

TECHNOGROWTH TG2.0 -hanke

# Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus

Koulutus 16.4.2019 Varkaus

Jukka Martikainen

professori

[jukka.martikainen@lut.fi](mailto:jukka.martikainen@lut.fi)

[jukka.k.martikainen@gmail.com](mailto:jukka.k.martikainen@gmail.com)

040 5457367

# Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus

## Luentopäivän sisältö

1. Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus. Johdanto ja tausta.
  1. Painelaitelaki
  2. Painelaitedirektiivi PED
  3. Painelaitteasetus
2. Nykyiset ja uudet rakennemateriaalit
3. Painelaiteteräkset
4. Hitsattavuus
5. Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset
6. Lujat rakenneteräkset
7. Runsasseosteiset teräkset
  
8. Hitsauksen laadunhallinta ISO 9000, EN 3834 ja EN 1090
9. Hitsausvirheet, hitsiluokat, hyväksymisrajat ja metallurginen laatu
10. Hitsaajien ja hitsausoperaattoreiden pätevyudet
11. Ainetta rikkoman aineenkoetus (NDT). Tarkastajien pätevyudet.
12. Ainetta rikkova aineenkoetus

# Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus

Painelaitelaki 1144/2016

Painelaitedirektiivi 2014/68/EU

Painelaitteasetus 1548/2016

# Painelaitteet

- Painelaitteita käytetään teollisuudessa, työpaikoilla ja kotitalouksissa jne. Painelaitteita ovat esim. painesäiliöt, höyry- ja kuumavesikattilat, putkistot, lämmönvaihtimet, autoklaavit, venttiilit jne.
- Painelaitteiden käyttöön liittyy merkittäviä henkilö-, ympäristö- tai omaisuusvahinkojen vaaroja.
- Painelaitteiden suunnittelua, valmistusta ja käyttöä säädetään Suomessa painelaitelailla.
- Suomessa lakisääteisiä tarkastuksia on tehty vuodesta 1888 lähtien.
- EU:ssa painelaitteiden yhdenmukainen suunnittelu ja valmistus sekä vapaa liikkuvuus on varmistettu eri direktiiveillä: painelaitedirektiivi, yksinkertaiset painesäiliöt –direktiivi, konedirektiivi, pienjännitedirektiivi jne. Painelaitteiden käytöstä säädetään kansallisesti.
- Tarkastuslaitoksilla on merkittävä rooli painelaitteiden turvallisuuden varmistamisessa. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes on painelaitesäädösten valvontaviranomainen Suomessa.

# Painelaitteen elinkaari

- Säädökset ja standardit
  - huomioi säädösvaatimukset ja hyödynnä yhdenmukaistettuja standardeja
- Suunnittelu
  - tee riskinarviointi ja eliminoi vaarat jo suunnitteluvaiheessa
- Valmistus
  - noudata vaatimuksia ja kiinnitä CE-merkintä (jos vaaditaan), tarvittaessa hyödynnä ilmoitettua laitosta vaatimustenmukaisuuden arvioinnissa
  - CE ransk. Conformance Europeenne
- Käyttö
  - jos painelaite ylittää tietyt raja-arvot, se pitää rekisteröidä Tukesin painelaiterekisteriin ja nimetä sille käytönvalvoja
- Kunnossapito ja huolto
  - noudata huolto-ohjeita ja huolehdi määräaikaistarkastuksista
- Käytöstä poisto
  - tee painelaite käyttökelvottomaksi ja hävitä se kierrätysohjeiden mukaisesti, poistoilmoitus Tukesille

# Painelaitelaki 16.12.2016/1144

- Laissa on säädetty erilaisia asioita eduskunnan päätöksen mukaisesti
- Sovelletaan painelaitteisiin ja alusten painelaitteisiin
- Vaarallisten aineiden kuljetuksista, sotilaspainelaitteista ja ydinlaitoksista on säädetty erikseen
- Lain noudattamista valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). Alusten painelaitteita valvoo Liikenne- ja viestintävirasto.

# Painelaitteiden suunnitteluun ja valmistukseen liittyviä määritelmiä

- Painelaite on säiliö, putkisto ja muu tekninen kokonaisuus sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettu tekninen kokonaisuus, johon voi kehittyä ylipainetta.
- Ilmoitettu laitos on Suomen viranomaisen nimeämä ja Euroopan unionin komissiolle ilmoittama Suomessa sijaitseva laitos, jonka tehtävänä on arvioida tuotteiden vaatimustenmukaisuus sovellettaessa unionin yhdenmukaistamislainsäädäntöön perustuvaa kansallista lainsäädäntöä. Ilmoitetulla laitoksella on lupa suorittaa vaatimustenmukaisuuden arviointitehtäviä. Ilmoitetut laitokset on listattu pätevyyksineen komission NANDO-tietokantaan.
- Vaatimustenmukaisuuden arviointilaitoksella tarkoitetaan painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta annetussa Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2014/68/EU – painelaitedirektiivi PED – tarkoitettua ilmoitettua laitosta, käyttäjien tarkastuslaitosta ja tunnustettua kolmantena osapuolena olevaa organisaatiota. Vaatimustenmukaisuuden arviointi tapahtuu kalibroimalla, testaamalla, sertifioimalla, tarkastamalla tai muulla tavoin.

## ... määritelmiä jatkuu ...

- CE-merkinnällä tarkoitetaan tuotteiden akkreditointiin ja markkinavalvontaan tarkoitettua merkintää, jolla valmistaja osoittaa tuotteen olevan merkinnän kiinnittämistä koskevassa unionin yhdenmukaisuuslainsäädännössä asetettujen sovellettavien vaatimusten mukainen. Tietyt raja-arvot ylittävät painelaitteet pitää CE-merkitä.
- Materiaalien eurooppalaisella hyväksynnällä tarkoitetaan teknistä asiakirjaa, jossa määritellään painelaitteiden valmistuksessa toistuvaan käyttöön tarkoitettujen materiaalien ominaisuudet, joista ei ole olemassa yhdenmukaistettua standardia.
- EU- tai EY- tyyppitarkastuksella tarkoitetaan vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyn osaa, jossa ilmoitettu laitos tutkii säiliön teknisen suunnittelun sekä varmistaa ja vakuuttaa, että säiliön tekninen suunnittelu täyttää sovellettavat Euroopan unionin lainsäädännön vaatimukset



## ... määritelmiä jatkuu ...

- Hyväksytty laitos on tarkastuslaitos, jolla on oikeus suorittaa sille tässä laissa säädettyjä kansallisia painelaitteiden turvallisuuden varmistamiseen liittyviä tehtäviä.
- Pätevöintilaitos tarkoittaa painelaitedirektiivissä tarkoitettua ja tunnustettua kolmantena osapuolena olevaa organisaatiota, joka suorittaa painelaitteiden pysyviä liitoksia ja rikkomatonta aineenkoetusta tekevien henkilöiden sekä liitosmenetelmien päteväntä ja hyväksymistä.
- Käytön valvoja on painelaitteen omistajan tai haltijan nimeämä henkilö, joka vastaa painelaitteen asianmukaisesta käytämisestä.
- Kattilalaitos on yhden tai useamman höyry- tai kuumavesikattilan ja niihin liittyvien putkistojen, painesäiliöiden, tukirakenteiden, polttoaineen ja syöttöveden syöttöjärjestelmien sekä rakennusten muodostama yhtenäinen kokonaisuus.

## ... määritelmiä jatkuu ...

- Höyrykattila on vesihöyryn tuotantoon tai muun nesteen kuin veden kuumentamiseen yli sadan celsiusasteen lämpötilaan tarkoitettua laitekokonaisuutta.
- Kuumavesikattila on veden kuumentamiseen tarkoitettu laitekokonaisuus.
- Tarkastuslaitoksen hyväksyminen. Valvontaviranomainen hyväksyy tarkastuslaitoksen suorittamaan tässä laissa tarkastuslaitokselle säädettyjä tehtäviä. Hyväksyminen on voimassa määräajan.

# Painelaitedirektiivi PED 2014/68/EU

- Keskeisimmät painelaitteita koskevat vaatimukset on Euroopan unionin tasolla yhdenmukaistettu ja määritelty painelaitedirektiivissä PED 2014/68/EU. Direktiivin vaatimukset on viety suomalaiseen lainsäädäntöön painelaitelailla 1144/2016 ja painelaitesetuksella 1548/2016. Laki ja asetus tulivat voimaan 1.1.2017.
- PED Pressure Equipment Directive. Tuli käyttöön Suomessa 1999 ja on ollut vuodesta 2002 lähtien ainoa painelaitedirektiivi Euroopassa. Pohjautuu pitkälti yhtenäisiin EN-standardeihin.
- Painelaitteisiin liittyvän lainsäädäntökokonaisuuden tavoitteena on varmistaa, että painelaite ei vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Tarkoituksena on myös poistaa kaupan esteet Euroopan talousalueella.
- Painelaitedirektiivin soveltamisohjeet ovat sovittuja tulkintoja, joten ne eivät ole direktiivin korjauksia eivätkä lainsäädäntöä eikä niillä ole juridista sitovuutta.
- Direktiivi käsittelee paineesta aiheutuvia vaaroja ja se koskee painelaitteen ensimmäistä markkinoille saattamista ja painelaitteen käyttöönottoa Euroopan talousalueella.

# Painelaitedirektiivi, jatkuu

- Painelaitedirektiiviä sovelletaan sellaisten painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnitteluun, valmistukseen ja vaatimustenmukaisuuden arviointiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar.
- Painelaitteet, jotka ovat ominaisuuksiensa perusteella sellaisia, että niihin ei sovelleta olennaisia turvallisuusvaatimuksia, on suunniteltava ja valmistettava jossain EU:n jäsenvaltiossa noudatettavan hyvän konepajakäytännön mukaisesti.
- Yksinkertaiset painesäiliöt –direktiivi käsittelee hyvän konepajakäytännön mukaan suunniteltavien ja valmistettavien painelaitteiden teknisiä ominaisuuksia, painelaitelaki 1144/2016

# ASME-standardit

- Yhdysvalloissa PED:n määäämiä EN-standardeja vastaa ASME-standardit.
- ASME-painelaitestandardit ovat yleisesti käytössä myös Pohjois-Amerikan ulkopuolella, myös Suomessa.
- ASME The American Society of Mechanical Engineers. ASME Standards and Codes.
- Ensimmäiset ASME-standardit astuivat voimaan vuonna 1914.
- PED on ”laki” Euroopassa, kun taas ASME on ”laki” tietyissä USA:n osavaltioissa ja Kanadan provinseissa.
- Toisin kuin ASME, PED vaatii erilliset standardit suunnitteluun, valmistukseen ja tarkastukseen.
- ASME sisältää tarkat vaatimukset mm. valmistajan laadunvalvontajärjestelmälle, tarkastuslaitokselle ja tarkastajille sekä rakenneaineille, hitsaukselle, lämpökäsittelylle ja tarkastuksille. PED:issä vaatimukset ovat yleisemmällä tasolla ja yksityiskohtaiset vaatimukset selviävät EN-standardeista.
- Hitsausmenetelmät ja hitsaajat hyväksytään PED:issä kolmannen osapuolen kanssa, kun taas ASME:ssa valmistaja itse huolehtii hitsauskokeiden suorittamisesta ja valvonnasta.

# Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016

- Asetus pohjautuu painelaitelakiin 1144/2016
- Asetusta sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 baaria.
- Uusien painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnitteluun, valmistukseen ja vaatimustenmukaisuuden arviointiin sovelletaan painelaitteista annettua valtioneuvoston asetusta painelaitteista (1548/2016) ja/eli painelaitedirektiiviä (PED, 2014/68/EU).

# Painelaitteen suunnittelu ja valmistus

- Sisältää ison joukon säädöksiä, jotka on huomioitava.
- Säädösvaatimukset täytetään pääosin soveltamalla yhdenmukaistettuja standardeja.
- Painelaitteiden suunnittelun ja valmistuksen perustana ovat
  - säädöksissä määritetyt olennaiset turvallisuusvaatimukset ja
  - vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt eli moduulit
- Yhdenmukaistettuja standardeja käyttämällä voidaan suoraan osoittaa, että olennaiset turvallisuusvaatimukset on huomioitu. Ns. ZA-liite.
- Tarvitaanko painelaitteen suunnittelun ja valmistuksen vaatimustenmukaisuuden arviointiin kolmatta osapuolta, eli ns. ilmoitettua laitosta, riippuu painelaitteen 1. tyypistä, 2. ominaisuuksista ja 3. sisällöstä.

# Suunnittelun ja valmistuksen vaatimukset

- Mihin luokkaan painelaite kuuluu? Luokka määrittelee painelaitteen suunnittelun ja valmistuksen vaatimukset.
- Luokkaan vaikuttavat
  - painelaitteen tyyppi: säiliö, putkisto, paineenalainen lisälaite, varolaitte tai kattila
  - painelaitteen ominaisuudet: PS suurin sallittu käyttöpaine, V tilavuus ja DN nimellissuuruus
  - sisällön vaarallisuus ja sen olomuoto: kaasu, neste
- Painelaitteiden sisällöt jaetaan vaarallisuuden perusteella (CLP-asetus, vaaraluokat ja kategoriat)
  - ryhmä 1: vaarallisimmat sisällöt, mm. räjähteet, syttyvät kaasut, syttyvät nesteet, syttyvät kiinteät aineet, myrkylliset aineet, ...
  - ryhmä 2: muut sisällöt



# Painelaiteluokat

- Painelaite voi kuulua luokkaan I – IV. Luokka IV on vaativin.
- Luokkien I – IV painelaitteet pitää CE-merkintä.
- Luokan I alle jääviä painelaitteita kutsutaan hyvän konepajakäytännön painelaitteiksi. Niitä ei saa CE-merkintä.
- Painelaitteen luokka selviää vaatimustenmukaisuuden arviointitaulukon perusteella. Taulukkoja on 9 kappaletta ja ne löytyvät painelaitedirektiivin liitteestä II. Painelaitteiden luokittelu – luettelo (säiliö, putkisto, kattila) määrittää käytettävän taulukon 1 – 9.
- Painelaitteen luokka määrittää, millaista vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä pitää käyttää painelaitteen suunnittelussa ja valmistuksessa. Arviointimenettelyt, eli moduulit, sisältävät erilaisia menettelyitä, joilla varmistetaan, että painelaite täyttää säädösvaatimukset ja on turvallinen.
- Hyväksytyt arviointimenettelyt päätteeksi valmistaja saa kiinnittää painelaitteeseen CE -merkinnän.

# Painelaiteluokat ja moduulit

- Painelaiteluokat ovat I, II, III ja IV.
- Moduulit ovat: A, A2, B, C2, D, D1, E, E1, F, G, H ja H1
- Moduuli = vaatimustenmukaisuuden arviointimenettely
- Arviointimenettelyjä on 13 kappaletta
- Kevein arviointimenettely on luokan I A-moduuli, jossa valmistaja itse huolehtii teknisten asiakirjojen laadinnasta ja loppuarvioinnista. Ns. sisäinen tuotannonvalvonta. Muissa moduuleissa mukana on kolmas osapuoli, eli ns. ilmoitettu laitos.
- Case: Kun painelaitteita valmistetaan yksittäistuotantona, on moduuli G joustava ja yksinkertainen. Siinä on yksikkökohtaiseen tarkastukseen ja todennukseen perustuva vaatimustenmukaisuus. Ilmoitettu laitos tekee suunnitelma- ja loppuarvioinnin. Tarkastuslaitos tutkii tekniset asiakirjat, arvioi materiaalit ja aine todistukset, hyväksyy liitosmenetelmät, todentaa hitsaajien ja tarkastajien pätevyudet, tekee lopputarkastuksen ja valvoo painekokeen ja tarvittaessa tarkastaa varolaitteet ja laatii kirjallisen vaatimuksenmukaisuustodistuksen
- Perusajatus on, että ylemmän luokan moduulia voi käyttää myös alemman luokan painelaitteeseen, mutta ei toisinpäin.

# Laitekokonaisuudet

- Laitekokonaisuus on yksittäisistä painelaitteista koottu yhtenäinen ja toiminnallinen kokonaisuus. Kokonaisuuteen voi sisältyä myös ns. hyvän konepajakäytännön painelaitteita.
- Laitekokonaisuuksia ovat esim. käsisammuttimet, autoklaavit, paineilman syöttöjärjestelmät, kylmälaitosten jäähdytysjärjestelmät, tulitorni- vesiputki ja kuumaöljykattilat.
- Laitekokonaisuuden vaatimustenmukaisuus pitää arvioida vastaavasti kuin painelaitteiden vaatimustenmukaisuus.
- Arviointi: yksittäisten painelaitteiden arviointi ja painelaitteiden yhdistämisen arviointi (esim. lämpölaajeneminen, painekoe, loppuarviointi, varolaitteet).
- Arviointi tehdään korkeimman luokan mukaisesti.
- Valmistajan on kiinnitettävä laitekokonaisuutta tarkoittava CE – merkintä.

# Painelaitteiden korjaus ja muutostyöt

- Painelaitteen käyttöönoton jälkeisistä korjaus- ja muutostöistä on säädetty painelaitelain (1144/2016) 76§:ssä ja painelaiteturvallisuudesta annetun valtioneuvoston asetuksen (1549/2016) 17§:ssä
- Painelaitteen korjaus ja muutos edellyttävät asetuksen soveltamista, jos esim. painelaitteen käyttötarkoitusta muutetaan merkittävästi.
- Vaiheet ovat: korjaus- tai muutostyön määrittely, hankinta, suunnittelu, toteuttaminen ja asiakirjat.
- Hyväksytyt laitokset tekevät painelaitteiden korjaus- ja muutostöihin liittyvät tarkastukset. Tietyissä tapauksissa myös omatarkastuslaitokset.

# Case: Toiminnanharjoittajan pätevyys korjaus- ja muutostöissä

- SFS-EN ISO 3834 tuo vankan pohjan toiminnanharjoittajalle ja sen hitsaustoiminnalle.
- Hitsaajien ja hitsausmenetelmien pätevänti – oltava ilmoitetun laitoksen hyväksymiä
- Oltava hyväksytyt hitsausohjeet (WPS) tai työohjeet
- Oltava NDT –pätevyudet
- Korjaus- ja muutostyön tehneen toiminnanharjoittajan on annettava painelaitteen omistajalle tai haltijalle vaatimustenmukaisuusvakuutus
- Tekniset asiakirjat: mm. korjaussuunnitelma, materiaalien ja lisäaineiden aineistodistukset, hitsaus-, lämpökäsittely- ja NDT-asiakirjat, painekokeen pöytäkirja ja tarkastuslaitoksen antamat todistukset

# Olennaiset turvallisuusvaatimukset

- Painelaitelaissa, painelaitedirektiivissä ja painelaitteasetuksessa on esitetty painelaitteita koskevat ja velvoittavat olennaiset suunnittelua ja valmistusta koskevat turvallisuusvaatimukset. Toisessa ”kevyemmässä” tavassa noudatetaan hyvää konepajakäytäntöä.
- Suunnittelu
  - Painelaitteet on suunniteltava kestämaan käyttötarkoitusta vastaavia kuormituksia sekä muita kohtuudella ennakoitavissa olevia olosuhteita.
  - Erityisesti on otettava huomioon sisäinen ja ulkoinen paine, ympäristön lämpötila ja käyttölämpötila, staattinen paine ja sisällön massa käyttö- ja testausolosuhteissa, liikenteestä, tuulesta ja maanjäristyksistä aiheutuvat kuormitukset sekä tukien, kiinnikkeiden ja putkistojen aiheuttamat vastavoimat ja momentit. Korroosio (rako-, piste- ja jännityskorroosio sekä korroosioväsyminen), eroosio ja väsyminen sekä epästabiliilien sisältöjen hajoaminen.
  - Laskentamenetelmät, kokeet ja kokeellinen suunnittelu, murtumismekaniikka, varmuuskertoimet
  - Kirjallinen lausunto hyväksyttävyydestä.

# Olellaiset turvallisuusvaatimukset, jatkuu

- Materiaalit
  - Materiaalien katsotaan olevan painelaitedirektiivin olennaisten turvallisuusvaatimusten mukaisia, kun niille on myönnetty eurooppalainen hyväksyntä, eli ns. yhdenmukaistettujen standardien mukaiset materiaalit, mikäli sellaiset on olemassa.
  - Materiaalit on tutkittu virheiden suhteen, aineenpaksuudet on tarkistettu
  - Materiaalit on jäljitetty oikeaan aineestodistukseen
  - Hitsauslisäaineet ja niiden merkintöjen oikeellisuus sekä säilytysolosuhteet on tarkastettu.
  - Hitsattavuus kokonaisvaltaisesti on tarkastettu.

# Olellaiset turvallisuusvaatimukset, jatkuu

- Valmistus
  - Painelaitteen valmistajan on määritettävä selkeästi valmistuksen järjestelyt, erityisesti kun valmistus käsittää hitsausta, muovausta ja lämpökäsittelyä.
  - Erityinen huomio tulee olla pysyvissä liitoksissa: hitsaus- ja juotosliitokset sekä mankelointi- ja liimaliitokset. Pysyvien liitosten ominaisuuksien tulee vastata liitettävien materiaalien vähimmäisvaatimuksia.
  - Pysyvät liitokset on teetettävä henkilöillä, joilla on asianmukaiset pätevyudet ja menetelmät on pätevoidettävä.
  - Lämpökäsittelyistä on oltava kirjallinen ohje, esim. SFS-EN 13445-4.



# Vaatimustenmukaisuuden arviointi

- Arviointilaitokset
  - Vaatimustenmukaisuuden arviointilaitoksella tarkoitetaan elintä, joka suorittaa arviointitoimia kuten kalibrointia, testausta, tarkastusta ja sertifiointia.
  - Arviointilaitos on riippumaton kolmas osapuoli. Se voi olla ilmoitettu laitos, käyttäjän tarkastuslaitos tai muu tunnustettu kolmantena osapuolena toimiva organisaatio. Euroopan komissio julkaisee luetteloja organisaatioista ja niiden tunnustetuista tehtävistä.
  - Tapa ja laajuus, jolla ilmoitettu laitos on mukana tarkastuksessa ja testauksessa, riippuu valitusta arviointimoduulista.
  - CE-merkintä. Laatimalla EU- (tai EY-) vaatimustenmukaisuusvakuutuksen valmistaja ottaa vastuun siitä, että painelaite tai laitekokonaisuus on painelaitedirektiivissä säädettyjen olennaisten turvallisuusvaatimusten mukainen.
  - Arviointimenettely ei saa aiheuttaa kohtuutonta taloudellista taakkaa! Taloudellisuus ja kilpailukyky.

# Tekniset asiakirjat

- Vaatimustenmukaisuuden arviointi edellyttää ison joukon teknisiä asiakirjoja. Vaihtelevat tilanteen mukaan, ohessa esimerkkejä.
  - asiakirjojen sisällysluettelo
  - laitteen tekninen spesifikaatio
  - valmistajan vaara-analyysi
  - suunnittelu- ja valmistusselostus, suunnitelman tarkastus ja hyväksyntä
  - lujuuslaskut ja piirustukset
  - luettelo materiaaleista, materiaalitodistukset, myös hitsausaineet
  - materiaalien jäljitettävyyden varmistaminen
  - luettelot hyväksytyistä hitsausohjeista, pätevoitettyistä hitsaajista ja hitsausoperaattoreista
  - työkokeet ja niiden tulokset
  - luettelo alihankituista palveluista ja osista
  - luettelot NDT-ohjeista ja pätevoitettyistä tarkastajista, NDT pöytäkirjat
  - lämpökäsittelyohjeet ja tulokset
  - painekokeen suoritus ja tulokset
  - poikkeamaraportit ja korjaustoimenpiteet
  - lopputarkastusraportin merkintöjen ja CE-merkinnän yksityiskohdat
  - loppuarviointi
  - käyttö- ja huoltoohjeet

# Valmistajalta vaadittava dokumentointi

- Painelaitteen valmistumisen, leimauksen ja todistusten jälkeen valmistaja tai edustaja on vastuussa teknisten asiakirjojen turvallisesta säilyttämisestä vähintään 10 vuotta.
- Liitettävien ohjeiden ja turvallisuustietojen on oltava selkeitä ja helppotajuisia.
- Mukana on oltava analyysi ja arviointi riskeistä. Vaara-analyysi, riskianalyysi ja riskien arviointi.
- Käyttö- ja huolto-ohjeet muodostavat kunnossapidon perustan. Ne kattavat asennuksen, käyttöönoton ja kunnossapidon. Arvioitava mitä voi tehdä itse ja mitä on jätettävä asiantuntijoiden tehtäväksi.

