

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Severi Iso-Markku

**HITSAUSVIRTALÄHTEEN OHJAUS LÄMMÖNTUONNIN JA JATKUVAN
JÄÄHTYMISEN S-KÄYRÄN PERUSTEELLA**

Työn tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
 DI Esa Hiltunen

Työn ohjaaja: DI Mikko Törölä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Severi Iso-Markku

Hitsausvirtalähteen ohjaus lämmöntonin ja jatkuvan jäähtymisen S-käyrän perusteella

Diplomityö

2012

110 sivua, 60 kuvaa ja 12 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
DI Esa Hiltunen

Hakusanat: hitsaus, lämmöntuonti, jäähtymisaika, jatkuvan jäähtymisen S-käyrä, hitsausvirtalähteen ohjaus

Lämmöntonilla on oleellinen vaikutus hitsausliitoksen ominaisuuksiin, koska se vaikuttaa liitoksen jäähtymisnopeuteen, jolla on puolestaan suuri vaikutus jäähtymisessä syntyviin mikrorakenteisiin. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä voidaan ennustaa hitsausliitokseen syntyvät mikrorakenteet. S-käyrät voidaan laatia hitsausolosuhteiden mukaisesti, jolloin faasimuutoskäyttäytyminen sularajalla saadaan selvitettyä.

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää hitsausvirtalähteen ohjaustapaa lämmöntuontiin ja jatkuvan jäähtymisen S-käyriin perustuen. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrillä ja lämmöntuontiin perustuvalla hitsausparametrien säädöllä on yhteys. Työssä tutkittiin, miten haluttuun jäähtymisnopeuteen johtava lämmöntuonti voidaan määrittää S-käyrälle luotettavasti. Työssä perehdyttiin jatkuvan jäähtymisen S-käyriin ja eri jäähtymisnopeuksilla hitsausliitokseen syntyviin mikrorakenteisiin sekä hitsausinverttereiden ohjaus- ja säätötekniikkaan. Teoriaosuuden jälkeen tarkasteltiin eri vaihtoehtoja, miten hitsattavan materiaalin koostumusvaihtelut sekä lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät voidaan ottaa huomioon virtalähteen ohjauksessa lämmöntonin perusteella. S-käyrältä määritettyjen lämmöntonin arvojen perusteella tehtiin kahdet koehitsaukset, joissa käytettiin kolmea eri aineenpaksumutta. Tulosten perusteella arvioitiin lämmöntonin arvojen toimivuutta käytännössä ja tutkittiin liitokseen syntyviä mikrorakenteita. Tutkimuksen pohjalta esitettiin jatkokehitystoimenpiteitä, joiden mukaan voidaan edetä lämmöntuontiin perustuvan säätöjärjestelmän kehitysohjelmassa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Mechanical Engineering

Severi Iso-Markku

Welding power source control based on the heat input and continuous cooling transformation diagram

Master's Thesis

2012

110 pages, 60 figures and 12 tables

Examiners: Professor Jukka Martikainen
M.Sc. (Tech) Esa Hiltunen

Keywords: welding, heat input, cooling time, continuous cooling transformation diagram (CCT diagram), welding power source control

Heat input has an essential influence on properties of the weld joint because it affects to the cooling rate of joint, which in turn has a strong impact to the forming microstructures on cooling. It is possible to predict the forming microstructures resulting from the cooling with continuous cooling transformation (CCT) diagram. CCT diagrams can be developed under the welding conditions so that the phase transition behavior on fusion line can be determined.

The aim of this master's thesis was to develop a control method for welding power source based on the heat input and CCT diagram. CCT diagrams have a connection to the heat input based welding parameter control. This thesis studied how the heat input, which leads to the desired cooling rate, can be reliably determined to CCT diagram. The thesis focused on CCT diagrams and microstructures which form on various cooling rates in the weld joint, as well as on the control technology of inverter power sources. After the theoretical part different options were studied of how to take into consideration composition changes of materials and factors affecting to the heat input when controlling power source based on the heat input. Based on the values of the heat input determined from CCT diagram, two test welds were made for three different plate thicknesses. On the basis of test results it was estimated how these heat input values work in practice and studied forming microstructures. On the basis of the study it was proposed future development actions, and according to these actions the heat input based control system development project can proceed.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Lappeenrannan teknillisen yliopiston sekä Kemppi Oy:n kehityshanketta. Diplomityön kirjoitus on edennyt etätöinä Pusulassa. Haluan kiittää seuraavia tahoja diplomityöni toteutumisesta.

Haluan osoittaa kiitokset työni tarkastajille professori Jukka Martikaiselle ja diplomi-insinööri Esa Hiltuselle erinomaisesta ohjauksesta sekä hyvistä neuvoista työn aikana. Kemppi Oy:ltä haluan kiittää työni ohjaajaa Mikko Törölää sekä Jyri Uusitaloa, joilta sain asiantuntevaa ohjausta työhöni liittyen.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kannustuksesta opintojeni aikana. Erityiskiitos kuuluu avopuolisolleni Jennalle sekä tyttärelleni Jasminille, jotka ovat jaksaneet kannustaa ja tukea minua tämänkin projektin aikana.

Pusulassa 1.2.2012

Severi Iso-Markku

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	10
1.1 Työn taustaa	10
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	11
2 HITSAUSENERGIA JA LÄMMÖNTUONTI	12
3 JÄÄHTYMISNOPEUS	14
4 LÄMMÖNJOHTUMINEN JA LIITOSMUOTO	17
5 JATKUVAN JÄÄHTYMISEN S-KÄYRÄT	19
5.1 Austeniitin hajaantuminen	21
5.1.1 Ferriitin muodostuminen	21
5.1.2 Perliitin muodostuminen	22
5.1.3 Bainiitin muodostuminen	24
5.1.4 Martensiitin muodostuminen	25
5.2 Jäähtymisessä syntyvät mikrorakenteet	27
5.3 Seosaineiden vaikutus S-käyriin	32
5.4 Muiden tekijöiden vaikutukset	41
6 HITS AUSLIITOKSEN MIKRORAKENNE JA OMINAISUUDET	42
7 MIG/MAG-HITSAUSINVERTTERIT	45
7.1 Virtalähteiden yleisiä ominaisuuksia	45
7.2 Rakenne ja toimintaperiaate	46
7.3 Ohjaus- ja säätötekniikka	49
7.4 Valokaaren säätötekniikka	50
7.5 Hitsausparametrien säätö	54
7.5.1 Kaksinuppisäätö	54

7.5.2	Synerginen säätö (yksinuppisäätö)	55
7.5.3	Adaptiivinen säätö	58
8	VIRTALÄHTEEN OHJAUS LÄMMÖNTUONNIN JA S-KÄYRÄN PERUSTEELLA	59
8.1	S-käyrät ja lämmöntuonti	61
8.2	Lämmöntuontiin vaikuttavien tekijöiden huomioon ottaminen	64
8.2.1	Työlämpötila	65
8.2.2	Liitosmuoto	65
8.2.3	Aineenpaksuus	67
8.3	Koostumusvaihteluiden huomioon ottaminen	73
8.3.1	Jäähtymisnauhojen tai jäähtymiskäyrien käyttö S-käyrässä	74
8.3.2	Arviointi hiiliekvivalentin perusteella	79
8.4	Ohjauksen toteutus	84
8.5	Koehitsaukset	87
8.5.1	Koehitsaukset 1	87
8.5.2	Koehitsaukset 2	92
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	99
10	YHTEENVETO	103
	LÄHTEET	106

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

Symbolit

d	[mm]	aineenpaksuus
E	[kJ/mm]	hitsausenergia
I	[A]	hitsausvirta
P	[W]	teho
Q	[kJ/mm]	lämmöntuonti
T ₀	[°C]	työlämpötila
t _{8/5}	[s]	jäähtymiseen kuluva aika lämpötilavälillä 800–500 °C
U	[V]	kaarijännite
v	[mm/s]	hitsausnopeus

Tunnukset ja yksiköt

A	ampeeri
B	bainiitti
°C	Celsiusaste
F	ferritti
F _{2,3}	liitosmuotokerroin
HBW	Brinell-kovuus mitattuna kovametallipallolla
HV	Vickers-kovuus
k	hitsausprosessin terminen hyötysuhde
kJ	kilojoule
kW	kilowatti
M	martensiitti
m	metri
min	minuutti
mm	millimetri
N/mm ²	newton/neliömillimetri

P	perliitti
s	sekunti
V	voltti

Alkuaineet ja seokset

Al	alumiini
Ar	argon
B	boori
C	hiili
CO ₂	hiilidioksidi
Cr	kromi
Cu	kupari
Fe	rauta
Fe ₃ C	rautakarbidi
Mn	mangaani
Mo	molybdeeni
N	typpi
Nb	niobi
Ni	nikkeli
P	fosfori
S	rikki
Si	pii
Ti	titaani
V	vanadiini
W	volframi

Lyhenteet

2D	2-dimensionaalinen
3D	3-dimensionaalinen

A _{1,3}	lämpötilaraja Fe-C tasapainopiirroksessa
CE	Carbon Equivalent, hiiliekvivalentti
EN	Eurooppalainen standardi
FET	Field-effect transistor
HAZ	Heat Affected Zone, muutosvyöhyke
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
IIW	International Institute of Welding
MAG	Metal Active Gas, Metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla
MIG	Metal Inert Gas, Metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla
M _f	martensiittireaktion loppulämpötila
M _s	martensiittireaktion alkulämpötila
p.k.k.	pintakeskinen kuutiollinen hila
P _{cm}	Säröparametri
S355J2G3	teräksen laatumerkintä
S	rakenneteräs
355	myötölujuuden minimiarvo [N/mm ²]
J2	iskusitkeysluokka, testauslämpötila -20 °C
G3	tyypeä sitovilla aineilla tiivistetty ja levytuotteet normalisoitu
M	termomekaanisesti valssattu
MC	termomekaanisesti valssattu ja kylmämuovattava
ML	termomekaanisesti valssattu ja kylmänsitkeä teräs
N	normalisoitu tai normalisointivalssattu
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
StE 26	vanhan DIN-standardin mukainen teräksen laatumerkintä
St	teräs
E	hienoraeteräs
26	murtolujuus [kp/mm ²] (≈260 N/mm ²)
TIG	Tungsten Inert Gas, Volframi-inerttikaasukaarihitsaus
t.k.k.	tilakeskinen kuutiollinen hila
W _s	Widmanstättenin ferriittireaktion alkulämpötila

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Tämä työ liittyy Kemppi Oy:n kehityshankkeeseen, jossa on myös mukana Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kehityshankkeen tavoitteena on kehittää hitsausvirtalähteen uusi lämmöntuontiin perustuva adaptiivinen hitsausparametrien säätöjärjestelmä. Tällainen säätöjärjestelmä ei käytännössä anna mahdollisuutta hitsata väärin, erityisesti metallurgisen laadun suhteen. Lämmöntuontiin perustuva säätöjärjestelmä perustuu toimivaan laatuikkunaan, jonka sisällä toimimalla saavutetaan sekä vaadittava hitsiluokkalaatu että myös metallurginen laatu. Tulevaisuudessa metallurginen laatu tulee olemaan entistä tärkeämpi. Tänä päivänä perinteisten hitsattavien terästen hitsaus pyritään suorittamaan entistä tehokkaammin sulatustehoa tai hitsausnopeutta lisäämällä, jolloin perinteistenkin 235- ja 355-lujuusluokan terästen hitsauksessa esiintyy entistä enemmän virhemahdollisuuksia. Metallurginen laatu korostuu erityisesti lujien terästen, aina 700 N/mm² myötölujuudesta yli 1000 N/mm²-myötölujuusluokan terästen hitsauksen yleistyessä. Lujien terästen lämmöntuonnin rajat voivat olla hyvin pienet ja ne vaativat erittäin tarkkaa hitsausprosessin säätöä.

Uudessa lämmöntuontiin perustuvassa hitsausparametrien säätöjärjestelmässä pyritään parametrien säätö tekemään hitsattavan materiaalin perusteella ja erityisesti sen metallurgisten ominaisuuksien perusteella. Perinteinen tapa on säätää hitsausvirtalähdettä ja sähköisiä suureita, mikä toimii sitä paremmin mitä varmemmalla pohjalla materiaalin metallurginen käyttäytyminen on. Tällä hetkellä virtalähdettä säädetään yleensä synergiakäyrän perusteella hitsauksen helpottamiseksi. Uudessa säätötavassa virtalähteen säätö perustuu synergiakäyrään sekä jatkuvan jäähtymisen S-käyrään, jolloin vaadittava metallurginen laatu saavutetaan aina. Uudessa vaihtoehtoisessa säätötavassa lähdetään siitä, että säädetään hitsattavan työn lopputulosta, eli hitsattavan työn lopulliset ominaisuudet voidaan valita jo virtalähdettä säädettäessä. Lämmöntuontiin ja sitä kautta hitsattavan työn lopputulokseen vaikuttaa eri tekijöitä, joiden perusteella voidaan valita oikeat parametrit hitsaukseen, jotta halutut liitoksen ominaisuudet saavutetaan.

Lämmöntuontiin perustuvalla säätöjärjestelmällä on yhteys jatkuvan jäähtymisen S-käyriin, jotka voivat olla materiaali- tai materiaaliryhmäkohtaisia. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä voidaan ennustaa haluttu mikrorakenne, joka täyttää mm. vaadittavat lujuus-, sitkeys- ja korroosiovaatimukset. Lämmöntuonnin ja S-käyrien väliltä puuttuu kuitenkin suora yhteys, joka on selvitettävä, jotta lämmöntuontiin perustuva säätö on mahdollista S-käyrien perusteella. Kun S-käyrältä nähdään lämmöntuonti, jolla päästään tiettyyn mikrorakenteeseen, voidaan hitsausliitoksen ominaisuudet valita sen perusteella. Hitsattaessa tietyllä lämmöntuonnilla, se johtaa tiettyyn jäähtymisnopeuteen, joka johtaa tiettyyn mikrorakenteeseen ja liitoksen ominaisuuksiin.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on kehittää hitsausvirtalähteen ohjaustapaa lämmöntuontiin ja jatkuvan jäähtymisen S-käyriin perustuen. Tätä varten S-käyrien ja lämmöntuonnin yhteys on selvitettävä. Tavoitteena on, että S-käyrälle voidaan määrittää lämmöntuonti, jonka perusteella virtalähteen ohjaus suoritetaan. Työssä tutkitaan, miten hitsattavan materiaalin koostumusvaihtelut sekä lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät voidaan ottaa huomioon. Tavoitteena on esittää eri vaihtoehtoja, miten koostumusvaihtelut ja lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät otetaan huomioon sekä miten hitsausvirtalähteen ohjaustapa voidaan toteuttaa lämmöntuonnin ja S-käyrän perusteella. Työssä selvitetään parhaita vaihtoehtoja ohjaustavan toteuttamiseksi ja sen perusteella määritetään jatkotoimenpiteitä sekä uusia tutkimuskohteita.

Työ rajataan käsittelemään paljon hitsattavia seostamattomia ja niukkaseosteisia teräksiä sekä MIG/MAG-invertterivirtalähteitä. Liitostyypeistä käsitellään pienaliitoksia. Työssä käsitellään jatkuvan jäähtymisen S-käyriin vaikuttavia tekijöitä ja eri jäähtymisnopeuksilla saavutettavia hitsausliitoksen mikrorakenteita sekä perehdytään hitsausinvertterin ohjaus- ja säätötekniikkaan. Näiden edellä mainittujen asioiden perusteella määritetään hitsausvirtalähteen ohjausvaihtoehtoja lämmöntuonnin ja S-käyrän perusteella.

2 HITSAUSENERGIA JA LÄMMÖNTUONTI

Kaarihitsauksessa esiintyy käsitteet hitsausenergia ja lämmöntuonti. Hitsausenergia eli kaarienergia E on kaarihitsauksessa palon hitsaukseen käytetty energia palon pituusyksikköä kohti. Hitsausenergia saadaan laskettua kaavan (1) avulla. (Lukkari 2002, s. 54.)

$$E = \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad [\text{kJ/mm}] \quad (1)$$

missä U = jännite [V]
 I = virta [A]
 v = kuljetusnopeus [mm/min]

Hitsausenergia saadaan laskettua myös sähkötehon avulla. Kun virta ja jännite kerrotaan keskenään, saadaan sähköteho P . Hitsauksessa virta ja jännite muuttuvat ajan funktiona, jolloin virta ja jännite pitää kertoa keskenään hetkellisarvoilla ja laskea näiden hetkellisarvojen keskiarvo. Tällöin sähköteho saadaan laskettua kaikissa tilanteissa oikein. Jos puolestaan mitataan virran ja jännitteen keskiarvot ja kerrotaan ne keskenään, tulos voi olla todelliseen nähden virheellinen. (Mäkimaa & Uusitalo 2007, s. 31.)

Kaarihitsauksessa lämmöntuonnilla Q tarkoitetaan hitsiin siirtynyttä lämpömäärää palon pituusyksikköä kohti. Koko syntynyt lämpömäärä ei siirry hitsiin, vaan osa siitä menee häviöinä ympäristöön mm. säteily- ja johtumishäviöinä. Tämä otetaan huomioon termisellä hyötysuhteella k . Lämmöntuonti saadaan laskettua kaavalla (2). (Lukkari 2002, s. 54.)

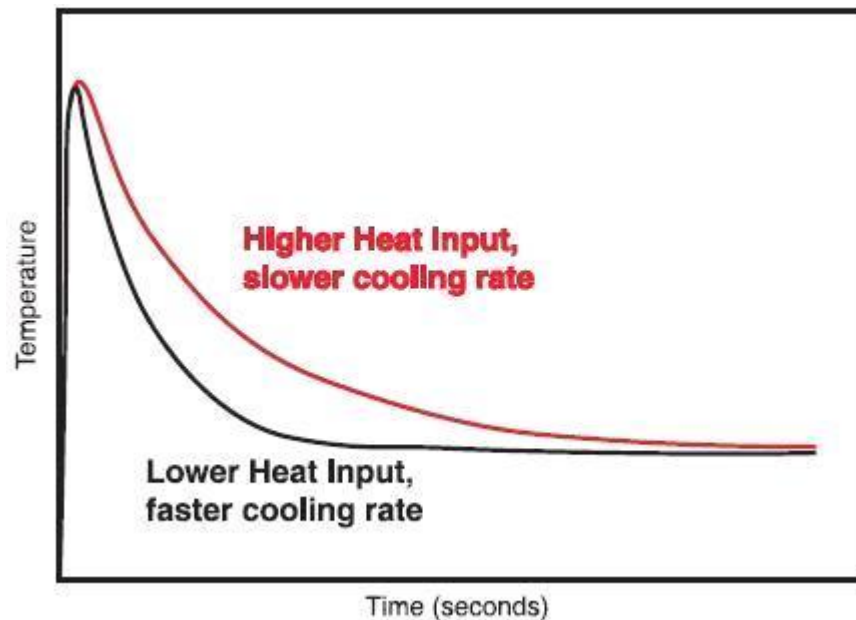
$$Q = k \times E \quad [\text{kJ/mm}] \quad (2)$$

Termisen hyötysuhteen suhteelliset arvot eri hitsausprosesseilla standardin SFS-EN 1011-1 mukaan ovat (Lukkari 2003, s. 4):

- Jauhekaarihitsaus: 1
- MIG/MAG-, täytelanka- ja puikkohitsaus: 0,8
- TIG- ja plasmahitsaus: 0,6

Lämmöntuonnille on asetettu ylä- ja alarajoja materiaaliikohtaisesti. Jos yläraja ylitetään, seuraa sitkeyden ja lujuuden heikkeneminen. Jos taas alaraja alitetaan, seuraa kovuuden kasvu. Normaalisti sitkeys on herkempi suurelle lämmöntuonnille kuin lujuus. Mitä vaativampaa iskusitkeysluokan ja korkeamman lujuusluokan terästä sekä pienempää aineenpaksuutta hitsataan, sitä enemmän lämmöntuontia tulee rajoittaa. (Mäkimaa & Uusitalo 2007, s. 31.)

Lämmöntuonnilla on suuri vaikutus hitsin ominaisuuksiin, koska se vaikuttaa hitsausliitoksen jäähtymisnopeuteen, joka puolestaan vaikuttaa oleellisesti liitokseen syntyviin mikrorakenteisiin. Kuvassa 1 on esitetty kaaviollisesti lämmöntuonnin vaikutus jäähtymisnopeuteen. (Scott Funderburk 1999, s. 8.)

