

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. 2021. Käytännön hitsausmetallurgiaa. Osa 5 : austeniitin hajaantuminen rakenneterästen hitsauksessa. Hitsaustekniikka. 73 (6), 33-37.



Käytännön hitsausmetallurgiaa. Osa 5 – Austeniitin hajoantuminen rakenneterästen hitsauksessa –

Timo Kauppi

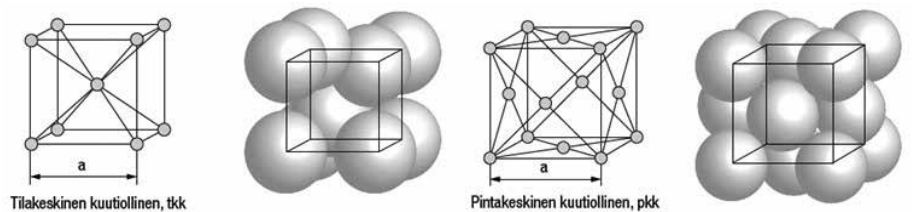
Ferriittisten terästen hitsauksessa hallitseva metallurginen ilmiö on hitsausliitoksen muutosvyöhykkeessä tapahtuva austeniitin syntyminen ja sen hajoantuminen. Nämä ilmiöt eivät ole monimutkaisia, kunhan vain tietyt perusasiat ovat tiedossa. Näistä yksi on hiilen liukoisuuden erot austeniitissa ja ferriitissä ja toinen on jäähtymisnopeuden vaikutus austeniitin hajoantumiseen.

Tämä artikkelisarjan ensimmäisessä osassa (HT4/2020 Käytännön hitsausmetallurgiaa. Osa 1: Terästen faasimuutokset) käsiteltiin faasimuutoksiin liittyviä perusasioita. Tässä jutussa puolestaan täsmennetään teknisen raportin CEN ISO/TR 15608 materiaaliyhymien 1–3 mukaisissa teräksissä hitsauksen yhteydessä muutosvyöhykkeessä tapahtuvaa austenitoitumista ja sitä seuraavaa austeniitin hajoantumista.

Allotropia eli miksi austeniittia ylipäättään syntyy

Rauta (Fe) on alkuaine, jonka allotropiset kidemuodot ovat tilakeskinen kuutiollinen ferriitti (α -rauta) ja pintakeskinen kuutiollinen austeniitti (γ -rauta), kuva 1. Allotropia eli polymorfia tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että materiaalilla on useampi kuin yksi kiderakenne eri olosuhteissa. Tämä allotropia periytyy myös ferriittisiin materiaaliyhymien 1–6 mukaisiin hitsattaviin teräksiin, onhan niissä seosaineena rautaa selvästi eniten (esimerkiksi materiaaliyhyelmä 1 vähintään n. 95 %).

Näiden kahden kidemuodon esiintymis- eli stabiiliisuusalueet selviävät Fe-C -tasa-

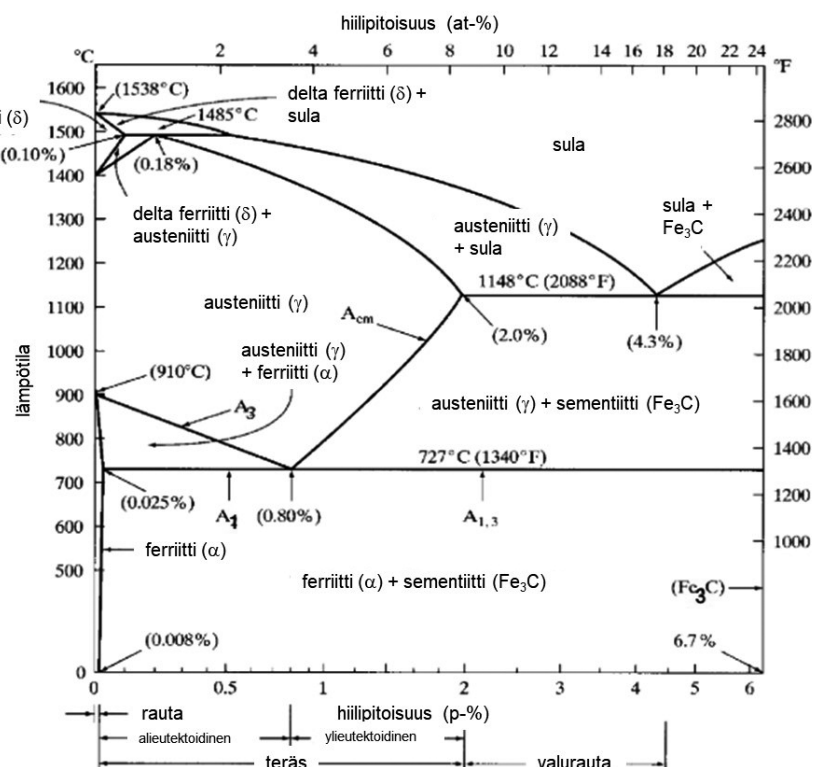


Kuva 1. Raudan allotropiset kidemuodot, tilakeskinen kuutiollinen ferriitti ja pintakeskinen kuutiollinen austeniitti.

painopiiroksessa karkealla tasolla, kuva 2. Sen mukaan austeniitti on ainut stabiili faasi alieutektoidisilla teräksillä ($C < 0,80$ %) A_3 -faasimuutoslämpötilan yläpuolella aina sulamispisteeseen saakka laajalla hiilipitoi-

suusalueella. Huom. Tarvittaessa voit kerrata tähän liittyviä termejä ja ilmiöitä artikkelisarjan ensimmäisestä osasta.