# Case: Kemianteollisuuden prosessiputkiston valmistus

- Kuvataan lyhyesti kemianteollisuuden prosessiputkiston valmistus pohjautuen painelaitedirektiiviin ja SFS-EN 3834 –hitsauksen laatuvaatimusstandardiin
- SFS-EN 3834 on hyvä pohjatyökalu, johon painelaitedirektiivi tuo omia lisävaatimuksiaan ja täsmennyksiään.
  - 1. Vaatimusten katselmus ja tekninen katselmus OK
  - 2. Alihankinta: arvioitava alihankkijan toiminta OK
  - 3. Hitsaushenkilöstö: PED:n mukaisessa hitsauksessa hitsaajat ja hitsausoperaattorit pitää olla pätevoidetty PED:n antamien vaatimusten mukaisesti. Hitsaajien pätevyudet ovat voimassa 3 vuotta siitä, kun kolmas osapuoli (esim. tarkastuslaitos) on hyväksynyt pätevyyskokeen. Lisäksi PED vaatii, että hitsaajalta otetaan näyte joka toinen vuosi kahdesta viimeisestä hitsistä kuuden kuukauden aikana. Hitsit tarkastetaan. Hitsauksen valvonnassa ja koordinoinnissa tulee olla pätevä henkilöstö, esim. IWE

# Case: Kemianteollisuuden prosessiputkiston valmistus, jatkuu

- 4. Tarkastus- ja testaushenkilöstö: käytettävissä on oltava kolmas osapuoli, mikäli paineeseen liittyvä vaara on olemassa
- 5. Laitteet: PED:n mukaan laitteet pitää olla validoituja
- 6. Hitsaustoiminnot: painelaitelaki vaatii, että prosessiputkistojen hitsaus tulee osoittaa toimivaksi soveltuvien vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyin. Hitsausmenetelmä pitää hyväksyttää kolmannen osapuolen toimesta. Viralliset hitsausohjeet laaditaan hyväksytyjen hitsausmenetelmien pohjalta. Hitsausohjeiden noudattamista valvotaan pistokoemaisesti.
- 7. Hitsausaineet: Valmistajan on valvottava hitsauslisäaineita. Tehtävään on nimetty vastuuhenkilö. Lisäaineille tulee löytyä eräkohtaiset 3.1 vastaanottotodistukset. Todistuksista täytyy tulla julki, että lisäaineet ovat CE-hyväksytyjä. Tällöin turvallisuusvaatimukset täyttyvät. Varastointi ja säilytys kuivassa, lämpimässä ja suojatussa tilassa.

# Case: prosessiputkiston valmistus, jatkuu

- 8. Perusaineen varastointi OK
- 9. Hitsien lämpökäsittely: sekä SFS-EN 3834 että PED kertovat vastuun olevan valmistajalla OK
- 10. Tarkastus ja testaus: ennen hitsausta laaditaan laatusuunnitelma, josta tulee esille ainakin hyväksytyt hitsausohjeet, hitsausmenetelmät, hitsaajien pätevyudet ja niiden voimassaolot, hitsausolosuhteet ja hitsausaineiden tunnistus; hitsauksen aikana tarkistetaan ja dokumentoidaan pistokoemaisesti olennaisia hitsausparametreja, esikuumennus- ja välipalkolämpötiloja, hitsausjärjestystä, hitsausaineiden käsittelyä ja mahdolliset välitarkastukset; hitsauksen jälkeen suoritetaan visuaalinen tarkastus ja muu NDT
- 11. Poikkeamat ja korjaavat toimenpiteet OK
- 12. Mittaus-, tarkastus- ja testauslaitteiden kalibrointi ja kelpuutus OK
- 13. Tunnistettavuus ja jäljitettävyys: valmistajalla on velvollisuus tehdä hitsikartat, jotka dokumentoidaan: mm. materiaali, lisäaine, sulatusnumero, hitsaaja, menetelmä, hitsauspäivämäärä, tarkastusdokumentit ja mahdolliset pintakäsittelyt
- 14. Laatuasiakirjat: säilytyksen vähimmäisaika on 5 vuotta. PED vaatii tehtäväksi painelaitekirjan ja säilytettäväksi niin kauan kun painelaite on rekisterissä.

# Nykyiset ja uudet metalliset materiaalit

# 1. "Mustat" teräkset, seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset

- yleiset rakenneteräkset; esim. S235JR, S355J2G3-Z25 ja S420
- paineastiateräkset; esim. P235GH, P355N, P355GH/NL2 ja HII DIN 17155
- laivanrakennusteräkset; esim. NV A36, NV500A ja ABEH36TM
- säänkestävät Corten –teräkset, pieni kuparilisä
  - esim. Corten B ja S355J0WP
- hiiliteräkset
  - niukkahiiiliset teräkset 0,05 – 0,25% C
  - keskihiiliset teräkset 0,25 – 0,60% C, esim. UIC 900A
  - runsashiiliset teräkset 0,60 – 2,11% C, esim. R260
  - työkaluteräkset 0,60 – 1,40% C
  - Damascus Steel: ylieutektoidinen C 1,00 – 1,87



- lujat rakenneteräkset; esim. S690QL, Weldox 700, Dillimax 690, RQT 701, Domex 650MC, Optim 700MC, Strenx 650 MC
  - toimitustila
    - termomekaanisesti valssattu (M)
    - sammutettu ja päästetty, nuorrutettu (QT)
    - sammutettu, karkaistu (Q)
    - kylmämuovattavaksi soveltuva (C)
    - termomekaanisesti valssattu ja nuorrutettu (TM + Q&T)
- ultralujat rakenneteräkset; esim. QC 960, S1100QL ja Armox 370T
- kulutusteräkset; esim. Hardox 400, Raex 500 ja Dillidur 400
- nuorrutusteräkset; esim. 25CrMo4 (MoC 210), 45CrMo4 (MoC 410), 30CrNiMo8 ja IMACRO
- muovaus- ja syvävetoteräkset; esim. DC03, Docol 600 CP
- suurlujuusteräkset yleisesti
  - lujuus > 360 N/mm<sup>2</sup>, ultralujat lujuus > 500 N/mm<sup>2</sup>
  - HSLA, TRIP, DP, MS

- hiiletysteräkset; esim. 20NiCrMo2-2 (MoCN 206) ja 18CrNiMo7-6
- jousiteräkset; esim. 51CrV4
- kuulalaakeriteräkset; esim. 100CrMo7
- koneteräkset; esim. 520MW+ ja Hydax
- taeteräkset; esim. Imamic
- booriteräkset; esim. B24 ja B27
- nitrausteräkset; esim. 20CrMoV5-7 (Imanite M)
- kuumalujat seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset; esim. (St35.8), 16Mo3, EN 13CrMo4-5 ja 10CrMo9-10+N
- mangaaniteräkset; esim. Hadfieldin mangaaniteräs (13% Mn)
  - austeniittinen mikrorakenne -> työstökarkeneminen, voimakas muokkauslujuuttuminen ja koveneminen
- työkaluteräkset
  - kutistumattomat teräkset (eivät laajene karkaistaessa)
  - iskunkestävät teräkset (pii-mangaani-teräkset, "jousiteräkset"), esim. UHB 15
  - kuumatyöstöteräkset (vanadiini-wolframi-molybdeeniteräkset)
  - pikateräkset, esim. 18W-4Cr-1V-0,7C

- nikkelteräket
  - niukkahiilisiä  $C < 0,20\%$ , Si ja Mn kuten yleisissä rakenneteräksissä, Ni 2,25 – 9%
  - LPG-teräket (Liquified Petroleum Gases); Ni 2,25 %, 3,5 % tai 5 %
  - LNG-teräket (Liquified Natural Gases); Ni 9 %, X8Ni9
- Maraging-teräket
  - Esim. Fe-18Ni-8Co, sammutus + erkautuskäsittely
- TRIP-teräket (Transformation Induced Plasticity)
  - $M_d$ -lämpötila
- Säättötransformaatioteräket
  - Martensiittimuutos tapahtuu tuotteen valmistuksen jälkeen,  $M_s$ -lämpötila on huoneenlämpötilan alapuolella

Virheetön kide, lujuus n. 20 000 N/mm<sup>2</sup>. Hilavirheet

→ n. 50 N/mm<sup>2</sup> → Nostetaan eri keinoin → ylimääräinen atomi (liuosatomi: välisija- tai korvausatomi), toisen faasin osanen, erkauma, dislokaatio, raekoko ja raeraja.

→ Uudet (uudehkot) teräkset: termomekaaninen käsittely, nuorrutus tai suorasammutus.

TMCP (ThermoMechanically Controlled Process)

## 2. "Kirkkaat" teräkset, jaloteräkset, ruostumattomat ja haponkestävät teräkset, runsasseosteiset teräkset

- austeniittiset ruostumattomat teräkset, esim. AISI 304 ja AISI 304L
- austeniittiset haponkestävät teräkset, esim. AISI 316, AISI 316L, Supra 316plus ja titaanistabiloitu X10CrNiMoTi18-10 (316Ti)
- superausteniittiset (haponkestävät) teräkset, esim. 904L, 254SMO, 654SMO ja Sanicro 625
- duplex –teräkset (austeniittis-ferriittiset teräkset), esim. SAF 2304, SAF 2507, UR45N, Avesta 2205 (EN 1.4462 X2CrNiMoN22-5-3), Forta LDX2101 ja LDX2101/2404
  - LDX2101: suuri lujuus ( $R_{p0.2}$  530 N/mm<sup>2</sup>, A5 30%), hyvä korroosionkestävyys (PRE 25%) ja matala nikkelpitoisuus; 21,5%Cr - 1,5%Ni - 5%Mn - 0,3%Mo ja 0,22%N
- ferriittiset teräkset
  - esim. ASTM 430 (EN 1.4016)
  - titaanistabiloitu ferriittinen teräs, esim. 18Cr-2Mo –teräs (Ti+Nb-stabiloitu, C+N<0,04%) ja 26Cr-1Mo
  - niobistabiloitu ferriittinen teräs, esim. 28Cr-2Mo-4Ni
- martensiittiset teräkset
  - niukkahiilliset C < 0,15%, esim. X11CrMoWVNb9-1-1
  - keskihiilliset 0,15 < % C < 0,5, esim. X20CrMoV12-1
  - runsahiilliset C % > 0,6 (-> 1,2 %)
- tulenkestävät austeniittiset teräkset (esim. 253MA) ja tulenkestävät ferriittiset teräkset
  - hilseilynkestävyys Cr
- kuunalujat runsasseosteiset teräkset
  - virumiskestävyys Mo

### 3. Valuteräkset ja valuraudat

- seostamattomat, niukkaseosteiset ja runsasseosteiset valuteräkset, esim. GS-20MnCrMo5, superausteniittiset GS-654SMO ja ASTM A743 CN-7M ja GS-X120Mn13
- suomugrafiittirauta GJL
- pallografiittirauta GJS, esim. EN-GJS-400-18
- tylppägrafiittirauta GJV
- adusoitu temperrauta GJM
- valkoinen valurauta GJN
- erikoisvaluraudat, esim. austeniittis-bainiittinen pallografiittirauta Kymenite
- austemperointi; austemperoitu pallografiittirauta ADI (Austempered Ductile Iron) ja austemperoitu suomugrafiittirauta AGI (Austempered Gray Iron); austeniittis-ferriittinen mikrorakenne

## 4. Alumiinit

- $T_{\text{sul}} = 660.2^{\circ}\text{C}$ , pkk –rakenne,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sulamispiste  $2052^{\circ}\text{C}$
- muokatut levyt, pursotteet (profiilit), valut ja takeet
- toimitustilat: O, H, T
  - O: pehmeäksihehkutettu mahdollisimman pehmeäksi
  - H: esim. H16: reduktio 60% ja  $\frac{3}{4}$ -kova
  - T: esim. T6: liotushehkutettu, sammutettu ja keinovanhennettu → lujat ja sitkeät sisäiset erkaumat
- Woodwardin diagrammi
- muokatut levyt ja profiilit:
  - 1000 -sarja alumiini: puhdas alumiini (>99%), esim. 1050 (Al99.5)
  - 2000 -sarja alumiini-kupari, lämpökäsiteltävät duralumiinit, "lentokonealumiinit": lujuus, esim. 2017 (AlCu4MgSi)
  - 3000 -sarja alumiini-mangaani: lujuus, muovattavuus ja korroosionkestävyys, esim. AlMn1 (3103)
  - 4000 -sarja alumiini-pii: sulamispiste ja juoksevuus, esim. 4043 (AlSi5) ja 4047 (AlSi12)
  - 5000 -sarja alumiini-magnesium, "merialumiinit": lujuus ja korroosionkestävyys, esim. EN AW-5754-H16 (EN AW-AlMg3-H16) ja EN AW-5083-O (EN AW-AlMg4.5Mn0.7-O)

- 6000 -sarja alumiini-pii-magnesium, pursotelaadut: lujuus, muovattavuus ja pursotettavuus, esim. 6005-T6 (AlSiMg-T6), 6063 (AlMg0.7Si) ja 6082 (AlSi1MgMn)
  - 7000 -sarja alumiini-sinkki: lujuus, esim. EN AW-AlZn4,5Mg1-T6 (7020), AA7085 ja 7178 (AlZn7MgCu)
  - 8000 -sarja alumiini-litium: lujuus ja keveys, esim. Al-Li-Cu-Mg –seokset 8090-T8 ja 8091-T8 (T8 liuoshehkutettu, kylmämuokattu ja keinovanhennettu)
    - 8090: 2.5Li-1Cu-1Mg-Zr0.10 ja 8091: 2.6Li-1.9Cu-0.9Mg
    - Zr0.12
    - Soviet alloys 01420, 01421, 01430, 01440, 01441, 01450 ja 01460; 1.7-2.3Li, 1.5-3.15Cu, 0.1-5.3Mg, 0.08-0.15Zr
    - muut litiumseosteiset alumiinit: erkautuskarkenevat seokset Al - Mg 5-6% - Li 2%; 2090: 2.3Li-2.7Cu-0.2Mg-0.12Zr; 2091: 2.0Li-2.2Cu-1.5Mg-0.1Zr; 2095: 1.0Li-4.0Cu-0.4Mg-0.12Zr; Weldalite 049-T8: 1.3Li-5.4Cu-0.4Mg-0.04Ag
  - 9000-sarja superplastiset alumiini-kalsium 5%-sinkki 5% ja alumiini-kupari 6%-zirkonium 0,5% sekä uudet seokset alumiini-scandium, alumiini-nikkeli, alumiini-molybdeeni ja pulverimetallurginen alumiini-alumiinioksidi (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- 
- valut
    - AlSi- ja AlSiCu –valut
    - silumiini (12% Si, G-AlSi12 tai G-AlSi12Cu)
  - takeet
    - kriittinen reduktio ylitetään → rakeenkasvuvaara
    - esim. AlSi12Cu



# 5. Magnesiumit

- $T_{\text{sul}} = 649^{\circ}\text{C}$ , tph –rakenne
- kevein konstruktio­metalli, tiheys  $1740 \text{ kg/m}^3$
- valut, takeet, pursotteet, levyt/latat
- toimitustilat O, H, T
  - Mg-Al –valut: esim. painevalu AZ91B-T6 tai hiekkavalu AZ81A ja AM100A-T6
  - pursote AZ80A-T5
  - tae AZ31B
  - Mg-Al –levyt, esim. levy AZ31B-H24

# 6. Kuparit

- $T_{sul} = 1084,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ , pkk –rakenne, 100% IACS (Ag 106%)
- puhdistetut kuparit (>99.85%)
  - happikuparit eli sitkokuparit, esim. Cu-ETP
  - fosforoidut kuparit, esim. Cu-DLP ja Cu-DHP; P yleensä alle 6%, valut 10-15%
  - hapettomat kuparit, Cu-OF ja Cu-OFE, ns. sertifikaattikupari puhtausaste vähintään 99.99%
  - (hopeakuparit, esim. Cu-Ag0.04 (OF) ja Cu-Ag0.07)
- seostetut kuparit (>97.5%)
  - hopeakuparit, esim. Cu-Ag, Ag 0.03-0.15%; sähkönjohtavuus, korkea rekristallisaatiolämpötila ja virumiskestävyys
  - lastuttavat kuparit, esim. Cu-Se ja Cu-Te; n. 0.5% Se tai Te, myös Pb ja S
  - kuumalujuus ja virumiskestävyys: zirkoniumkuparit ja kromikuparit
- kupariseokset (messingit ja pronssit)
  - Cu-Zn, messingit, satoja, jopa tuhansia lajeja, lujuus, muovattavuus, lastuttavuus, valettavuus ja korroosionkestävyys, yleiskäyttö CuZn37 (Ms63), väri Cu:n lohenpunaisesta punaruskeaan (CuZn10), kullankeltaiseen (CuZn15 tai tomppakki Zn 10-20 %), vihertävän keltaiseen (CuZn30 ja CuZn37), ruskehtavan punaiseen (CuZn40) ja keltaiseen (CuZn50) aina valkoiseen (CuZn60); muovaava työstö hylsinessingit (esim. CuZn30 ja CuZn28), lastuvaan työstöön sorvi- eli lyijymessingit (esim. CuZn39Pb3), korroosio-olosuhteisiin/kavitaatiokohteisiin amiraliteettimessinki tai merimessinki (esim. CuZn20Sn1 tai CuZn38Sn1), suuri lujuus ns. lujamessingit eli mangaanipronssit (esim. AlZn25Al5)

- Cu-Sn, tinapronssit, muokattavat ja valupronssit, pronssimitalit, lujuus ja korroosionkestävyys, esim. CuSn8, myös CuSn10 tai CuSn12, tinapronssit ovat punaisen ruskeita
- Cu-Sn-Zn, punametallit, valupronsseja, lastuttavuus, syöpymisen- ja kulumisenkestävyys, esim. "tykkimetalli" CuSn10Zn2, CuSn8Zn4 tai CuSn5ZnPb (LUT ansiomitalit), armatuurivalu CuSn5Pb5Zn5 ja liukulaakerit CuSn4Zn4Pb4Cu
- Cu-Ni-Zn, uushopeat, hopean värinen, korroosionkestävyys ja lujuus, esim. alpakka, 10-20% Ni ja 20-37% Zn, CuNi18Zn20
- Cu-Ni, nikkelikuparit, aukoton liukoisuus, meriveden korroosionkestävyys, esim. CuNi20; esim. konstantaani 58% Cu-41% Ni, rahametalli CuNi25, jarruputket CuNi10Fe1Mn; Monel 28% Cu - 67% Ni -Fe, Mn, Si
- Cu-Al, alumiinipronssit, keltaisia, lujia ja erittäin korroosionkestäviä (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-kalvo), esim. potkuri CuAl8 tai CuAl10Fe3 ja liukulaakeri CuAl10Ni
- Cu-Si, piipronssit, punaisen ruskeita, hitsattavuus ja muovattavuus, esim. CuSi3Mn1
- Cu-Be, berylliumpronssit, erkautuskäsittely → myötölujuus jopa 1400 MPa → jouset, venttiilit ja kipinöimättömät työkalut
- Cu-Ni-Si, Corsonpronssit, erkautuskäsittely → suuri lujuus  
→ esim. erikoisruuvit ja -mutterit, esim. CuNi1.5Si ja CuNi2Si

Case Liukulaakeri: lujuus/sitkeys, kovuus/kulumisenkestävyys, korroosionkestävyys, lastuttavuus, ...

punametalli CuSn5ZnPb, tinapronssi CuSn12, lyijytinapronssi CuSn10Pb10 tai alumiinipronssi CuAl10Ni

# 7. Titaanit

- $T_{sul} = 1668^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha$ -faasi tph -rakenne ja  $\beta$ -faasi tkk -rakenne
  - ASTM Grade 1 (Ti 1,  $\alpha$ ), 99,5Ti
  - ASTM Grade 2 (Ti 2,  $\alpha$ ), 99,2Ti, yleislaatu
  - ASTM Grade 3 (Ti 3,  $\alpha$ ), 99,1Ti
  - ASTM Grade 4 (Ti 4,  $\alpha$ ), 99,0Ti
  - ASTM Grade 5 (Ti 5,  $\alpha+\beta$ ), esim. yleislaatu Ti-6Al-4V (ELI), ASTM Grade 5+ (Ti5+): suuri lujuus korotetuissa lämpötiloissa Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr tai Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo; jännityskorroosionkesto ja murtositkeys Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo tai Ti-6Al-4V-ELI, hitsattavuus Ti-5Al-2,5Sn, matalat lämpötilat Ti-5Al-2,5Sn-ELI, virumisenkesto Ti-6242S, IMI 829 ja Ti-6442
  - ASTM Grade 7 (Ti 7,  $\alpha$ )
  - ASTM Grade 11 (Ti 11,  $\alpha$ ), esim. Ti-0,2Pd
  - ASTM Grade 12 (Ti 12,  $\alpha$ ), esim. Ti-0,8Ni-0,3Mo
- $\beta$ -rakenne Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-11,5Mo-6Zr-4,6Sn

ELI = Extra Low Interstitial, erityisesti rauta ja happi

## 8. Sinkit

- $T_{\text{sul}} = 419^{\circ}\text{C}$ , tph –rakenne, tiheys  $7140 \text{ kg/m}^3$
- 3 pääaluetta: raudan ja teräksen sinkitys, kuparin seostus (ja 7000-sarjan alumiini) ja painevalut
- painevalut n. 4 % Al ja 1-2 % Cu
- levyinä esim. laivojen katodisena suojauksena
- sinkki-alumiini -pinnoitteet, kuumasinkitys
- ns. superplastinen eutektoidinen sinkkiseos Zn-Al 22 %, plastinen venymä jopa 2500 % vain 10 MPa voimalla

## 9. Nikkelit

- $T_{\text{sul}} = 1455^{\circ}\text{C}$ , pkk -rakenne, tiheys  $8900 \text{ kg/m}^3$
- pääalueet: seosaineena muissa metalleissa (rakenneteräkset, ruostumattomat teräkset, valuraudat, kuparit ja superseokset), pinnoitusaineena
- Erkautuskarkaistut, lujat ja erittäin korroosionkestävät Monel-metallit: K-Monel (30 % Cu - 3% Al – 67 % Ni) ja S-Monel (30 % Cu – 4 % Si – 2 % Fe – 0,5 % Mn – 63 % Ni)

# 10. Superseokset

- kuumankestävyys (virumiskestävyys), tulenkestävyys ja korroosionkestävyys
- rautavaltaiset, "erkautuslujitettuja austeniittisia ruostumattomia teräksiä", tulenkestävyys, esim. Timken 16Cr-25Ni-6Mo, loput Fe
- nikkelivaltaiset, korroosionkestävyys ja virumiskestävyys, hastelloy (+Mo) ja inconel, incoloy ja nimonic (+Cr), esim. Inconel 600 ja Hastelloy C-22
- kobolttivaltaiset, virumiskestävyys, esim. S816 42Co-20Cr-20Ni-4Fe + muut Mo, W, Nb, C
- Refractalloy, Sermetit (sintraamalla oksideista)

# VIIME AIKOJEN "UUSIA" METALLEJA

900 - 1100 N/mm<sup>2</sup> -lujuusluokan "mustat" rakenneteräkset, esim. 960 QC → aina 1500 N/mm<sup>2</sup> saakka

Uudet ferriittiset ruostumattomat teräkset ja LDX2101 / 2404 -tyyppiset duplex-teräkset

Imamic, luja Si-seostettu (1-2 % Si) mikroseosteräs

AlLi- ja Al-Li-Cu-Mg -seokset

CuNi- ja CuBe -seokset

Ti5+ (ELI)