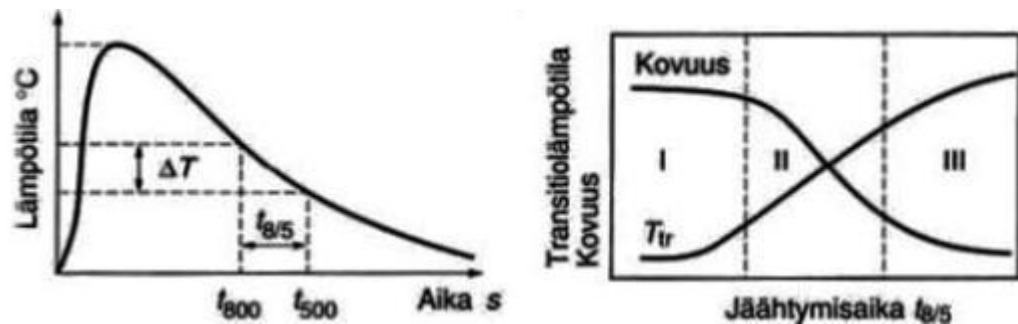


Kuva 1. Jäähtymisnopeuden riippuvuus lämmöntuonnista (Scott Funderburk 1999, s. 8).

3 JÄÄHTYMISNOPEUS

Hitsausliitoksen jäähtymisnopeudella on oleellinen vaikutus liitoksen ominaisuuksiin. Jäähtymisnopeuteen vaikuttavat lähinnä lämmöntuonti, aineenpaksuus, liitosmuoto sekä työlämpötila. (Vähäkainu 2003, s. 23.) Jäähtymisnopeutta kuvaavana suurena käytetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$, joka tarkoittaa lämpötilavälin 800–500 °C ohittamiseen kulunutta aikaa sekunteina, kuva 2. Hitsin jäähtymisen aikana tällä lämpötilavälillä tapahtuvat hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen ominaisuuksien kannalta merkittävimmät mikrorakennemuutokset. (Lukkari 2003, s. 3.)

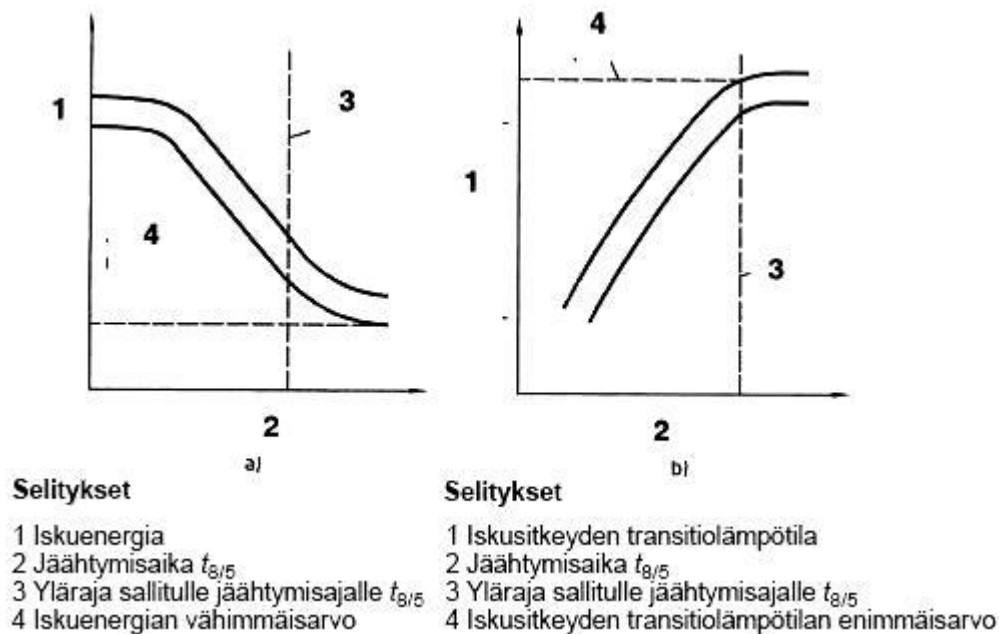
Kuvasta 2 ilmenee kaaviollisesti kuinka jäähtymisaika vaikuttaa liitoksen muutosvyöhykkeen kovuuteen ja iskusitkeyden transitiolämpötilaan, kun hitsataan seostamattomia ja niukkaseosteisia teräksiä (Vähäkainu 2003, s. 23). Hitsin liian hidask jäähtymisen eli pitkä jäähtymisaika heikentää liitoksen mekaanisia ominaisuuksia, lujuutta ja erityisesti iskusitkeyttä. Hitsin liian nopea jäähtymisen taas aiheuttaa karkenemista, joten kovuus nousee ja vetyhalkeilutaipumus kasvaa. (Lukkari 2003, s. 3.) Tällöin liitoksen iskusitkeysominaisuudet ovat kuitenkin hyvät (matala transitiolämpötila). Jotta liitoksen ominaisuudet olisivat optimaaliset, tulisi jäähtymisajan osua alueelle II kuvassa 2. (Vähäkainu 2003, s. 23.)



Kuva 2. Vasemmalla jäähtymisaika $t_{8/5}$ ja oikealla sen vaikutus hitsausliitoksen muutosvyöhykkeen kovuuteen ja iskusitkeyden transitiolämpötilaan (Vähäkainu 2003, s. 23).

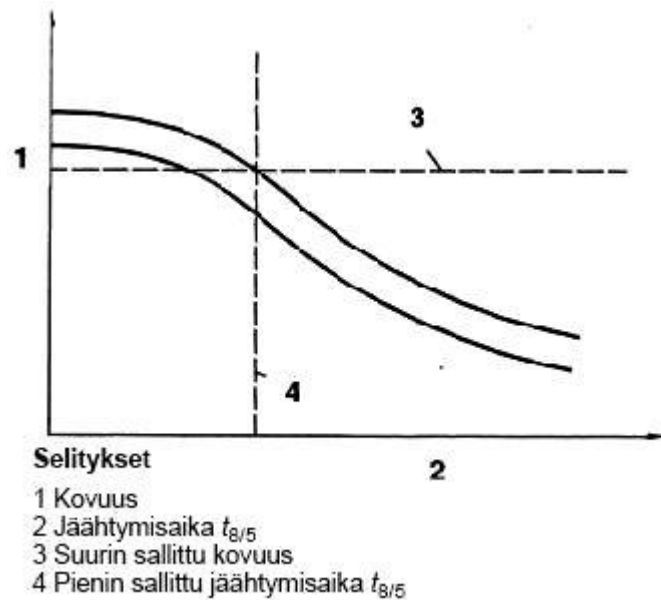
Jäähtymisaika $t_{8/5}$ valitaan muutosvyöhykkeen iskusitkeysominaisuuksien ja kovuuden perusteella. Jäähtymisajan $t_{8/5}$ kasvaminen johtaa yleensä iskusitkeyden heikkenemiseen,

mikä ilmenee iskuenergian laskuna ja iskusitkeyden transitiolämpötilan nousuna muutosvyöhykkeellä, kuva 3. Jos iskuenergia ei saa alittaa jotain tiettyä vähimmäisarvoa, jäähtymisajan $t_{8/5}$ ylempi raja-arvo valitaan pienimmän hyväksyttävän iskuenergia-arvon mukaan, kuten kuvassa 3 a). Sitkeyden heikkeneminen riippuu teräslajista ja sen kemiallisesta koostumuksesta. (SFS-EN 1011-2 2001, s. 76.)



Kuva 3. Jäähtymisajan $t_{8/5}$ ylärajan valinta: a) iskuenergian mukaan; b) iskusitkeyden transitiolämpötilan mukaan (SFS-EN 1011-2 2001, s. 82).

Jäähtymisajan $t_{8/5}$ kasvaminen laskee myös muutosvyöhykkeen kovuutta, kuva 4. Jos kovuuden arvo ei saa ylittää jotain tiettyä kovuutta, valitaan jäähtymisajan $t_{8/5}$ alempi raja-arvo suurimman hyväksyttävän kovuuden arvon mukaan, kuten kuvassa 4. (SFS-EN 1011-2 2001, s. 76.)



Kuva 4. Jäähymisajan $t_{8/5}$ alarajan valinta kovuuden perusteella (SFS-EN 1011-2 2001, s. 84).

Seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille jäähymisajan $t_{8/5}$ voi laskea standardin SFS-EN 1011-2 laskukaavojen avulla. Alla on esitetty 2D-lämmönjohtumisen (2-dimensionaalisen) jäähymisajan $t_{8/5}$ laskentakaava (3) sekä 3D-lämmönjohtumisen (3-dimensionaalisen) jäähymisajan $t_{8/5}$ laskentakaava (4). (SFS-EN 1011-2 2001, s. 78.)

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

$$t_{8/5} = (6700 - 5 T_0) \times Q \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3 \quad (4)$$

missä T_0 = työlämpötila $[\text{°C}]$

Q = lämmöntuonti $[\text{kJ/mm}]$

d = aineenpaksuus $[\text{mm}]$

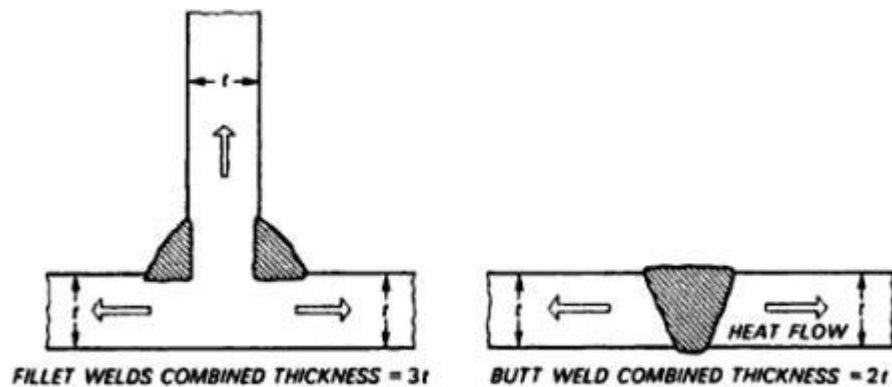
F_2 ja F_3 = liitosmuotokerroin (käsitellään kappaleessa lämmönjohtuminen ja liitosmuoto)

Työlämpötilalla tarkoitetaan hitsattavan kappaleen lämpötilaa hitsauksen alussa ja se vaikuttaa huomattavasti liitoksen jäähtymisnopeuteen. Mitä korkeampi työlämpötila on, sitä hitaammin liitoksen jäähtyminen tapahtuu ja sitä pidempi on liitoksen jäähtymisaika $t_{8/5}$. Työlämpötilan korotus voidaan tehdä käyttämällä esikuumennusta tai sopivaa hitsausjärjestystä palkojen välisen lämpötilan nostamiseksi. (Vähäkainu 2003, s. 24.)

Kaavoihin (3) ja (4) tarvittavat liitosmuotokertoimet saadaan taulukosta 1. Lämmöntuonti saadaan laskettua kaavasta (2). Yleensä suositeltavat jäähtymisajat ovat 10–30 s, mutta tarkempi arvo riippuu teräslajista. Kun iskutkeysvaatimus on -20 °C :ssa, tyypillinen maksimi $t_{8/5}$ on 30 s. Tyypillinen maksimi $t_{8/5}$ on 25 s, kun iskutkeysvaatimus on puolestaan -50 °C :ssa. Hyvin lujilla teräksillä jäähtymisajan rajat voivat olla paljon pienemmät, esimerkiksi 5–10 s, minkä vuoksi lämmöntuonin kontrolloinnilta edellytetään huolellisuutta. (Lukkari 2003, s. 4; 18.) Lasketut jäähtymisajat $t_{8/5}$ voidaan sovittaa jäähtymiskäyriksi jatkuvan jäähtymisen S-käyrään, jolloin voidaan arvioida liitokseen syntyviä mikrorakenteita (Metallurgia s. 4).

4 LÄMMÖNJOHTUMINEN JA LIITOSMUOTO

Lämmönjohtumiseen vaikuttaa hitsattavan materiaalin aineenpaksuus. Mitä suurempi hitsattava aineenpaksuus on, sitä enemmän on massaa, johon hitsauksesta tullut lämpö johtuu ja jäähtymisnopeus kasvaa. Lisäksi se, kuinka moneen suuntaan lämpö voi siirtyä, vaikuttaa lämmön poisjohtumiseen. T- ja pienaliitos jäähtyvät nopeammin kuin päittäisliitos, kuva 5. (Lepola & Makkonen 2005, s. 347.) Jäähtymisajan $t_{8/5}$ laskemiseen tarvittavat liitosmuotokertoimet saadaan taulukosta 1.

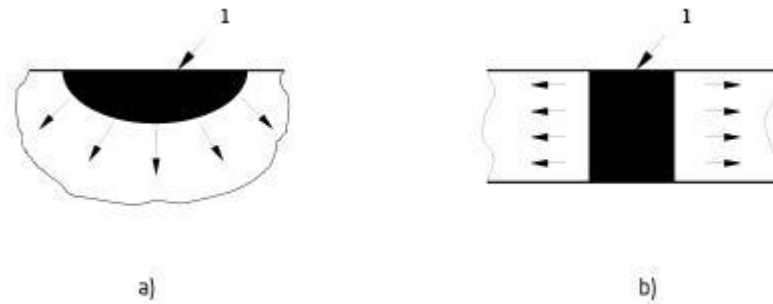


Kuva 5. Lämmönjohtuminen piena- ja päittäisliitoksessa (Davies 1993, s. 80).

Taulukko 1. Liitosmuotokerroimen vaikutus jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ (Vähäkainu 2003, s. 27).

Liitosmuoto	Liitosmuotokerroin F	
	F ₂ kaksikulotteinen lämmönjohtuminen	F ₃ kolmiulotteinen lämmönjohtuminen
Päällehitsaus	1	1
Pienahitsi kulmaliitoksessa	0,9	0,67
Pienahitsit T- tai ristiliitoksessa	0,3–0,67	0,67
Pienahitsi päällekkäisliitoksessa	0,7	0,67
V-hitsin juuripalko	noin 1	1,0–1,2
X-hitsin juuripalko	noin 1	0,7
V- tai X-hitsin välipalko	1	0,8–1,0
V- tai X-hitsin pintapalko	1	0,9–1,0
I-hitsi kaksipalkohitsauksena	1	–

Lämmönjohtumistavat on esitetty kuvassa 6, jossa a) esittää 3D-lämmönjohtumista ja b) 2D-lämmönjohtumista. 3D-lämmönjohtumista tapahtuu suhteellisen paksuilla levyillä, jolloin aineenpaksuus ei vaikuta jäähtymisaikaan. 2D-lämmönjohtumisessa puolestaan aineenpaksuus vaikuttaa jäähtymisaikaan ja sitä tapahtuu suhteellisen ohuilla levyillä. (SFS-EN 1011-2 2001, s. 108.)



Kuva 6. Lämmönjohtumistavat hitsauksessa (SFS-EN 1011-2 2001, s. 108).

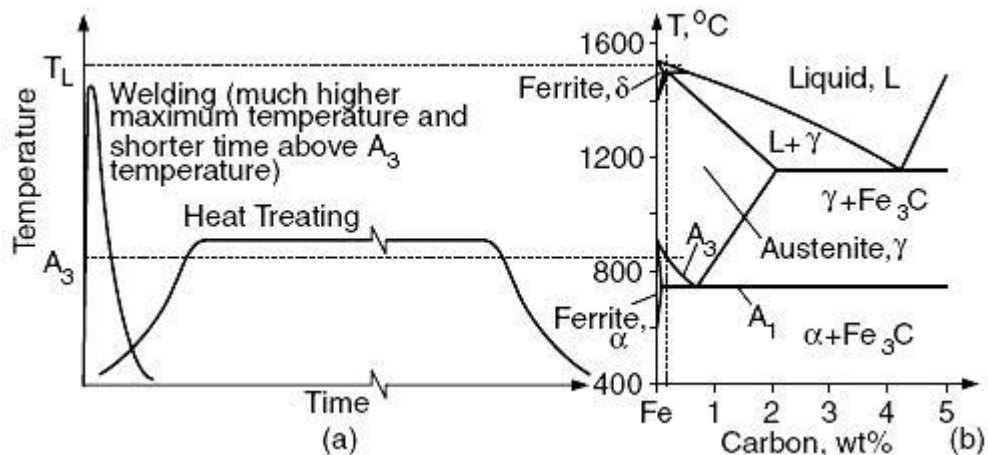
Työkappaleen aineenpaksuus, jossa tapahtuu siirtyminen 2D-lämmönjohtumisesta 3D-lämmönjohtumiseen, voidaan määrittää laittamalla jäähtymisajan $t_{8/5}$ laskukaavat (3) ja (4) yhtä suuriksi ja ratkaisemalla se aineenpaksuuden suhteen. Yksinkertaisemmin voidaan kuitenkin laskea jäähtymisajat $t_{8/5}$ kummastakin kaavasta erikseen ja käytetään sitä kaavaa, joka antaa suuremman $t_{8/5}$ -arvon. (Vähäkainu 2003, s. 25.)

5 JATKUVAN JÄÄHTYMISEN S-KÄYRÄT

S-käyrät kuvaavat austeniitin hajaantumista. Niitä on kahdenlaisia: isotermisiä S-käyriä ja jatkuvan jäähtymisen S-käyriä. Isotermiset S-käyrät kertovat eri vakioämpötiloissa austeniitin hajaantumisen ajan funktiona. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrät kertovat teräksen jatkuvasti jäähtyessä austeniitin hajaantumisen ajan funktiona. (MET Raaka-ainekäsikirja 1 2001, s. 144.)

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrien avulla voidaan ennustaa hitsausliitokseen syntyviä rakenteita. Siitä nähdään eri jäähtymisnopeuksilla syntyvä mikrorakenne muutosvyöhykkeelle sekä sen kovuus. (Vähäkainu 2003, s. 16; 20.) Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä nähdään myös, missä lämpötilassa mikäkin faasimuutos tapahtuu (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 33). Mekaanisilta ominaisuuksiltaan huonoimmat mikrorakenteet syntyvät yleensä sularajalle, joten käytännössä riittää, että sularajan faasimuutoskäyttäytyminen otetaan huomioon (Vähäkainu 2003, s. 20).

Hitsausta varten tehdyt ja lämpökäsittelyjä varten tehdyt jatkuvan jäähtymisen S-käyrät eroavat toisistaan, koska niiden lämpösyklit poikkeavat olennaisesti toisistaan, kuva 7. Hitsauksessa huippulämpötila muutosvyöhykkeellä voi nousta lähelle 1500 °C:ta. Lämpökäsittelyssä maksimi lämpötila on puolestaan 900 °C:n lähetyillä, mikä on vähän yli kriittisen lämpötilan A_3 , jossa austeniitti muodostuu. Hitsauksessa kuumennusnopeus on suuri ja aika A_3 -lämpötilan yläpuolella on lyhyt. Lämpökäsittelyssä puolestaan kuumennusnopeus on hitaampi ja pitoaika A_3 -lämpötilan yläpuolella on pidempi. (Kou 2003, s. 393.) Vertailukokeista on havaittu, että austenitointi 1300 °C:ssa ilman pitoaikaa (kuumennus noin 2 minuuttia) vastaa hyvin austenitoinnin tilaa sularajalla (Vähäkainu 2003, s. 20).



Kuva 7. Teräksen hitsauksen ja lämpökäsittelyn erot: (a) lämpösyklit; (b) Fe-C tasapainopiirros, josta näkyy myös A_1 - ja A_3 -lämpötilarajat (Kou 2003, s. 395).

Hitsaukseen sopiva jatkuvan jäähtymisen S-käyrä voidaan laatia käyttämällä termomekaanista simulaattoria sekä suurnopeusdilatometriä, joka tunnistaa faasimuutoksen aiheuttamat tilavuuden muutokset kappaleessa. Hitsattavan kappaleen kokemat lämpösyklit voidaan jäljentää pienillä koekappaleilla, jotka sopivat mekaaniseen testaukseen, käyttäen termomekaanista simulaattoria Gleebleä. Termomekaanisilla simulaattoreilla on joitain rajoituksia. Koekappaleen lämpögradientti voi olla paljon pienempi kuin todellisessa liitoksessa muutosvyöhykkeellä. Suuri ero lämpötilagradientissa voi muuttaa koekappaleen mikrorakennetta verrattuna todelliseen muutosvyöhykkeeseen. Esimerkiksi raekoko voi

kasvaa huomattavasti suuremmaksi koekappaleessa kuin todellisessa liitoksessa, erityisesti korkeissa huippulämpötiloissa, kuten 1100 °C ja sen yli. (Kou 2003, s. 396; 58–60.)

5.1 Austeniitin hajaantuminen

Austeniitin muodostuminen alkaa A_1 -lämpötilan yläpuolella ja A_3 -lämpötilan yläpuolella rakenne on täysin austeniittinen. Faasirajan ylittyessä teräksen tasapainorakenteessa pyrkii aina tapahtumaan muutos. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 25–26.)