Tasapainopiiroksessa nähdään, että A_1 -faasimuutoslämpötilan alapuolella stabiili-



Kuva 2. Rauta-hiili (Fe-C) -tasapainopiiros (pdfslide.net 2020, mukailten).

faasit ovat ferriitti ja sementiitti eli rautakarbidi (Fe_3C). Sementiittiä syntyy sen vuoksi, koska ferriittiin ei "mahdu" eli metallurgian termein liukene hiiltä kuin hyvin vähän. Liukoisuus on huoneenlämpötilassa vain 0,008 % ja koska esim. kuumavalssatuissa hitsattavissa rakenneteräksissä käytännön hiilipitoisuudet vaihtelevat suurin piirtein välillä 0.05–0,25 %, niin syntyvä rautakarbidi sitoo tarjolla olevan ns. vapaan hiilen.

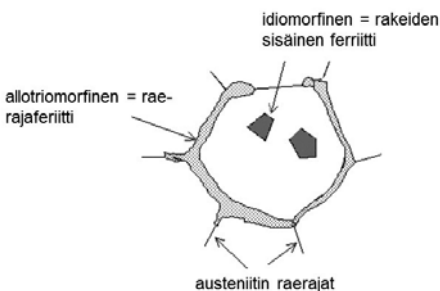
Tästä kaikesta seuraa se, että hitsauksen lämpösykli saa aikaan hitsattavan perusaineen austeniitumista muutosvyöhykkeen alueella. Se kuinka laajalla alueella riippuu hyvin pitkälle perusaineen kemiallisesta koostumuksesta, käytettävistä hitsausarvoista, liitostyypistä ja aineenpaksuudesta.

Huom. Tasapainopiirroksia tarkasteltaessa pitää muistaa, että ne pätevät vain erittäin hitaan jäähtymisen ollessa kyseessä, joka ei toteudu missään nimessä hitsauksen yhteydessä.

Esieutektoidisen ferriitin erkautuminen

Kun lämpötila laskee hiilipitoisuudesta riippuvan A_3 -lämpötilan alapuolelle, alkaa rakenteeseen erkautumaan esieutektoidista ferriittiä (engl. Proeutectoid ferrite). Jäähtymisnopeuden ollessa pieni tärkeimpiä ydintymispaikkoja ovat raerajat ja teräksessä olevat sulkeumat. Syntyvän ferriitin ydintymiseen tarvitaan alijäähtymistä eli se alkaa käytännössä vasta A_3 -lämpötilan alapuolella. Tarvittava alijäähtymisen riippuu jäähtymisnopeudesta ollen sitä suurempi mitä suurempi jäähtymisnopeus on.

Kun puhutaan pienestä alijäähtymisestä ja lähellä tasapaino-olosuhteita tapahtuvasta esieutektoidisen ferriitin erkautumisesta eli jäähtymisnopeuden ollessa riittävän pieni, esitetään kirjallisuudessa sille kaksi päämorfologiaa eli muotoa: allotriomorfinen (engl. Allotriomorphic, ALF) ja idiomorfinen (engl. Idiomorphic, IDF). Allotriomorfinen ferriitti ydintyy austeniitin raerajoille ja kasvaa raerajojen suuntaisesti tai kohtisuoraan niihin nähden. Idiomorfinen ferriitti syntyy taas rakeiden sisälle (engl. intragranular) siellä



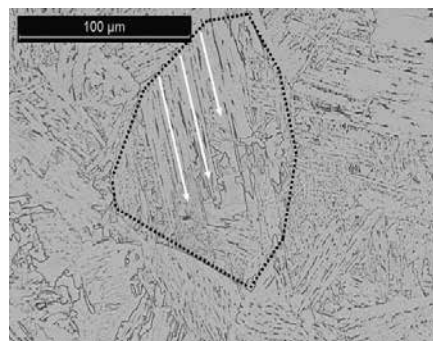
Kuva 3. Allotriomorfinen ja idiomorfinen ferriitti (Bhadeshia 2021 mukailleen).

oleviin sulkeumiin (Dubé ym. 1958; Aaronson 1956). Termeille allotriomorfinen ja idiomorfinen ei ole esitetty suomennosta alan kirjallisuudessa, mutta voitaneen yksinkertaisesti puhua raerajaferritistä ja rakeiden sisäisestä ferriitistä, kuva 3.

Lämpötilan laskiessa kohti A_1 -lämpötilaa esieutektoidisen ferriitin määrä kasvaa ja sen kanssa tasapainossa olevan austeniitin hiilipitoisuus kasvaa vipusäännön mukaisesti. Syntyvän esieutektoidisen ferriitin määrä riippuu lämpötilasta ja teräksen hiilipitoisuudesta ja on tasapainon mukaisessa tarkastelussa A_1 -lämpötilassa esim. 0,20 % hiiltä sisältävässä teräksessä n. 75 %.