Zn - 22 % Al -eutektinen seos



# Painelaiteteräkset ja muut rakenneaineet

# Painelaiterakennearineet

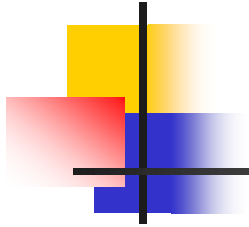
- Teräkset
  - seostamattomat, niukkaseosteiset ja runsasseosteiset
  - esim. P235GH, P355NL1, P460NH, P500QL2, P690Q, 16Mo3 (15Mo3), 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, X10CrMoVNb9-1
- Kuparimetallit
- Alumiinimetallit
- Titaani
- Zirkonium ja tantaali
- Ei-metalliset materiaalit
  - muovi
  - lasikuitu
  - lasi

# Painelaiteteräkset

- Samaa kemiallista koostumusta, lujuutta ja iskusitkeysluokkaa edustavat teräkset voivat olla sekä rakenne- että painelaiteteräksiä.
- Näennäisesti samankaltaisten terästen selkeimpiä eroja ovat:
  - painelaiteteräksille taataan tiettyjä erikoisominaisuuksia kuten esim. laskentalujuudet korkeissa lämpötiloissa, ns. kuumalujat painelaiteteräkset, parempaa virumiskykyä, matalan lämpötilan iskusitkeyttä, ns. arktiset laadut ja Ni-seosteiset teräkset tai parempaa muovattavuutta
  - painelaiteterästen valmistus on tiukasti säädeltyä, painelaiteterästen testaus on laajempaa ja tarkempaa kuin rakenneterästen, ainestodistus on pakollinen
  - painelaiteterästen koostumus on tiukemmin rajoitettu, koska usein vaaditaan hyvää/erinomaista hitsattavuutta, epäpuhtaudet ovat tiukemmin rajattu, erityisesti rikki ja fosfori
  - painelaiteteräkset ovat yleisesti ns. hienoraeteräksiä, esim. niobi- ja titaanilisäykset
  - levyjen nimellispaksuudet on tarkemmin säädetty
  - toimitustila voi olla normalisoitu, nuorrutettu tai kontrolloidusti valssattu, perusrakenneteräksillä se on lähes aina kuumavalssattu

# Painelaiteteräokset

- Hiiliteräokset ovat standarditeräksiä. Ne sopivat parhaiten laitteisiin, joilta vaaditaan pientä korroosion- ja lämmönkestoa. Mm. P235GH/Ni2 on niukkaseosteinen ja hienorakeinen painelaiteteräs kaksoistodistuksilla. Se soveltuu käytettäväksi sekä korkeissa (+400°C) että alhaisissakin (-50°C) lämpötiloissa.
- ”Mustiin” kuumalujiiin teräksiin on lisätty kromia ja nikkeliä, ja erityisesti molybdeenia lämmön- ja korroosionkestoa. 16Mo3 ja 13CMo4-5 ovat tällaisia laatuja. Ne soveltuvat käytettäväksi jopa +500 °C lämpötiloissa.
- Runsasseosteiset (ruostumattomat ja haponkestävät) teräokset ovat seostetumpia ja niiden kromi-, molybdeeni- ja nikkeliarvot ovat korkeita. Ruostumattomia teräksiä käytetään erityisesti elintarvike- ja lääketieteellisyydessä, mutta myös tavanomaisessa painelaitteikäytössä.
- Painelaitestandardia on lukuisia määriä. Ne ovat joko yhdenmukaistettuja, yhdenmukaistettuja apustandardia tai apustandardia. Standardit liittyvät esim. levytuotteisiin, putkistoihin, tankoihin, valuihin ja takeisiin. Esimerkkinä olkoon SFS-EN 10273:2016, Painelaiteteräokset. Kuumavalssatut hitsattavat kuumalujat terästangot.
- Painelaiteterästen hitsattavuus on lähtökohtaisesti hyvä, mutta siirryttäessä seostetumpiin laatuihin, vaatimukset kasvavat. Lujien laatuojen kohdalla on huomioitava toimitustila: normalisoidut, termomekaanisesti valssatut ja nuorrutetut.



# Hitsattavuus

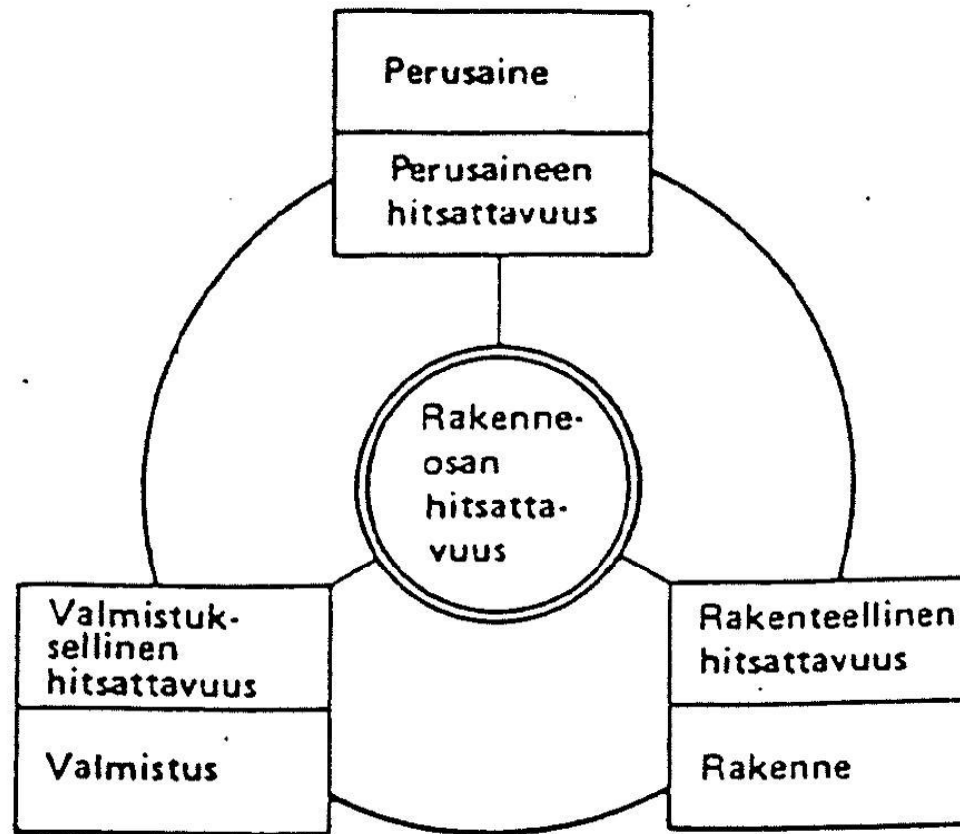
# Hitsattavuus

- Teräksen hitsattavuus on tärkeä materiaaliominaisuus, joka tulee ottaa huomioon materiaaleja ja valmistusmenetelmiä valittaessa.
- Hitsauksen ja muun konepajavalmistuksen ( *kylmämuovaus, terminen leikkaus, kuumilla oikaisu, lämpökäsittelyt*) aiheuttamat muutokset teräksen rakenteessa voivat heikentää teräksen lujuutta, muodonmuutoskykyä, iskutietoisuuksia tai korroosionkestävyyttä, tai rakenteeseen voi syntyä esim. kylmä- tai kuumahalkeamia, lamellirepeilyä tai myöstöhalkeamia.

- Teräksen hitsattavuus on hyvä, kun siihen voidaan valmistaa ilman erityistoimenpiteitä hitsausliitos, joka paikallisilta ominaisuuksiltaan ja rakenteeseen kohdistuvilta vaikutuksiltaan täyttää asetetut vaatimukset.
- Parempi hitsattavuus merkitsee väljempää rajoja esim. hitsausmenetelmien ja lämmöntuonnin suhteen ja lisäaineiden valinnalle sekä pienempiä kustannuksia erilaisten ongelmien välttämiseksi.

- Nykyisin hitsattavuuden määrittelyssä käytetään laajaa, kolmeen ominaisuuteen perustuvaa määrittelyä:
  - **Perusaineen hitsattavuus**, joka on materiaaliominaisuus
  - **Rakenteellinen hitsattavuus**, joka on konstruktio-ominaisuus
  - **Valmistuksellinen hitsattavuus**, joka on valmistusominaisuus





Kuva 1. Rakenneosan hitsattavuus-käsite.

# Perusaineen hitsattavuus

## 1. Koostumus

- karkeneminen -> kylmähalkeaminen
- epäpuhtaudet -> kuumahalkeaminen
- vanheneminen -> haurastuminen
- haurasmurtuminen -> kiderakenne, transitiolämpötila
- hitsisulan käyttäytyminen -> jähmettymisjärjestys
- väsymislujuus

## 2. Tila ja metallurgiset tekijät

- valmistustapa, tiivistystapa, muokkaustapa, lämpökäsittelyt
- erkaumat ja suotaumat
- sulkeumat
- raekoko ja anisotropia
- mikrorakenne

## 3. Fysikaaliset tekijät

- lämmönjohtavuus
- lämpölaajeneminen
- sulamispiste
- lujuus- ja sitkeysominaisuudet

# Rakenteellinen hitsattavuus

## 1. Rakenteen muodot

- voimien vaikutussuunnat
- hitsien sijainnit
- aineenpaksuus
- lovet
- jäykkyyserot

## 2. Kuormitustila

- kuormitusten/jännitysten laatu: staattinen, dynaaminen
- kuormitusten/jännitysten suuruus
- kestävyysvaatimukset
- lämpötila
- korroosio

# Valmistuksellinen hitsattavuus

## 1. Esivalmistelut

- hitsausprosessi ja -menetelmä
- lisäaine
- liitosmuodot ja railomuodot
- esikuumennustarve

## 2. Hitsauksen suoritus

- lämmöntuonti ja välipalkolämpötila
- hitsausjärjestys
- ympäristöolosuhteet

## 3. Jälkikäsitteilyt

- lämpökäsittelyt
- työstö
- peittäus, passivointi

# Kymmenen + yksi hitsauksen metallurgista ongelmaa

1. kuumahalkeama, jähmettymishalkeama
2. kylmähalkeama, vetyhalkeama, karkenemishalkeama
3. lamellirepeily
4. heikentynyt hitsiaineen sitkeys
5. heikentynyt muutosvyöhykkeen (HAZ) sitkeys
6. heikentynyt lujuus, pehmeät alueet tai vyöhykkeet
7. myöstön heikentämä sitkeys ja/tai myöstöhalkeama
8. haurasmurtumakäyttäytyminen (ferriitti)
9. seosaineiden ja/tai epäpuhtauksien suotautuminen
10. muutosvyöhykkeen herkistyminen
11. muu korroosiokäyttäytyminen



# Miten välttää ongelmat?

---

- Materiaalin valinta (koostumus ja tila)
- Lämmöntuonti [kJ/mm] → esim.  $t_{8/5}$
- Hitsausaineet (lisäaineet, kaasut ja jauheet)
- Laadunvarmistustoimenpiteet (puhtaus, laitteet, parametrit ja WPS, mitat ja mittatarkkuudet, ammattitaito ja motivaatio)
- Ulkoiset olosuhteet (kuormitus, kosteus, lämpötila, korroosio, konepaja- tai asennusolosuhteet)



# Hitsattavuuden arviointi

---

- Koostumus ja laskentakaavat
- Tila
- Tasapainopiirros (esim. Fe-C/Fe<sub>3</sub>C, Fe-Cr-Ni, Al-Mg ja Cu-Zn)
- Mikrorakenne (F, P, B, M, α, β, γ, ...)
- Kovuus (HV, HB, HR)
- S-käyrät (CCT)
- Hitsattavuus- ja menetelmäkokeet



# Hitsattavuuden arviointi

---

- Perusaineen hitsattavuuden arvioinnissa käytetään materiaalista ja käyttökohteesta riippuen erilaisia menetelmiä:
  - Koostumus ja laskentakaavat
    - CE(IIW), CET, Pcm, CEN
    - UCS, HCS, CS, Mn/S, S+P, Mg/Si
    - Schaefflerin diagrammi, deLong, WRC-92, Creq/Nieq (Hammar-Svensson)
  - Toimitustila
    - esim. pehmeäsihehkutettu, jännitystenpoistohehkutettu, muokattu, kuumavalssattu, suorasammutettu, normalisoitu, nuorrutettu, erkautuskarkaistu, termomekaaninen tila, keinovanhennettu, liuotushehkutettu, ...



- Useimmat arviointimenetelmät ovat teräksille, mutta osaa niitä voidaan käyttää myös muille materiaaleille.
- Hitsattavuuden arviointi on joskus vaikeaa, koska eri materiaaleille käytetään eri arviointimenetelmiä.
  - Esimerkiksi hiiliekvivalentin  $CE(IIW)$ -kaava soveltuu ainoastaan seostamattomille ja niukkaseosteisille rakenneteräksille, kun taas esim. Schaefflerin diagrammi käy vain runsasseosteisten terästen hitsattavuuden arviointiin.

# 1. Koostumus ja laskentakaavat

- Hiiliekvivalentit

- $CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$

- Dearden ja O'Neill v. 1940

- C-, C-Mn-, seostamattomat ja niukkaseosteiset rakenneteräkset sekä hienoraeteräkset

- Yleisesti käytetyt rakenneteräkset: S235 ja S355 tai vastaavat teräkset

- CE(IIW) perustuu karkenevuuteen eli kykyyn (helppouteen) muodostaa martensiittia HAZ:in karkearakeiselle alueelle

- Arvioidaan kylmähalkeilualttiutta

- 0,41...0,43...0,45...jopa yli 0,50

- Vety, lämmöntuonti, yhdistetty aineenpaksuus, esilämmitys

- $CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$

- Seostamattomat, niukkaseosteiset ja hienoraeteräkset

- CET perustuu karkenevuuteen

- Arvioidaan kylmähalkeilualttiutta

- Vety, lämmöntuonti, aineenpaksuus, esilämmitys

- Käytetään erityisesti esikuumennuslämpötilan määrittämisessä

## ■ Säröparametri (halkeamaparametri)

- $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$ 
  - Ito ja Bessyo v. 1968
  - Niukkaseosteiset, lujat rakenneteräkset
  - Esim. lujat hienoraeteräkset, nuorrutusteräkset, kulutusteräkset, booriteräkset ja kuumalujat ”mustat” teräkset
  - Perustuu täysin karsenneen mikrorakenteen kovuuteen
  - 0,27...0,30
- $CEN = C + f(C) \times \{Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5\}$ 
  - $f(C) = 0.5 + 0.5 \tanh \{20 (C - 0.12)\}$
  - Yorioka v. 1981
  - Pyritty yhdistämään CE(IIW), CET ja Pcm
  - Laajempi käytettävyys
  - Kun C on yli 0.15 %, CEN on samaa suuruusluokkaa kuin CE(IIW)

- $UCS = 230 \times C + 190 \times S + 75 \times P + 45 \times Nb - 12.3 \times Si - 5.4 \times Mn - 1$  (Unit of Cracking Susceptibility)
  - Seostamattomat ja niukkaseosteiset rakenneteräkset ja koneteräkset
  - Arvioidaan kuumahalkeilualttiutta
  - Erityisesti jauhekaarihitsaukseen, mutta soveltuu myös muille hitsausmenetelmille
  - Taipumus on pieni, kun  $UCS < 10$  ja suuri, kun  $UCS > 30$
  
- $HCS = 10^3 \times C \times \{S + P + (Si/25 + Ni/100) / (3 \times Mn + Cr + Mo + V)\}$  (Hot Cracking Susceptibility)
  - Seostamattomat ja niukkaseosteiset rakenneteräkset ja koneteräkset
  - Arvioidaan kuumahalkeilualttiutta
  - Taipumus pieni, kun  $HCS < 4$

- $CS = Cr + 3.3 \times Mo + 8.1 \times V - 2$  (Crack Susceptibility)
  - Kuumalujat "mustat" CrMoV – teräkset, esim. 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 ja vastaavat
  - Arvioidaan myöstöhalkeilualttiutta
  - Taipumus on pieni, kun  $CS < 0$

Koostumustiedot AINESTODISTUKSESTA, ei esitteestä tai mainoslehtisestä!!!

Missä TOIMITUSTILASSA hitsattava teräs on?

Mikä kaava missäkin tapauksessa?

**RUUKKI**

**AINESTODISTUS TEST REPORT  
WERKSZEUGNIS RELEVÉ DE CONTRÔLE  
EN 10 204-3.1 (2004) / PED 97/23/EC/LRQA.**

A 2/2  
38677 -02

Tilasin Purchaser/Besteller/Acheteur <b>RAUTARUUKKI OYJ RUUKKI PRODUCTION</b>		Vastaanottajan/Clientage/Emplacement Destinataire <b>12.04.2005/JV</b>		Vastaanotto Date/Datum/Date <b>12.04.2005 B</b>	
Tilasin ero Order No./Bestellung Nr./Commande No. <b>12.04.2005/JV</b>		Lähtömerkkin Shipping mark./Versandzeichen/Markus d'expédition <b>12.04.2005/JV</b>		Valmistajan/Markkin Mark of the Manufacturer Zeichen des Herstellerwerks Signe de producteur	
Lähtö Quality Workmark/Nummer <b>EN10028-3 P355N11</b>		Lähtö Add. requirements./Weitere Anforderungen/Autres prescriptions <b>EN 10029/1991 CLASS C</b>		Jatkuvuusvaatimus Durabilité Oppien, steel, continued casting Organisat. Suoritus Aset. a l'origine, coulée continue	

**WELDABLE FINE-GRAIN PRESSURE VESSEL STEEL**

Posite Item Pos. Fonte	Paksuus Thickness Dicke Epaisseur	Sulatus Cast No. Schmelz-Nr. No coulé	Cev Ceq Ceq	Seostusanalyysi % Chemical composition of cast % Chem. Zusammensetzung auf geschmolzen % Composition Chimique de coulé %													
				C	SI	MN	P	S	AL	NB	V	TI	CU	CR	NI	MO	N
002	12.00	44499	.40	.15	.38	1.42	.008	.006	.036	.044	.005	.004	.025	0.04	0.04	.002	.004

$CEKV=C+MN/6+(CR+MO+V)/5-(NI+CU)/15$

Pos. Item Pos. Fonte	Sulatus Cast No. Schmelz Coulée, Extra No.	Tilauk Order Zoll Etat	Yhteinen, Tennis test Zusammenh., Etat de traction	Tähtä Impact test Fallvers. Energie D = X 1	Tähtä, Impact test Energieversuch, Etat de résistance					Keskiv. Average Mittelw. Moyenne	Erikoistesteet Special tests Sonderversuche Essais Spéciaux		
					K2	Re N/mm2	Em N/mm2	A %	K3			°C	1
002	44499 012 N	11	417 539 28	REH	S	112	-50	071	091	075	079	012	RP0.2+300 271

K2: 11=TOP, TRANSV.  
K3: 112=CH-V/ISO-V (5), 10X10, TOP, TRANSV, KV600

**RUUKKI PRODUCTION**  
Raabe Steel Works  
Tilauksen ja tuotteen  
Printing and Inspection  
Essai et Contrôle

Tämän todistuksen, että mainittu on valmistettu edellä mainitun.  
We hereby certify that the material described above has been  
found and compared with the terms of the specification  
in all respects, and the test results are in accordance  
with the requirements of the specification.  
Nous certifions que la livraison est conforme aux  
spécifications de l'acceptation de la commande.

*M. Valkama*  
**MINNA VALKAMA**  
12.04.2005 MSH

Välittäjä/Edustaja Adressat/Importeur P.O. Box 5111  
Verkaufsstandort/Importeur/Adresse, Tel. +358 20 5111

AR kuuma- ja kylmä as rolling warm/rolled état de laminage	N normaali normalised normalisiert normalisé	NR normaali normalizing normalisiert normalisant	N normaali normalizing normalisiert normalisant	CR kontrolloitu controlled température réglée laminage contrôlé	TM lämpökäsitelty thermo-treated thermo-traité	NT normaali normalizing normalisiert normalisant	Q kutsu- quotation prelève tempé
---	---	---	--	--	--	---	---

Kuva 4. Paineläitedirektiivin mukainen Vastaanottotodistus 3.1 - EN 10204:2004 (sivu 2/2).



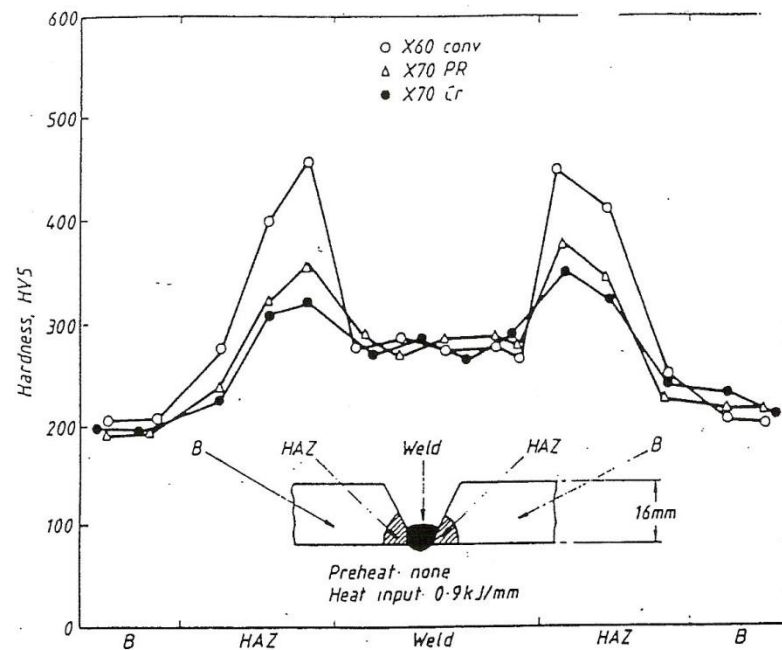
# Toimitustila

---

- kuumavalssattu
- pehmeäksihehkutettu
- normalisoitu
- jännitystenpoistohehkutettu
- kylmämuokattu
- termomekaanisesti käsitelty
- nuorrutettu
- sammutettu
- erkautuskarkaistu

# Kovuus

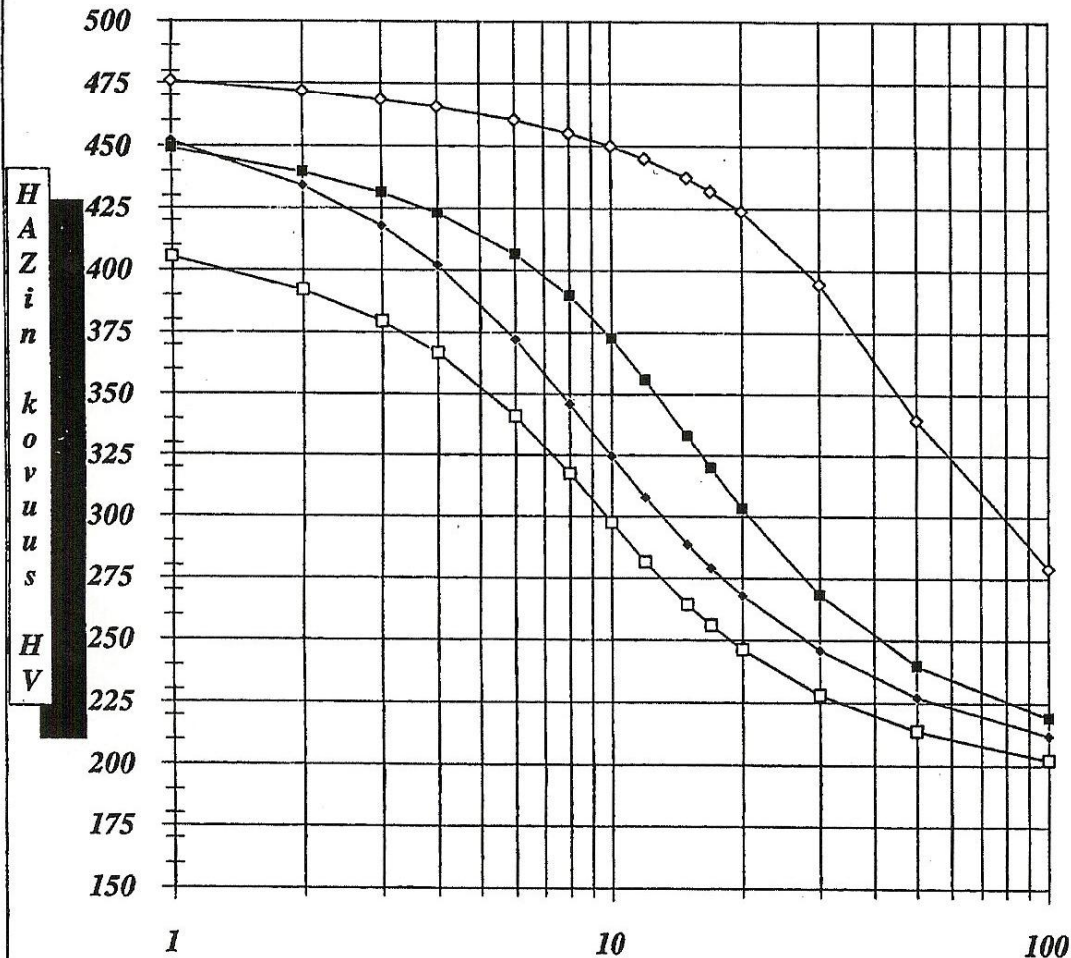
- Tuotekohtaisesti rajana voi olla esim. 350 HV10 tai 400 HV, mikäli käytetään esilämmitystä ja/tai niukkavetyistä hitsausmenetelmää
- Esim. painelaitteissa rajana on usein 320 HV10



Kuva 2. Hitsausliitoksen kovuusjakaumat erilaisen koostumuksen omaavilla teräksillä.