Huoneenlämpötilassa olevan teräksen rakenne on tulos austeniitin hajaantumisesta. Austeniitin hajaantumisessa esiintyy kaksi eri mekanismia, jotka toimivat eri lämpötiloissa. Hajaantumisessa, kun lämpötila on korkea, atomit liikkuvat yli tasapainoetäisyyden. Se tapahtuu diffuusion avustuksella eli metallihilassa olevat atomit siirtyvät hilapaikalta toiselle lämpöenergian ajamana. Tällä mekanismilla syntyvät ferriittiset, perliittiset sekä bainiittiset rakenteet. Kun lämpötila on matala, austeniitti hajaantuu ilman diffuusiota leikkautumalla. Tällä mekanismilla syntyy martensiittinen rakenne. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 26.)

5.1.1 Ferriitin muodostuminen

Ferriitti muodostuu, kun austeniitti hajaantuu A_3 -lämpötilan alapuolella. Ferriitin ytimiä muodostuu lähinnä austeniitin raerajoille. Koska raerajat ovat helppo reitti diffuusionille, niihin syntyy ohuita ja jatkuvia ferriittikerroksia. Ferriitin muodostuminen hidastuu, kun sen kerrokset paksuuntuvat. Kun ferriitin diffuusion perustuva kasvu hidastuu lämpötilan laskiessa niin paljon, että raerajaferriitin kerrokset saavuttavat maksimi paksuuden, alkaa jäljellä oleva austeniitti muuttua Widmanstättenin ferriitiksi. (Bhadeshia & Honeycombe 2006, s. 291–292.)

Matalammilla lämpötiloilla syntyy Widmanstättenin ferriittiä raerajaferriitin sijaan (Kou 2003, s. 233). Widmanstättenin ferriitin muodostumisessa ferriitiksi muuttuvasta kiteestä poistuva hiili ei ehdi tasaantua austeniittirakeen sisustaan. Tällöin ferriittikiteet kasvavat

ohuina liuskoina. (Lindroos et al. 1986, s. 280.) Ferriittikiteen muodosta johtuen suuri osa hiilestä pääsee pakenemaan kasvavien kiteiden sivuille niin, että kiteiden kärki kohtaa uutta austeniittia. Widmanstättenin ferriitin kasvunopeus on niin suuri, että tavallisille hitsikoostumuksille sen muodostuminen tapahtuu sekunnin murto-osissa. (Bhadeshia & Honeycombe 2006, s. 294.)

Kun lämpötila laskee edelleen, syntyy asikulaarista ferriittiä. Tämä uusi ferriitti muodostaa uusia ytimiä kasvavan ferriitin eteen. Asikuulariset ferriittikiteet muodostavat ytimiä ytimenmuodostusta edistäviin sulkeumiin. (Kou 2003, s. 233.)

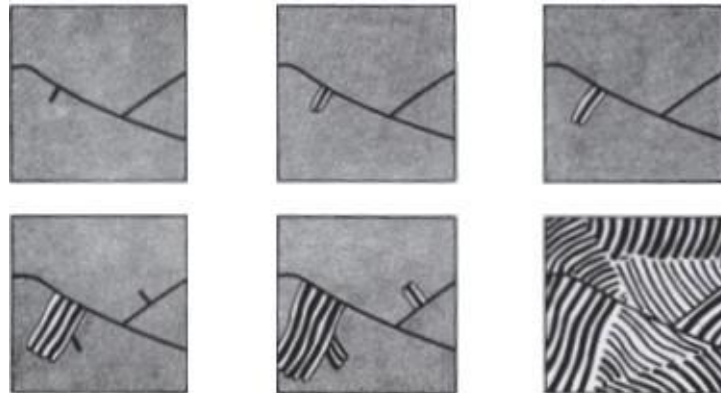
Normaaleissa käyttöolosuhteissa ferriitti on sitkeää ja hyvin muovautuvaa niin kuumana kuin kylmänäkin. Ferriitti on pehmeää ja muokkaamattomana sen kovuus vaihtelee raekoon mukaan välillä 60–90 HBW. Ferriitti on lisäksi magneettinen lämpötilaan 768 °C asti. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 14–15.)

Asikulaarinen ferriitti on toivottu mikrorakenne hitsausliitoksessa, koska se parantaa liitoksen sitkeyttä. Sen lukitseva luonne yhdessä sen hienon raekoon kanssa estää parhaiten halkeamien syntymistä. Raerajaferritin tai Widmanstättenin ferriitin muodostuminen ei ole yhtä hyvä kuin asikulaarisen ferriitin muodostuminen ajatellen liitoksen sitkeyttä, koska nämä mikrorakenteet tarjoavat polkuja halkeamien etenemiselle. (Kou 2003, s. 238–239.)

5.1.2 Perliitin muodostuminen

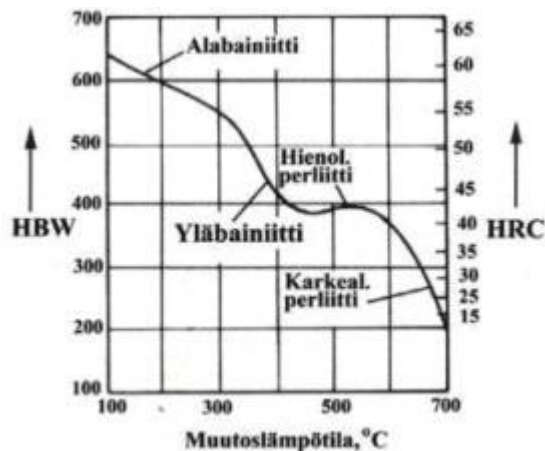
Kun austeniitti hajaantuu lämpötila-alueella A_1 –noin 500 °C, muodostuu perliittiä, joka koostuu ferriitistä ja sementiitistä. Yleensä hajaantuminen alkaa raerajalta pienestä ferriitin tai sementiitin ytimestä. Kun sementiittiydin muodostuu ja kasvaa, se alentaa samalla ympäristön hiilipitoisuutta, jolloin sementiittipartikkeli vastaavasti kasvaa. Näin ferriitti, joka pystyy liuottamaan vain vähän hiiltä, pääsee ydintymään hiilestä köyhtyneeseen sementtiin ympäristöön. Ferriitti työntää edellään hiiltä, kun se kasvaa paksuutta, kunnes uusi sementtiin ydin muodostuu. Tällä tavoin rakenteeseen kasvaa kerroksittain sementtiittiä ja ferriittiä, jotka yhdessä muodostavat ns. perliittikolonian. Kun rauta- ja

hiiliatomit siirtyvät austeniitista raerajan yli sementiittiin ja ferriittiin, pääsevät sitä mukaa perliitin lamellit kasvamaan. Kuvassa 8 on esitetty perliitin muodostumismekanismi. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 26–27.)



Kuva 8. Perliitin muodostumismekanismi (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 27).

Perliitin kovuus riippuu sen muodostumislämpötilasta, kuten kuvasta 9 nähdään. Hienolamellinen perliitti muodostuu lähempänä 500 °C lämpötilaa ja sen kovuus on noin 400 HBW. Karkealamellinen perliitti puolestaan syntyy lähempänä A₁-lämpötilaa ja sen kovuus on vain noin 200 HBW. Perliitin kuten teräksenkin lujuus riippuu erittäin paljon ferriitti- ja sementiittilamellien paksuudesta. Ohutlamellinen perliitti on lujempaa kuin karkealamellinen perliitti. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 15; 27–28.)

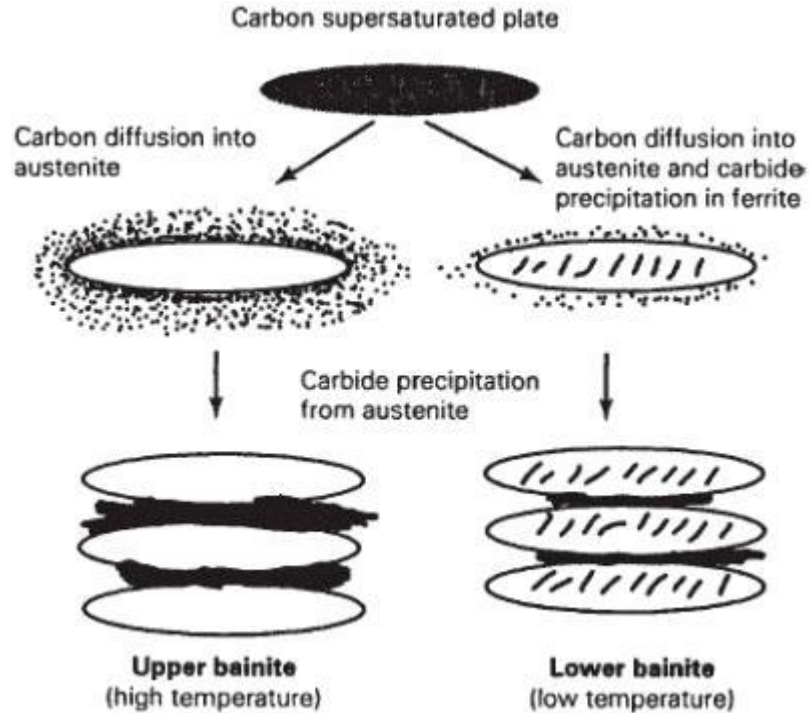


Kuva 9. Perliitin ja bainiitin kovuuden riippuvuus muodostumislämpötilasta (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 28).

5.1.3 Bainiitin muodostuminen

Bainiittireaktio tapahtuu lämpötilavälillä noin 500 °C– M_s (martensiittireaktion alkulämpötila) ja se on eräänlainen perliitti- ja martensiittireaktion välimuoto. Bainiitti muodostuu osittain diffuusion avulla ja osittain linssien leikkautumisella austeniitista. Bainiittireaktiossa ensimmäisenä syntyy ferriittiydin, joka kasvaessaan työntää hiiltä edellään. Tällöin sementiittipartikkelien syntyminen on mahdollista. Sementiitti syö hiilen ympäristöstään, jolloin M_s -lämpötila nousee hiilipitoisuuden alenemisen takia. Tämä mahdollistaa martensiittimekanismin toimimisen. Kun diffuusio ja martensiittimekanismi vuorottelevat, syntyy hyvin hienolamellinen rakenne. Bainiitissa sementiittierkaumat ovat jakautuneet satunnaisesti ferriittiseen perusaineeseen. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 31–32.)

Diffuusio tai martensiittireaktio kontrolloi bainiittireaktion etenemistä. Kun bainiitti muodostuu matalammissa lämpötiloissa, diffuusio vaikeutuu ja bainiitin rakenne muuttuu hienojakoisemmaksi. Hienojakoisuus vaikuttaa suoraan sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Yläbainiitti muodostuu korkeissa lämpötiloissa (noin 500 °C) ja sen kovuus on 400 HBW, kuten hienolamellisen perliitinkin, kuva 9. Alabainiitti muodostuu taas alemmissä lämpötiloissa (noin 300 °C) ja se on kovuudeltaan lähes martensiitin luokkaa, noin 600 HBW. Yläbainiitin ominaisuudet ovat lähellä ohutlamellisen perliitin ominaisuuksia. Alabainiitin lujuus on puolestaan lähellä martensiitin lujuutta, mutta se on päästömartensiittia sitkeämpää. Kuvassa 10 on esitetty ylä- ja alabainiitin muodostumismekanismit. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 15; 32.)



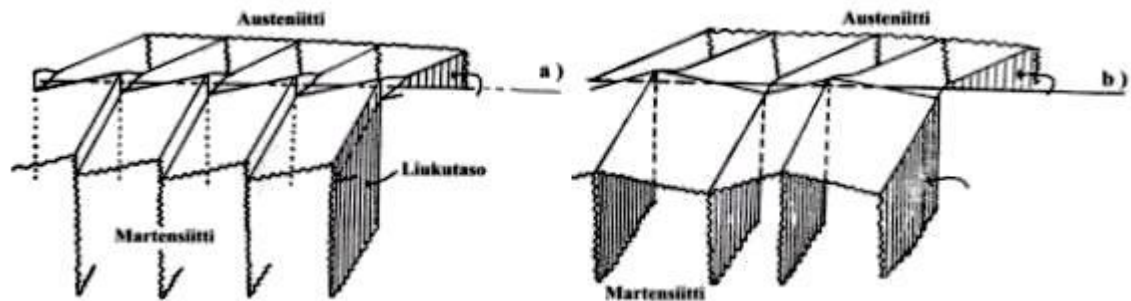
Kuva 10. Kaaviollinen esitys ylä- ja alabainiitin muodostumismekanismeista (Bhadeshia & Honeycombe 2006, s. 143).

5.1.4 Martensiitin muodostuminen

Martensiittireaktio tapahtuu tietyllä lämpötila-alueella. Alueen ylärajan tunnus on M_s ja alarajan tunnus on M_f (martensiittireaktion loppulämpötila). M_s -lämpötilassa tietyllä hiilipitoisuudella martensiittireaktio alkaa ja M_f -lämpötilan alapuolella rakenne on muuttunut kokonaan martensiittiseksi. Lämpötilavälillä M_s – M_f jokaisessa lämpötilassa tietty osa austeniitista on hajaantunut. Martensiittilinssit eivät kasva reaktion edistyessä, vaan rakenteeseen syntyy kokonaan uusia linssejä, joista jokainen on oma kiteensä. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 29.)

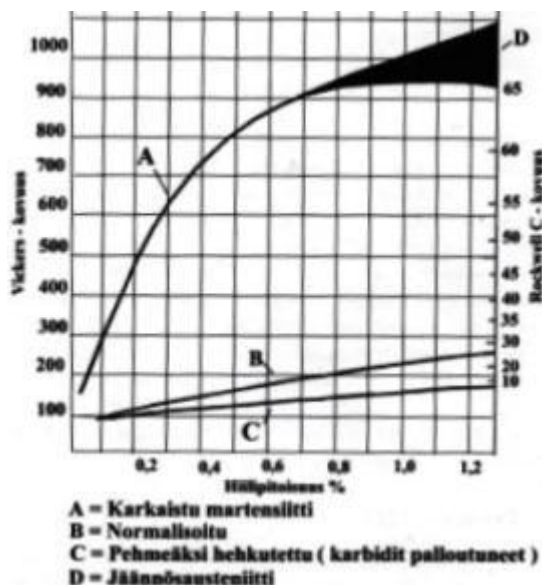
Austeniitti muuttuu leikkautumalla hiiliylikylläiseksi ferriitiksi eli martensiitiksi. Martensiitin hiilipitoisuus pysyy samana kuin austeniitin, josta se muodostuu. Martensiitti voi leikkautua joko linssimäisenä levymartensiittina tai neulasmaisina sälemartensiittikiteinä, kuva 11. Kun austeniitin raekoko on suuri, myös martensiittilinssien koko

muodostuu suureksi, koska ne saattavat leikkautua raerajalta toiselle. Martensiittireaktiossa tapahtuu tilavuuden kasvu, koska tiiviisti pakattu p.k.k. (pintakeskinen kuutiollinen hila) austeniitti korvautuu väljemmin pakatuksi t.k.k. (tilakeskinen kuutiollinen hila) ferriitiksi, jonka hilan hiiliatomit muuttuvat lievästi tetragoniseksi. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 28.)



Kuva 11. Martensiitin leikkautuminen austeniitista: a) sälemartensiittina (liukumalla) ja b) levymartensiittina (kaksostumalla) (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 29).

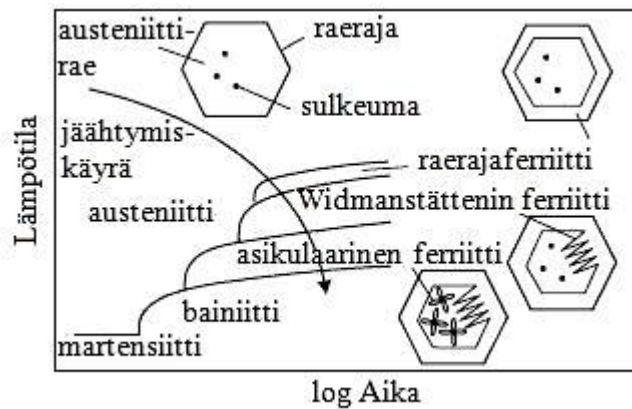
Martensiitti on kovaa ja haurasta. Sen kovuus riippuu hiilipitoisuudesta. Teräksen hiilipitoisuuden kasvaessa kasvaa myös martensiitin kovuus, joka vaihtelee noin 250–950 HV välillä, kuva 12. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 15; 31.)



Kuva 12. C-pitoisuuden vaikutus teräksen kovuuteen (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 31).

5.2 Jäätymisessä syntyvät mikrorakenteet

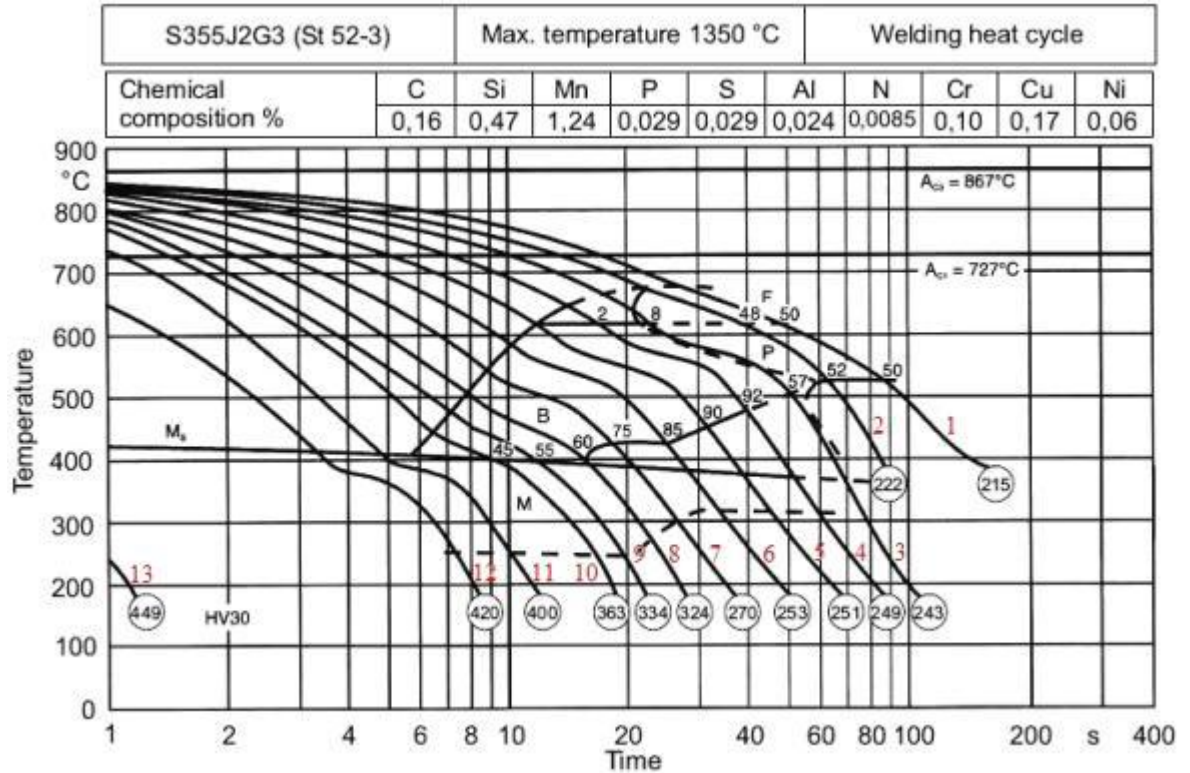
Matalahiilisten ja niukkaseosteisten terästen jäätymisessä voi syntyä useita mikrorakenteita, kuten kuvasta 13 nähdään. Jäätymiskäyrästä riippuen mikrorakenteiksi voi syntyä raerajaferrittiä, Widmanstättenin ferrittiä, asikulaarista ferrittiä, bainiittia tai martensiittia. Myös polygonaalista ferrittiä voi syntyä. Kuvassa kuusikulmiot esittävät hitsiaineessa olevan austeniittirakeen poikkileikkausta, joissa näkyy myös raerajat sekä sulkeumia. (Kou 2003, s. 232–234.)



Kuva 13. Kaaviollisesti esitetty matalahiilisen teräksen S-käyrä (Muokattu: Kou 2003, s. 232).