Esieutektoidisen ferriitin lopullinen morfologia riippuu sen muodostumislämpötilasta ja jäähtymisnopeudesta. Se voi olla: 1. polygonaalista, 2. kvasipolygonaalista, 3. Widmanstättenin ferriittiä tai 4. askulaarista ferriittiä riippuen lähinnä jäähtymisnopeudesta, austeniitin raekoosta ja tarjolla olevista heterogeenisistä ydintymispaikoista. Polygonaalinen ferriitti muodostuu kaikkein korkeimmilla austeniitin faasimuutoslämpötiloilla sekä hitaimmilla jäähtymisnopeuksilla matalahiilisisissä teräksissä. Kvasipolygonaalinen ferriitti syntyy matalammassa lämpötiloissa kuin polygonaalinen ferriitti ja sitä syntyy yleensä vain erittäin matalahiilisisissä teräksissä. Faasimuutos tapahtuu stabiiliin yksifaasisen austeniitin ja yksifaasisen ferriitin alueella niin sanottuna massiivimuodonmuutoksena. Askulaarinen ferriitti kuvaa faasirakennetta, jossa ferriittilevyt ovat ydintyneet teräksessä oleviin sulkeumiin austeniittirakeiden sisälle. (Ritola 2016, 15–18; Hannula ym. 2020, 65)

Suurilla jäähtymisnopeuksilla austeniitin raerajoille ja mahdollisesti jo erkautuneeseen raerajaferrittiin muodostuu neulasmaista Widmanstättenin ferriittiä. Näin käy erityisesti hitsauksen yhteydessä karkearakeisessa muutosvyöhykkeessä, kuva 4. Muutosvyöhykkeessä olevia alueita (CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ ja SCHA) käytiin läpi tämän artikkelisarjan ensimmäisessä osassa (HT 4/2020).

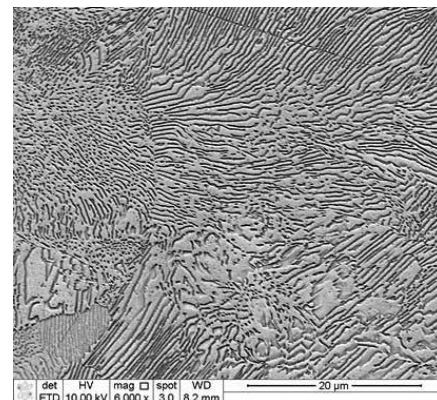


Kuva 4. Widmanstättenin ferriittiä S355MC tyyppisen rakenneteräksen hitsin karkearakeisessa muutosvyöhykkeessä. Kuvaan on rajattu yksittäinen austeniittirake, jonka raerajalta ferriittilevyt ovat kasvaneet kohti rakeen keskustaa. (©T. Kauppi 2018).

Koska syntyvään esieutektoidiseen ferriittiin ei liukene hiiltä enimmillään kuin 0,025 % A_1 -lämpötilassa, niin hiiltä siirtyy sitä ympäröiviin austeniittialueisiin. Austeniitin hiilipitoisuus kasvaa ja se riippuu tasapaino-olosuhteista ja sen hiilipitoisuudesta taulukon 1 mukaisesti. Tämä merkitsee sitä, että jäähtymisnopeuden ollessa riittävän hidas austeniitti hajaantuu perliitiksi A_1 -lämpötilan alapuolella. Perliitti koostuu paksummista vaaleista ferriittilamelleista sekä ohuemmista tummista sementiittilamelleista. Perliitissä on vuorotellen kerroksittain austeniittia ja vuoroin Fe_3C rautakarbideja eli sementiittiä, kuva 4. Hienolamellisen perliitin yksityiskohdat eivät erotu valomikroskoopiolla, vaan perliitti näkyy vain yksittäisinä tummina alueina – yleensä vaaditaan elektronimikroskooppia, jonka resoluutio on parempi ja jolla voidaan saavuttaa riittävä suurennus (n. 6000-kertainen kuvassa 4).

Taulukko 1. Teräksen hiilipitoisuuden vaikutus austeniitin hiilipitoisuuteen A_1 -lämpötilassa.

% C	V_α	% C_γ
0.06	0.92	0.476
0.08	0.90	0.556
0.1	0.87	0.604
0.12	0.84	0.635
0.14	0.82	0.658
0.16	0.79	0.675
0.18	0.77	0.688
0.2	0.74	0.699
0.22	0.71	0.707
0.24	0.69	0.715
0.26	0.66	0.721



Kuva 5. Perliittiä (vaalea faasi ferriittiä, tumma faasi sementiittiä).

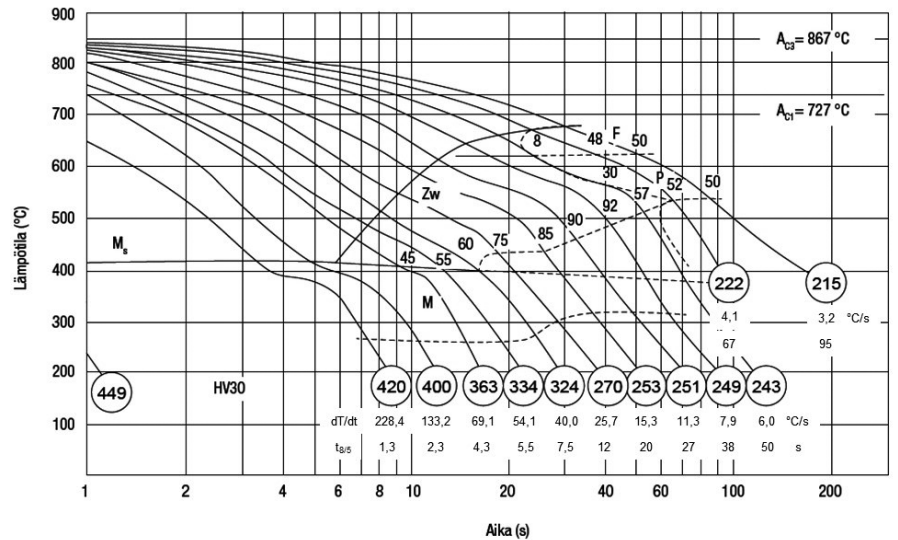
Jäähtymisnopeuden vaikutus mikrorakenteeseen