# t8/5-JÄÄHTYMISAJAN JA HAZIN KOVUUDEN VÄLINEN RIIPPUUUS



H  
A  
Z  
i  
n  
k  
o  
v  
u  
u  
s  
H  
V

Jäähtymisaika t8/5 (s)

t8/5 (martens.:100%/50%): RAEX-Moniteräs=0,9/9,1; 13CrMo44/DIN17175=9,1/45,7; 13CrMo44 sul. 526740/lo1rev=2,5/15,8; 13CrMo 44 me. koe 8 ja16 mm=1,3/9,2

- ◆ RAEX-Moniteräs C<sub>ekv</sub>= 0,43 C= 0,18 Mn= 1,5 Cr= Mo= V= Cu= Ni=
- ◇ 13CrMo44/DIN17175 C<sub>ekv</sub>= 0,64 C= 0,18 Mn= 0,7 Cr= 1,1 Mo= 0,65 V= Cu= Ni=
- 13CrMo44 sul. 526740/lo1rev C<sub>ekv</sub>= 0,53 C= 0,16 Mn= 0,63 Cr= 0,94 Mo= 0,4 V= Cu= Ni=
- 13CrMo 44 me. koe 8 ja16 mm C<sub>ekv</sub>= 0,47 C= 0,12 Mn= 0,43 Cr= 0,93 Mo= 0,49 V= Cu= Ni=

# Martensiitti

- martensiitin määrä
  - rajana 50 %
- martensiitintyyppi
  - sälemartensiitti
  - levymartensiitti
- kovuus
  - hiilipitoisuus
- karkenevuus = martensiitin muodostumis-  
helppous
  - hiili ja muut seosaineet

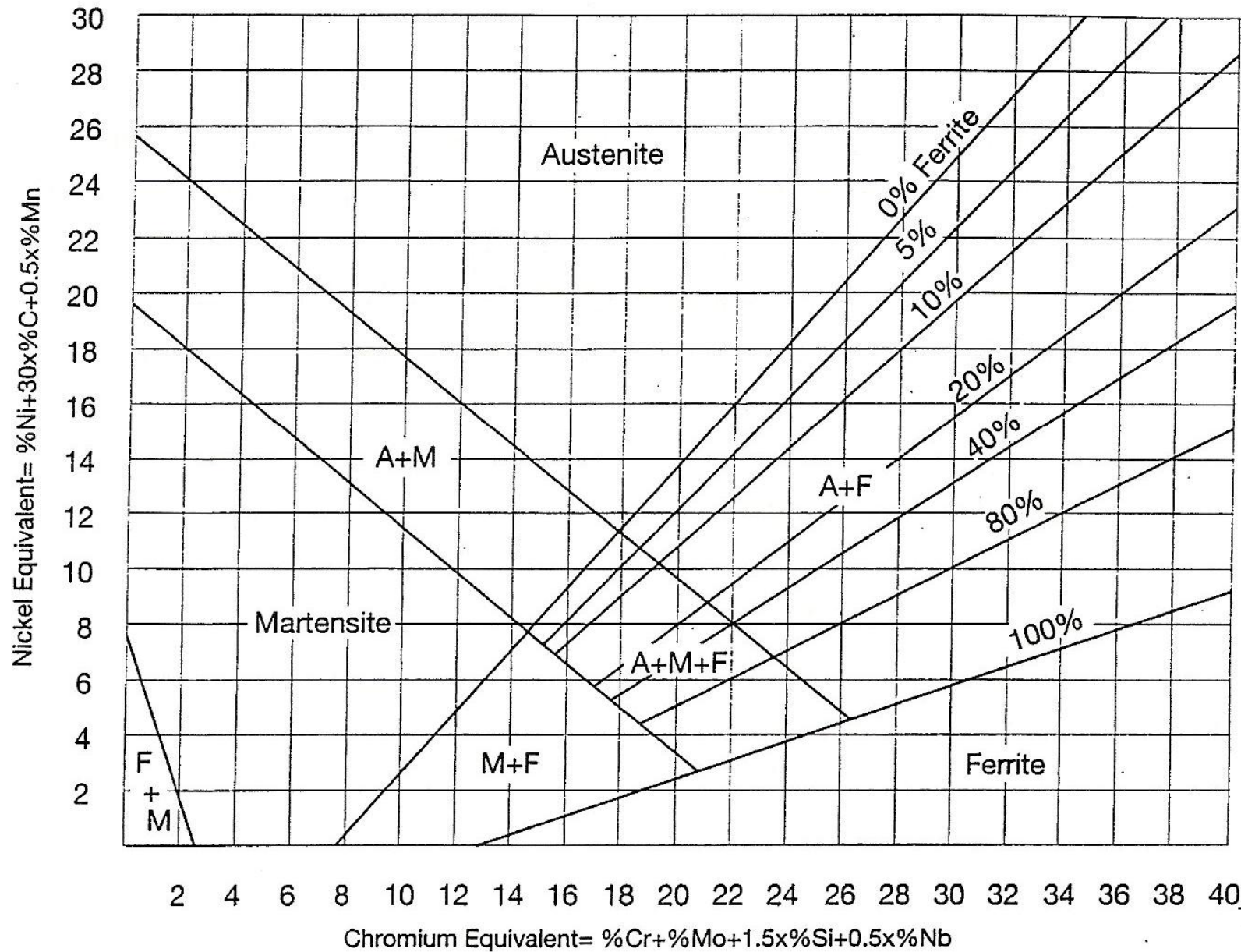
# S-käyrät

- Hitsausliitokseen syntyviä rakenteita ja siten liitoksen ominaisuuksia ja hitsattavuutta voidaan ”ennustaa” ns. jatkuvan jäähtymisen S-käyrien (CCT) avulla.
- S-käyrät
  - CCT-diagrammit (Continuous Cooling Temperature)
  - TTT-diagrammit (Temperature Time Transformation)
- Koska mekaanisilta ominaisuuksiltaan huonoimmat mikrorakenteet syntyvät yleensä sularajalle ja HAZ:in karkearakeiselle alueelle, riittää käytännössä, että hallitaan sularajan faasikäyttäytyminen.

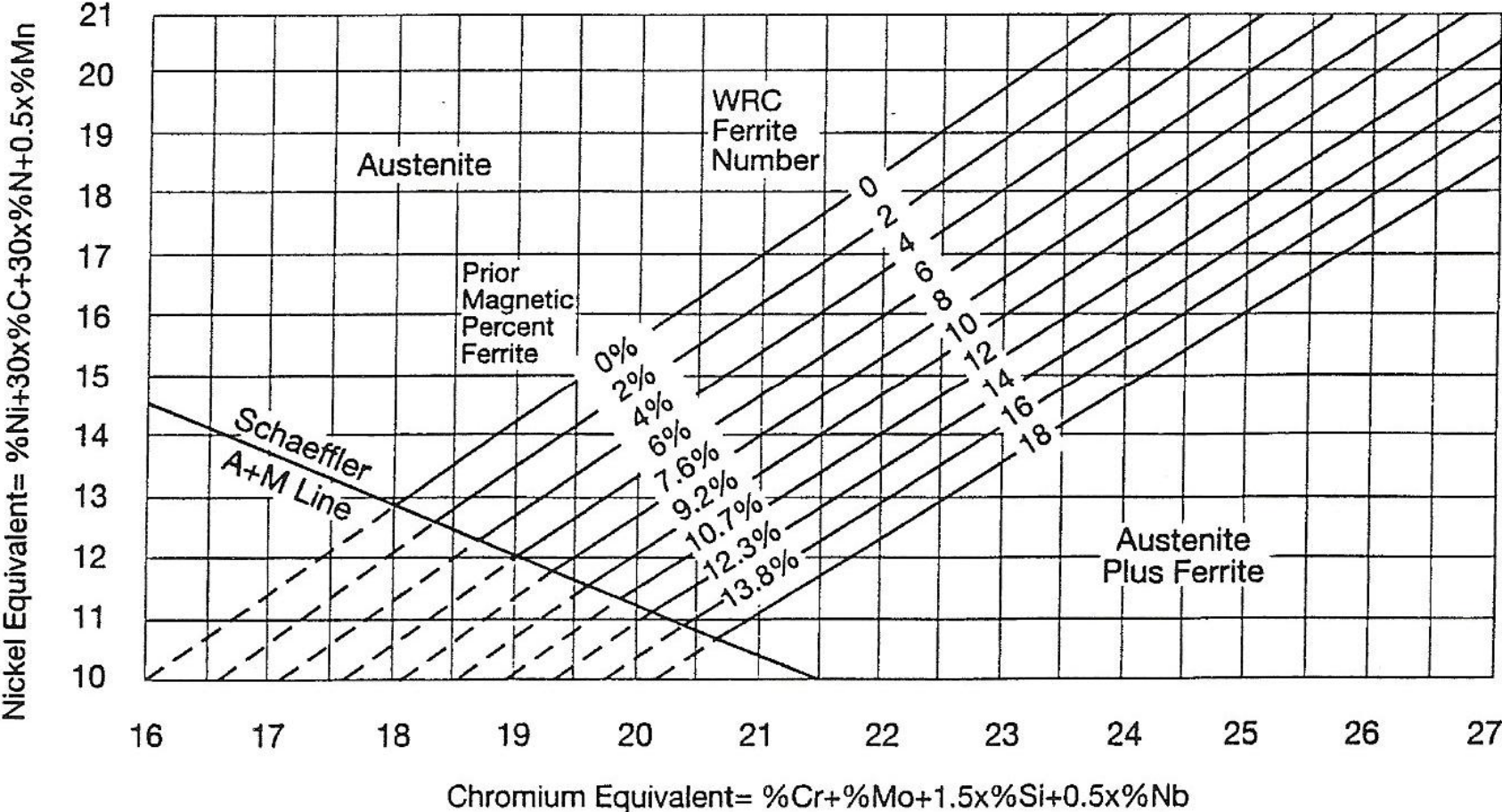
# Schaefflerin diagrammi

- Schaefflerin diagrammi soveltuu hitsattavuuden arviointiin ruostumattomille (esim. AISI 304 ja 304L) ja haponkestäville (esim. AISI 316 ja 316L) teräksille. Lisäksi sitä voidaan käyttää runsaammin molybdeenia sisältäville teräksille, kuten esim. Avesta 254 SMO sekä rajoitetusti myös duplex-teräksille.
- Bystramin alueet
- DeLong -diagrammi
- WRC-92 -diagrammi

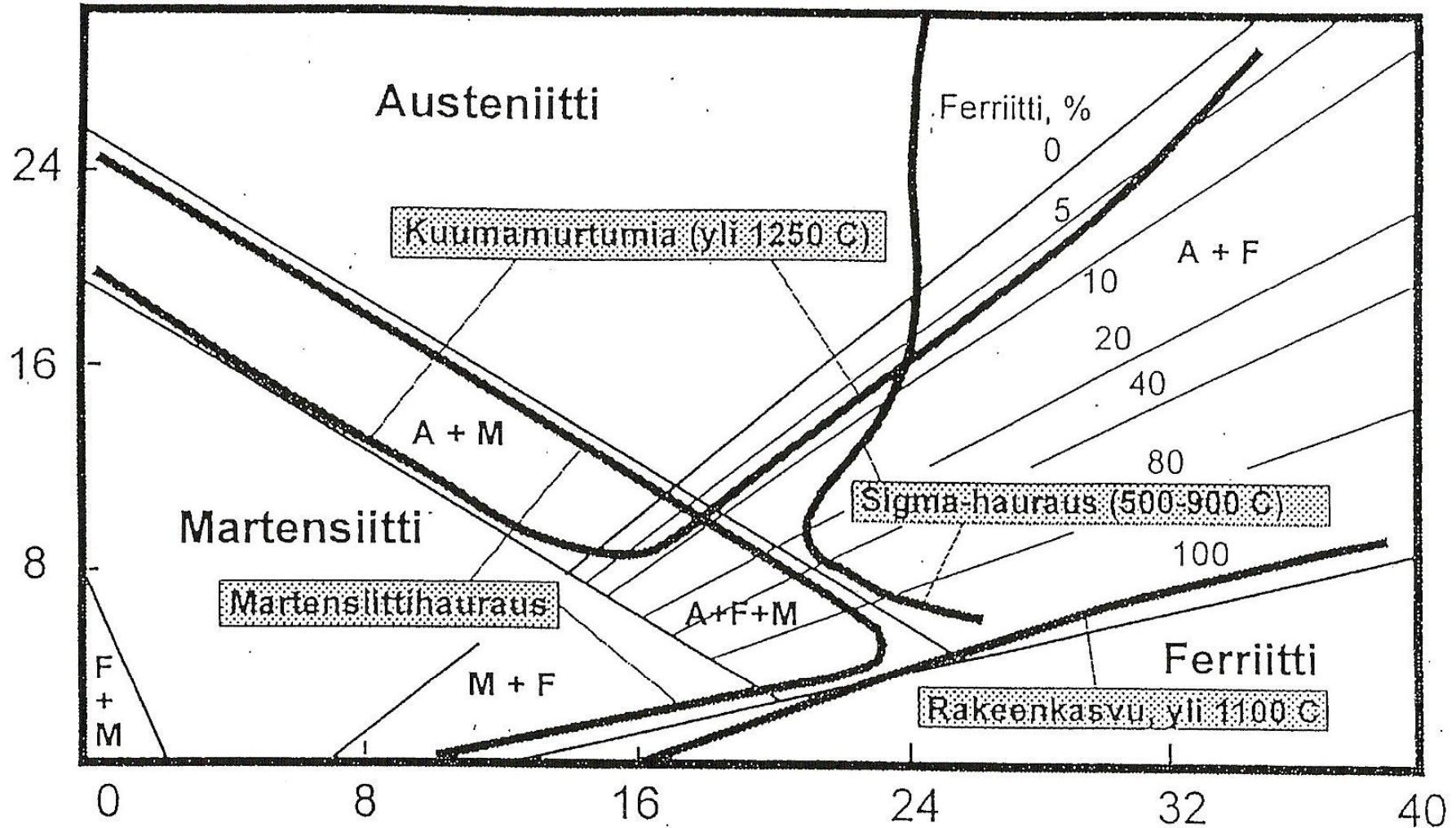
# Schaeffler Diagram



# DeLong Diagram



Nikkeliekvivalentti =  $\%Ni + 30x\%C + 0.5\%Mn$



Kromiekvivalentti =  $\%Cr + \%Mo + \%1.5xSi + 0.5xNb$

Kuva 4. Ruostumattomien terästen haurausilmiöiden esiintyminen koostumus kentässä Schaeffler-diagrammilla kuvattuna.

# Hitsattavuus- ja menetelmäkokeet

- Hitsattavuuskokeet
  1. Kuumahalkeilukokeet
  2. Kylmähalkeilukokeet
  3. Myöstöhalkeilukokeet
  4. Lamellirepeilykokeet
  5. Sitkeä/haurasmurtumakokeet
- Menetelmäkokeet



# Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset

# ”Mustat” teräkset

- yleiset rakenneteräkset, esim. S235JR, S355J3G3-Z25 ja S420
- paineastiateräkset, esim. P235GH, P355NL1, P500Q ja H II DIN 17155
- laivanrakennusteräkset, esim. NV A36 ja ABEH36TM
- säänkestävät Corten -laadut, esim. Corten B ja S355J0WP
- hiiliteräkset
  - niukkahiiliset teräkset 0,05-0,25%C
  - keskihiiliset teräkset 0,25-0,60%C, esim. UIC 900A
  - runsashiiliset teräkset 0,60-2,11%C, esim. R260
    - työkaluteräkset 0,60-1,40%C, esim. UHB 15
    - yliutektoidiset teräkset, 1,00-1,85%C, esim. Damascus Steel
- lujat rakenneteräkset, esim. S690QL, Weldox 700, Dillimax 690, RQT 701, Domex 650 MC, Raex Optim 700 MC ja Strenx 700 E
  - toimitustila, mm.
    - termomekaanisesti valssattu (TM)
    - sammutettu ja päästetty, nuorrutettu (QT)
    - sammutettu, karkaistu (Q)
    - termomekaanisesti valssattu ja nuorrutettu (TM+Q&T)
    - kylmämuovattava (C)
- ultralujat teräkset, esim. QC 960, S1100QL, Strenx 1100 ja Armox 370T
- kulutusteräkset, esim. Hardox 400, Raex 500 ja Dillidur 400

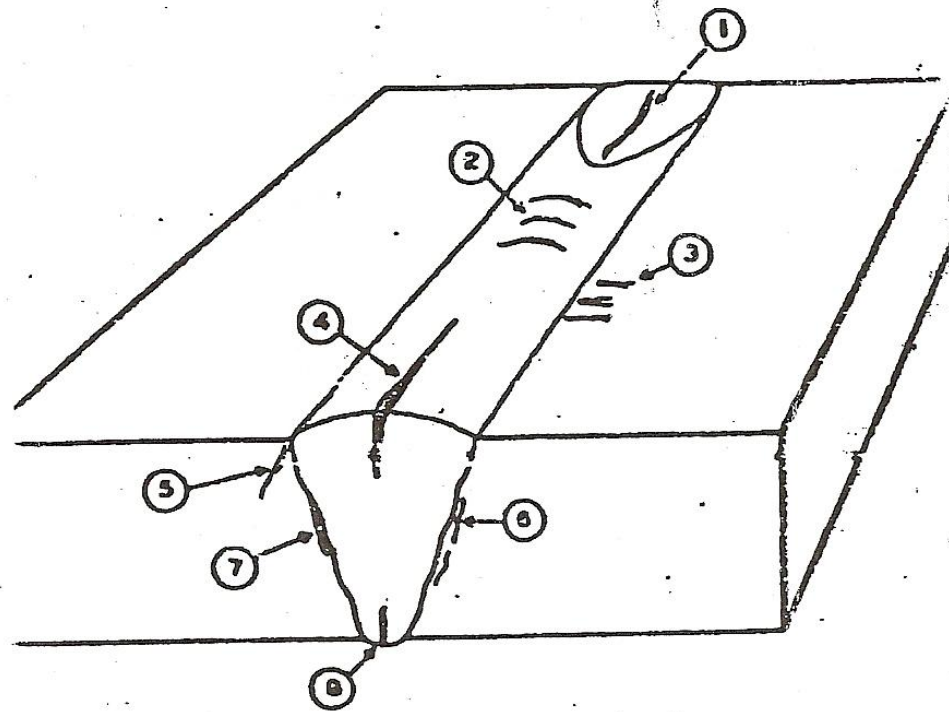
- nuorrutusteräkkeet, esim. MoC210 (25CrMo4), MoC410 (42CrMo4), 30CrNiMo8 ja Imacro
- hiiletysteräkkeet, esim. MoCN 206 (20NiCrMo2-2)
- jousiteräkkeet, esim. 51CrV4
- koneteräkkeet, esim. 520 MW+ ja Hydax 15
- kuulalaakeriteräkkeet, esim. 100CrMo7
- taeteräkkeet, esim. Imamic
- booriteräkkeet, esim. B24 ja B27
- nitrausteräkkeet, esim. 20CrMoV5-7 (Imanite M)
- seostamattomat ja niukkaseosteiset kuumalujat teräkkeet, esim. (St35.8), 16Mo3, 13CrMo4-5 ja 10CrMo9-10
- mangaaniteräkkeet, esim. Hadfieldin Mn-teräs (Mn 13%)
- nikkelteräkkeet, kylmänsitkeät 2.25%, 3.5%, 5% ja 9% Ni-teräkkeet, LPG- ja LNG-teräkkeet
- Maraging-teräkkeet, esim. Fe-18Ni-8Co, sammutus ja erkautuskäsittely

# Kymmenen ”mustan” teräksen hitsauksen metallurgista ongelmaa

1. kuumahalkeama, jähmettymishalkeama
2. kylmähalkeama, vetyhalkeama
3. lamellirepeily
4. heikentynyt hitsiaineen sitkeys
5. heikentynyt muutosvyöhykkeen (HAZ) sitkeys
6. heikentynyt väsymiskestävyys
7. heikentynyt lujuus, pehmeät vyöhykkeet
8. myöstön heikentämä sitkeys
9. myöstöhalkeama
10. haurasmurtumakäyttäytyminen (ferriitti)

# Halkeamatyypit

- Erilaisia halkeamatyyppejä ovat:
  - Kylmähalkeama (eli vetyhalkeama, karkenemishalkeama tai viivästynyt murtuma)
  - Kuumahalkeama (eli jähmettymishalkeama)
  - Lamellirepeämä
  - Myöstöhalkeama
  - Murtumat
    - sitkeä murtuma
    - hauras murtuma



Hitsausliitoksessa esiintyvät halkeamatyypit

- 1. Hitsiaineen kraatterihalkeama
- 2. Hitsiaineen poikittaishalkeama
- 3. Muuttumisvyöhykkeen poikittaishalkeama
- 4. Hitsiaineen pitkittäishalkeama
- 5. Reunahalkeama
- 6. Palonalainen halkeama
- 7. Sulorajahalkeama
- 8. Juurihalkeama

● Kylmähalkeamat

● Kuuma halkeamat

# Kylmähalkeama

(cold cracking, hydrogen cracking)

- Tunnistaminen
  - Tyypilliset halkeamat palonalaisia halkeamia HAZ:issa, juuri- tai sularajahalkeamia. HAZ:issa yleensä pitkittäisiä, hitsiaineessa myös poikittaisia.
  - Raerajoja pitkin tai rakeiden läpi, lohkomurtuman kaltainen.
  - Halkeama ”ajan” kuluttua.
- Kohteet
  - Jäykät rakenteet, pienet palot, suuret aineenpaksuudet, ”kosteat ja likaiset” olosuhteet.

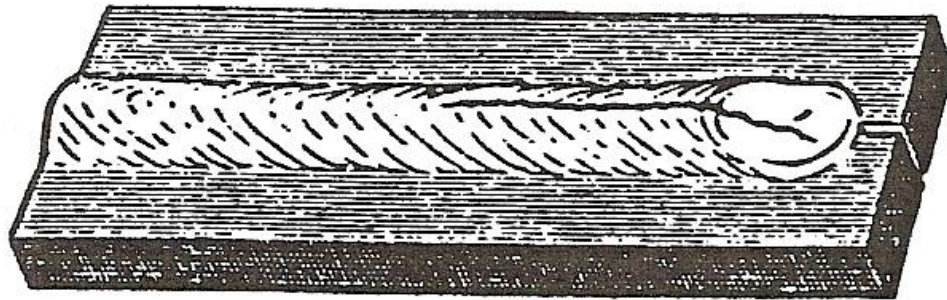
- **Materiaalit**
  - Lujat, karkenevat teräkset ( $R_m > 500 \text{ N/mm}^2$ ). S355 →.
  - Yleensä seostetut ”mustat” teräkset.
  