Yleensä jatkuvan jäätymisen S-käyrissä ei eritellä eri ferrittifaaseja. Kuvassa 14 on esitetty teräksen S355J2G3 (tunnus nykystandardin mukaan S355J2) jatkuvan jäätymisen S-käyrä. S-käyrä on laadittu hitsauslämpösyklin mukaisesti hitsausta varten. S-käyrältä nähdään eri alueilta kuinka monta prosenttia kyseistä faasirakennetta on syntyvässä mikrorakenteessa. Jäätymiskäyrien päässä on esitetty myös syntyvän mikrorakenteen kovuus, kun liitos jäähtyy kyseisen jäätymiskäyrän mukaisesti. Kuvasta 14 voidaan erottaa seuraavat käyrät ja alueet:

- ferriittialueen käyrä eli ferriittinenä (F)
- perliittialueen käyrä (P)
- bainiittialueen käyrä eli bainiittileuka (B)
- martensiittialue (M) ja martensiittireaktion alkulämpötila (M_s)

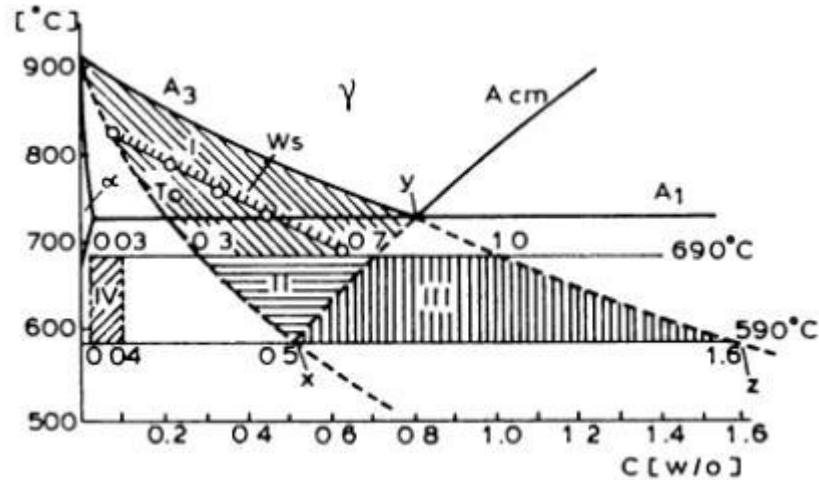


Kuva 14. Teräksen S355J2G3 jatkuvan jäähtymisen S-käyrä hitsausta varten (Dilthey 2005, s. 19).

Jäähtymisessä syntyvät mikrorakenteet riippuvat jäähtymisnopeudesta. Seuraavassa kerrotaan eri jäähtymisnopeuksilla syntyvistä mikrorakenteista viitaten kuvan 14 jäähtymiskäyriin sekä Fe-Fe₃C tasapainopiirroksen, kuva 15.

Kun jäähtymisnopeus on hidas (jäähtymiskäyrät 1 ja 2), ferriittiä ydintyy raerajoille alijäähtymisen ollessa vähäistä. Lämpötilan laskiessa austeniittialueet, jotka ovat rikastuneet hiilestä niin paljon, että ne ovat eutektoidikolmion alueella xyz kuvassa 15,

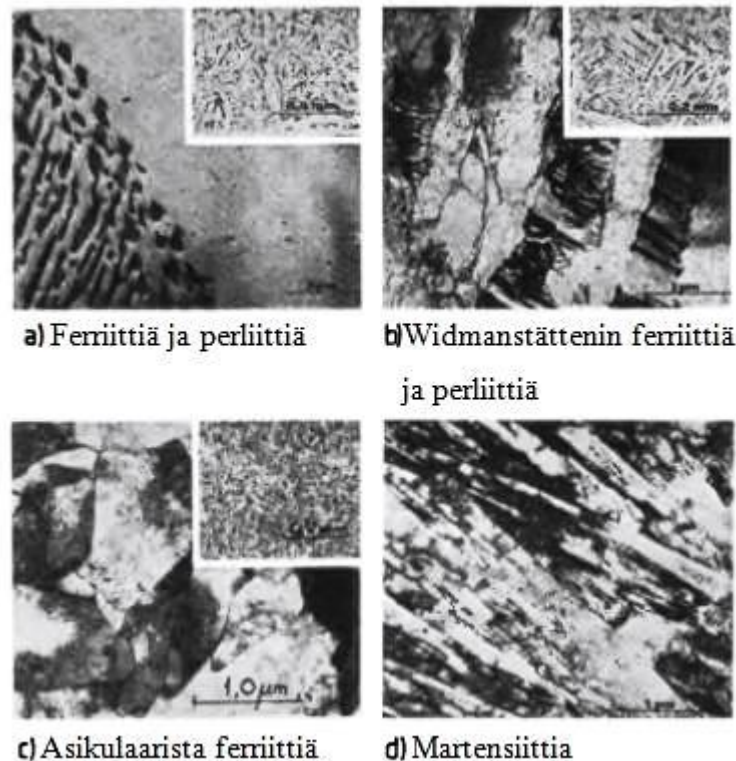
muuttuvat perliitiksi. Tällöin mikrorakenteeksi muodostuu ferriittis-perliittinen rakenne, kuva 16 a). (Easterling 1992, s. 105–106.)



Kuva 15. Osa Fe-Fe₃C tasapainopiirroksesta (Easterling 1992, s. 104).

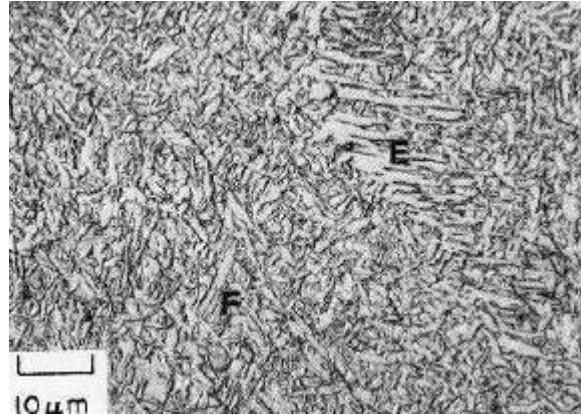
Jäähtymisnopeuden kasvaessa hiukan, alijäähtymisen ollessa A₃-lämpötilan alapuolella suurempaa kuin hitaassa jäähtymisessä, ferriitti ydintyy ja kasvaa raerajoilta. Kun austeniitti alijäähtyy kuvan 15 W_s-rajan alapuolelle, syntyy Widmanstättenin ferriittiä. Jäähtymisen jatkuessa alle A₁-rajan hiilirikastuneet alueet Widmanstättenin ferriitin välissä muuttuvat sementiitiksi tai perliitiksi. Syntyvä mikrorakenne, jossa on Widmanstättenin ferriittiä sekä perliittiä, on esitetty kuvassa 16 b). (Easterling 1992, s. 106–107.)

Kun hitsi alijäähtyy lähelle A₁-lämpötilaa, syntyy asikulaarista ferriittiä, joka ydintyy rakeissa oleviin sulkeumiin. Karbideja muodostavat seosaineet rajoittavat raerajaferritin kasvua ja edistävät näin asikulaarisen ferriitin kasvua. Kuvassa 16 c) on esitetty mikrorakenne, jossa on asikulaarista ferriittiä. (Easterling 1992, s. 107.)



Kuva 16. Hitsauksen jälkeisessä jäähtymisessä syntyviä mikrorakenteita (Easterling 1992, s. 105–106).

Keskinopeassa jäähtymisessä (jäähtymiskäyrät 4–7) syntyy bainiittisia rakenteita. Esimerkiksi kuvan 14 jäähtymiskäyrät 4–7 tuottavat mikrorakenteita, joissa on bainiittia 92–75 %. Bainiitin muodostuminen alkaa metastabiilista austeniitista lämpötilassa, joka on liian matala, jotta hiili pystyisi siirtymään diffuusion avulla raerajoille. Jäähtymisnopeudesta riippuen voi syntyä yläbainiittia tai alabainiittia siten, että alabainiitti syntyy nopeammassa jäähtymisessä. (Kaplan & Murry 2008, s. 108.) Alieutektoidisilla kuumavalssatuilla rakenneteräksillä, kuten kuvan 14 teräksellä, syntyy yläbainiittia (Metallurgia s. 4). Kuvassa 17 on esitetty mikrorakenne, jossa on ylä- ja alabainiittia.



Kuva 17. Mikrorakenne, jossa on yläbainiittia (E) ja alabainiittia (F) (Kou 2003, s. 233).

Erittäin nopeilla jäähtymisnopeuksilla (jäähtymiskäyrät 11–13), joissa austeniitin hajaantuminen tapahtuu M_s -lämpötilan alapuolella, syntyy martensiittia. Tällöin hiilen diffuusiolle ei ole aikaa. Kuvassa 16 d) on esitetty martensiittinen mikrorakenne. (Easterling 1992, s. 108.) Jäähtymisen ollessa jäähtymiskäyrien 11–13 mukainen, kuvassa 14, syntyvä mikrorakenne on täysin martensiittinen.

Karkenemisen estäminen on onnistuneen hitsaamisen edellytys. Jos teräs on karkeneva, se voi johtaa kovan ja hauraan martensiitin syntymiseen, mikä lisää vetyhalkeilutaipumusta. (Seppälä 2007, s. 14.) Niinpä martensiittisia mikrorakenteita on vältettävä valitsemalla jäähtymiskäyrä S-käyrältä siten, että mikrorakenteeksi ei synny liikaa martensiittia. Martensiitin määrän rajana voidaan pitää 50 % (Martikainen 2011, s. 42). Esimerkiksi kuvan 14 jäähtymiskäyrän 10 mukaisessa jäähtymisessä syntyy martensiittia vielä 55 %, joka on yli sallitun rajan.

S-käyrältä nähdään myös syntyvän mikrorakenteen kovuus huoneenlämmössä, minkä perusteella voidaan valita jäähtymiskäyrä. Yleensä tuotekohtaisena rajana voi olla esimerkiksi 350 HV10 tai 400 HV10, mikäli käytetään esilämmitystä ja/tai vähävetyistä hitsausmenetelmää. Lisäksi painelaitteissa on usein rajana 320 HV10. (Martikainen 2011, s. 40.) Esimerkiksi kuvan 14 jäähtymiskäyriä 10–13 käytettäessä syntyy liian kova mikrorakenne, jos rajana käytetään 350 HV30.

Kun katsotaan jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ kuvasta 14, nähdään, että yleensä suositeltavien jäähtymisaikojen (10–30 s) alueelle mahtuvat käyrät 5, 6 ja 7. Jäähtymiskäyrän 5 jäähtymisaika $t_{8/5}$ on noin 26 s ja syntyvässä mikrorakenteessa on 90 % bainiittia ja 10 % martensiittia sekä kovuus on 251 HV30. Jäähtymiskäyrän 6 jäähtymisaika $t_{8/5}$ on noin 18 s ja mikrorakenne sekä kovuus ovat melkein samat kuin jäähtymiskäyrällä 5 saavutettava mikrorakenne ja kovuus. Jäähtymiskäyrän 7 jäähtymisaika $t_{8/5}$ on puolestaan noin 12 s ja syntyvässä mikrorakenteessa on 75 % bainiittia ja 25 % martensiittia sekä kovuus on 270 HV30.

5.3 Seosaineiden vaikutus S-käyriin

Eri seosaineilla on erilaisia vaikutuksia jatkuvan jäähtymisen S-käyrän muotoon. Faasimuutosjärjestys saattaa muuttua seostuksen johdosta tai faasimuutokset voivat siirtyä matalampiin lämpötiloihin. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 103.)

Teräksen perusseosaineita ovat hiili (C), pii (Si) ja mangaani (Mn), jotka nostavat teräksen lujuutta, mutta ne myös lisäävät kylmähälkeiluriskiä hitsauksessa. Niukkaseosteisiin teräksiin ei normaalisti lisätä kromia (Cr), kuparia (Cu), molybdeenia (Mo) ja nikkeliä (Ni). Niitä esiintyy ainoastaan jäännöspitoisuuksina, jolloin ne eivät vaikuta oleellisesti teräksen ominaisuuksiin. Mikrooseosaineita, joita lisätään teräkseen, ovat niobi (Nb), vanadiini (V), titaani (Ti) ja alumiini (Al). Mikrooseosaineita seostetaan pieniä määriä, jolloin ne muodostavat teräksessä hyvin pieniä erkaumia hiilen ja/tai typen kanssa. Nämä erkaumat estävät raekoon kasvua korkeissa lämpötiloissa hitsauksen yhteydessä. Kun raekoko pienenee, lujuus nousee ja iskutkeys paranee. (Vähäkainu 2003, s. 17.)

Standardissa SFS-EN 10025 on esitetty rakenneteräksien kemialliset koostumukset. Seuraavissa taulukoissa (2 ja 3) on esitetty standardien SFS-EN 10025-2 ja SFS-EN 10025-4 mukaan seostamattomien rakenneterästen sekä termomekaanisesti valssattujen hitsattavien hienoraeterästen kemialliset koostumukset.

Taulukko 2. Seostamattomien rakenneterästen kemialliset koostumukset. Sulatusanalyysi (SFS-EN 10025-2 2004, s. 34).

Teräs-nimike	C max. % nimellispaksuuksilla, mm			Si % max.	Mn % max.	P % max.	S % max.	N % max.	Cu % max.
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40						
S235JR	0,17	0,17	0,20	-	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55
S235J0	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55
S235J2	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,025	0,025	-	0,55
S275JR	0,21	0,21	0,22	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55
S275J0	0,18	0,18	0,18	-	1,50	0,030	0,030	0,012	0,55
S275J2	0,18	0,18	0,18	-	1,50	0,025	0,025	-	0,55
S355JR	0,24	0,24	0,24	0,55	1,60	0,035	0,035	0,012	0,55
S355J0	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55
S355J2	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55
S355K2	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55

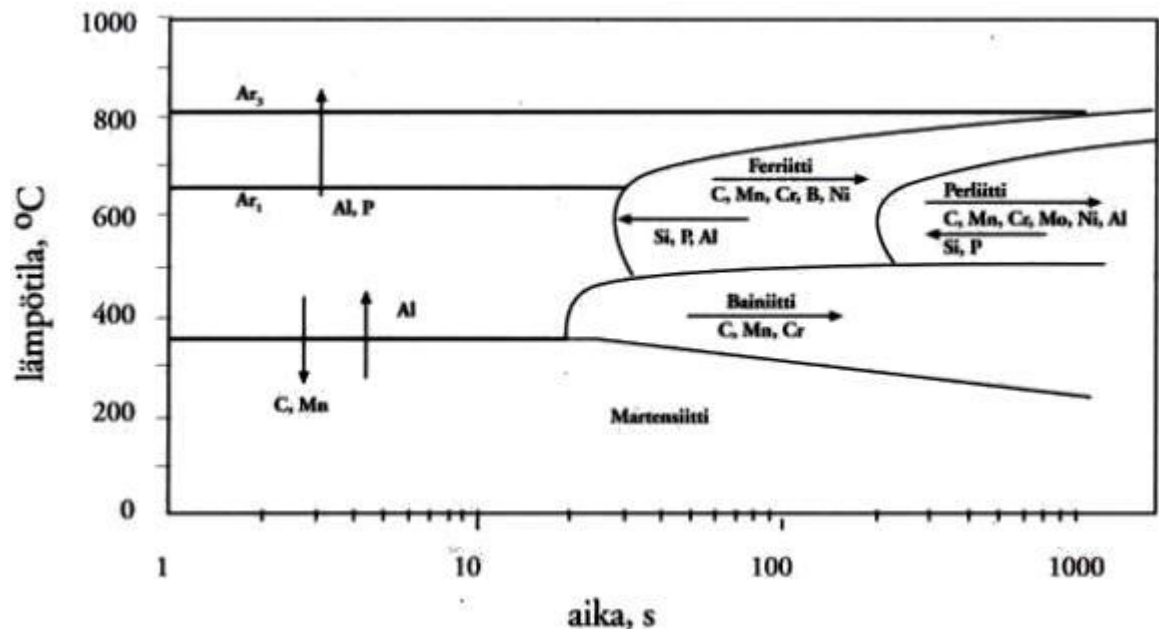
Taulukko 3. Termomekaanisesti valssattujen hitsattavien hienoraeterästen kemialliset koostumukset. Sulatusanalyysi (SFS-EN 10025-4 2004, s. 30).

Teräs-nimike	C % max.	Si % max.	Mn % max.	P % max.	S % max.	Nb % max.	V % max.	Al % min.	Ti % max.	Cr % max.	Ni % max.	Mo % max.	Cu % max.	N % max.
S275M	0,13	0,50	1,50	0,030	0,025	0,05	0,08	0,02	0,05	0,30	0,30	0,10	0,55	0,015
S275ML				0,025	0,020									
S355M	0,14	0,50	1,60	0,030	0,025	0,05	0,10	0,02	0,05	0,30	0,50	0,10	0,55	0,015
S355ML				0,025	0,020									
S420M	0,16	0,50	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025
S420ML				0,025	0,020									
S460M	0,16	0,60	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025
S460ML				0,025	0,020									

Kun tutkitaan seosaineiden vaikutuksia S-käyriin, pitää huomioon ottaa kaikki mahdolliset seosaineet. Seostamattomilla teräksillä suurimmat vaikutukset S-käyriin on teräksen perusseosaineilla. Termomekaanisesti valssatuilla hienoraeteräksillä pitää huomioon ottaa myös mikroseosaineet, jotka vaikuttavat S-käyrien muotoon ja sijaintiin.

Austeniitin hajaantuminen hidastuu liuenneiden seosaineiden vaikutuksesta, joista poikkeuksena on koboltti. Mitä seostetumpi teräs on, sitä pidemmille ajoille eli enemmän oikealle S-käyrät siirtyvät. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 36.) Seosaineiden lisäys siirtää S-käyriä myös matalammille lämpötiloille (Kou 2003, s. 235). Kuvasta 18 nähdään

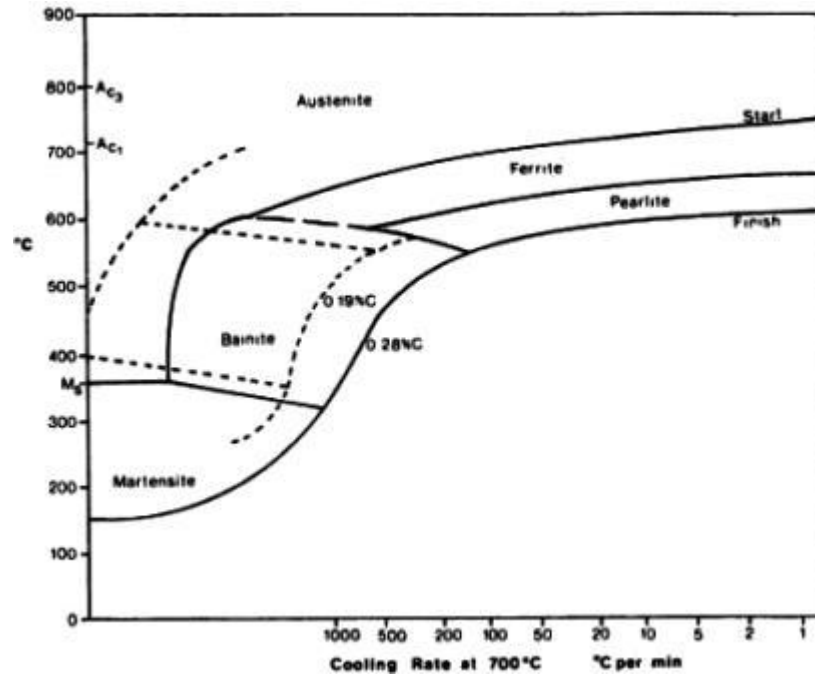
yleisimpien seosaineiden vaikutukset S-käyriin. Eri seosaineilla on erilaisia vaikutuksia faasimuutoslämpötiloihin. Niinpä pitääkin määrittää teräslajikohtaiset S-käyrät, joista näkyy seosaineiden yhteisvaikutus. Nikkeli, kromi, mangaani ja kupari ovat karkenevuutta eli martensiitin muodostamista edistäviä seosaineita. Ne siirtävät faasinäniä pidemmille ajoille. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 36.)



Kuva 18. Seosaineiden vaikutus S-käyriin (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 36).

Hiili

Hiili lisää tehokkaimmin karkenevuutta ja se kontrolloi myös martensiitin kovuutta sekä muotoa (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 103). Kuvan 18 mukaan hiili viivästyttää ferriitti-, perliitti- ja bainiittireaktioita sekä laskee M_s -lämpötilaa. Kuvan 19 esimerkistä nähdään hiilen suuri vaikutus C-Mn-teräksen S-käyrään. Hiilipitoisuuden nosto 0,19 %:sta 0,28 %:iin tuottaa laajemman bainiittialueen sekä leveämmän martensiittialueen. Suhteellisen pieni hiilipitoisuuden nosto muuttaa huomattavasti bainiitti- ja martensiittialueiden sijaintia. (Easterling 1992, s. 108–109.)



Kuva 19. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrä C-Mn-teräkselle hiilipitoisuuksilla 0,19 % (katkoviiva) ja 0,28 % (yhtenäinen viiva) (Easterling 1992, s.109).

Pii

Pii lujittaa kiinteää liuosta, parantaa sitkeyttä ja siirtää A_3 -rajaa ylöspäin. Pii yhdessä mangaanin kanssa nopeuttaa austeniitin hajaantumista. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 104.) Kuvan 18 mukaan pii siirtää perliitti- ja ferriittialueita lyhyemmille ajoille.

Mangaani

Mangaani edistää tehokkaasti teräksen karkenevuutta. Mangaani liuosluujittaa, suosii austeniittia sekä se myös siirtää A_3 -rajaa alaspäin. Kun mangaaniseostus on korkea, se suosii asikulaarisen ferriitin ja bainiitin muodostusta. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 104.) Kuten kuvasta 18 nähdään, mangaani vaikuttaa hiilen tavoin siirtäen kaikkia S-käyrän alueita pidemmille ajoille sekä laskien M_s -lämpötilaa.