Jäähtymisnopeus on olennainen tekijä esieutektoidisen ferriitin erkautumisessa ja sitä seuraavassa lopullisessa austeniitin hajaan-

tumisessa. Jos tarkastellaan seostamatonta kuumavalssattua standardin SFS-EN 10025-2 vaatimusten mukaista S355J2-rakenneterästä, niin hiilipitoisuus voi olla esim. 0,18 % ja tällöin esieutektoidisen ferriitin määrä on n. 78 % kuvan 2 tasapainopiirroksesta määritettynä. Silloin tietysti on kysymys termodynaamisen tasapainon mukaisesta tilanteesta.

Kuvassa 6 a on esitetty kuumavalssatun seostamattoman S355J2-rakenneteräksen mikrorakennetta. Se on toimitustilaisena ferriittis-perliittinen. Kuvassa 6 b nähdään perliittiä ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) esieutektoidisen ferriitin (α) ympäröimänä. Ferriitin muoto on pääosin polygonaalista, mikä merkitsee sitä, että jäähtymisnopeus A_3 - ja A_1 -lämpötilojen välissä on ollut hidas. Polygonaalinen ferriitti syntyy korkeissa lämpötiloissa (= lähellä A_3 -lämpötilaa) hitaalla jäähtymisnopeudella. Käytännössä jäähtymisnopeus saadaan riittävän hitaaksi käyttämällä kuumavalssauksessa tarpeeksi korkeaa kelauslämpötilaa.

Hitsauksessa syntyviä mikrorakenteita ja kovuuksia voidaan arvioida jatkuvan jäähtymisen CCT-käyrästä (engl. Continuous Cooling Transformation) avulla. Hitsauksen materiaalioppi kirjasarjassa on esitetty mm. kuvassa 7 nähtävä seostamattoman 0,18 % hiiltä sisältävän S355J2 tyyppisen rakenneteräksen CCT-kuvaaja, johon tässä yhteydessä on merkitty myös jäähtymiskäyriä vastaavat jäähtymisnopeudet ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$). Sen perusteella esieutektoidisen ferriitin muodostuminen estyy, kun jäähtymisnopeus on suurempi kuin $6^{\circ}\text{C}/\text{s}$, mikä vastaa jäähtymisaikaa $t_{8/5} = 50$ s. Kaarihitsauksessa hitsin jäähtymisnopeutta kuvaavan $t_{8/5}$ -ajan arvot ovat tyypillisesti välillä 5–30 s, eli siis huomattavasti lyhyempiä. Tätä suuremmilla jäähtymisnopeuksilla austeniitti hajoaa perliitiksi ja/tai muuttuu martensiitiksi. Tarkemman kuvan asiasta antaa taulukko 2,



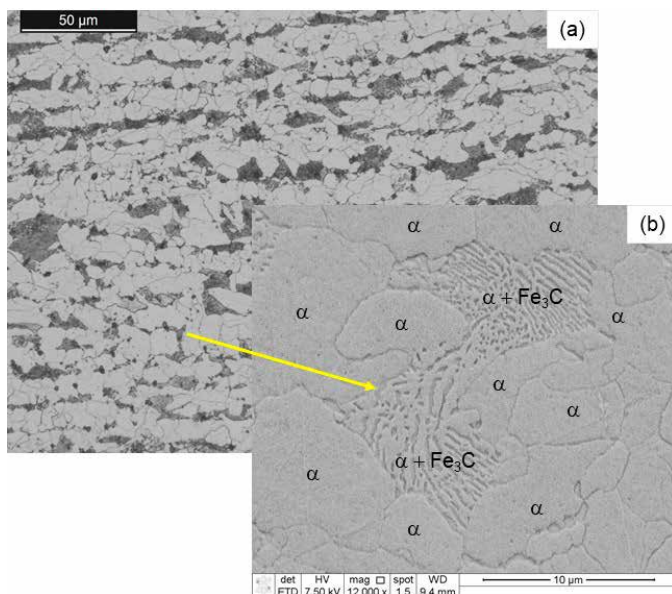
Kuva 7. Seostamattoman S355-rakenneteräksen CCT-käyrät (austenointilämpötila $T = 1350^{\circ}\text{C}$). Mikrorakenteet ovat: M: martensiitti, Zw: bainiitti, F: ferriitti ja P: perliitti. Teräksen kemiallinen koostumus: 0,18%C, 0,47%Si, 1,24%Mn, 0,029nP, 0,029%S, 0,10%Cr, 0,17%Cu, 0,06%Ni. (Hitsauksen materiaalioppi 2A, 2019, s. 106)

jossa on annettu eri jäähtymisnopeuksilla syntyvien faasien tilavuusosuudet kuvan 5 tiedoista määritettynä.