- **Vaikuttavat tekijät**
  - **YHTEISVAIKUTUS:**
    - **Vetypitoisuus** (HD ml/100g): lähtövetypitoisuus H0 ja lopullinen vetypitoisuus HR; t15/2 tai t15/1.5
    - Mikrorakenne: **hauras mikrorakenne** (runsashiilinen martensiitti), HV,  $C_{ekv}$ ,  $P_{cm}$ , t8/5
    - **Jännitykset:** jähmettymisjännitykset, ulkoinen kuormitus, jännityshuiput ja kolmiaksaalinen jännitystila
    - **Lämpötila:** alle 100 - 150 °C
  
- **Mittaus**
  - $C_{ekv}$ ,  $P_{cm}$
  - Implant, Tekken Y, Cruciform, CTS-koe (Critical Thermal Severity), Lehigh
  - Vetypitoisuus: glyseriini-, parafiini- ja elohopeakoe



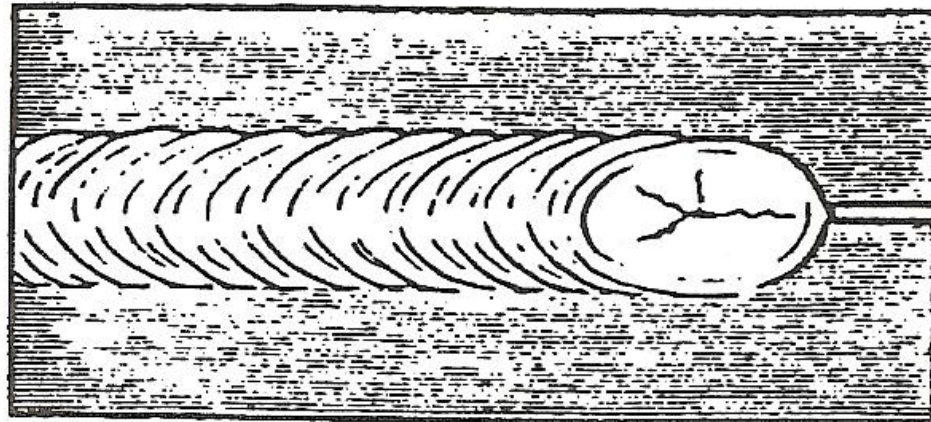
# Kuumahalkeama, hitsiaine (solidification cracking)

- Tunnistaminen
  - Yleensä hitsiaineen keskellä pitkittäisenä halkeamana.
  - Murtopinnassa tumma päästöväri.
  - Murtuma etenee raerajoja tai dendriittien välejä pitkin.
  - Halkeama heti jähmettymisen yhteydessä tai välittömästi sen jälkeen.
- Kohteet
  - Jäykät rakenteet. Kraaterin täyttö.
  - Suuri palon korkeus/leveys-suhde (yli 1-2). Suuri tunkeuma (elektronisuihku-, jauhekaari- ja MIG/MAG-hitsaus) tai suuri hitsausnopeus (laseri ja plasma).

- **Materiaalit**
  - ”Epäpuhtaat” materiaalit: S, P, C, (O, N, H).
  - Austeniittiset ruostumattomat teräkset: jähmettymisjärjestys.
  - ”Niukkaseosteiset” (seosaineita 0,5-3 %) alumiinit.
- **Vaikuttavat tekijät**
  - Seosaineiden ja epäpuhtauksien epätasainen jakautuminen.
  - **Suotautuminen** ja hauraiden matalissa lämpötiloissa sulavien/jähmettyvien raerajafaasien (esim. rautarikkiyhdisteet) muodostuminen.
  - Laaja puuro- ja suotautumisalue.
  - Jähmettymisjärjestys
  - Karkeat jähmettymisrakenteet
  - **Jäykkä rakenne**
  - **Jännitystila:** jähmettyminen, lämpölaajeneminen, ulkoinen kuormitus (rakenteen jäykkyys).



end cracking

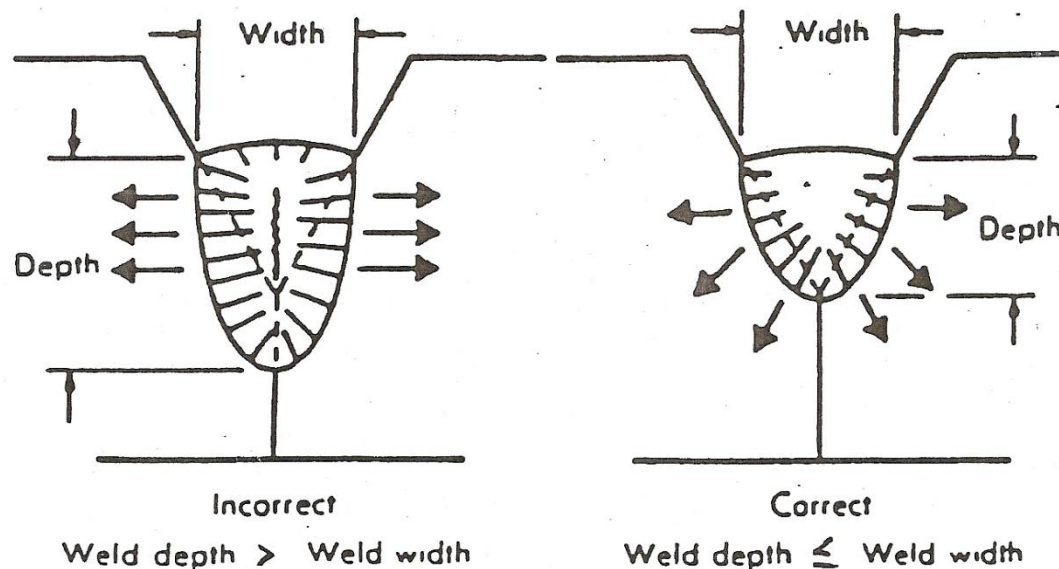


end-crater cracking

Figure 4.9 Examples of end cracking in fillet welds associated with high constraint joints. After Richards, K.G., *Weldability of Steel*, The Welding Institute, 1967

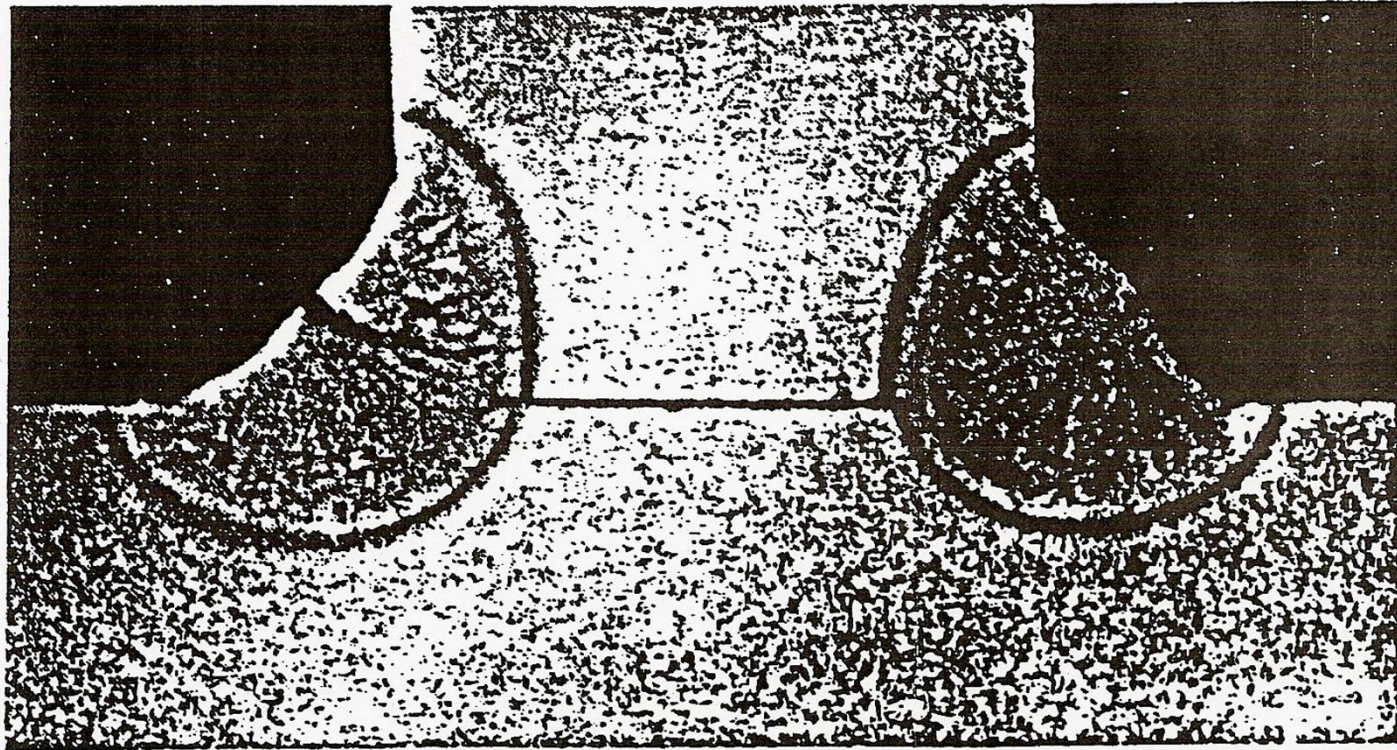
# Kuumahalkeamatekijät / hitsiaine

- Hitsin muoto, syvyys/leveys-suhde
  - Kun suhde on suuri ( $\geq 1$ ), on halkeamariski suuri
  - Pylväsmäisten rakeiden kohtaaminen kohtisuorasti hitsin keskilinjalla aiheuttaa yhtenäisen sulafilmin jähmettymisen loppuvaiheessa



- Rakenteen jäykkyys → jännitykset

ESIMERKKI:



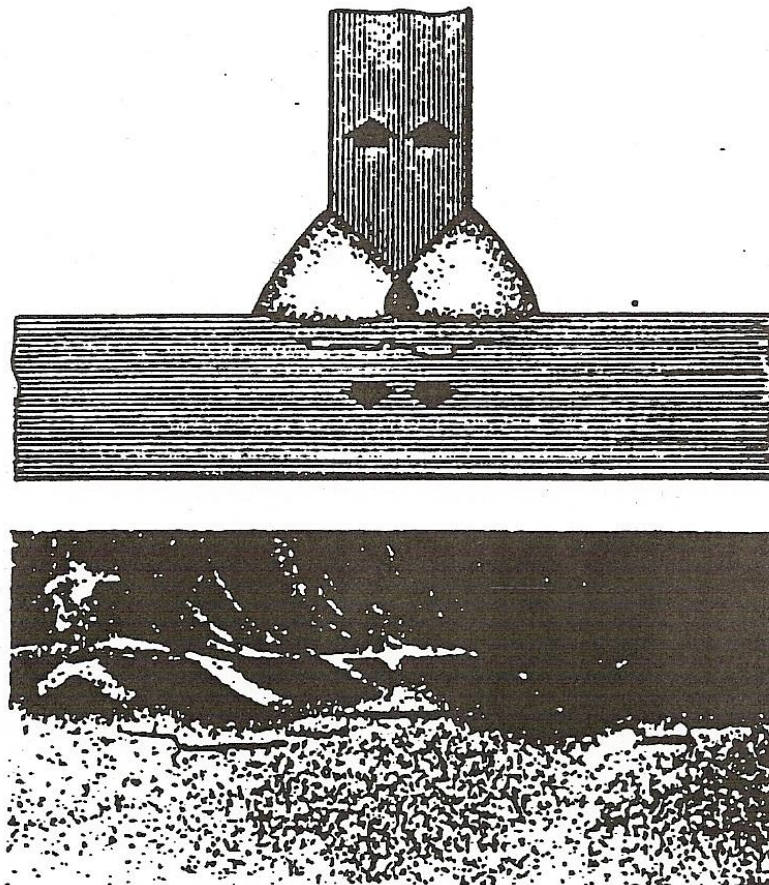
KUVAN T-LIITOKSEN VIIMEKSI HITSATUN  
HITSIN (VASEN) HALKEAMISTAIPUMUS ON SUUREMPI  
SUUREMMAN JÄYKKYYDEN VUOKSI

# Lamellirepeämä

## (lamellar tearing)

- Tunnistaminen
  - Hitsausliitoksen alla perusaineessa sijaitseva levyn pinnan suuntainen ”terassimainen” repeämä.
  - Ydintymänä usein kylmähalkeama tai jännityskeskittymä.
  - Repeämä etenee terassimaisena pitkin sulkeumien heikentämiä tasoja, sitkeät leikkausmurtumat yhdistävät murtumatasoja.
  - Sulkeumat sulfideja, silikaatteja tai oksideja.
- Kohteet
  - Jäykät piena- ja päittäishitsatut L-, T- ja ristikkäisliitokset.
  - Paksuussuuntaiset jännitykset.
  - Suuret aineenpaksuudet.

- Repeäminen edellyttää:
  - paksuussuuntaista kuormitusta
  - puutteellista paksuussuuntaista sitkeyttä



# Myöstöhalkeama (stress relief cracking)

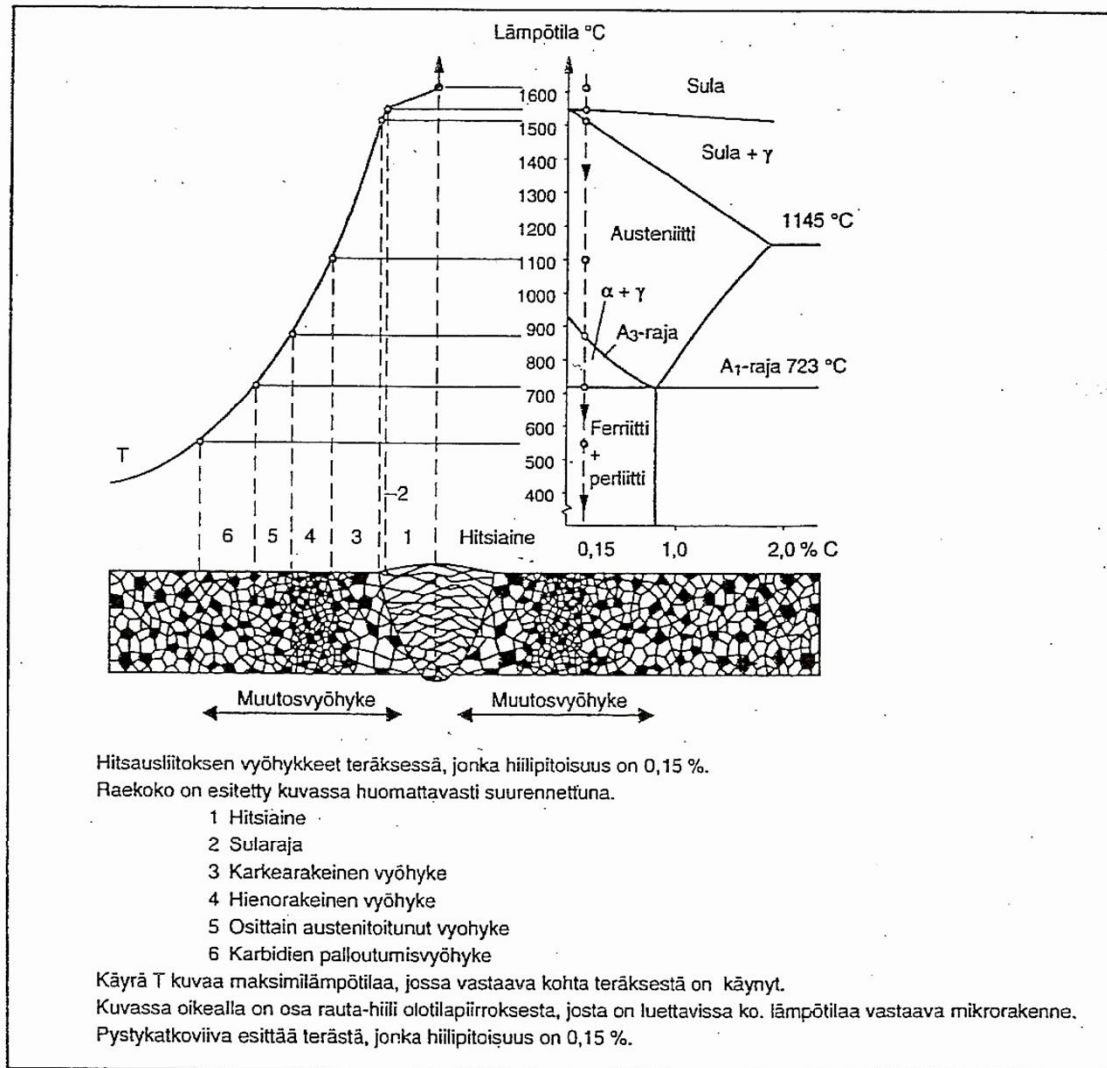
- Tunnistaminen
  - Hitsauksen jälkeisen myöstöhehkutuksen aikana ja joskus myös hitsauksen yhteydessä.
  - Hitsauksessa muutosvyöhykkeen rakeenkasvualueella pitkittäinen tai poikittainen halkeama.
  - Monipalkoliitoksen hitsiaineessa ja pinnoitushitseissä.
  - Esiintyvät raerajoilla (perinnäisen austeniitin raerajoilla).
  - Myöstöhehkutus: tavoitteena laukaista hitsausjännityksiä-virumismekanismi (= plastinen muodonmuutos korotetussa lämpötilassa).



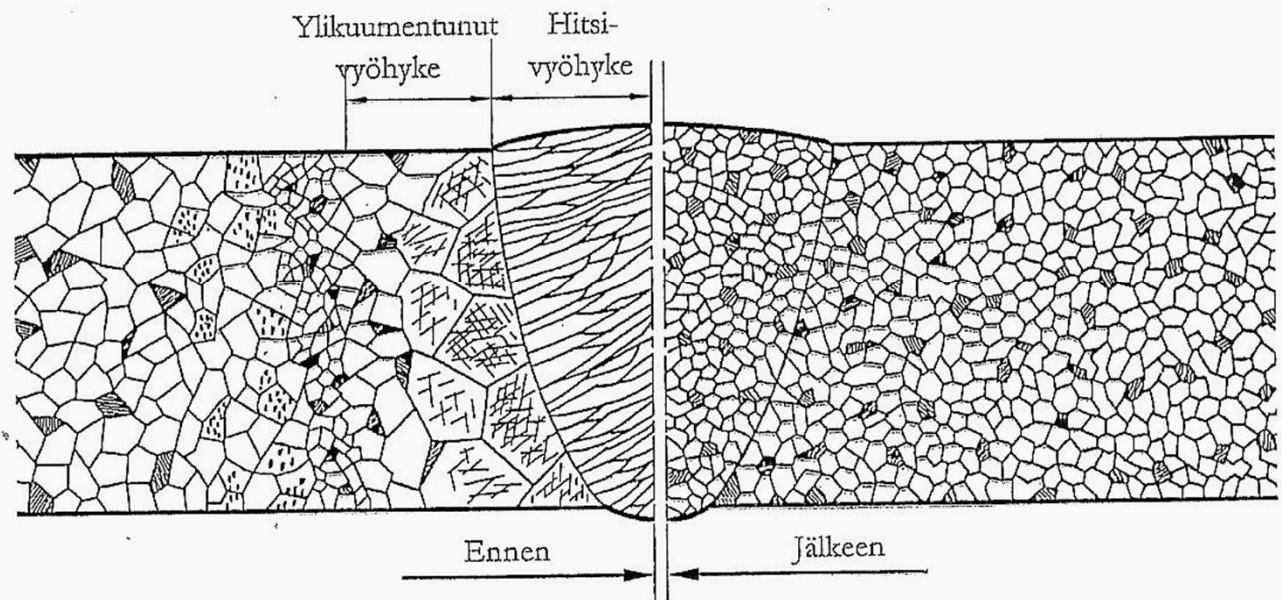
- Kohteet
  - Suuret aineenpaksuudet (yli 50 mm).
- Materiaalit
  - Erkautumiselle taipuvaiset hitsi- ja perusaineet, joissa on tyypillisesti karbideja muodostavia (Cr, Mo, V) ja raerajoja heikentäviä seosaineita ja epäpuhtauksia (P, S, Sn, As, Cu, Al).
  - Niukkaseosteiset ja austeniittiset teräkset, esim. Cr-Mo- ja Cr-Mo-V-seosteiset teräkset.
  - Myöstövanhenevat Ni-pohjaiset superseokset.
- Vaikuttavat tekijät
  - Raerajojen lujuus jää matriisiin (= rakeiden sisäosat) lujuutta pienemmäksi hitsauksessa liuenneitten karbidien erkautuessa ensisijaisesti rakeiden sisäisiin dislokaatioihin.
  - Viruminen keskittyy heikentyneille raerajoille, joissa ylitetään paikallisesti muodonmuutoskyky.

# Miten välttää ongelmat?

- Teräksen valinta (koostumus ja tila)
- Lämmöntuonti [kJ/mm]  $\rightarrow t_{8/5}$
- Hitsausaineet (lisäaineet, kaasut ja jauheet)
- Laadunvarmistustoimenpiteet (puhtaus, laitteet, parametrit ja WPS, mitat ja mittatarkkuudet, ammattitaito ja motivaatio)
- Ulkoiset olosuhteet (kuormitus, kosteus, lämpötila, korroosio, konepaja- tai asennusolosuhteet)



Kuva 3.1 Hitsausliitoksen vyöhykkeet rakenneteräksessä. Muutosvyöhykkeen raekoko ja hitsauksessa syntyvät mikrorakenteet hitsauksen huippulämpötilan funktiona [3].



Kuva 6.18 Hitsi seostamattomassa hiiliteräksessä. Rakenne ennen ja jälkeen normalisoinnin.

# C-, C-Mn- ja mikroseosteiset teräkset

Menetelmiä HAZ-vyöhykkeen sitkeyden parantamiseksi:

1. Valitse teräs, jolla on pienempi hiilipitoisuus ja pienempi hiiliekvivalentti/säröparametri
2. Valitse teräs, jolla on pienempi raekoko
3. Valitse teräs, joka on tiivistetty (Al-tiivistetty)
4. Valitse teräs, jolla on alhainen typpipitoisuus ja pieni välisijatyypipitoisuus
5. Valitse teräs, jolla on suurempi perusaineen sitkeys ("pehmeä")
6. Valitse "puhtaampi" teräs, so. teräs, jolla on pieni S- ja P-pitoisuus,  $S+P < 0,04\%$ ,  $S < 0,03\%$  ja  $Mn/S > 30-40$
7. Muista, että lämmöntuonnilla yli (noin) 3.5 kJ/mm Nb- ja V-lisäykset alentavat HAZ-vyöhykkeen sitkeyttä vs. vastaava C-Mn-teräs
8. Muista, että hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely parantaa HAZ-vyöhykkeen sitkeyttä, mikäli ei ole sekundäärinen karkenemisen vaaraa
9. Muista, että pienempi hiilipitoisuus sallii suuremman mikroseostuksen
10. Korotettu Ni-pitoisuus vaikuttaa edullisesti ferriitin murtumiskäyttäytymiseen ja vain vähän karkenevuuteen
11. Älä käytä ylisuurta lämmöntuontia. Suurempi hitsausnopeus pienentää lämmöntuontia kaventaen samalla HAZ-vyöhykettä ja vaikuttaen edullisesti sitkeyteen
12. Vältä hyvin pientä lämmöntuontia ja pieniä palkoja railon reuna-alueilla, joissa voi olla seurauksena suuria kovuusarvoja ja alttiutta rakenteen väsymiseen
13. Varmista, että monipalkohitsauksessa palot menevät riittävästi limittäin ja, että palkojen välinen lämpötila pysyy hallinnassa
14. Käytä hitsausmenetelmää, jossa jälkimmäinen palko pienentää edellisen palon raekokoa
15. Noudata ohjeita perus- ja hitsausaineiden käsittelystä (puhtaus ja kosteus, erityisesti vety)

Nämä samat asiat soveltuvat myös vetyhalkeilun estämiseen hitsiaineessa, jossa vaikka karkeneminen on yleensä pienempää, niin vetypitoisuus korkeampi ja jännitykset todennäköisesti korkeampia kuin muutosvyöhykkeessä. Yleensä hitsausmenetelmän valinta niin, että estetään vetyhalkeilu muutosvyöhykkeellä, riittää estämään vetyhalkeilun myös hitsiaineessa. Kuitenkin tietyissä olosuhteissa, kuten hyvin jäykät olosuhteet, matalahiliekvivalenttinen teräs, suuret aineenpaksuudet tai niukkaseosteinen hitsiaine, vetyhalkeilu hitsiaineessa voi tulla hallitsevaksi.