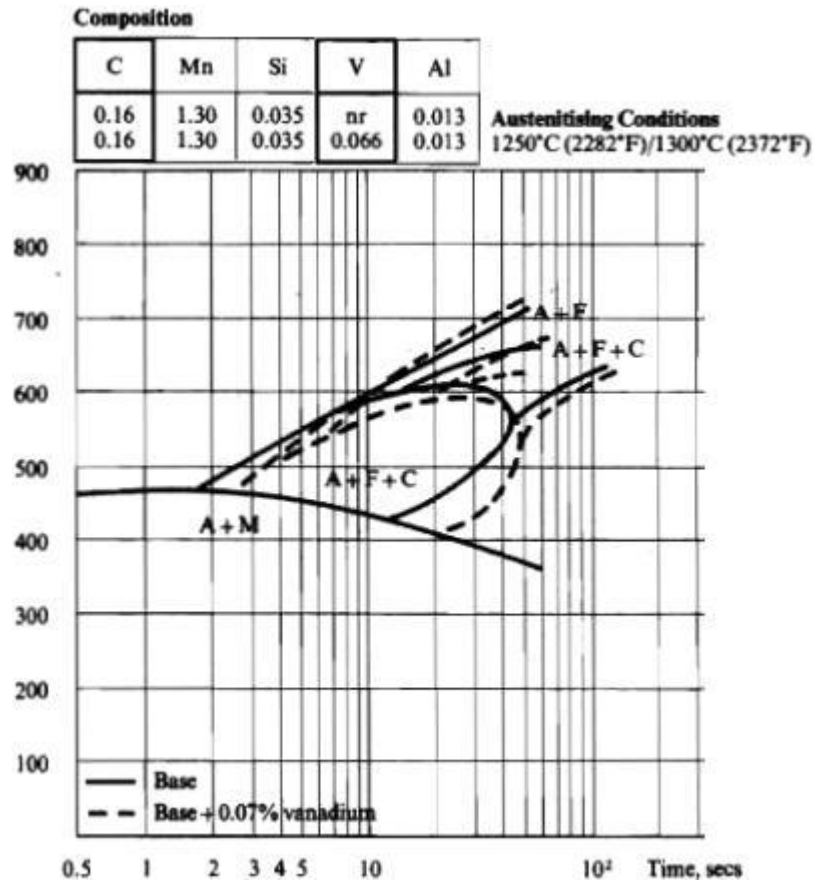
Mikroseosaineet

Niobi, vanadiini ja titaani ovat voimakkaita karbidien ja nitridien muodostajia. Nämä hyvin pienet karbidit ja nitridit estävät raekoon kasvua. Titaaninitridi on kaikkein stabiilein, koska se ei liukene helposti korkeissa lämpötiloissakaan. Tämän takia titaani on tehokkain aine estämään austeniitin rakeenkasvua hitsauksessa. (Kou 2003, s. 405.)

Austeniitin raekoon kasvu siirtää S-käyriä pidemmille ajoille (Kou 2003, s. 236). Tämän johdosta, kun mikroseosaineet estävät austeniitin raekoon kasvua, S-käyrät eivät siirry rakeenkasvun johdosta oikealle pidemmille ajoille, vaan pysyvät lyhyemmällä ajoilla.

Kuvasta 18 nähdään alumiinin vaikutuksia S-käyriin. Alumiini siirtää perliitin muodostumista pidemmille ajoille, kun taas ferriitin muodostumista se siirtää lyhyemmille ajoille. Alumiini myös nostaa M_s -lämpötilaa sekä A_1 - ja A_3 -lämpötiloja. Myös niobi viivästyttää austeniitin hajaantumista ferriitiksi (Bleck et al. s. 10). Näin niobi siirtää ferriittialuetta lyhyemmille ajoille.

Vanadiinikarbidit muodostuvat teräksen rakenteeseen jo 0,01 %:n vanadiinipitoisuuksilla. Kun nämä karbidit liukenevat austeniittiin korkeissa lämpötiloissa, S-käyrät siirtyvät pidemmille ajoille. Jos karbidit eivät liukene, ne kiihdyttävät austeniitin hajaantumista ja S-käyrät siirtyvät vasemmalle. (Lindroos et al. 1986, s. 353.) Hitsauksen aikana vanadiinin ja niobin karbidit sekä nitridit liukenevat muutosvyöhykkeellä, jossa lämpötila on yli 1100 °C (Chen & Pollack 1993, s. 417). Kuvasta 20 nähdään vanadiinin vaikutus rakenneteräksen S-käyrään. Siinä yhtenäiset viivat esittävät S-käyriä kuvan mukaisella koostumuksella ilman vanadiinia ja katkoviivat S-käyriä, kun koostumuksessa on 0,07 % vanadiinia.

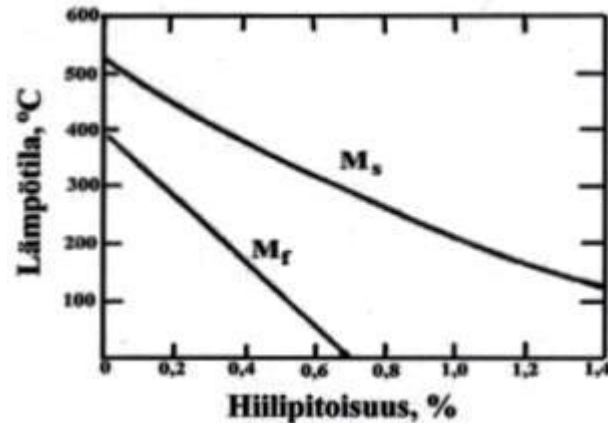


Kuva 20. Vanadiinin vaikutus rakenneteräksen S-käyrään (Vanitec 1985, s. 22).

Seosaineiden vaikutus martensiittireaktioon

Austeniittiin liuenneet seosaineet vaikeuttavat sen muuttumista martensiitiksi, kobolttia lukuun ottamatta. Seosainepitoisuuden kasvaessa M_s - ja M_f -lämpötilat laskevat. Hiilellä on suurin vaikutus näihin lämpötiloihin ja se alentaakin M_s -lämpötilaa 350 °C yhtä pitoisuusprosenttia kohden. Muille seosaineille on saatu arvoja kuinka paljon M_s -lämpötila alenee yhtä pitoisuusprosenttia kohden: Mn 40 °C, V 35 °C, Cr 20 °C, Ni 17 °C, Cu 10 °C ja W 5 °C. Kuvassa 21 on esitetty hiiliteräksen hiilipitoisuuden vaikutus M_s - ja M_f -lämpötiloihin. Jos seosaineet muodostavat karbideja, se heikentää hiilen tehoa. Tällöin seosainekarbidit nostavat M_s -lämpötilaa. Yhden pitoisuusprosentin muutoksella karbideja muodostanut hiili nostaa M_s -lämpötilaa 15 °C ja alumiini 30 °C. Seosaineiden vaikutukset

ilmenevät vain, jos ne ovat lienneet austeniittiin ja niiden vaikutukset ovat lähes lineaarisia sekä yhteenlaskettavia. (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 30; 105.)



Kuva 21. Hiilipitoisuuden vaikutus M_s - ja M_r -lämpötiloihin (Härkönen & Kivivuori 2004, s. 30).

Teräksen valmistusmenetelmän vaikutus

Teräksen valmistusmenetelmä voi vaikuttaa huomattavasti S-käyrien muotoon. Esimerkiksi termomekaanisella käsittelyllä saadaan korkea lujuus seostuksen ollessa matala. Matala hiilipitoisuus ja edullinen mikrorakenne tuottavat termomekaanisesti valssatuille teräksille hyvät iskutietoisuudet. (Vähäkainu 2003, s. 11.) Matalan seostuksen ansiosta termomekaanisesti valssattu teräs ei ole yhtä helposti karkeneva kuin saman lujuusluokan perinteinen rakenneteräs. Tämän takia S-käyrät sijaitsevat lyhyemmällä ajoilla eli enemmän vasemmalla kuin saman lujuusluokan muilla korkeammin seostetuilla teräksillä. Teräksen toimitustila vaikuttaa siis olennaisesti S-käyrän muotoon ja sijaintiin.

Seuraavassa, taulukko 4, on vertailtu kuumavalssatun teräksen S355J2G3 ja termomekaanisesti valssatun S355ML teräksen tyypillisiä kemiallisia koostumuksia. Saman lujuusluokan perinteisen teräksen hiilikvivalentin (CE) arvo on yleensä noin 0,1 % suurempi kuin saman aineenpaksuuden omaavan termomekaanisesti valssatun teräksen (Schröter 2001, s. 710). Hiilikvivalentin avulla voidaan arvioida teräksen kemiallisen

koostumuksen perusteella sen karkenevuutta ja kylmähalkeilualttiutta (Vähäkainu 2003, s. 37).

Taulukko 4. Teräksien S355ML ja S355J2G3 tyypillisten kemiallisten koostumusten vertailu (Muokattu: Schröter 2001, s. 711).

	S 355 J2G3 typical ladle analysis	S 355 ML typical ladle analysis
C	0,17	0,08
Si	0,45	0,35
Mn	1,50	1,45
P	0,018	0,012
S	0,015	0,005
Nb	-	0,02
V	-	-
Mo	-	-
Ni	-	-
CE	0,42	0,32
Pcm	0,26	0,16
CET	0,32	0,23

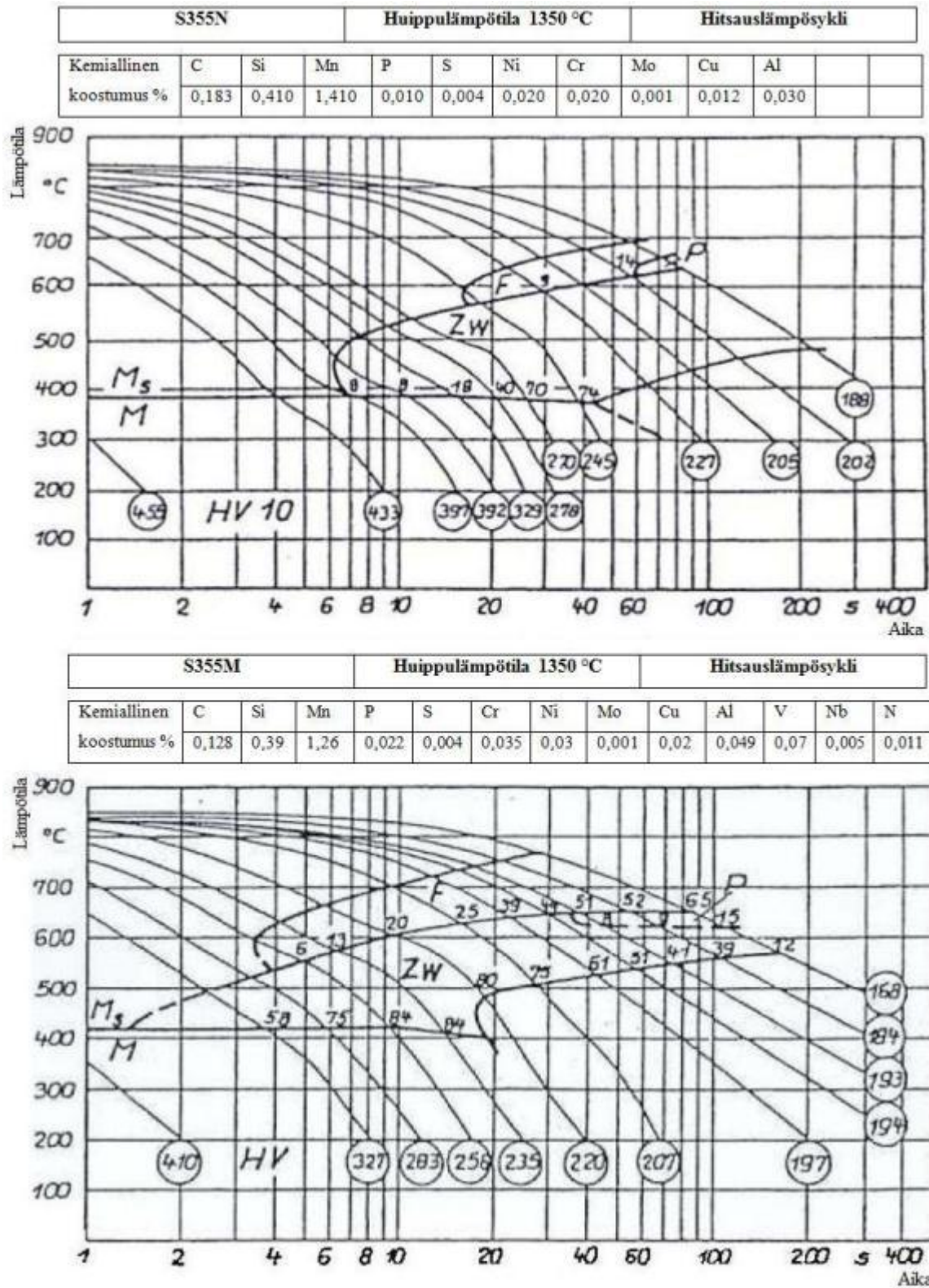
carbon equivalents:

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

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

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

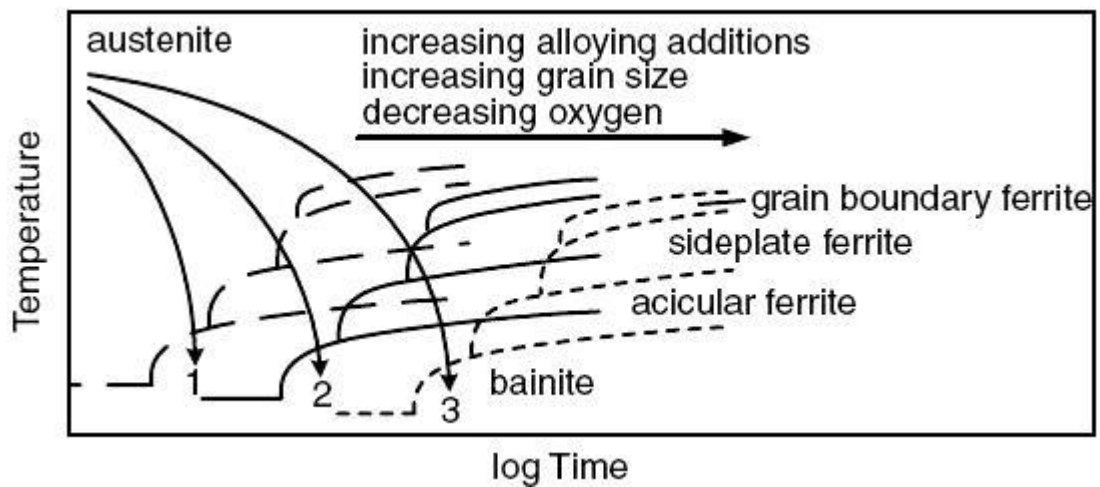
Kuvassa 22 on verrattu normalisoidun S355N ja termomekaanisesti valssatun S355M teräksen jatkuvan jäähtymisen S-käyriä. Kuvassa Zw tarkoittaa bainiittia. Kuvasta 22 nähdään, että normalisoidun teräksen ferriitti-, perliitti- ja bainiittialueet sijaitsevat huomattavasti pidemmillä ajoilla kuin termomekaanisesti valssatulla teräksellä ja lisäksi termomekaanisesti valssatulla teräksellä mikrorakenne tulee täysin martensiittiseksi vain, kun jäähtymisaika $t_{8/5}$ on hyvin pieni. Kun jäähtymisaika $t_{8/5}$ on noin 17 s, syntyvässä mikrorakenteessa on 20 % ferriittiä ja 80 % bainiittia eikä yhtään martensiittia. Kovuus on tällöin 220 HV. Saman lujuusluokan normalisoidulla teräksellä päästään mikrorakenteeseen, jossa ei ole yhtään martensiittia jäähtymisajan $t_{8/5}$ ollessa noin 43 s. Tällöin mikrorakenteessa on 9 % ferriittiä ja 91 % bainiittia sekä kovuus on 227 HV.



Kuva 22. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrät hitsausta varten teräksille S355N ja S355M (Hubo & Schröter 2001, s. 562).

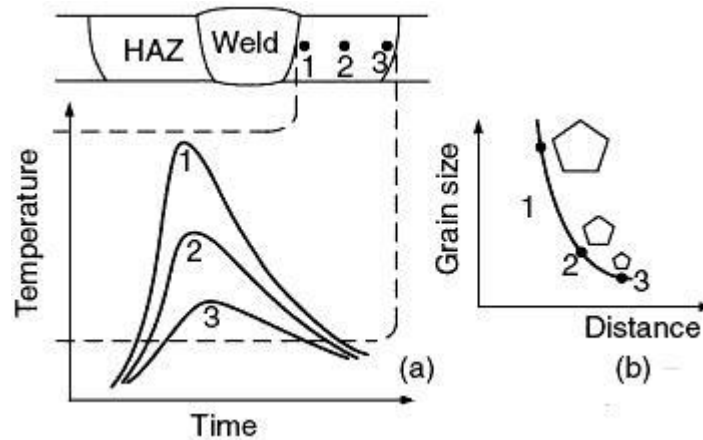
5.4 Muiden tekijöiden vaikutukset

Austeniitin raekoon kasvu vaikuttaa S-käyriin samalla tavalla kuin seosaineiden lisäys. Kun austeniitin raekoko kasvaa, ferriitille jää vähemmän tilaa raerajoilla ferriittiytimien muodostamiseen. Tämä siirtää S-käyriä pidemmille ajoille ja matalammille lämpötiloille, kuten kuvasta 23 nähdään. Jos katsotaan jäähtymiskäyrää 3 kuvassa 23, raekoon ollessa suuri, hajaantumisen tuloksena voi syntyä pääasiassa esiintyvien raerajaferritin ja Widmanstättenin ferritin (kuvassa sideplate ferrite) (vasemmalla olevat S-käyrät) sijaan ensisijaisesti esiintyvää asikulaarista ferriittiä (keskimmäiset S-käyrät) ja edelleen ensisijaisesti esiintyvää bainiittia (oikealla olevat S-käyrät). (Kou 2003, s. 235–236.)



Kuva 23. Seosaineiden, raekoon ja happipitoisuuden vaikutukset jatkuvan jäähtymisen S-käyrään matalahiiliselle teräkselle (Kou 2003, s. 236).

Kuvassa 24 on esitetty rakeenkasvu muutosvyöhykkeellä. Siitä nähdään, että rakeenkasvu muutosvyöhykkeellä tapahtuu lämpösykliin mukaisesti. Mitä lähempänä sularajaa ollaan, sitä suurempi huippulämpötila on ja sitä pidempään materiaali pysyy korkeassa lämpötilassa. Rakeenkasvu lisääntyy, kun lämpötila nousee ja aika, jonka materiaali on korkeassa lämpötilassa, pidentyy. Näin raekoko on sitä suurempi mitä lähempänä sularajaa ollaan. (Kou 2003, s. 349.)

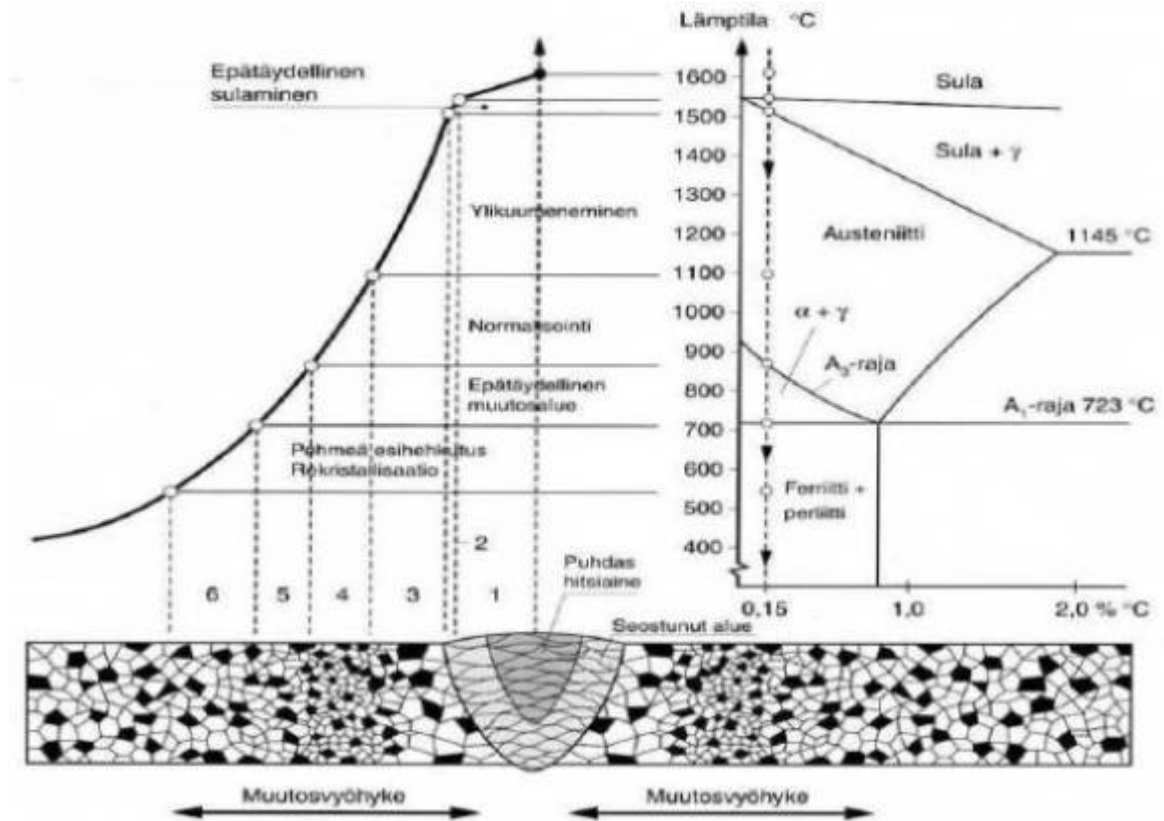


Kuva 24. Rakeenkasvu muutosvyöhykkeellä: (a) lämpösyklit; (b) raekoon vaihtelut (Kou 2003, s. 350).