Syntyvien faasien osuudet ovat esillä myös kuvassa 8, jossa on esitetty jäähtymisnopeuden vaikutus termomekaanisesti valssatun S460ML teräksen mikrorakenteeseen. Määritykset on tehty Oulun yliopiston termomekaanisella Gleeble-simulaattorilla tehdyistä näytteistä. Austenointilämpötilana on käytetty $T = 1350^{\circ}\text{C}$, joka vastaa karkearakeisella muutosvyöhykkeellä syntyvää lämpötilaa. Teräksen hiilipitoisuus on termomekaanisesti valssatulle teräkselle tyypillinen (0,07 %), mutta korkeahko nikkelipitoisuus (0,72 %) nostaa sen karkenevuutta ja aikaansaa sen, että esim. perliitin syntyminen estyy jo hyvin pitkällä $t_{8/5}$ -jäähtymisajoilla ($t_{8/5} < 100$ s).

Kuvan perusteella rakenteessa on 50 % martensiittia jäähtymisajan ollessa $t_{8/5} = 4,3$ s. Kovuus ei kuitenkaan nouse lähellekään standardin SFS-EN ISO 15614-1 vaatimusten mukaisessa menetelmäkokeessa materiaali-ryhmän 2.1 lämpökäsittelmättömälle hitsille sallittua enimmäisarvoa 380 HV. Syntyvä martensiitti on teräksen matalasta hiilipitoisuudesta johtuen kohtuullisen pehmeää.

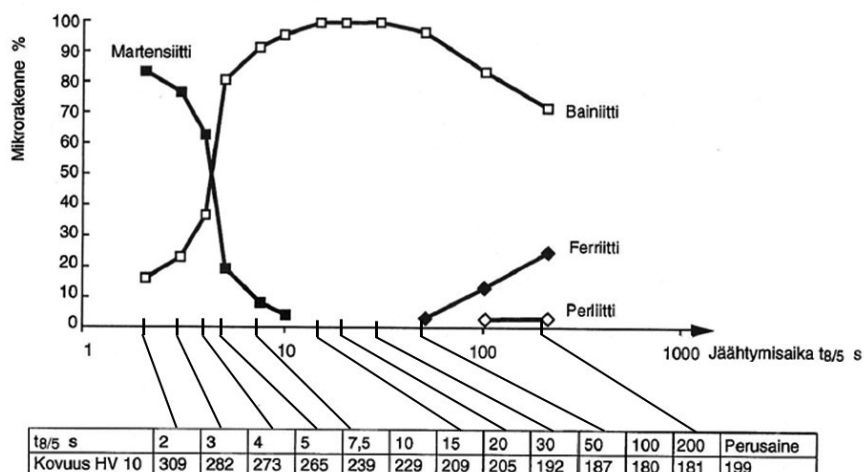
Kuva 9 havainnollistaa sitä, miten hitsin mikrorakenne poikkeaa selkeästi tasapainon mukaisesta mikrorakenteesta. Kuvassa 9 a on esitetty säänekästävä CORTEN-B teräksen hitsin ja karkearakeisen muutosvyöhykkeen (CGHAZ) mikrorakennetta, joissa on esieutektoidista raerajaferritiä ja siitä kasvannutta Widmanstättenin ferriittiä sekä jonkin verran austeniittirakeiden sisälle muodostunutta asikulaarista ferriittiä. Kun tällainen rakenne normalisoidaan eli austenitoidaan ja jäähdytetään hitaasti, niin mikrorakenne muuttuu kuvan 9 b mukaiseksi. Normalisoin-



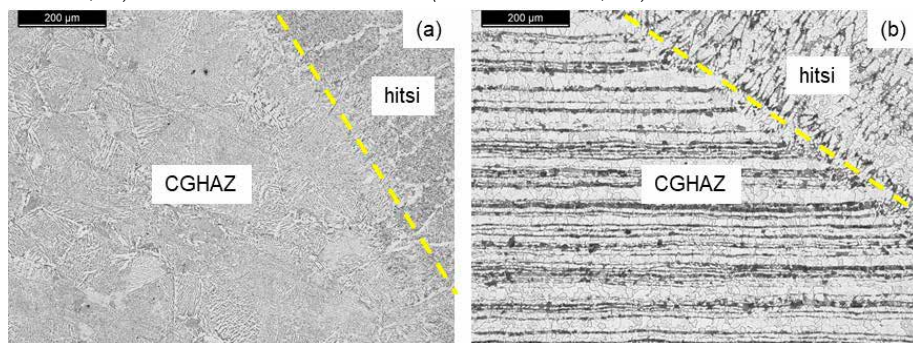
Kuva 6. Seostamattoman kuumavalssatun S355J2-rakenneteräksen ferriittis-perliittinen mikrorakenne.

Taulukko 2. Kuvan 5 perusteella määritetyt faasisuudet eri $t_{8/5}$ -ajoilla.