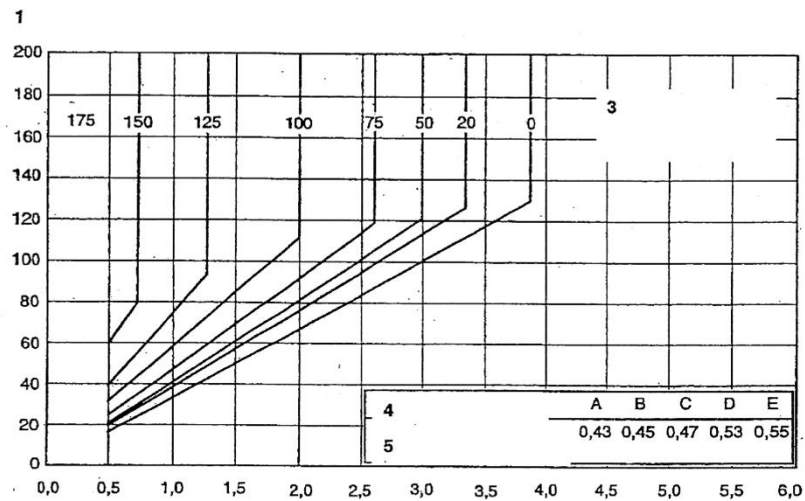
Tehokkain keino estää vetyhalkeilu on vähentää vedyn tuontia lisäaineesta hitsiaineeseen. Taulukossa C.1 on annettu esimerkkejä, miten eri tekijöillä voidaan vaikuttaa niin, että esikuumennusta ei tarvita. Erityisesti siinä on huomioitava niukka-vetyisen lisäaineen käytön edut.

Taulukko C.1 Esimerkkejä yhdistetyistä aineenpaksuuksista (ks. kohta C.2.4), jotka voidaan hitsata ilman esikuumennusta

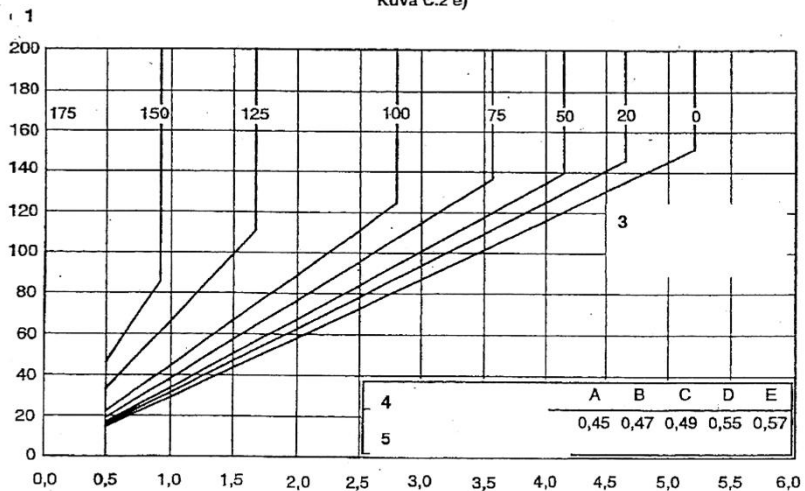
Hitsiaineen vetypitoisuus <sup>a</sup>  (ml/100 g)	Suurin yhdistetty aineenpaksuus			
	CE: 0,49		CE: 0,43	
	Lämmöntuonti:		Lämmöntuonti:	
	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm
	mm	mm	mm	mm
> 15	25	50	40	80
10 ≤ 15	30	55	50	90
5 ≤ 10	35	65	60	100
3 ≤ 5	50	100	100	100
≤ 3	60	100	100	100

<sup>a</sup> Mitattu standardin ISO 3690 mukaan.

Hitsausolosuhteet, joilla estetään vetyhalkeilu hiilimanganiteräksissä, on esitetty graafisessa muodossa kuvassa C.2 ilmaistuna hiiliekvivalentin avulla teräksille, joita tämä standardi koskee. Nämä olosuhteet soveltuvat kaiken tyyppisille liitoksille, jos se on käytännössä vain mahdollista.



2  
Kuva C.2 e)



2  
Kuva C.2 f)

Selitykset

1 Yhdistetty aineenpaksuus (mm)

2 Lämmöntuonti (kJ/mm)

3 Vähimmäisesikuunnuslämpötilä (°C)

4 Vetyasteikko

5 Hiiliekvivalentti, enintään

Kuva C.2 Hitsausolosuhteet teräksille eri hiiliekvivalentin arvoilla

### C.3.2.5 Sisäiset jännitykset

Tällä hetkellä sisäisten jännitysten ja esikuumennuslämpötilan välinen yhteys on kvalitatiivisesti tunnettu vain tiettyyn laajuuteen saakka. Esikuumennuslämpötilan laskentakaavan C.8 johtamisen yhteydessä on oletettu, että sisäiset jännitykset ovat hitsausvyöhykkeellä yhtä suuret kuin perusaineen tai vastaavasti hitsiaineen myötölujuus.

### C.3.3 Esikuumennuslämpötilan laskeminen

Esikuumennuslämpötilan  $T_p$  laskemista varten voidaan yhdistää kemiallinen koostumus ilmaistuna hiiliekvivalentilla  $CET$ , aineenpaksuus  $d$ , hitsiaineen vetypitoisuus  $HD$  ja lämmöntuonti  $Q$ :

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (C.7)$$

Esikuumennuslämpötila voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times \tanh(d/35) + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (C.8)$$

Tämä kaava pätee rakenneteräksille, joiden myötölujuus on alle  $1000 \text{ N/mm}^2$ , seuraavilla edellytyksillä:

$$CET = 0,2 \dots 0,5 \%$$

$$d = 10 \dots 90 \text{ mm}$$

$$HD = 1 \dots 20 \text{ ml/100g}$$

$$Q = 0,5 \dots 4,0 \text{ kJ/mm}$$

Kokemuksen mukaan esikuumennuslämpötila voidaan laskea kaavojen C.7 tai C.8 avulla edellyttäen, että seuraavat ehdot täyttyvät:



# Esikuumennuslämpötila

- Tarvittava esikuumennuslämpötila voidaan määrittää kaavasta:

$$T_{cr} = 697CET + 160 \tanh(d/35) + 62(H_D)^{0,35} + (53CET-32) \times Q - 328$$

(°C)

jossa  $CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$

Esim. materiaalin L485MB (1.8977, X70, StE480.7TM) analyysin pitoisuuksilla putkelle, jonka seinämän paksuus on 15 mm. *(Huom! ei yhdistetty aineenpaksuus!)*

- $d = 15$  mm putken seinämä
- $H_D = 15$  cm<sup>3</sup>/100 g hitsin vetypitoisuus (cm<sup>3</sup>/100 g DM ISO 3690), emäspiikko
- $Q = 1,0$  kJ/mm lämmöntuonti,

→ saadaan

$$T_{cr} = 129 \text{ °C} \rightarrow \text{valitaan esikuumennuslämpötila } T > 130 \text{ °C}$$

mikäli tämä on varmistettu asianmukaisella menetelmäkokeella standardin EN 288-3:1997 tai esituotannollisella kokeella standardin EN 288-8:1995 mukaan ja tulokset täyttävät vaatimukset.

Jos ei ole saatavissa käyriä, jotka osoittavat iskuenergian, transitiolämpötilan ja kovuuden välisen yhteyden jäähtymisajan  $t_{8/5}$  funktiona, suositellaan hitsauskokeen tekemistä standardin EN 288-3:1997 tai EN 288-8:1995 mukaan.

## D.6 Jäähtymisajan laskeminen

Hitsausolosuhteiden ja jäähtymisajan välinen yhteys voidaan esittää yhtälöillä sekä kaksidimensionaaliselle että kolmidimensionaaliselle lämmönjohtumiselle (ks. kuvat D.3 ja D.4).

Kuvassa D.4 on diagrammi, joka kuvaa transitiopaksuuden  $d_t$ , lämmöntuonnin  $Q$  ja esikuumennuslämpötilan  $T_p$  välistä yhteyttä. Se soveltuu mille tahansa hitsityypille ja hitsausprosessille. Diagrammi selvittää eri aineenpaksuuden, lämmöntuonnin ja esikuumennuslämpötilan yhdistelmille lämmönjohtumistavan, kaksi- tai kolmidimensionaalinen lämmönjohtuminen.

Jos lämmönjohtuminen on kolmidimensionaalinen, jäähtymisaika on riippumaton aineenpaksuudesta. Jäähtymisaika voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä D.1:

$$t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} \times \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (D.1)$$

Seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille yhtälö D.1 voidaan muuntaa yhtälöksi D.2, joka ottaa huomioon liitosmuoto kertoimen  $F_3$  taulukossa D.1:

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \times Q \times \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3 \quad (D.2)$$

Jos lämmönjohtuminen on kaksidimensionaalista, jäähtymisaika riippuu aineenpaksuudesta. Jäähtymisaika voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä D.3:

$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi\lambda\rho cd^2} \times \left( \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right) \quad (D.3)$$

Seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille yhtälö D.3 voidaan muuntaa yhtälöksi D.4, joka ottaa huomioon liitosmuoto kertoimen  $F_2$  taulukossa D.1:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 T_0) \times 10^5 \times \frac{Q^2}{d^2} \times \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 + \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \times F_2 \quad (D.4)$$

- Tehtävä 1.

Teräksen koostumukseksi ilmoitetaan 0,14%C - 0,22%Si - 0,95%Mn - 0,12%Cr - 0,08%Ni - 0,1%Mo - 0,039%S - 0,012%P - 0,15%Cu ja toimitustilana on kuumavalssattu ferriittis-perliittinen rakenne. Sinulle on kerrottu, että ko. teräksen hitsauksessa esiintyy kuumahalkeiluaittiutta. Onko ko. teräs lähtökohdiltaan kuumahalkeiluaittis vai onko joku muu halkeilutyyppe tai muu metallurginen ongelma todennäköisempi? Perustele vastauksesi.

Avuksi:

$$CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

$$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12.3Si - 5.4Mn - 1$$

$$CS = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$$

$$C_{rekv} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb; C_{rekv} = Cr + Mo + 0.7Nb$$

$$N_{iekv} = Ni + 30C + 0.5Mn; N_{iekv} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu$$

$$E = UI/v; Q = \eta E$$

- Tehtävä 2.

Hitsattaessa kuumavalssattua S355-lujuusluokan 50 mm paksuista rakenneteräksen päittäisliitoksen pohjapalkkoa MAG -menetelmällä on perusaineen HAZ:in karkearakeiselle alueelle syntynyt kylmähalkeamia. Mitä toimenpiteitä esität halkeamien välttämiseksi?

Avuksi:

$$CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$$

$$Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

$$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12.3Si - 5.4Mn - 1$$

$$CS = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$$

$$Crekv = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb; Crekv = Cr + Mo + 0.7Nb$$

$$Niekv = Ni + 30C + 0.5Mn; Niekv = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu$$

$$E=UI/v; Q=\eta E$$

- Tehtävä 3.

Kolme erityyppistä lujaa rakenneterästä on kukin valmistettu omalla tavallaan myötölujuusluokkaan noin 500 N/mm<sup>2</sup>. Selvitä näiden kolmen teräksen eli

a) normalisoidun teräksen

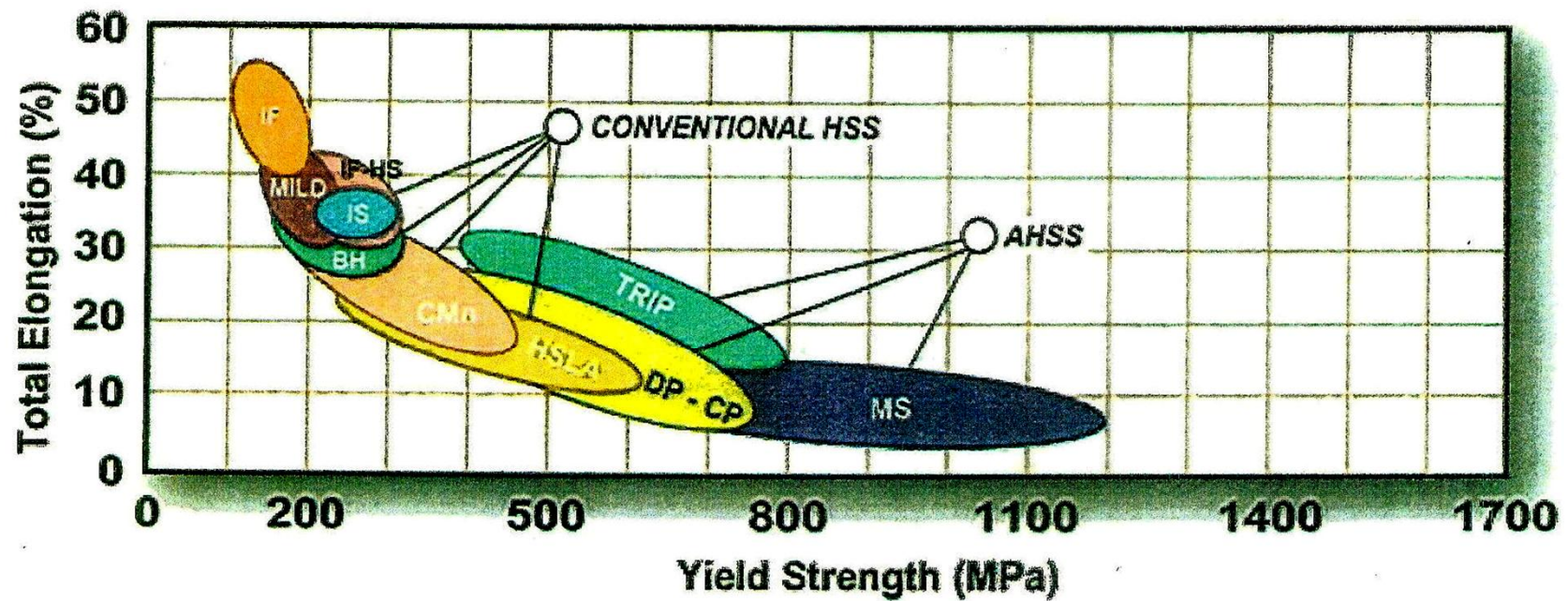
b) nuorrutetun teräksen

c) termomekaanisesti valssatun teräksen,

erot hitsattavuusominaisuuksissa. Aloita tarkastelu miettimällä, miten mainitut teräkset on valmistettu ja millainen kemiallinen koostumus ja mikrorakenne niissä on. Sen jälkeen pohdi, mitä kullekin teräkselle tapahtuu hitsauksessa. Mikä näistä teräksistä on hitsattavuudeltaan paras ja mikä huonoin?