Myös hitsiaineen happipitoisuudella on vaikutus jatkuvan jäähtymisen S-käyriin ja syntyvään mikrorakenteeseen. Happipitoisuuden nostaminen pienentää austeniitin raekokoa. Tästä johtuen happipitoisuuden pienentämisellä on samanlainen vaikutus kuin austeniitin raekoon kasvulla, kuten kuvasta 23 nähdään. (Kou 2003, s. 236.)

6 HITS AUSLIITOKSEN MIKRORAKENNE JA OMINAISUUDET

Hitsauksen aikana lämpötila vaihtelee liitoskohdassa sulan teräksen lämpötilasta käytettyyn työlämpötilaan kapealla alueella. Näin hitsausliitoksen eri kohtiin kohdistuu erilainen lämpökäsittelyvaikutus ja liitokseen syntyy vyöhykkeitä, joilla on erilaisia mikrorakenteita. Kuvassa 25 on esitetty eri hitsausliitoksen vyöhykkeet teräksessä. Vyöhykkeiden mikrorakenne ja ominaisuudet ovat riippuvaisia huippulämpötilasta ja sen kestoajasta, jäähtymisnopeudesta sekä perus- ja hitsiaineiden kemiallisista koostumuksista. Hitsausliitos voidaan jakaa metallurgisesti kolmeen vyöhykkeeseen: hitsiaineeseen, muutosvyöhykkeeseen (HAZ) sekä lämpövyöhykkeeseen. (Vähäkainu 2003, s. 18–19.)



Kuva 25. Hitsausliitoksen vyöhykkeet teräksessä, jonka hiilipitoisuus on 0,15 %. Kuvassa raekoko on esitetty huomattavasti suurennettuna (Lepola & Makkonen 2005, s. 24).

Hitsiaine (1) on ollut sulassa tilassa ja se koostuu sulaneesta lisäaineesta sekä siihen sekoittuneesta sulaneesta perusaineesta. Hitsiaineen ja jähmeänä pysyneen muutosvyöhykkeen välissä on sularaja-alue (2). Se muodostuu kokonaan tai osittain sulana olleesta perusaineesta. Muutosvyöhyke, johon eri lämpötilat ovat aiheuttaneet kiderakenteen muutoksia, jakaantuu seuraaviin vyöhykkeisiin: karkearakeinen vyöhyke (ylikuumentunut vyöhyke) (3), hienorakeinen vyöhyke (normalisoitunut vyöhyke) (4) ja osittain austenitoitunut vyöhyke (5). (Vähäkainu 2003, s. 19.)

Karkearakeinen vyöhyke on yleensä kriittinen liitoksen iskutkeysominaisuuksien kannalta (Vähäkainu 2003, s. 19). Tällä vyöhykkeellä lämpötila on ollut yli 1100 °C, mistä johtuen austeniitin raekoko on kasvanut. Suuri raekoko aiheuttaa teräksen jäähtyessä ja austeniitin hajaantuessa kovien ja yleensä hauraiden mikrorakenteiden kuten yläbainiitin ja

jäähtymisnopeuden ollessa suuri myös martensiitin muodostumista. (Lepola & Makkonen 2005, s. 24.)

Hienorakeisella vyöhykkeellä lämpötila on ollut austenitoitumisalueen alaosassa ja austenitoituminen on tapahtunut, mutta raekoko ei ole kuitenkaan kasvanut. Hitsausliitoksen jäähtyessä tälle vyöhykkeelle muodostuu ferriittinen tai ferriittis-perliittinen hienorakeinen ja pehmeä mikrorakenne. Tämä mikrorakenne on iskutietoisuudeltaan yleensä alkuperäistä perusainetta parempaa. (Lepola & Makkonen 2005, s. 24–25.) Hienorakeiselle vyöhykkeelle saadaan yleensä normalisoitunut mikrorakenne seostamattomia ja niukkaseosteisia teräksiä hitsattaessa (Martikainen 2009, s. 58).

Osittain austenitoituneella vyöhykkeellä lämpötila on kohonnut noin 720–870 °C:een A₃- ja A₁-lämpötilojen välille. Austenitoituminen on tapahtunut vain siellä, missä austeniitti on päässyt helposti ydintymään eli lähinnä perliittisillä alueilla, joilla hiilipitoisuus on korkea. Osittain austenitoituneen vyöhykkeen ominaisuudet eivät normaalisti ole kriittisiä, mutta suuri jäähtymisnopeus voi austenitoituneilla korkeahiilisillä alueilla muodostaa hauraita martensiittisiä rakenteita. (Vähäkainu 2003, s. 19.)

Muutosvyöhykkeen ulkopuolella on ns. karbidien palloutumisvyöhyke (6). Tällä alueella lämpötila on ollut välillä 550–720 °C:ta. Tällä vyöhykkeellä ominaisuudet eivät eroa olennaisesti perusaineen ominaisuuksista. Lämpötila on ollut työlämpötilaa korkeammalla lämpövyöhykkeellä. Lämpövyöhykkeellä voi tapahtua myötövanhenemistä, etenkin teräksillä, joiden valmistuksessa ei ole käytetty alumiinia tiivistykseen. Tämä voi heikentää mm. hitsausliitoksen iskutietoisuutta. (Vähäkainu 2003, s. 19.)

Hitsausliitoksen ominaisuuksien kannalta kriittisiä alueita ovat sularaja, karkearakeinen vyöhyke sekä suurilla hitsausenergioilla myös hitsiaine. Liitoksen hitsauksen yhteydessä jäähtymisnopeus on määräävin tekijä liitoksen mikrorakenteen ja ominaisuuksien kannalta, koska sulahitsausprosesseissa huippulämpötila vastaa teräksen sulamislämpötilaa ja teräslaji (koostumus) on yleensä valittu ennalta. (Vähäkainu 2003, s. 19.)

Hitsausliitokseen syntyvällä mikrorakenteella on suuri vaikutus liitoksen ominaisuuksiin. Hitsauksen jälkeisessä jäähtymisessä pyritään saavuttamaan tietty mikrorakenne liitoksen hyvien ominaisuuksien saavuttamiseksi. Hitsausliitoksella pitää olla esimerkiksi riittävät lujuus- ja iskutkeysominaisuudet. Karkearakeisella vyöhykkeellä pyritään yleensä välttämään kovien ja hauraiden mikrorakenteiden syntyä, jotta liitoksen ominaisuudet pysyvät riittävän hyvinä.

7 MIG/MAG-HITSAUSINVERTTERIT

Hitsausinvertteri on erittäin käytetty virtalähdetyyppi, ensisijaisesti sen erinomaisen ohjattavuuden ansiosta. Invertteri tuottaa suuritaajuuksista virtaa, jota voidaan ohjata hyvin. (Cary & Helzer 2005, s. 261–262.) Hitsausinvertterit ovat tehoonsa nähden pienikokoisia ja kevyitä. Niiden hyötysuhde on myös hyvä ja ne kuormittavat sähköverkkoa symmetrisesti. (Lukkari 2002, s. 84.)

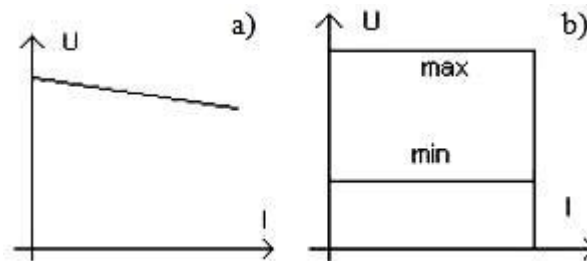
Seuraavassa kerrotaan lyhyesti hitsausvirtalähteiden yleisistä ominaisuuksista. Tämän jälkeen perehdytään MIG/MAG-hitsausinverttereiden ohjaus- ja säätötekniikkaan.

7.1 Virtalähteiden yleisiä ominaisuuksia

Sähköverkosta tuleva sähkö ei sovellu sellaisenaan hitsaukseen. Tämä johtuu niin fysikaalisista kuin turvallisuuteenkin liittyvistä näkökohdista. Sähköverkon ja valokaaren välissä pitää olla laite, joka muuntaa sähköverkosta saatavan sähkötehon valokaarelle sopivaksi. Hitsausvirtalähde toimii myös sähköverkon ja hitsausvirtapiirin välisenä erotuksena. Hitsaustehoa pitää pystyä muuttamaan käytännön hitsaustyössä, joten myös tästä syystä vakioista sähköä tarjoavan sähköverkon ja valokaaren välissä pitää olla säätölaite, jolla voidaan kulloinkin asettaa sovellukseen tarvittava hitsausteho. (Mäkimaa 2005, s. 1.)

Virtalähteet voivat olla vakiovirta- tai vakiojännitelähteitä. Vakiovirtalähde pitää virran vakiona, jolloin virtalähteen ominaiskäyrä on pystysuora. Vakiovirtalähdettä käytetään

yleensä puikko- ja TIG-hitsauksessa. Vakiojännitelähdettä käytetään puolestaan muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta MIG-, MAG- ja täytelankahitsauksessa. Vakiojännitelähde on riippumaton kuormavirrasta pitäen jännitteen vakiona. Ideaalista vakiojännitelähdettä ei kuitenkaan ole olemassa, vaan yleensä sen ominaiskäyrä on hieman laskeva, kuva 26 a). Hitsauslaitestandardien mukaan virtalähde luokitellaan vakiojännitelähteeksi, jos jännite alenee vähemmän kuin 7 V/100 A. Käytännön virtalähteissä koneen jännite laskee yleensä 2–6 V/100 A. (Mäkimaa 2005, s. 3–4.) Vakiojännitelähdettä käytetään MIG/MAG-hitsauksessa teholähteenä, jotta valokaari olisi itsesäätyvä. Tällöin valokaari pysyy vakaana, vaikka vapaalangan pituus vaihtelisi. (Lukkari 2002, s. 79.)



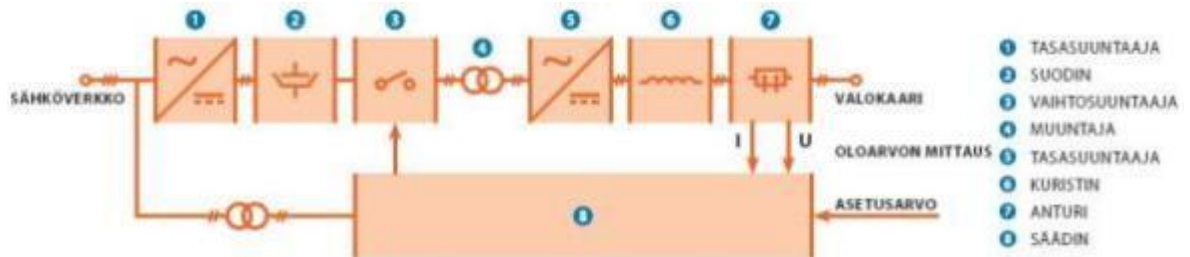
Kuva 26. a) Hieman laskeva ominaiskäyrä; b) Elektronisesti ohjatun MIG/MAG-virtalähteen ominaiskäyrä (Mäkimaa 2005, s. 4).

Kuvan 26 a) mukaisesta ominaiskäyrästä puuttuu säädettävyys. Kuvassa 26 b) on esitetty elektronisesti ohjattujen MIG/MAG-virtalähteiden ominaiskäyrät. Siinä jännitteen säätö on portaaton minimin ja maksimin välillä. Sen lisäksi jännite pysyy vakiona normaalilla käyttöalueella. Ylikuormitussuojana käytetään virtarajaa, joka rajoittaa virran turvalliseen arvoon epänormaaleissa kuormitustilanteissa. (Mäkimaa 2005, s. 4.)

7.2 Rakenne ja toimintaperiaate

Hitsausinvertterien rakenne ja periaate ovat sama toteutustavasta riippumatta. Kuvassa 27 on esitetty invertterin rakenne. Invertterin toimintaperiaate on seuraava. Ensimmäiseksi sähköverkosta saatava vaihtojännite tasasuunnataan tasasuuntaajalla (1) ja suodatetaan suotimella (2). Näin saatu tasasuunnattu sähkövirta viedään vaihtosuuntaajaan (3), joka on

laitteen keskeisin osa. Vaihtosuuntaaja muuttaa tasavirran vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaus on tärkeä vaihe, koska vaihtosuuntaajan toimintataajuus voidaan valita melko vapaasti. Tämän ansiosta hitsausinvertterin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa monella tavalla. Tämän vaiheen jälkeen vaihtovirta muunnetaan muuntajalla (4) hitsaukseen sopivaksi. Tämä vaihe toimii samalla sähköisenä erotuksena sähköverkon ja hitsauspiirin välillä. Muuntajalta tullut vaihtovirta tasasuunnataan tasasuuntaajalla (5) ja se johdetaan kuristimen (6) sekä virtaa mittaavan anturin (7) kautta valokaareen. Hitsausvirtaa ja jännitettä sekä käyttäjän asettamaa ohjearvoa mitataan säätimellä (8) ja se ohjaa vaihtosuuntaajaa niin, että haluttu ulostulo säilyy. (Mäkimaa 2005, s. 7.)



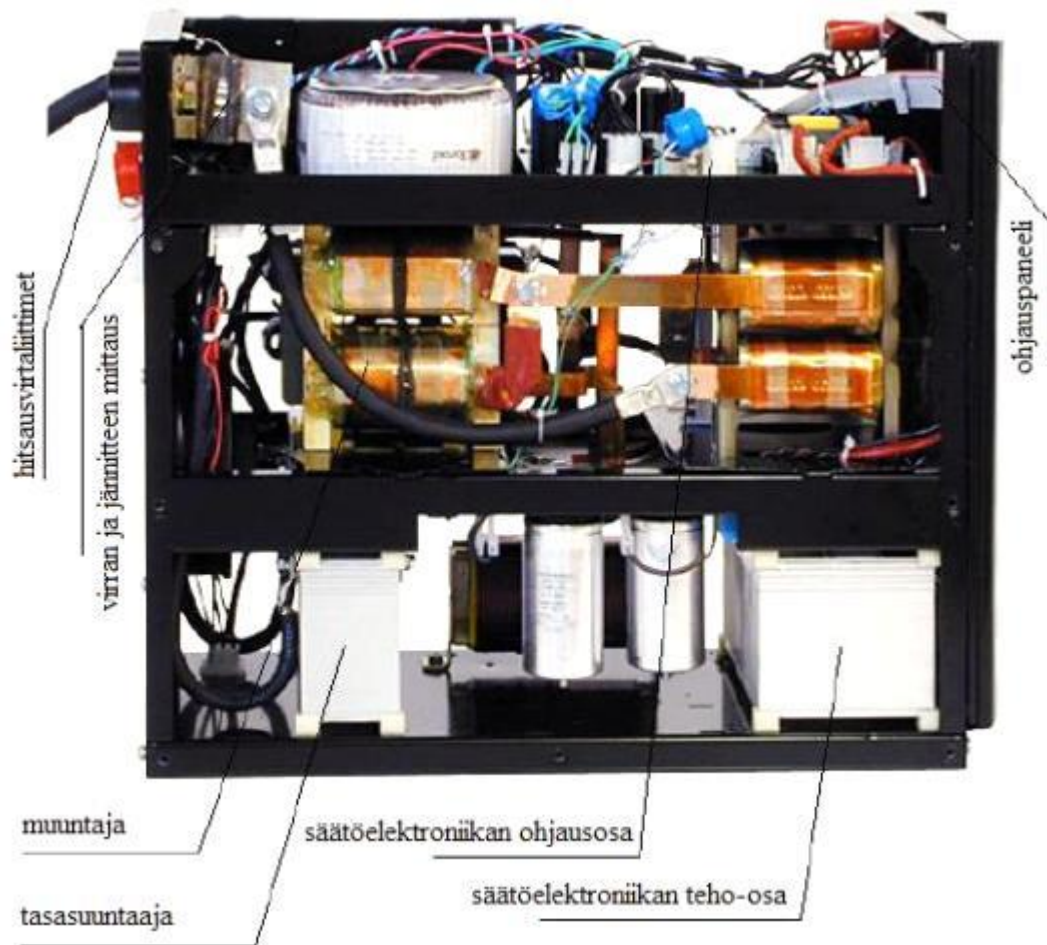
Kuva 27. Hitsausinvertterin rakenne (Pohjola 2007, s. 7).

Hitsausinvertterin keskeisin osa suorituskyvyn kannalta on vaihtosuuntaajan kytkinelementti. Hitsausinverttereissä kytkinelementteinä käytetään FET- ja IGBT-transistoreja, joista IGBT on hallitsevana keski- ja suuritehoisissa koneissa. (Mäkimaa 2005, s. 8.)

Muuntaja saadaan rakennettua pieneksi, koska invertterin toimintataajuus on aina paljon suurempi kuin sähköverkon taajuus. Suuremmilla taajuuksilla päästään suurempiin reaktionopeuksiin. Näin invertterit voivat olla monitoimivirtalähteitä, jotka sopivat kaikkien hitsausprosessien virtalähteiksi, mukaan lukien pulssi-MIG/MAG-hitsaus. (Lukkari 2002, s. 83.)

Kuvassa 28 on esitetty erään monitoimi-invertterin rakenne. Invertterin tehopuolijohteiden jäähdityselementit ovat suuria verrattuna käämikomponentteihin (muuntaja, kuristin).

Lisäksi ohjauselektronikan osuus on huomattavasti suurempi kuin perinteisissä virtalähteissä. (Mäkimaa 2005, s. 11.)

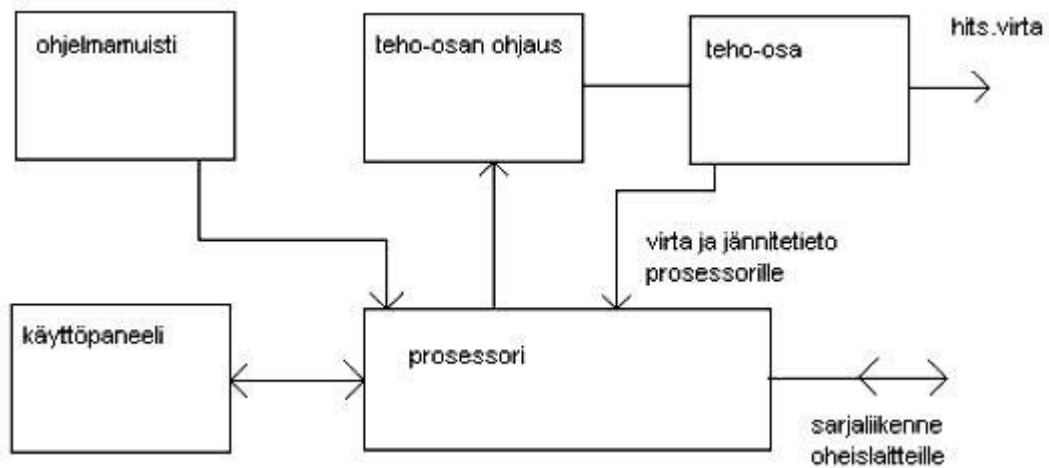


Kuva 28. Monitoimi-invertterin rakenne (Mäkimaa 2005, s. 11).

Puikko- ja TIG-hitsauksessa invertterin hyvällä ohjattavuudella ei saavuteta suurta etua kaariominaisuuksiin perinteisiin tasasuuntaajiin verrattuna. Merkittävimpänä etuna on invertterin pienempi paino ja koko. MIG/MAG-hitsauksessa puolestaan saavutetaan invertterien ohjattavuuden suurimmat hyödyt. Periaatteessa MIG/MAG-invertterin virtalähdeosan ydin on samanlainen kuin puikko- ja TIG-virtalähteissä, mutta säätö- ja ohjaustekniikassa on suuria eroja. (Mäkimaa 2005, s. 8–9.)