$t_{8/5}$ [s]	dt/dT [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]	V_{α} [%]	$V_{\text{perliitti}}$ [%]	$V_{\text{bainiitti}}$ [%]	$V_{\text{martensiitti}}$ [%]	Kovuus [HV30]
95	3.2	50	50	0	0	215
67	4.1	48	52	0	0	222
50	6.0	8	30	57	0	243
38	7.9	0	0	92	0	249
27	11.3	0	0	90	10	251
20	15.3	0	0	85	15	253
12	25.7	0	0	75	25	270
7.5	40.0	0	0	60	40	324
5.5	54.1	0	0	55	45	334
4.3	69.1	0	0	45	55	363
2.3	133.2	0	0	0	100	400
1.3	228.4	0	0	0	100	420



Kuva 8. Jäähdytysnopeuden ($t_{8/5}$) vaikutus S460ML (0,07%C, 0,19%Si, 1,51%Mn, 0,72%Ni, CEV = 0,39) teräksen mikrorakenteeseen. (Vähäkainu 2003, 22)



Kuva 9. CORTEN-B teräs (0,08%C, 0,4%Si, 1,02%Mn, 0,3%Cu, 0,5%Cr, CEV = 0,38), a) hitsin mikrorakennetta ($t_{8/5} \approx 40\text{--}70$ s lämmöntuonnista riippuen), b) normalisoidun hitsin mikrorakennetta.

tihekkyydessä käytetty lämpötila oli 850 °C ja jäähdytys tehtiin niin hitaasti, että hitsiin ja muutosvyöhykkeeseen syntyi lähes tasapainon mukainen ferriitti-perliittinen rakenne.

Asikulaarinen ferriitti

Asikulaarisen ferriitin (AF) tiedetään parantavan hitsin ominaisuuksia ja tästä syystä sitä pyritään saamaan rakenteeseen. Sen historia juontaa juurensa vuoteen 1956, jolloin Aaronson ja Wells havaitsivat tämän austeniittirakkeen sisälle ydintyvän, neulasmaisen ja ”kaoottisesti” sijaitsevan faasin. He nimittivät faasia ”Widmanstättenin tähdeksi” (engl. Widmanstätten star). Morfologialtaan asikulaarinen ferriitti on neulasmaisen, mutta ydintyy siis austeniittirakkeen sisään eikä raerajalle kuten Widmanstättenin ferriitti (Loder ym. 2017, 24).

Asikulaarista ferriittiä ja sen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu paljon vuosien varrella sen teräksen ominaisuuksia, erityisesti iskutiheyttä parantavan vaikutuksensa vuoksi. Sen muodostumiseen vaikuttaa neljä päätekijää:

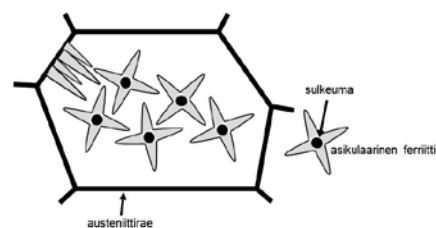
1. austeniitin raekoko
2. jäähtymisnopeus
3. teräksen kemiallinen koostumus

4. epämetalliset sulkeumat (Loder ym. 2017, 24)

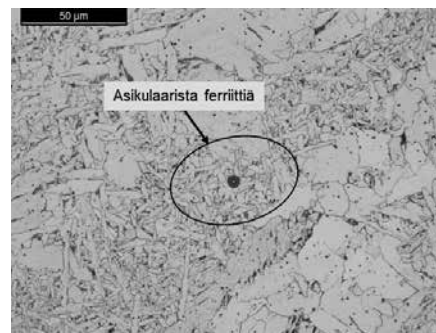
Asikulaarinen ferriitti ydintyy austeniittirakkeen sisällä oleviin ei-metallisiin sulkeumiin (mm. erilaiset oksidit) austeniitti-ferriitti faasimuutoksen yhteydessä. Muodostuvat ferriittirakeet kiertyvät eri suuntiin ja muodostavat kidesuunniltaan epäsäännöllisiä pituudeltaan 5–15 µm ja 1–3 µm leveydeltään olevia levyjä. Muodostuminen vaatii suurta alijäähtymistä eli riittävän suuren jäähtymisnopeuden ja se tapahtuu käytännössä samalla lämpötila-alueella kuin bainiitin muodostuminen. Austeniitin raekoon pitää olla myös riittävän suuri, koska tällöin raerajapinta-ala pienenee ja austeniittirakkeen sisällä tapahtuva heterogeeninen ydintyminen helpottuu.

Asikulaarisen ferriitin muodostuminen ei vaadi diffuusiota, joten faasimuutoksen alussa se on hiiliyliyllästeinen. Ylimääräinen hiiri siirtyä jäljelle jääneeseen austeniittiin heti, kun siihen on edellytykset. Jäljelle jääneeseen austeniitin hiilipitoisuus luonnollisesti nousee tässä vaiheessa, mikä vaikuttaa sen hajaantumiseen. Jäähtymisnopeudesta riippuen jäljelle jäänyt austeniitti hajaantuu perliitiksi, bainiitiksi tai martensiitiksi.

Kuvassa 10 on esitetty periaatekuva asikulaarisen ferriitin muodostumisesta ja muo-



Kuva 10. Asikulaarisen ferriitin muodostumisen periaatekuva (Bhadeshia 2015, 255 mukaillen).



Kuva 11. Asikulaarista ferriittiä seostamattomalla MAG-langalla (EN ISO 14341-A G 42 4 M21 3Si1) hitsatussa hitsissä (@T. Kauppi 2019).