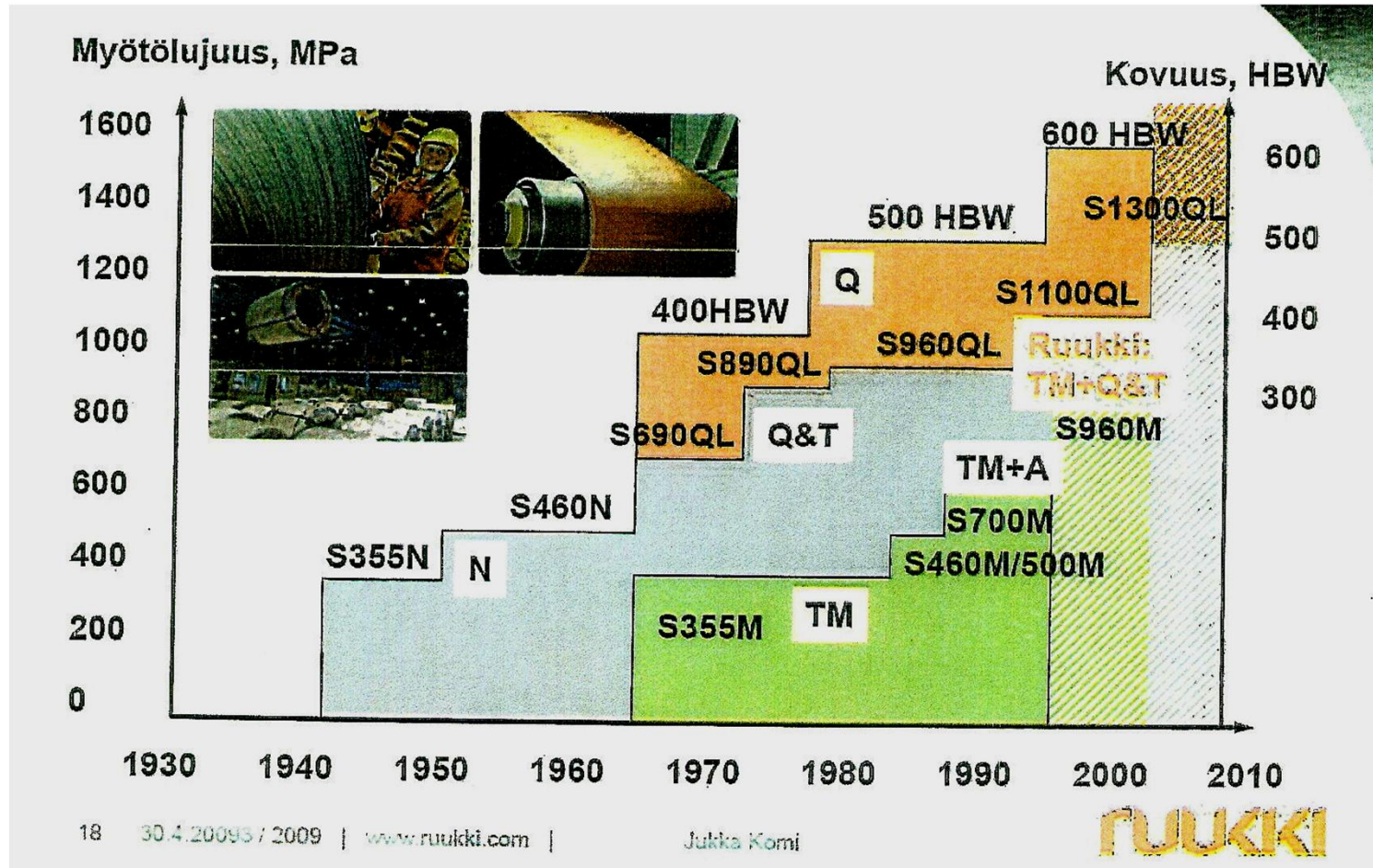
**Lujat teräkset**

# Mikä on suurlujuusteräs?

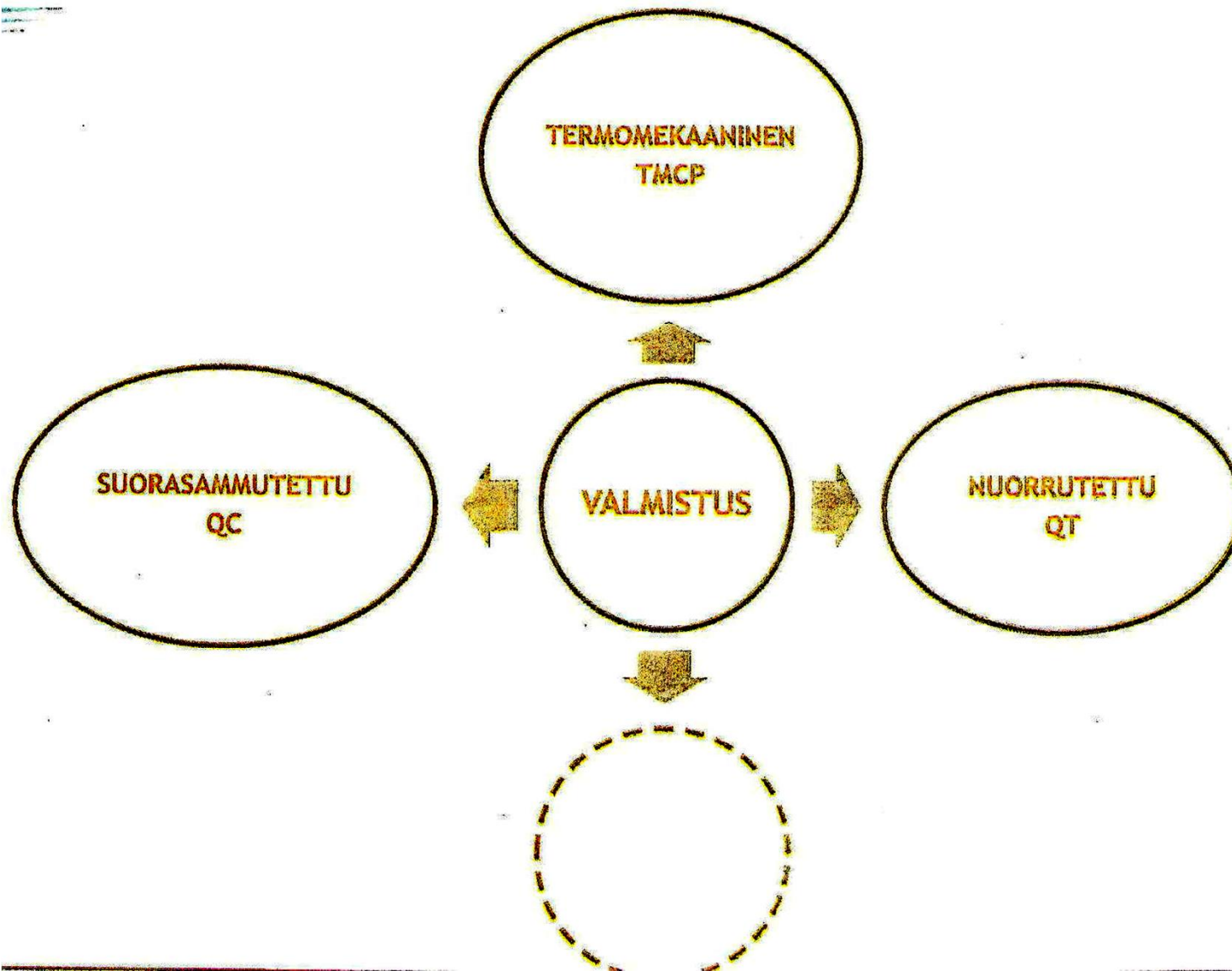


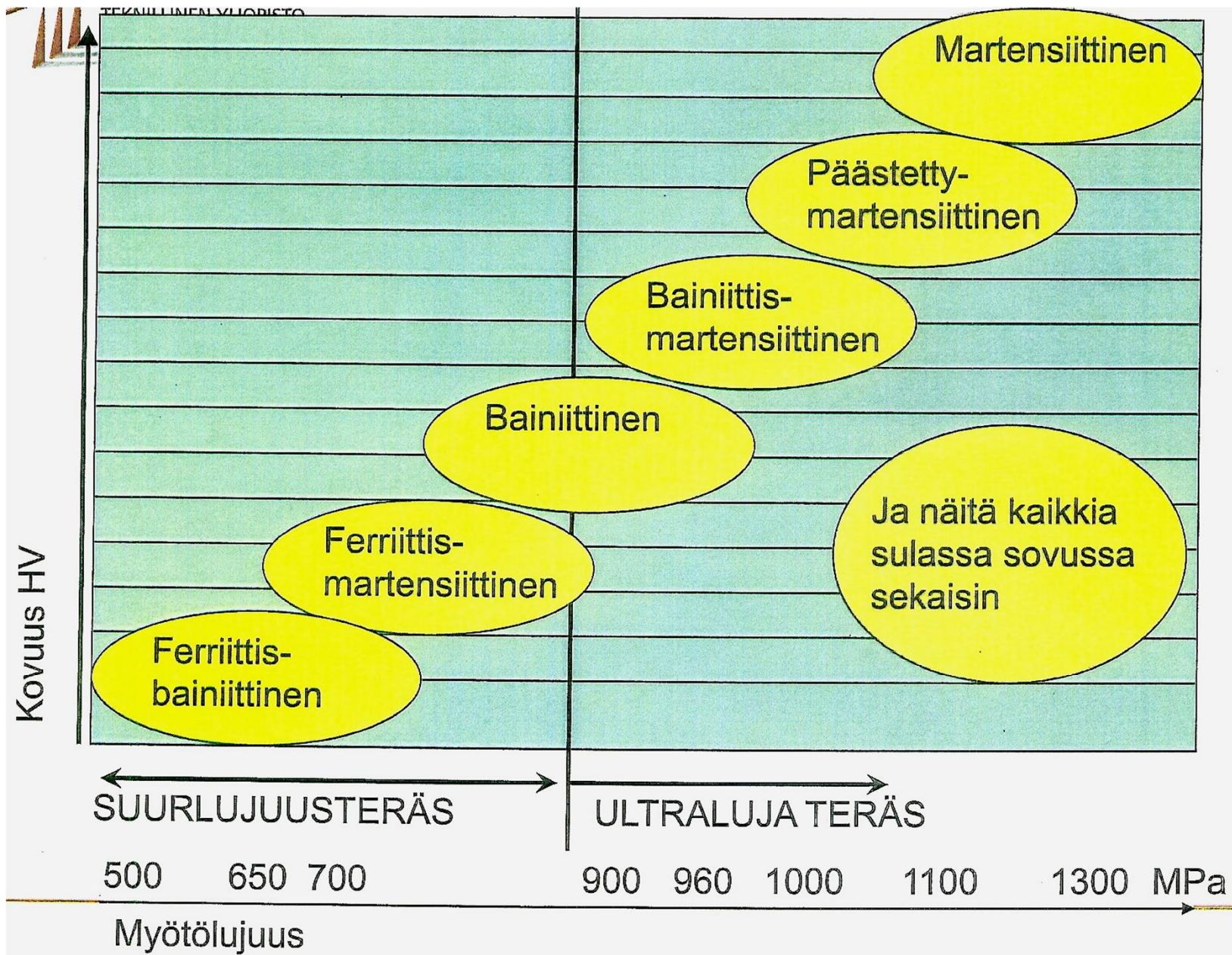
Lähde: WoldAutoSteel 2009

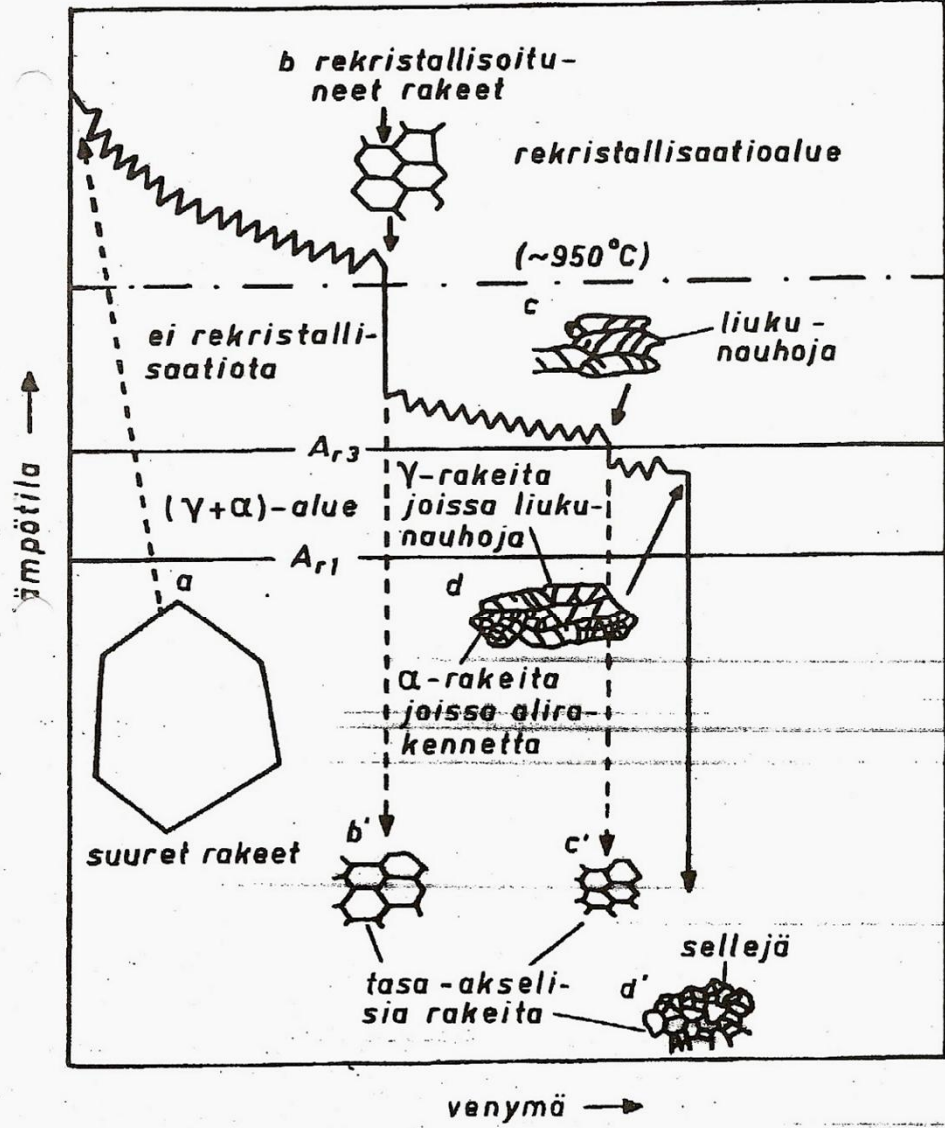
# Ultralujien terästen historia











KUVA R 13.3. Kontrolloidussa valssauksessa muodostuvia rakenteita.

# Lujien terästen edut

- Korkeammat suunnittelujännitykset
  - ainevahvuus pienemmäksi
  - painon vähennys
  - konstruktio yksinkertaisemmiksi
- Hitsaustyön ja lisääineen tarve pienenee
- Kulutuksen ja pintapaineen kestävyys kasvaa



- Lähtökohtaisesti valmistustekniikka helpottuu
- Materiaali- ja valmistuskustannukset alenevat
- Kuljetuskustannukset alenevat / hyötykuorma kasvaa (kuljetus- ja nostokalusto)
- Käyttöikä kasvaa

# Lujien terästen hitsaus

- Kylmähalkeilun välttäminen
  - lisäaineiden oikea käsittely
  - hitsausenergia  $Q_{\min}$
  - esikuumennus
- Liitoksen iskusitkeys
  - lisäaineen / hitsausmenetelmän valinta
  - hitsausenergia  $Q_{\max}$
- Lamellirepeämät / kuumahalkeamat
  - liitosten suunnittelu
  - hitsausarvot
- Hitsauksen käytännön suoritus
  - palkomäärä, hitsausasento, levitys jne.
- Hitsauksen jälkeiset toimet
  - väsymiskestävyyden parantaminen
  - lämpökäsittelyt
  - tarkastus

# Lähtökohtia ultralujien terästen hitsaukselle

- Ultralujat teräkset ovat hyvin hitsattavia alhaisen hiilipitoisuutensa vuoksi
- Kaikki perinteiset menetelmät soveltuvat näiden terästen hitsaukseen
- Laser- ja hybridihitsaus on pienen lämmöntuontinsa ansiosta erityisen käyttökelpoinen menetelmä
- Erityistä huomiota on kiinnitettävä lämmöntuontiin ja  $t_{8/5}$  aikaan
- Paksummilla ainespaksuuksilla tarvitaan esi- ja jälkilämmitystä

# Lämmöntuonti

- Suositeltavat lämmöntuonnit suurlujuusteräksille 1,0 – 2,0 kJ/mm
- Esimerkiksi Ultralujalle teräkselle OPTIM 960 QC Ruukki suosittelee lämmöntuontia 0,4 – 0,5 kJ/mm
- Arvot riippuvat paljon hitsattavan aineen lisäksi railomuodosta, levynpaksuudesta, lisäaineesta jne.

# Pehmeiden lisäaineiden edut

- Hyvä muodonmuutoskyky  
→ hitsiaine kykenee ottamaan turvallisesti vastaan syntyvät jännitykset ja muodonmuutokset
- Hitsausliitoksen pienempi jäännösjännitystila
- Hitsiaine ei altis karkenemiselle ja vetyhalkeamien synnylle
- Halvempia ja valikoimat laajempia



# Runsasseosteiset teräkset

Ruostumattomat ja haponkestävät teräkset

”Kirkkaat” teräkset, ”Jaloteräkset”

Tulenkestävät (Cr) ja kuumalujat (Mo) teräkset

# Runsasseosteiset teräkset

”Kirkkaat” teräkset (ruostumattomat ja haponkestävät)

-austeniittiset ruostumattomat teräkset, esim. AISI 304 (EN 1.4301) ja AISI 304L, AISI 301 (EN 1.4310, Core 301, AISI 301LN)

-austeniittiset haponkestävät teräkset, esim. AISI 316 (EN 1.4401), AISI 316L ja AISI 316Ti (X10CrNiMoTi18-10), Supra 316plus (EN 1.4420), Forta 316plus

-superausteniittiset haponkestävät, esim. AISI 904L, 254SMO, 654SMO ja Sanicro 25,28 ja 70; Sanicro 28 (EN1NiCrMoCuN31-27-4, SCC ja raerajakorroosio)

-duplex-teräkset, esim. 1.4362, 1.4462, SAF 2205, SAF 2507, UR45N, Avesta 2205, LDX 2101 ja LDX 2404 (1.4662)

-ferriittiset ruostumattomat teräkset, esim. ASTM 430 (EN 1.4016), 1.4003, 1.4589

-martensiittiset ruostumattomat teräkset

- niukkahiiliset  $C < 0,15\%$ , esim. X11CrMoWVNb9-1-1, X10CrMoVNb9-1
- keskihiiliset  $0,15\% < C < 0,5\%$ , esim. X20CrMoV12-1
- runsashiiliset  $C > 0,6\%$

-tulenkestävät austeniittiset (esim. 253 MA) ja ferriittiset teräkset (Cr)

-kuumalujat runsasseosteiset teräkset (Mo), Huom! Kuumalujat seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset: 13CrMo4-5, 10CrMo9-10

-SEKALIITOKSET, esim. ”musta” S235 - ”kirkas” AISI 304L, kuumalujat 10CrMo9-10 – X10CrMoVNb9-1

## Ruostumaton teräs

- luja ja kestävä, korroosionkestävä, lämmönkestävä, esteettinen, hygieeninen, huoltovapaa, kustannustehokas, kierrätettävä
- passiivikalvo edellyttää vähintään 11-12% kromia, voimakas syöpymiskestävyyden paraneminen 16-18% kromia kohdalla
- nikkeli tuo austeniittisuuden, molybdeeni parantaa edelleen syöpymiskestävyyttä (erityisesti haponkestävyys)
- austeniittinen 18Cr + 10Ni lienee tavallisin ruostumaton teräs tänä päivänä, runsaimmillaan ollaan 20Cr + 25Ni + 6,5Mo luvuissa, jopa enemmänkin
- fysikaaliset ominaisuudet: austeniittiset ovat ei-magneettisia, austeniittisten ja ferriittis-austeniittisten lämmönjohtavuus on pienempi (W/Km 14-16 vs. 23-25, hiiliteräs 52-63) ja lämpölaajenemiskerroin on suurempi (10-6/K 13-19 vs. 10-12, hiiliteräs 12) kuin muiden runsasseosteisten terästen. Siksi austeniittisten ja ferriittis-austeniittisten vetelyt eli muodonmuutokset hitsauksessa ovat ferriittisiä suurempia.
- haurasmurtuma-alttius – austeniittisilla ei transitiolämpötilaa

# Runsasseosteiset teräkset ja niiden hitsattavuus

- Austeniittiset ( $\gamma$ ) ruostumattomat teräkset ovat pääsääntöisesti hyvin hitsattavia. Hitsattavuusongelmat liittyvät yleisimmin hitsien kuumahalkeiluun ja korroosionkestävyyteen.
- Martensiittiset ( $\alpha'$ ) ruostumattomat teräkset ovat vaativia hitsattavuudeltaan. Keskeisin ongelma on kylmähalkeilu. Uudemmat hiukkahiilliset laadut ovat vähemmän ongelmallisia.
- Ferriittiset ( $\alpha$ ) ruostumattomat teräkset ovat vaikeita hitsata. Ongelmana ovat haurausilmiöt, mm. rakeenkasvu, 475°C-hauraus ja sigmahauraus.
- Duplex-teräkset ( $\alpha+\gamma$ ) ovat selvästi paremmin hitsattavia kuin martensiittiset ja ferriittiset teräkset, mutta huonompia kuin austeniittiset teräkset. Ongelmia ovat haurausilmiöt ja korroosionkestävyys sekä ferriitti-austeniitti-tasapainon säilyttäminen

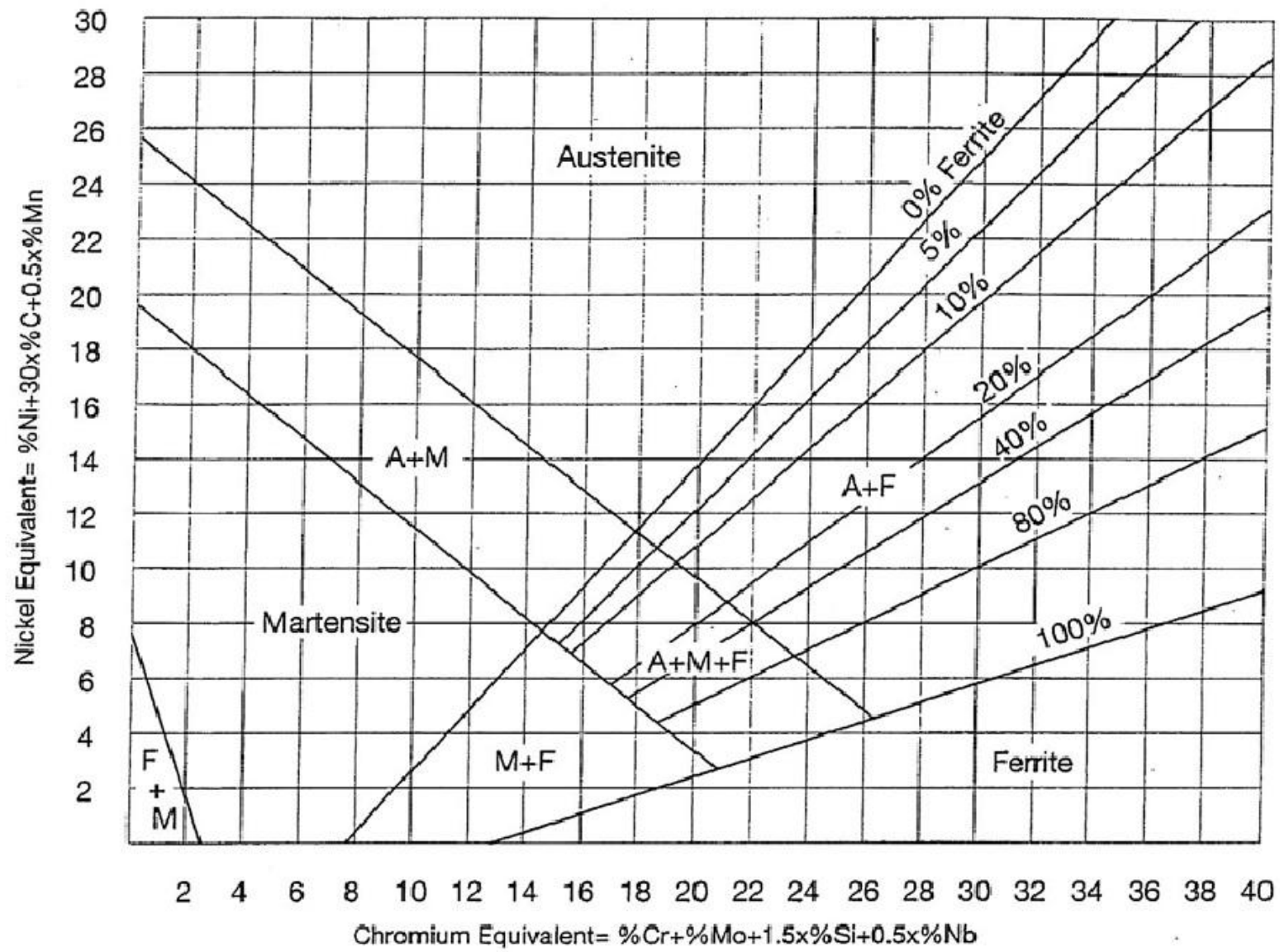
**Taulukko 1**

Mikrorakenne	Tyyppi	C % (max.)	Cr %	Ni %	Mo %	Muut %
Ferriittiset	430	0,10	16,0–18,0	max. 0,5	–	–
	S44400	0,025	17,0–19,0	max. 0,5	2,0–2,5	Ti-stab.
Ferriittis- austeniittiset (duplex-teräkset)	329	0,10	24,0–27,0	4,5– 6,0	1,3–1,8	N = 0,10–0,20
	S31803	0,03	21,0–23,0	4,5– 6,5	2,5–3,5	
Austeniittiset	304	0,05	17,0–19,0	8,0–11,0	–	Ti-stab.
	321	0,08	17,0–19,0	9,0–12,0	–	
	316	0,05	16,0–18,5	10,5–14,0	2,5–3,0	
	304L	0,030	17,0–19,0	9,0–12,0	–	
	316L	0,030	16,0–18,5	11,5–14,5	2,5–3,0	
	310S	0,08	24,0–26,0	19,0–22,0	–	
	317L	0,030	17,5–19,5	14,0–17,0	3,0–4,0	
	N08904	0,025	19,0–21,0	24,0–26,0	4,0–5,0	
Martensiittiset	420	0,4	12,0–14,0	max. 1,0	–	–
Martensiittis- austeniittiset	–	0,1	12,0–14,0	5,0– 6,0	–	–

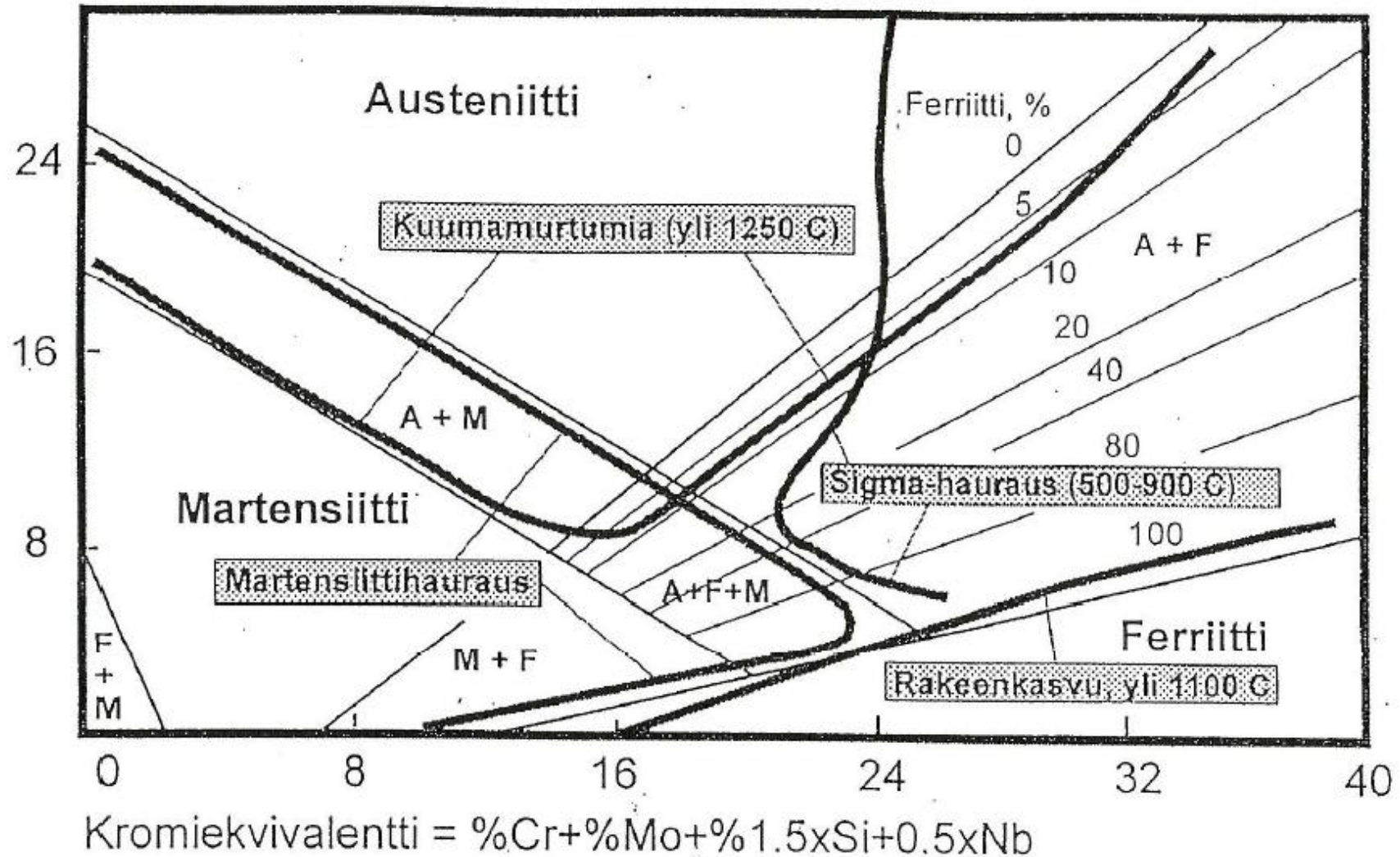
# Schaefflerin diagrammi (Anton Schaeffler 1949)

- Schaefflerin diagrammi soveltuu hitsattavuuden arviointiin ruostumattomille (esim. AISI 304 ja 304L) ja haponkestäville (esim. AISI 316 ja 316L) teräksille. Lisäksi sitä voidaan käyttää runsaammin molybdeenia sisältäville teräksille, kuten esim. Avesta 254 SMO sekä rajoitetusti myös duplex-teräksille. Tärkeä alue on sekaliitosten hitsaus.
- Bystramin alueet (1956), “vaaralliset alueet”
- DeLong –diagrammi (1953, modifioitu 1973)
- WRC-1992 –diagrammi (aik. 1988)
- Espy –diagrammi (1982)

# Schaeffler Diagram



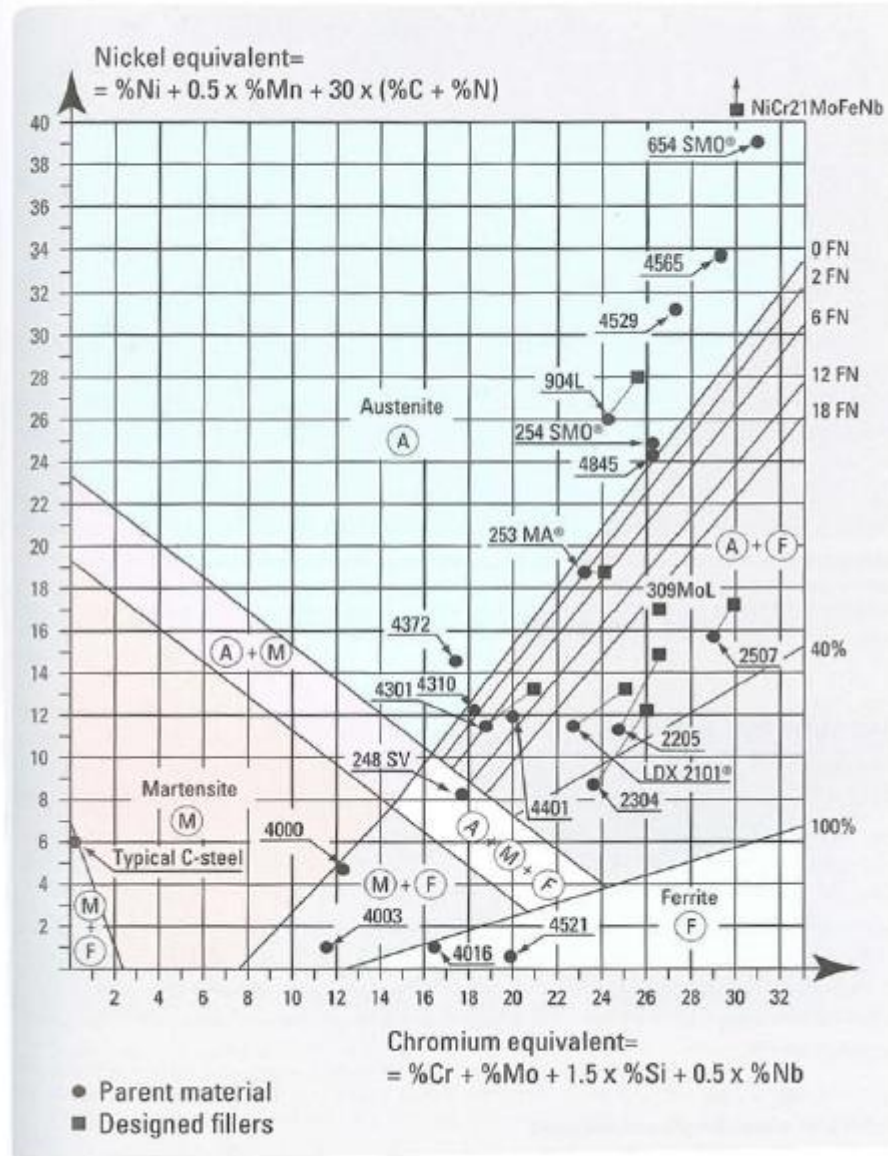
$$\text{Nikkeliekvivalentti} = \%Ni + 30x\%C + 0.5\%Mn$$



Kuva 4. Ruostumattomien terästen haurausilmiöiden esiintyminen koostumus kentässä Schaeffler-diagrammilla kuvattuna.