7.3 Ohjaus- ja säätötekniikka

Yksinkertaisimmissa virtalähteissä inverttereiden ohjaus ja säätö toteutetaan perinteisellä analogitekniikalla. Muuten säätö ja ohjaus toteutetaan tavallisesti digitaalitekniikan keinoin prosessoria käyttäen. MIG/MAG-invertterivirtalähteen ohjaus ja säätöpiirien periaate on esitetty kuvassa 29. (Mäkimaa 2005, s. 10.)



Kuva 29. MIG/MAG-invertterivirtalähteen ohjausperiaate (Mäkimaa 2005, s. 10).

Prosessori on ohjauksen keskeisin osa. Se ohjaa toimintoja sekä huolehtii virtalähteen säädöstä. Prosessori liikennöi sarjaväylän kautta oheislaitteiden, tässä tapauksessa langansyöttölaitteen, kanssa ja välittää sille tosiaikaisen tiedon virrasta ja jännitteestä. Langansyöttölaitteelta tulee käynnistys- ja pysäytystieto sekä tiedot langansyöttölaitteen käyttöpaneelilta tehdyistä asetuksista. Näitä asetuksia ovat mm. jännitteen ohjearvo, hitsausmenetelmä ja eri menetelmiin liittyvät yksityiskohdat, kuten valokaaren ”kovuus”. Prosessorin muistiin on tallennettu ohjeet miten virtaa pitää säätää kussakin hitsausstilanteessa. (Mäkimaa 2005, s. 10.)

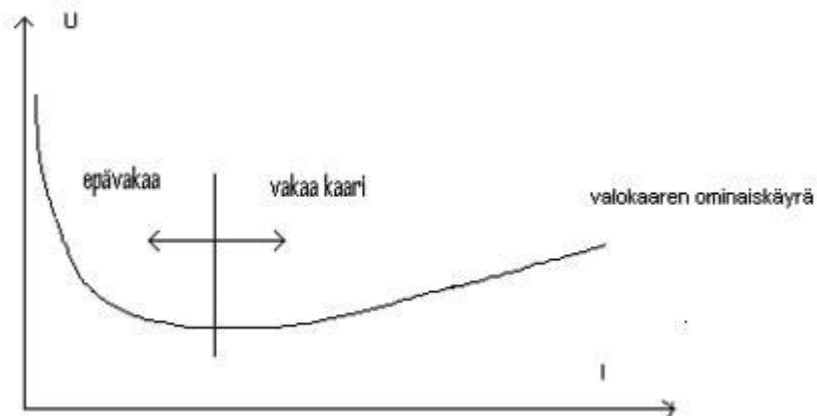
Prosessori suorittaa hitsausvirran ja jännitteen mittauksen useita kymmeniä tuhansia kertoja sekunnissa, vertaa näitä mitattuja arvoja asetettuihin arvoihin ja antaa muistiin tallennettujen sääntöjen perusteella teho-osalle ohjeen siitä minkälaista virtaa valokaareen

pitää seuraavalla hetkellä syöttää. Suuri etu prosessoriohjauksessa on se, että kullekin hitsausprosessille tai prosessin osallekin voidaan laatia optimaaliset toimintaohjeet, jotka voidaan sitten lukea muistista, kun kyseinen tilanne tulee eteen. Myös äkillisiin muutoksiin voidaan reagoida, koska menettelytavan vaihto kestää vain sekunnin sadastuhannesosien luokkaa. (Mäkima 2005, s. 10.)

Virtalähteen teho-osan pitää olla riittävän hyvin ohjattavissa, jotta prosessoritekniikkaa voidaan hyödyntää täysimittaisesti. Inverteri- ja prosessoritekniikka on mahdollistanut nopeiden ja monipuolisten MIG/MAG-virtalähteiden kehityksen. Tämä on ollut tärkeä edellytys nykyisille pulssi-MIG-virtalähteille. (Mäkima 2005, s. 10.)

7.4 Valokaaren säätötekniikka

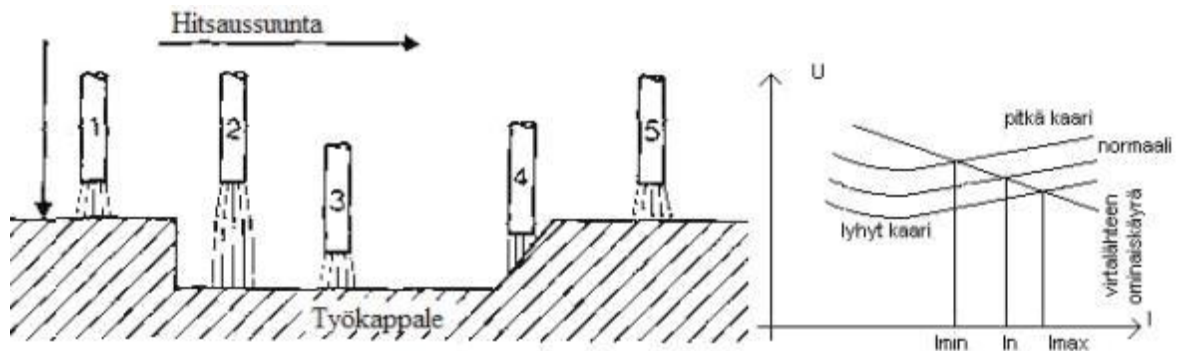
Lähtökohtana valokaaren säädölle ovat sen fysikaaliset ominaisuudet, jotka asettavat valokaaren säädölle minimivaatimukset. Kaaren virran ja jännitteen arvot ovat riippuvaisia valokaaren tyypistä sekä pituudesta. Suuntaa-antavasti voidaan kuitenkin sanoa, että hitsausvalokaari toimii vakaalla alueella pääsääntöisesti, mutta epävakaalle alueelle voidaan joutua häiriötilanteissa. Tärkein yksittäinen seikka valokaaren vakavuuden kannalta on virran jatkuvuus, sillä virran aukottuminen johtaa melkein aina pahaan häiriöön. Kuvassa 30 on esitetty vapaana palavan valokaaren staattinen ominaiskäyrä. (Mäkima 2009, s. 1.)



Kuva 30. Vapaana palavan valokaaren ominaiskäyrä (Mäkima 2009, s. 1).

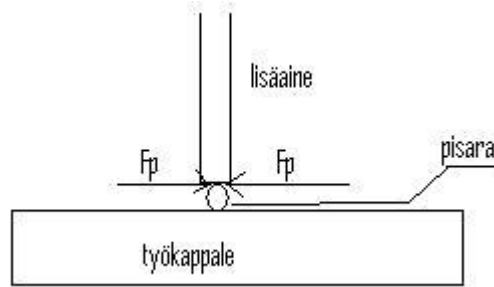
MIG/MAG-valokaaren jatkuvuustila

Vakiojännitteellä syötetty MIG/MAG-valokaari on itsesäätyvä, kuva 31. Valokaaren itsesäätyvyys perustuu siihen, että vakiojännitesyöttöisen kaaren virta riippuu huomattavasti kaaripituudesta sekä myös vapaalangan pituudesta. Valokaaren ja vapaalangan lyhentyessä virta kasvaa voimakkaasti. Näin myös kaariteho nousee, koska jännite on vakio. Tämän ansiosta langan sulamisnopeus kasvaa ja kaaripituus palautuu pidemmäksi. Vastaavasti, jos valokaari ja/tai vapaalanka pitenee, virta putoaa ja teho pienenee. Tämä aiheuttaa sulamisen hidastumisen ja kaaripituuden lyhenemisen. Valokaaren itsesäätyvyys toimii puhtaalla vakiojännitesyötöllä sekä laskevilla ominaiskäyrillä, kun ominaiskäyrän laskunopeus on pienempi kuin noin 6 V/100 A. (Mäkima 2009, s. 13.)



Kuva 31. MIG/MAG-valokaaren itsesäätyvyys (Mäkima 2009, s. 12).

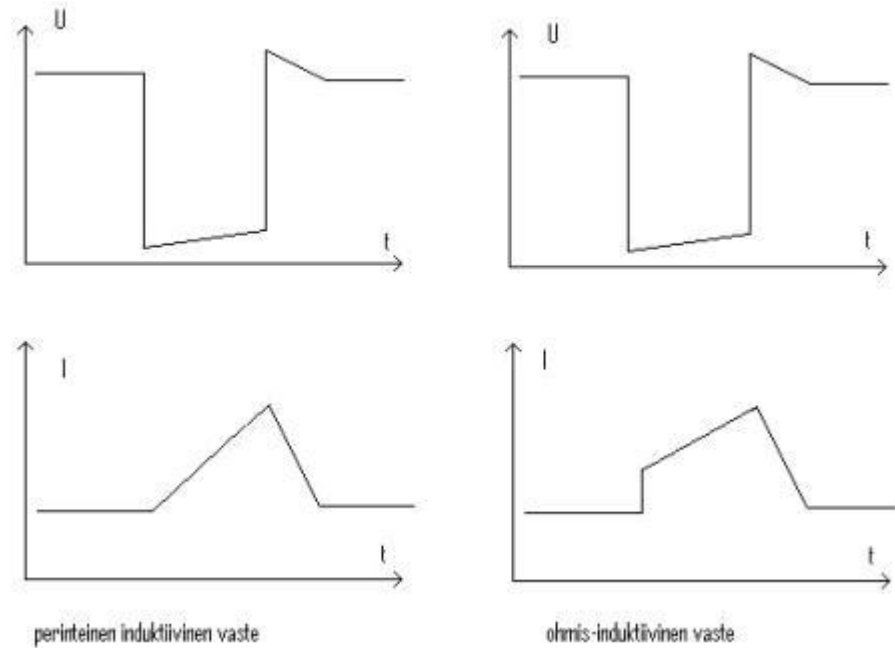
Vakiojännite-ehto ei ole vielä riittävä vakaan valokaaren aikaansaamiseksi, sillä MIG/MAG-hitsauksessa on tilanteita, joissa tapahtuu pisaraoikosulku. Pisaraoikosulku tapahtuu, kun lisäainelangan päähän muodostuva metallipisara tekee oikosulun lisäainelangan pään ja hitsisulan välille, kuva 32. (Mäkima 2009, s. 2; 12.)



Kuva 32. Pisara-oikosulku (Mäkimaa 2009, s. 2).

Pisara pitää saada siirtymään sulaan, jotta prosessi ei pysähtyisi. Pisaran muodostaessa oikosulun lisäainelangan ja työkappaleen välille, pintajännitys pyrkii pitämään sen kiinni sekä lisäainelangan päässä että työkappaleessa. Pisaraan vaikuttaa myös sähkömagneettinen pinch-voima, joka pyrkii irrottamaan pisaran lisäainelangan päästä. Pinch-voima riippuu virran neliöstä, joten pisaran irtoamista voidaan edistää antamalla virran nousta pisara-oikosulkutilanteessa. (Mäkimaa 2009, s. 2.) Oikosulkusiirtymistä tapahtuu lyhytkaarihitsauksessa, jossa pisara siirtyy tasaisin välein hallitusti oikosulkujen avulla (Lukkari 2002, s. 168).

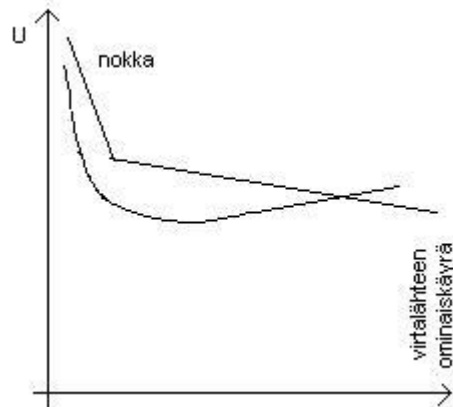
Jotta pisara irtoaa lisäainelangan päästä, tarvitaan korkeampi virta kuin mitä kaariaikana kulkee. Oikosulun sattuessa ideaalinen vakiojännitelähde nostaisi virran äärettömyyteen, jolloin seurauksena olisi voimakas roiskiminen. Tämän takia oikosulkuvirran nousua on rajoitettava. Perinteisesti oikosulkuvirtaa on rajoitettu tekemällä jännitelähde dynaamisesti induktiiviseksi. Tällöin oikosulkuvirta nousee lähes lineaarisesti kuvan 33 esittämällä tavalla. Kokemusperäisesti on kuitenkin havaittu, että valokaaren vakavuus paranee, jos virta nousee askelmaisesti 50–100 A oikosulun alussa, kuten kuvassa 33 oikealla. CO₂-hitsauksessa voidaan parantaa valokaaren vakavuutta viivästäväällä oikosulkuvirran nousua. (Mäkimaa 2009, s. 13.)



Kuva 33. MIG/MAG-virtalähteen oikosulkuvasteita (Mäkimaa 2009, s. 13).

Oikosulkuvirran nousunopeus ja huippuarvo vaikuttavat huomattavasti valokaaren ominaisuuksiin. Jos nousunopeutta nostetaan, pisaran irtoaminen nopeutuu ja valokaaren vakavuus paranee, mutta se johtaa yleensä suurempiin roiskeisiin johtuen suuremmista voimista. Hitaalla nousulla saavutetaan pehmeä ja vähäroiskeinen valokaari, mutta tällöin se on hyvin arka vaihteluille. Jos käytetään liian pientä nousunopeutta, pisara ei irtoa ajoissa, vaan seurauksena on langan palaminen poikki ja epävakaata valokaaria. MIG/MAG-invertterivirtalähteissä dynamiikkaa hallitaan elektronisesti säätöteknisin keinoin. (Mäkimaa 2000, s. 18–19; Mäkimaa 2005, s. 18.) Sopiva ”karheus” eli virran nousunopeus on tapauskohtainen. Tästä johtuen monissa virtalähteissä on dynamiikkasäädöksi kutsuttu säätö, jolla vaikutetaan oikosulkuvirran nousunopeuteen. (Mäkimaa 2009, s. 14.)

Virran jatkuvuus on välttämätön edellytys valokaaren vakavuudelle. Kun hitsataan pienillä virroilla, virta aukottuu helposti. Tämä voidaan korjata ominaiskäyrän nokan avulla, kuva 34. Ominaiskäyrän nokan avulla nostetaan jännitettä pienillä virroilla sen varalta, että toiminta ajautuu epävakaalle alueelle. Normaalisti nokan kynnysvirta on 10–20 A ja se voi olla joko voimakkaasti laskeva tai peräti vakiovirtaohjattu. (Mäkimaa 2009, s. 4; 14.)



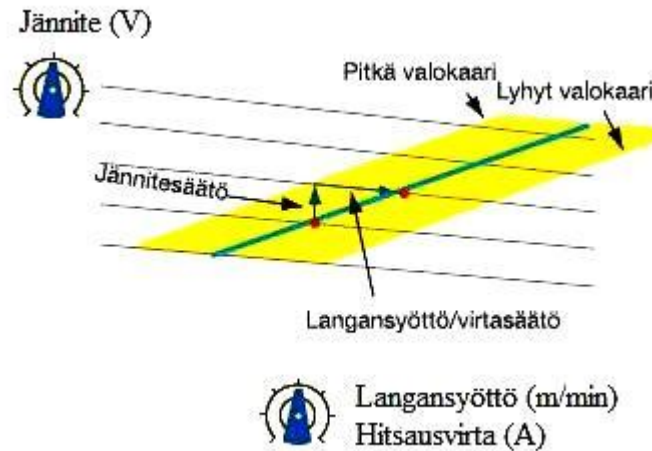
Kuva 34. Ominaiskäyrän nokka laskevalla ominaiskäyrällä (Mäkimaa 2000, s. 18).

7.5 Hitsausparametrien säätö

Hitsausparametrien, langansyöttönopeuden/hitsausvirran ja jännitteen, säätö voidaan yleensä tehdä kahdella eri tavalla: käyttäen kaksinuppisäätöä tai yksinuppisäätöä. Yksinuppisäätöä kutsutaan myös synergiseksi säädöksi. Hitsausparametrien pitää olla säädetty tarkasti toisiinsa nähden hyvien hitsausominaisuuksien sekä hyvän hitsaustuloksen takaamiseksi. Jännitesäädössä valitaan virtalähteen staattinen ominaiskäyrä jännitteen säätönupista. Hitsausvirran säädössä valitaan langansyöttönopeus, joka vastaa aina tiettyä virtaa. (Lukkari 2002, s. 210.) Hitsausinverttereitä voidaan säätää myös adaptiivisesti.

7.5.1 Kaksinuppisäätö

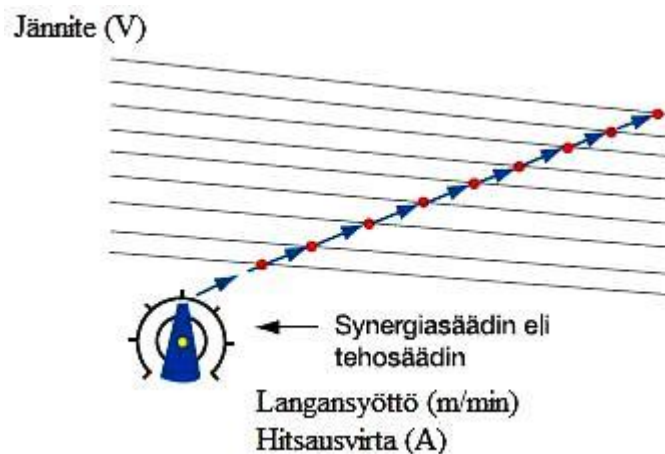
Kaksinuppisäädössä käyttäjä säätää vuorotellen langansyöttönopeutta ja jännitettä omista säätönupeistaan. Virtalähteestä tai langansyöttölaitteesta säädetään jännitettä ja langansyöttölaitteesta langansyöttönopeutta. Nämä säädöt pitää tehdä oikeassa suhteessa toisiinsa, jotta hitsaustapahtuma ei olisi epävakaata ja roiskeinen. Jännitettä ja langansyöttönopeutta voidaan säätää myös toisistaan riippumatta kaariominaiskäyräalueen rajoissa, kuva 35. (Lukkari 2002, s. 210.)



Kuva 35. Kaksinuppisäädön periaate (Lukkari 2009, s. 23).

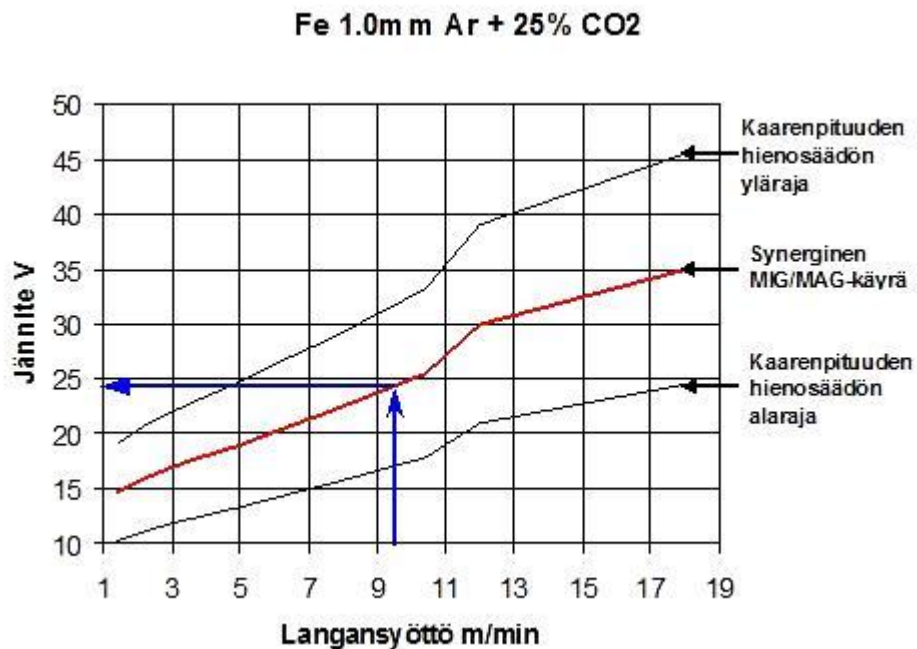
7.5.2 Synerginen säätö (yksinuppisäätö)

Hitsausvirtalähteiden synergisellä säädöllä hitsausparametrien säätöä on helpotettu. Hitsauslaitteen synergialla tarkoitetaan, että laite osaa säätää hitsausvirtaa tai jännitettä tai molempia sen perusteella, minkä langansyöttönopeuden laitteen käyttäjä on valinnut, kuva 36. (Uusitalo 2007, s. 59.) Synergisessä säädössä siis virtalähteen ohjauselektronikka pitää huolta, että jännite ja virta (langansyöttönopeus) ovat aina oikeassa suhteessa toisiinsa nähden virtalähteessä olevan synergiakäyrän mukaan (Lukkari 2009, s. 23).