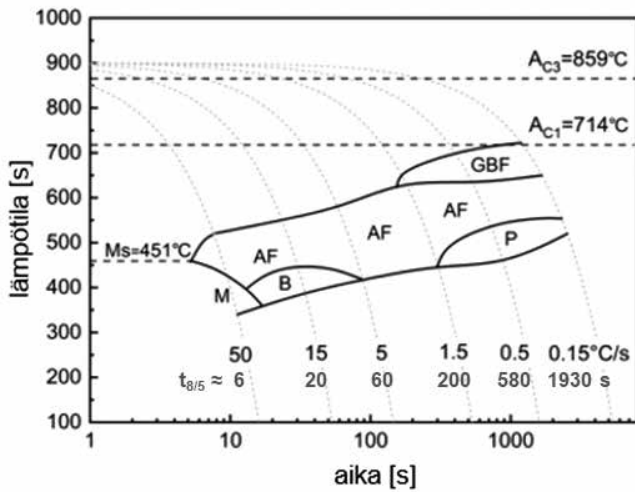
dosta. Kuvassa 11 nähdään asikulaarista ferriittiä seostamattomalla MAG-langalla hitsatussa hitsissä.

Wang ym. tutkivat termomekaanisen valsausvaikutusta asikulaarisen ferriitin muodostumiseen Ti-Ca käsitellyllä teräksellä. Kuvassa 12 on esitetty tutkimuksessa 0,07% C, 0,06% Si, 1,5% Mn teräkselle määritetty CCT-diagrammi. Sen perusteella asikulaarista ferriittiä muodostuu lämpötilavälillä n. 400–650 °C jäähtymisnopeudesta riippuen. Perliitin muodostumiseen tarvitaan hyvinkin paljon aikaa eli $t_{8/5}$ -ajan pitää olla yli 200 s, mikä tarkoittaisi 1,5 kJ/mm lämmöntuonnilla vähintään 370 °C esikuumennus- ja jälipalokämpötilojen käyttöä!

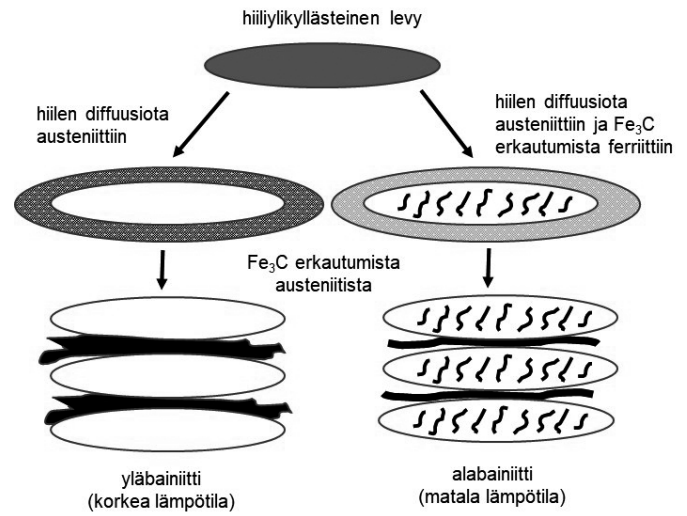
Bainiitti ja martensiitti

Kuten kuvista 7 ja 8 nähdään, niin jäähtymisnopeuden kasvaessa rakenteeseen muodostuu bainiittia austeniitin hajaantuessa. Kuvassa 13 on esitetty ylä- ja alabainiitin muodostumisen periaatekuva.

Aivan kuten perliitissä, on bainiitissa myös sementiittiä ferriittipohjalla. Nykyisin bainiitiksi luokitellaan austeniitin hajaantumisen tuloksena muodostuva ei-lamellaarinen ferriitin ja sementiitin seokset. Nykyisin tunnistetaan kuusi erilaista morfologiaa. Perinteisesti bainiittirakenteet on jaettu kahteen ryhmään: ylä- ja alabainiittiin. Yläbainiitti koostuu samansuuntaisista ferriittisäleistä tai -levyistä, joiden välissä on sementiittipartikkeleita. Toisin kuin perliitissä sementiitti ei ole jatkuvana faasina, vaan erillisinä karbi-



Kuva 12. Teräkselle 0,07% C, 0,06% Si, 1,5% Mn määritetty CCT-diagrammi (Wang ym. 2019, 2).



Kuva 13. Ylä- ja alabainiitin muodostumismekanismien periaatekuva (Bhadeshia 2015, 196 mukailleen).

deissa. Alabainiitin muodostuessa kaikki hiili ei ehdi liikkua pois ferriittisäleistä, vaan niiden sisälle syntyy hienoja neulasmaisia karbideja n. 55–60° kulmassa ferriittisäleen kasvusuuntaan nähden (Hannula ym. 2020, 71).

Alabainiitilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet ja esimerkiksi hiiliteräksissä se on jopa saman lujuista päästömartensiittia sitkeämpää. Yläbainiitissa, jossa karbidit ovat suurempia ja levymäisiä, murtuman ydintyminen on helpompaa kuin alabainiitissa, jossa karbidit ovat hienojakoisia (Hannula ym. 2020, 77).

Kun jäähtymisnopeus on niin suuri, ettei edes välisija-atomien (hiili ja typpi) diffuusiota ehdi tapahtua, niin austeniitista muodostuu leikkautumalla martensiittia. Martensiitti-reaktiota käsiteltiin yksityiskohtaisesti tämän artikkelisarjan ensimmäisessä osassa ”Teräksen faasimuutokset”.