### Constitution diagrams



## Case: Putkisto kuunalujista teräksistä

Korkeahkoon käyttölämpötilaan valmistetaan putkisto ns. kuunalujista teräksistä. Materiaaleina käytetään seuraavia EN-merkinnöillä olevia teräslajeja:

- 13CrMo4-5
- 10CrMo9-10
- X10CrMoVNb9-1

Mitä merkinnöistä on luettavissa kemiallisen koostumuksen suhteen?

Esitä periaatteet seuraavien eripariliitosten hitsauksille ja lämpökäsittelyille:

- 13CrMo4-5 – 10CrMo9-10
- 10CrMo9-10 – X10CrMOVNb9-1

## Case: Teräsryhmät

Mistä rst-teräsryhmästä on kysymys seuraavissa tapauksissa. Millainen on niiden hitsattavuus? Perustelut?

- a) 0,08C-0,25Si-1,28Mn-19,2Cr-12,2Ni-2,8Mo-0,011S-0.016P-0,002V-Ti5xC, tila kuumavalssattu
- b) 0,20C-0,39Si-0,62Mn-0,010P-0,012S-11,25Cr-0,45Ni-1,08Mo-0,3V, tila nuorrutettu
- c) 0,01C-0,042Si-0,44Mn-20,2Cr-18,1Ni-6,25Mo-0,001S-0,002P-0,20N-0,25Cu, tila kuumavalssattu
- d) 0,025C-0,020Si-0,90Mn-25,2Cr-6,90Ni-4,2Mo-0,015P-0,0012S-0,25N, tila kuumavalssattu

## Case: Kloridiputkisto AISI316L:stä 1.4547-teräkseen

Sellutehtaan valkaisuutornin kloridiputkisto (vahva kloridiympäristö) vaihdetaan haponkestävästä AISI 316L –teräksestä 1.4547 –teräkseen, jonka koostumus on 0.01%C, 20%Cr, 18.5%Ni, 6.5%Mo, 0.20%N ja 0.5%Cu. Avesta 254SMO (EN2CrNiMoN20-18-6) on tyypillinen tämän ryhmän teräs.

Mitä hitsausmetallurgisia erityispiirteitä teräksen vaihtaminen tuo tullessaan esim. lämmöntuonnin ja lisäaineen valinnan suhteen vai tuoko mitään? Entä jos haponkestävä AISI 316 ei olekaan L-laatu, vaan pelkkä AISI 316. Muuttuuko tilanne silloin?

## Case: Schaefflerin diagrammi - sekaliitos

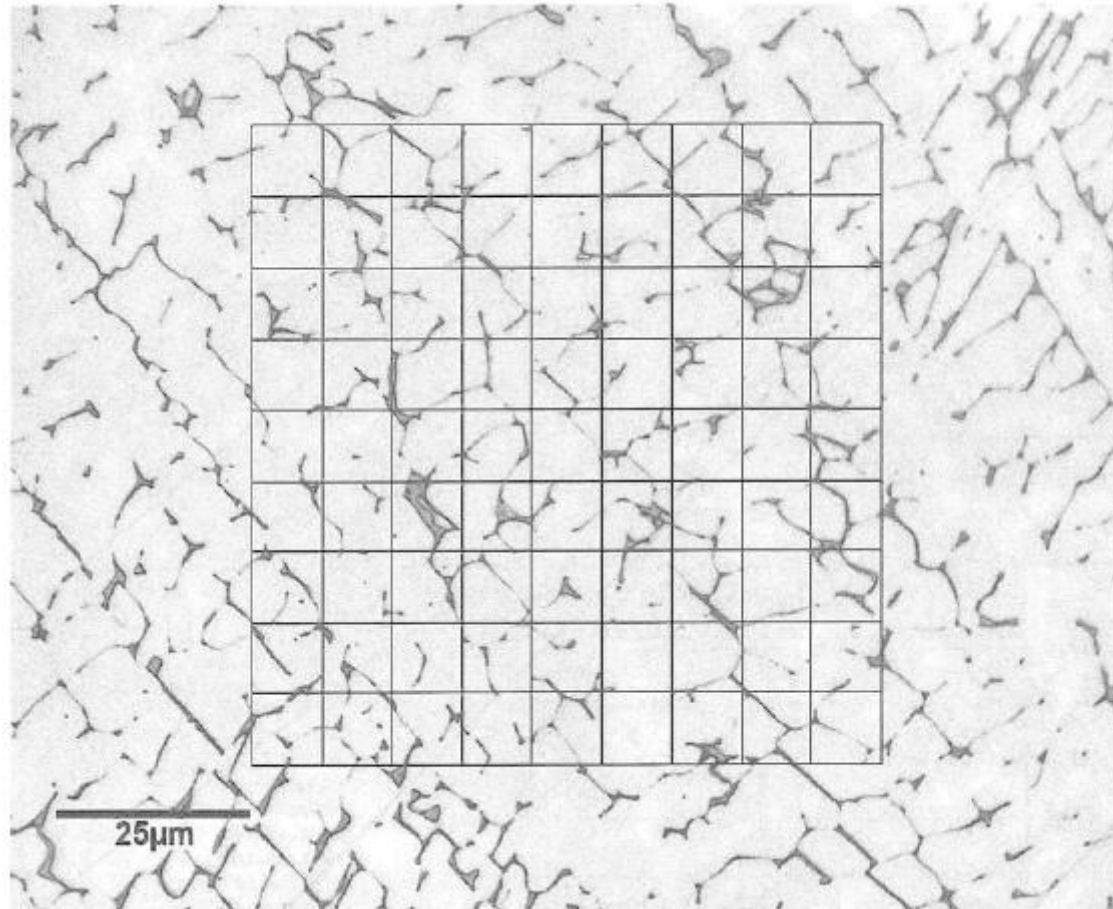
- Seostamattoman/niukkaseosteisen ferriittisen teräksen (esim. S355) ja runsasseosteisen austeniittisen teräksen (esim. AISI 304L) sekaliitoksia esiintyy enenevässä määrin.
- Esitä tällaisen sekaliitoksen hitsauksen peruseriaatteen. Tarkastele hitsausta erityisesti metallurgiselta kannalta. Mitä metallurgisia ongelmia liitoksessa voi esiintyä, jos asiat hoidetaan väärin? Mikrorakenteet, lisäaineet, sekoittuminen, lämmöntuonti, halkeama- ja haurastumisilmiöt ...?

# Korroosiolajit

- Yleiskorroosio
  - passiivikalvo on tuhoutunut tasaisesti laajalta alueelta
  - kun yleiskorroosio on pienempi kuin 0,1 mm/vuosi → ruostumaton teräs
- Galvaaninen korroosio
  - kaksi sähkökemiallisesti toisistaan poikkeavaa metallia koskettaa toisiaan sopivassa elektrolyytissä, sähkökemiallinen jännitesarja
- Pistekorroosio
  - paikallinen, pistemäinen passiivikalvon rikkoutuminen, esim. kloridiympäristö
  - suotautuminen
- Rakokorroosio
  - muistuttaa pistekorroosiota, mutta kehittyy ”ahtaissa” paikoissa
  - ”happi puuttuu”
- Jännityskorroosio
  - korroosio-olosuhde ja samanaikaisesti vetojännitys, esim. hitsauksen aiheuttama
- Korroosioväsyminen
  - korroosio-olosuhde ja samanaikaisesti väsyttävä kuormitus
- Raejakorroosio
  - herkistyminen, kromiköyhät alueet raerajojen vieressä
  - veitsenviiltokorroosio (stabiloidut laadut)

# Austeniittiset ruostumattomat teräkset

- Jähmettymisjärjestys
  - A: sula jähmettyy täysin austeniittisena ja mikrorakenne pysyy täysin austeniittisena huoneenlämpötilaan saakka.
  - AF: sulan jähmettyminen alkaa ja etenee austeniittisena, mutta dendriittien välissä olevasta loppusulasta muodostuu  $\delta$ -ferriittiä, jonka pitoisuus huoneenlämpötilassa jää pieneksi, alle 5 %.
  - FAF: jähmettyminen alkaa  $\delta$ -ferriittinä ja jatkuu austeniittisena. Jähmettymisen loppuvaiheessa suotautuminen tuottaa jäännössulaan uudelleen  $\delta$ -ferriittiä.
  - FA: jähmettyminen alkaa ja etenee pääosin  $\delta$ -ferriittinä ja austeniittia muodostuu loppusulaan ja sen muodostus jatkuu kiinteässä tilassa. Huoneenlämpötilassa  $\delta$ -ferriittiä hitsissä on 2–15 %.
  - F: sula jähmettyy kokonaan  $\delta$ -ferriittinä. Rakenteeseen syntyy austeniittia vasta kiinteässä tilassa. Huoneenlämpötilassa  $\delta$ -ferriitin määrä on yleensä yli 15 %.
- Jähmettymisjärjestys määräytyy koostumuksen ja jähmettymisolosuhteiden (jähmettymisnopeus) mukaan.





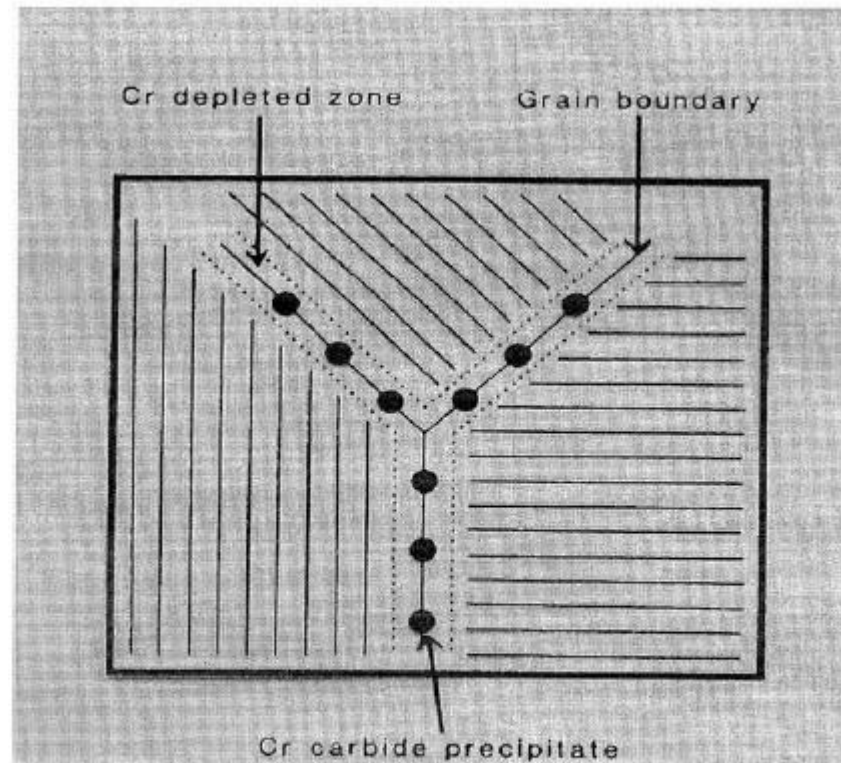
- Hitsisulan koostumus ja jossakin määrin hitsin jähmettymisnopeus vaikuttavat seuraavasti:
- Hammar-Svenssonin parametri  $C_{req}/Ni_{eq}$ 
  - Kun  $C_{req}/Ni_{eq}$  ylittää arvon noin 1.5, muuttuu jähmettyminen AF:stä FA(F):ksi
  - Kun  $C_{req}/Ni_{eq}$  ylittää arvon 2, muuttuu jähmettyminen FA:sta F:ksi
  - Kun jähmettymisnopeus kasvaa selvästi (esim. nopea laserhitsaus), muuttuu jähmettyminen austeniittisempaan suuntaan

## - MIKROSUOTAUTUMINEN

- Jähmettymisen edetessä seosaineet jakautuvat sulan ja kiinteän faasin välillä
  - Useimmat seosaineet suotautuvat kohti dendriittien välejä, mutta eri voimakkuuksilla
  - Suotautumisprofiili riippuu jähmettymisjärjestyksestä
- Jähmettymisen jälkeen myös kiinteässä tilassa tapahtuu seosaineiden jakautumista
  - Cr-, Mo- ja Si -pitoisuudet ovat korkeampia  $\delta$ -ferriitissä
  - Ni-, Mn- ja N-pitoisuudet ovat korkeampia austeniitissa
- Suotautumisen vaikutukset
  - Kuumahalkeiluvaara kasvaa, mikä johtuu epäpuhtauksien (S, P) ja seosaineiden (Si, Ti, Nb) suotautumisesta loppusulaan ja raerajoille
  - Hitsiaineen korroosionkestävyys heikkenee paikallisesti (pistekorroosiokestävyys), mikä johtuu siitä, että dendriittien väliin jää nimelliskoostumusta vähemmän Cr ja Mo
  - Sigmahaurastumisessa dendriittien rajoilla Cr- ja Mo-pitoisuudet ovat nimelliskoostumusta korkeammat

# Austeniittisten ruostumattomien terästen herkistyminen ja raerajakorroosio

- Voi tulla ongelmaksi HAZ:issa, kun terästä hehkutetaan 500-800°C
  - lämpökäsittelyjen yhteydessä
  - monipalkohitsauksessa
  - hitsattaessa suurella lämmöntonilla
- Cr ja C muodostavat raerajakarbideja, jotka alentavat Cr:n määrän raerajojen läheisyydessä liian alhaiseksi (<12%Cr). Tämä johtaa raerajakorroosioon.
- Herkistymistä voidaan estää
  - käyttämällä matalahiilisiä teräksiä: C 0.02-0.03%, ns. L-laadut
  - käyttämällä Ti- tai Nb-stabiloituja teräksiä, joissa hiili on sidottu Ti- tai Nb-karbideiksi
- Rakenne voidaan tasoittaa liuotushehkutuksella, noin 1100-1150°C



Herkistymisen periaate

# Seosaineiden suotautuminen/hitsiaineen korroosionkestävyys

- Kromin ja molybdeenin suotautuminen
- Kriittinen pistekorrosiolämpötila (CPT) korreloi kloridiympäristössä esim. parametrin PRE (Pitting Resistance Equivalent) kanssa.
- $PRE = \%Cr + 3,3x\%Mo + 16x\%N$
- Rakokorroosioindeksi CRE =  $\%Cr + 3,7x\%Mo + 30x\%N$
- Mo suotautuu erittäin voimakkaasti → lämmöntuontia on rajoitettava (<1,5-2 kJ/mm), on vältettävä levityслиikettä ja on valittava yhtä astetta seostetumpi lisäaine, erityisesti Mo suhteen
- AISI304L → AISI316L(2,5Mo) → AISI904L(4,5Mo) → 254SMO(6,5Mo) → 654SMO(9Mo) → Sanicro 28 (EN X1NiCrMoCuN31-27-4) → ???

Molybdeenin minimi- ja maksimipitoisuuksia lämpökäsittelemättömässä hitsissä (mitattu SEM/EDS-analysaattorilla)

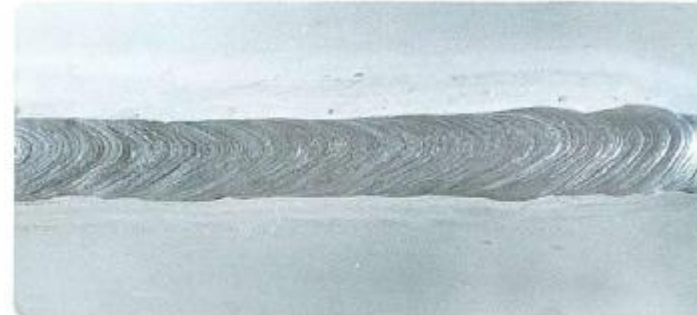
Hitsiaine (luetteloarvo)	Mo-pitoisuus, %		
	Keskiarvo	Maksimi	Minimi
18Cr-17Ni-4.3Mo-N	4.3	5.4	3.1
20Cr-25Ni-6.5Mo-N	6.5	9.4	5.0
21Cr-60Ni-9.0Mo	9.0	11.6	7.2

# Duplex-terästen hitsattavuus

- Tavoitteena yhdistää austeniittisten ruostumattomien terästen ja ferriittisten ruostumattomien terästen hyviä ominaisuuksia.
- Ferriitti-austeniitti –tasapaino tärkeää: 50-50 yleensä tavoitteena.
- Uusissa laaduissa nikkeliä on korvattu mangaanilla, esim. LDX2101 (5%Mn) tai 1.4662 LDX2404 (3%Mn)
- Hitsattavuus lähellä tavanomaisia austeniittisiä ruostumattomia teräksiä. Hieman huonompia.
- Suuri lämmöntuonti (yläraja 2 – 2,5 kJ/mm) johtaa austeniitin määrän lisääntymiseen, pieni lämmöntuonti ferriitin määrän lisääntymiseen. Lämmöntuontirajat melko tiukat.
- Lisäaineet ovat perusainetta vastaavia tai hieman enemmän nikkeliä sisältäviä.



FCAW: Smooth, some small spatter.



MMA: Small spatter.



TIG: Good, clean and smooth weld.

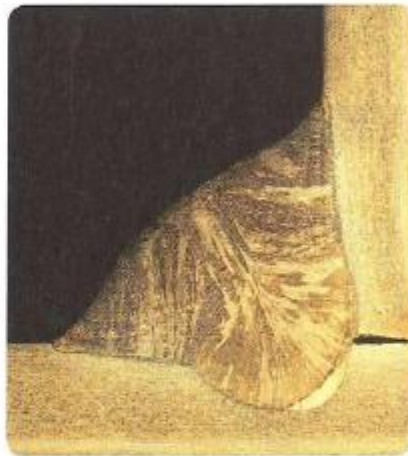


MAG short arc: Imbedded slag in the weld and spatter on the parent metal.





MMA: Typical good appearance of a vertical-up weld.



Convex MAG short arc weld - potential fatigue initiation site.

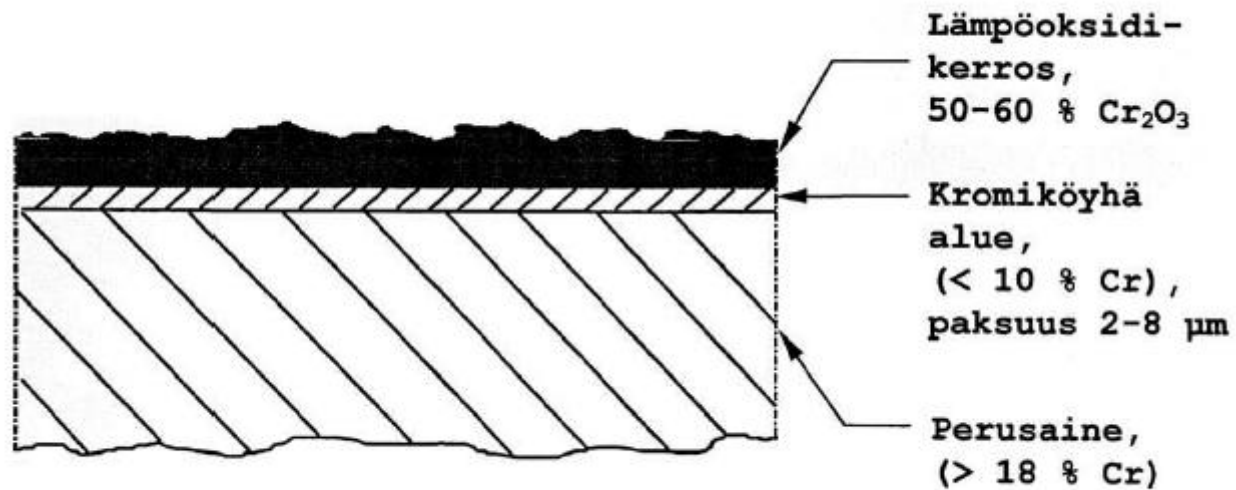


Good concave TIG fillet weld.

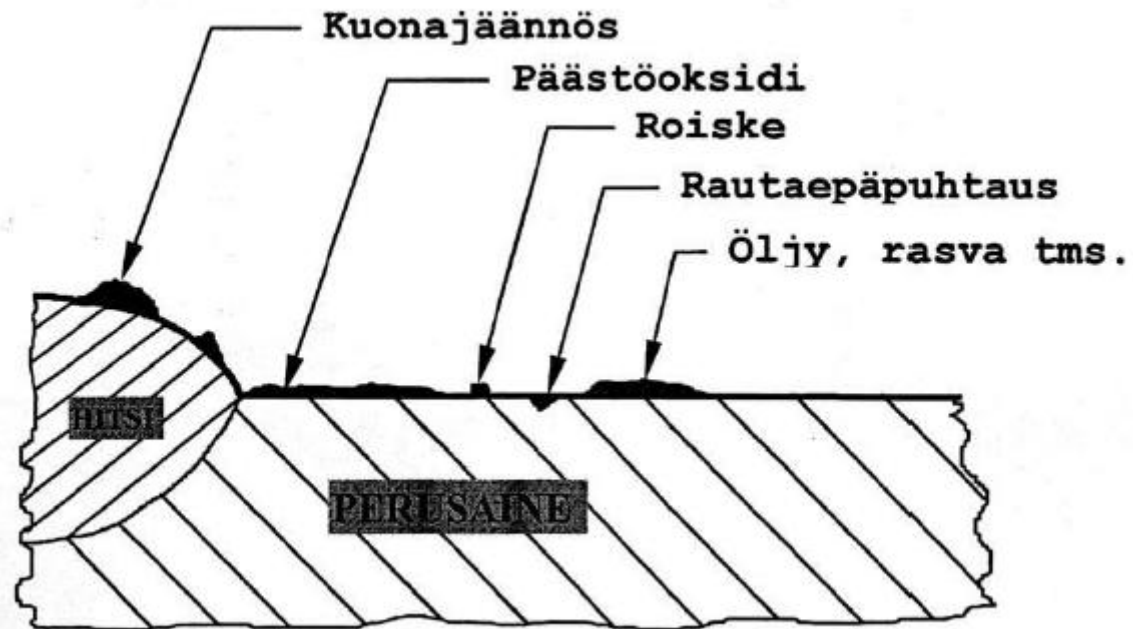


Good flat FCAW.

# Lämpövyöhyke hitsauksen jälkeen



# Teräksen pinta hitsauksen jälkeen



# Jälkikäsittelymenetelmät

- Mekaaniset menetelmät
  - teräsharjaus
  - paineilmakuulapuhallus
  - hionta
- Kemialliset menetelmät
  - peittäus
    - tahna-, ruisku- tai kylpypeittäus
    - 0,5-6% fluorivetyhappo- ja 8-20% typpihapposeos
    - oikein suoritettuna antaa parhaimman lopputuloksen
  - passivointi
    - typpihappo
  - elektrolyyttinen kiillotus