Miten tämä kaikki näkyy käytännön hitsauksessa?

Tässä käsiteltävä austeniitin hajaantumista tapahtuu teknisen raportin CEN ISO/TR 15608 materiaaliyhmien 1–6 mukaisissa teräksissä. Hitsauksen yhteydessä perusaine austenitoituu muutosvyöhykkeen CGHAZ, FGHAZ ja ICHAZ alueilla. Jäähtymisnopeus riippuu hyvin pitkälle hitsauksessa käytetystä lämmöntonnuista, joka puolestaan vaihtelee mm. hitsausprosessista ja käytetystä liitosmuodosta riippuen.

Materiaaliyhmän 1 teräksillä (seostamattomat ja niukkaseosteiset teräokset, joiden $R_{eH} \leq 460$ MPa) muutosvyöhykkeeseen voi syntyä martensiittia suurilla aineenpaksuuksilla ja/tai pienillä lämmöntonnuilla. Koska näiden terästen hiilipitoisuudet ovat yleensä välillä n. 0,15–0,22 %, on vaarana, että muutosvyöhykkeen kovuus nousee liian korkeaksi. Menetelmäkokeessahan lämpökäsitlemättömän hitsin suurin sallittu kovuus

materiaaliyhmän 1 teräksille on 380 HV.

Materiaaliyhmä 2 eli termomekaanisesti valssatut teräokset. Näiden terästen hiilipitoisuudet ovat pääsääntöisesti hyvin matalia (< 0.1%) ja näin ollen esieutektoidisen ferriitin määrä on useasti n. 90 % luokkaa hitaalla jäähtymisellä. Karkenevuutta lisäävien seosaineiden pitoisuudet ovat muutenkin pienemmät kuin saman lujuisissa seostamattomissa rakenneteräksissä ja hienorakenneteräksissä, koska lujuutta saadaan myös termomekaanisen valssauksen avulla. Näitä teräksiä käytetään nykyään paljon niiden hyvän sitkeyden takia. Esikuumennus-tarve on pienempi kuin seostamattomilla ja normalisoiduilla rakenneteräksillä. Mahdollisen martensiitin kovuus jää maltilliseksi matalan hiilipitoisuuden ansiosta.

Materiaaliyhmä 3, nuorrutusteräokset ja erkautuskarkenevat teräokset, joiden ohjeellinen pienin myötöraja $R_{eH} > 360$ MPa. Nuorrutusteräksillä lujuus perustuu päästömartensiittiseen mikrorakenteeseen. Kun hitsin jäähtyminen tapahtuu niin, että jäähtymisaika $t_{8/5}$ on alueella noin 5–20 s, niin hitsin mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät, erityisesti iskutilaus. Mikrorakenne muodostuu martensiitista ja alabainiitista. Nopeampi jäähtyminen johtaa täysin martensiittiseen mikrorakenteeseen ja vetyhalkeiluvaaraan, hitaalla jäähtymisellä ($t_{8/5} > 20$ s) mikrorakenne tulee hauraammaksi lähinnä muodostuvan yläbainiitin takia. Standardin SFS-EN ISO 15614-1 vaatimusten mukaan näillä teräksillä suurin sallittu kovuus saa olla 450 HV lämpökäsitlemättömällä hitsillä.

Lähteet

Aaronson H.I. 'Symposium on the mechanism of phase transformations in metals', 47; 1956, London, The Institute of Metals.

Bhadeshia H. K. D. H. Allotriomorphic ferrite. Materials Science & Metallurgy.

Part II Course C9, Alloys. Pdf-dokumentti. Haettu 7.11.2021. Saatavissa <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2000/C9/lectures78.pdf>.

Bhadeshia H. K. D. H. Bainite in Steels. Theory and practice. Third Edition. Maney publishing. ISBN 978-1-909662-74-2. 618 s.

Dubé E.A., Aaronson H.I. & Mehl R.F. Rev. Metall., 1958, 3, s. 201 - 210.

Hannula S.-P., Haimi E. & Lindroos V. 2020. Uudistettu Miekko-Ojan metallioppi. Osa 2. Teknologiateollisuus ry. ISBN 978-952-238-244-3.

Loder D., Michelis S.K. & Bernhard C. 2017. Acicular Ferrite Formation and Its Influencing Factors - A Review. Journal of Materials Science Research; Vol. 6. No. 1. ISSN 1927-0585.

pdfslide.net. Websivut. Haettu 30.4.2020. Ladattavissa <https://pdfslide.net/documents/the-iron-iron-carbide-fer-c-phase-diagram.html>.

Ritola V. 2016. Erikoisterästen aihokäsittelyt ja niiden vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin. Diplomityö. Oulun yliopisto. Ladattavissa <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201606022117.pdf>.

Vähäkainu O. Hitsaajan opas. 2003. Rautaruukki Steel. ISBN 952-5010-35-X. 112 s.

Wang C., Wang X., Kang J., Yuan G. & Wang G. 2019. Effect of Thermomechanical Treatment on Acicular Ferrite Formation in Ti–Ca Deoxidized Low Carbon Steel. Metals 2019, 9, 296.

**Timo Kauppi, IWE, IWI-C
Oulun yliopisto/Lapin
ammattikorkeakoulu
timo.kauppi@lapinamk.fi**