Kuva 36. Hitsausparametrien synergisen säädön periaate (Lukkari 2009, s. 23).

Hitsausvirtalähde hakee ennalta määritettyjen tietojen perusteella optimaaliset hitsausparametrit jokaisessa tilanteessa. Synergisissä hitsausvirtalähteissä on suuri määrä myös muita hitsausparametreja. Koneessa oleva ohjelmisto valvoo ja ohjaa jatkuvasti hitsauksen aikana näiden parametrien arvoja. Näitä parametreja ovat esimerkiksi hitsausvirran nousu- ja laskuajat valokaaren sytytyksessä ja lopetuksessa, virran dynamiikka eli käyttäytyminen oikosulkutilanteissa sekä virtapulslien muoto ja taajuus pulssihitsauksessa. Ennalta laaditut hitsauskäyrät vastaavat näiden hitsausparametrien keskinäisen vuorovaikutuksen toimivuudesta. Synerginen MIG/MAG-käyrä on esitetty kuvassa 37. Käyriä on laadittu erilaisia eri perusaineille, lisäaineille ja suojakaasuille. (Uusitalo 2007, s. 59.)



Kuva 37. Synerginen MIG/MAG-käyrä, jossa näkyy myös hienosäädön rajat (Synergiset toiminnot s. 2).

Käyrien ansiosta koneen käyttäjä voi käyttää yksinuppisäätöä ja säätää hitsausvirtalähteen asetuksia käytännönläheisten asioiden kuten suojakaasun, langanpaksuuden ja aineenpaksuuden avulla (Uusitalo 2007, s. 59). Näiden asetusten perusteella käyttäjä tekee esivalinnat ennen hitsauksen aloitusta. Asetettujen parametrien perusteella

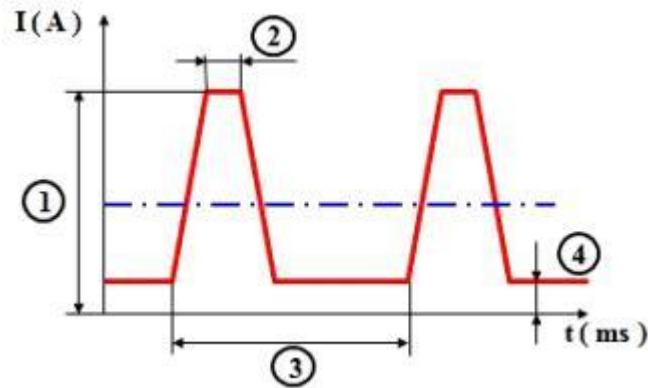
ohjauselektronikka osaa valita muistista oikean synergiakäyrän. (Lukkari 2002, s. 211.) Kuvassa 38 on esitetty yksinuppisäädön synergiset toiminnot ja hitsausvirtalähteen säätö käyttäen yksinuppisäätöä.

Synergisessä säädössä voidaan tehdä myös pientä hienosäätöä. Käyttäjä voi tarvittaessa tapauskohtaisesti tehdä pieniä korjauksia eli hienosäätöä jännitesäätimellä. Näin voidaan korjata hieman valokaaren pituutta. (Lukkari 2009, s. 23.)



Kuva 38. Yksinuppisäädön synergiset toiminnot ja hitsausparametrien säätö langansyöttönopeuden mukaan (Synergiset toiminnot s. 1).

Pulssihitsauksessa on paljon parametreja ja niiden tulee olla tietyissä rajoissa, jotta hitsaaminen olisi mahdollista. Tämän takia pulssihitsaus suoritetaan käytännössä synergisillä käyrillä, jolloin ainoastaan hienosäätö jää käyttäjän tehtäväksi. Tärkeimmät parametrit pulssihitsauksessa ovat: 1. Pulssivirta, 2. Pulssin pituus, 3. Taajuus, 4. Perusvirta sekä pulssin nousu- ja laskunopeudet. Nämä pulssiparametrit on esitetty kuvassa 39. Muita parametreja pulssihitsauksessa ovat kaaren pituuden korjaukseen liittyvät parametrit, syttymis- ja lopetusparametrit sekä oikosulun hallinta. (Synergiset toiminnot s. 3.)



Kuva 39. Pulssihitsauksen tärkeimmät parametrit, jotka säätyvät synergiakäyrän mukaan: 1. Pulssivirta, 2. Pulssin pituus, 3. Taajuus ja 4. Perusvirta (Synergiset toiminnot s. 3).

Yksi yksinuppisäädön versio on ESABin kehittämä QSet-toiminto lyhytkaarihitsaukseen. Siinä käyttäjä asettaa koneeseen hitsaustehtävään valitun langan ja suojakaasun. Tämän jälkeen käyttäjä suorittaa koehitsauksen millä tahansa langansyöttönopeuden arvolla. QSet-toiminto etsii valitun lanka/kaasu yhdistelmän optimaaliset säätöarvot ja alkaa käyttää niitä. Käyttäjää säätelee langansyöttönopeuden railon, aineenpaksuuden ja hitsausasennon mukaan. Näin hitsausta voidaan jatkaa ja QSet-toiminto pitää optimaaliset säätöarvot, vaikka langansyöttönopeutta muutetaan. (Lukkari 2009, s. 24.)

7.5.3 Adaptiivinen säätö

Adaptiivisessa säädössä virtalähteen ohjaus kerää tietoa halutuista valokaaren muuttujista ja käyttää näitä mittaustuloksia laitteen toiminnan ohjaamiseen (Hiltunen 2005, s. 18). Esimerkiksi lyhytkaarihitsauksessa adaptiivisuus voi perustua oikosulun aikaisen jännitteen mittaamiseen ja näiden mittaustulosten käyttöön tehonlähteen säätöön (Patenttijulkaisu 2007, s. 3).

Adaptiivinen säätö helpottaa virtalähteen käyttöä. Adaptiivisessa säädössä käyttäjä voi esimerkiksi asettaa koneeseen haluamansa langan ja suojakaasun sekä aineenpaksuuden. Sitten käyttäjä säätelee halutun tehon tehonsäätimestä, jonka jälkeen hitsaus voi alkaa. Kone

määrittää oikeat hitsausparametrit, kerää tietoa halutuista valokaaren muuttujista ja käyttää kerättyjä tietoja laitteen toiminnan ohjaamiseen. (Hiltunen 2005, s. 18.)

8 VIRTALÄHTEEN OHJAUS LÄMMÖNTUONNIN JA S-KÄYRÄN PERUSTEELLA

Lämmöntuontiin perustuvassa hitsausparametrien säätöjärjestelmässä pyritään parametrien säätö tekemään hitsattavan materiaalin perusteella ja erityisesti sen metallurgisten ominaisuuksien perusteella. Säätöjärjestelmällä on yhteys jatkuvan jäähtymisen S-käyriin, mutta niistä puuttuu kuitenkin suora yhteys hitsauksen lämmöntuontiin. Virtalähteen ohjauksessa käytettävä lämmöntuonti, jolla päästään haluttuun jäähtymisaikaan $t_{8/5}$, on pystyttävä määrittämään luotettavasti S-käyrään. Tällöin lämmöntuonnin arvo on sijoitettava oikeaan paikkaan S-käyrälle, jotta sillä saavutetaan haluttu jäähtymisaika $t_{8/5}$.

Ajatuksena lämmöntuontiin perustuvassa säätöjärjestelmässä on, että jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä voidaan valita liitokseen syntyvä mikrorakenne, joka määrää sen ominaisuudet. Kun hitsataan jollain tietyllä lämmöntuonnilla, johon vaikuttaa pääasiassa aineenpaksuus, liitosmuoto ja työlämpötila, hitsausliitos jäähtyy tietyllä jäähtymisajalla $t_{8/5}$. Tästä jäähtymisajasta seuraa S-käyrältä valittu mikrorakenne sekä halutut liitoksen ominaisuudet.

Uudesta säätöjärjestelmästä pyritään tekemään mahdollisimman käyttäjäystävällinen. Ohjauksessa tarvittavat lämmöntuonnit sekä jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvot voidaan tallentaa koneeseen materiaaliakohtaisesti, jotta käyttäjän ei tarvitse säätää tai asettaa näitä arvoja koneeseen. Myös tarvittavat laskukaavat ja synergiakäyrät tallennetaan koneeseen, jotta oikeat parametrit saadaan määritettyä niin, että käyttäjän ei tarvitse huolehtia niistä. Ohjauksessa kone määrittää oikeat hitsausparametrit käyttäjän tekemien asetusten perusteella. Käyttäjän pitää siis tehdä vain esiasetukset koneeseen, jonka jälkeen kone pystyy määrittämään optimaaliset parametrit hitsaukseen. Lämmöntuonnille voidaan tehdä myös oma tehonsäädin, josta käyttäjä voi tarvittaessa säätää lämmöntuontia suuremmaksi tai pienemmäksi.

Virtalähteen ohjauksessa hitsausparametreja määritettäessä lämmöntonin perusteella tiedetään tarvittava hitsausteho, jota käytetään ohjauksessa. Tämän jälkeen pitää vielä määrittää optimaalinen langansyöttönopeus, jännite ja hitsausnopeus. Yksi keino määrittää nämä parametrit on siten, että kone laskee esitallennetulta hitsauskäyrältä lähimmän pisteen halutulle lämmöntonille ja käyttää hitsauksessa tämän pisteen käyräparametreja. (Törölä 2011.)

Virtalähteen ohjaus voidaan toteuttaa siten, että lämmöntonin laskukaavaan asetetaan lämmöntonin arvot ja kone säätää itseään koko ajan pitäen lämmöntonin säädettyjen arvojen sisällä hitsauksen aikana. Kaavan yksi päämuuttuja on hitsausvirta, joka säätyy langansyöttönopeuden arvon mukaan. Langansyötön mukaan muuttuvat myös muut hitsausparametrit synergiakäyrän perusteella. Toinen kaavan päämuuttuja on hitsausnopeus, joka mitataan käsin hitsauksessa tai tiedetään, kun kyseessä on mekanoitu-/automatoitu hitsaus. (Uusitalo 2011.)

Hitsauksen alettua kone tunnistaa käytetyn hitsausnopeuden, jonka signaali tulee ulkoisesta lähteestä koneelle ja se asetetaan kaavaan. Jos lämmöntonin tulokseksi tulee jotain muuta kuin asetettu arvo, kone muuttaa langansyöttöä siten, että haluttu lämmöntonin arvo pysyy vakiona tai asetettujen raja-arvojen sisällä. Jos hitsausnopeus vaihtelee hitsauksen aikana, kone hakee synergiakäyrältä koko ajan oikeaa langansyötön pistettä. (Uusitalo 2011.) Langansyötön arvo voidaan pitää myös vakiona, jolloin jännitettä voidaan säätää synergiakäyrän perusteella niin, että oikea lämmöntonin arvo säilyy hitsauksessa.

Hitsausnopeus on joko tiedettävä tai se on voitava mitata, jotta saavutetaan luotettava lopputulos. Mekanoitussa ja robotisoitussa hitsauksessa mittaus onnistuu hyvin. Käsinhitsauksessa hitsausnopeuden mittaukseen on kehitettävä uutta tekniikkaa, jotta virtalähteen ohjaus onnistuu lämmöntonin perusteella.

Seuraavassa käsitellään, miten lämmöntuonti voidaan määrittää S-käyrälle sekä miten lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät ja materiaalin koostumusvaihtelut voidaan ottaa huomioon. Tämän jälkeen käsitellään ohjauksen toteutusvaihtoehtoja ja koehitsaukset

luvussa käsitellään, miten S-käyrältä määritetyt suuntaa antavat lämmöntuonnin arvot toimivat käytännössä ja millaisia mikrorakenteita syntyy hitsattaessa kyseisillä lämmöntuonnin arvoilla.

8.1 S-käyrät ja lämmöntuonti

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrällä olevat jäähtymiskäyrät ovat yhteydessä tiettyyn lämmöntuontiin, kun jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ liittyvät suureet pysyvät vakiona. Virtalähteen ohjauksessa hitsausparametrien säätö perustuu lämmöntuontiin, joten jäähtymiskäyrille pitää määrittää lämmöntuonnin arvot. Ohjausta varten tarvittavat S-käyrät voidaan laatia esimerkiksi termomekaanisella simulaattorilla tai ohjauksessa voidaan käyttää jo olemassa olevia S-käyriä.

S-käyriä laadittaessa austenitointilämpötilan tulee olla 1300–1350 °C, jotta S-käyrät vastaavat hitsauksen olosuhteita ja liitoksen ominaisuudet muutosvyöhykkeeltä voidaan määrittää. Näin myös rakeenkasvu lähellä sularajaa otetaan huomioon. Jos käytetään valmiita, jo julkaistuja S-käyriä, myös niiden pitää vastata hitsausolosuhteita.

S-käyristä pitää näkyä syntyvän mikrorakenteen kovuus, mikä helpottaa oikean jäähtymisaajan $t_{8/5}$ valinnassa. S-käyriin voidaan merkitä myös kullekin faasialueelle, kuinka monta prosenttia kyseistä faasirakennetta on syntyvässä mikrorakenteessa eri jäähtymisajoilla. Tämä auttaa valitsemaan jäähtymisessä syntyvän mikrorakenteen sekä halutut liitoksen ominaisuudet.

S-käyrien laadintaan voidaan käyttää dilatometriä ja termomekaanista simulaattoria, kuten Gleeble-simulaattoria. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrien laadintaan se on joustava ja nopea.

Jäähtymisnauhan tai jäähtymiskäyrien käyttö

Jotta materiaalien koostumusvaihtelut voidaan ottaa huomioon, S-käyrissä voidaan jäähtymiskäyrän sijaan käyttää jäähtymisnauhaa. Tällöin jäähtymisnauhalta näkyy minimi-

ja maksimiraja-arvot, joiden sisällä toimiessa saavutetaan haluttu mikrorakenne. Jos jäähtymisajan $t_{8/5}$ rajat ovat tyypilliset (10–30 s), voi jäähtymisnauhoja olla mahdollisesti useampia riippuen toleranssialueen laajuudesta, jolloin voidaan valita vapaammin syntyvä mikrorakenne ja liitoksen ominaisuudet. Yksi vaihtoehto on myös käyttää jäähtymiskäyriä, joiden jäähtymisajat ovat sallittujen jäähtymisaikojen rajojen sisäpuolella. Jäähtymiskäyriä käytettäessä on niitä vastaavalla lämmöntuonnilla oltava toleranssialue, jolla lämmöntuonti voi vaihdella, jotta virtalähteen ohjaus on mahdollista lämmöntuonnin perusteella.

Lämmöntuonnin määrittäminen S-käyrään

Ohjaustavan kehittämisessä kiinnitetään huomiota koneen käytettävyyteen. Jotta koneen käytettävyys olisi mahdollisimman hyvä, jatkuvan jäähtymisen S-käyrässä pitää näkyä tiettyä jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ vastaava lämmöntuonti. S-käyrältä nähdään siis jäähtymiskäyrän/-nauhan lämmöntuonnin arvot, joita käytetään koneen ohjaukseen. Nämä lämmöntuonnin arvot voidaan tallentaa koneeseen, jolloin käyttäjän ei erikseen tarvitse asettaa niitä.

Jatkuvan jäähtymisen S-käyriä tutkittaessa ja mahdollisesti laadittaessa pitää tutkia voidaanko niitä laatia eri lämmöntuonnin arvoilla hitsausolosuhteiden mukaisesti. Tällöin koekappaletta lämmitetään eri lämmöntuonnin arvoilla hitsauslämpösyklin mukaisesti, jolloin jäähtymisaika $t_{8/5}$ muuttuu lämmöntuonnin mukaisesti.

Lämmöntuonti voidaan määrittää S-käyriin myös erillisten jäähtymisaikamittausten perusteella. Tällöin hankitaan tai laaditaan ensin jatkuvan jäähtymisen S-käyrä tietyille teräslajille, mistä näkyy myös jäähtymiskäyrät/-nauha. Sen jälkeen tehdään hitsauskokeita, joissa kappaletta lämmitetään eri lämmöntuonnin arvoilla ja mitataan lämmöntuonnin mukaiset jäähtymisajat $t_{8/5}$. Näin saadut lämmöntuonnin arvot voidaan merkitä S-käyrään niitä vastaaviin jäähtymiskäyriin/-nauhoihin.

Yksi vaihtoehto on myös, että S-käyrältä näkyy vain jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvot, minkä perusteella kone voi laskea tarvittavan lämmöntuonnin laskukaavojen perusteella.

Laskukaavat eivät kuitenkaan ole täysin tarkkoja ja niitä käytettäessä voidaan valita virheellinen lämmöntuonti. Jäähtymisaikoja mitattaessa voidaan tutkia sitä, miten tarkasti lämmöntuonnin ja jäähtymisajan $t_{8/5}$ laskukaavojen arvot vastaavat todellisia arvoja.

Kun S-käyrältä nähdään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ vastaava lämmöntuonti, on se määritettävä tietylle aineenpaksuudelle, liitosmuodolle sekä työlämpötilalle. Näiden muuttujien vaihtuessa muuttuvat myös lämmöntuonnin arvot, mikä pitää ottaa huomioon säädettäessä konetta lämmöntuonnin perusteella.

Ohjauksessa käytettävän jäähtymisnauhan tai käytettävien jäähtymiskäyrien valinta

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrän laatimisen jälkeen tai kun sopiva S-käyrä on löydetty, pitää määrittää mitä jäähtymisnauhaa/-käyriä käytetään kyseiselle teräslajille. Jäähtymisnauhat/-käyrät pitää valita niin, että liitokseen syntyy haluttu mikrorakenne ja vaadittava metallurginen laatu saavutetaan.

Ensimmäisenä teräslajille voidaan etsiä valmistajien suosittelemat lämmöntuonnin minimi- ja maksimiarvot sekä etsiä onko kyseiselle teräslajille annettu suosituksia jäähtymisajan $t_{8/5}$ suhteen. Jäähtymisnauhojen alarajat valitaan niin, että kovuus ei ylitä sallittuja arvoja eikä liitokseen pääse syntymään martensiittia yli sallitun rajan tai, että martensiitti ei muodostu haitallisen kovaksi ja sitkeydeltään heikoksi. Ylärajat valitaan niin, että iskusitkeysominaisuudet eivät heikkene liikaa. Tarkastelu tehdään teräslajikohtaisesti, minkä jälkeen valitaan optimaaliset jäähtymisajat kyseiselle teräslajille huomioiden myös koostumusvaihteluiden vaikutukset S-käyrän muotoon ja sijaintiin.

Tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös aineenpaksuus ja liitosmuoto. Laskukaavojen avulla voidaan arvioida valittuja jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavia lämmöntuonnin arvoja eri aineenpaksuuksille ja liitosmuodoille. Valmistajien antamia lämmöntuonnin suositusarvoja voidaan käyttää apuna arvioitaessa jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavia lämmöntuonnin arvoja. Pienillä aineenpaksuuksilla lämmöntuontia voidaan joutua rajoittamaan, jolloin pitää tarkistaa, että pienellä lämmöntuonnilla päästään haluttuun jäähtymisaikaan. Suuremmilla

aineenpaksuuksilla lämmöntuonti, jolla päästään haluttuun jäähtymisaikaan, voi nousta liian suureksi.

Ohjauksessa lämmöntuonti pyritään pitämään lähellä sen keskiarvoa. Ohjauksen toimivuuden kannalta lämmöntuonnin arvot voivat poiketa noin $\pm 10\%$ keskiarvosta. Kun arvioidaan jäähtymisnauhojen jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavia lämmöntuonteja, jäähtymisnauhan leveys pitää valita siten, että sitä vastaavien lämmöntuontien arvot eivät poikkea yli 10% keskiarvosta.

8.2 Lämmöntuontiin vaikuttavien tekijöiden huomioon ottaminen

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä saatavaan tiettyyn jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ liittyvään lämmöntuontiin vaikuttavat työlämpötila, liitosmuoto ja aineenpaksuus. Kun S-käyrälle määritetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ vastaava lämmöntuonti, pitää näiden muiden tekijöiden vaikutukset myös ottaa huomioon.

Jos lämmöntuonti Q halutaan laskea jäähtymisajan $t_{8/5}$ kaavojen avulla, pitää ne muuttaa niin, että jäähtymisajan sijaan määritetään lämmöntuonnin arvo. Kaavat (3) ja (4) voidaan muuttaa seuraavasti, jotta niistä voidaan määrittää lämmöntuonti:

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

$$Q = \frac{t_{8/5}}{(6700 - 5 T_0) \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3} \quad (6)$$

missä T_0 = työlämpötila [°C]
 $t_{8/5}$ = jäähtymisaika [s]
 d = aineenpaksuus [mm]
 F_2 ja F_3 = liitosmuotokerroin

Kaavaa (5) käytetään 2D-lämmönjohtumisessa ja kaavaa (6) 3D-lämmönjohtumisessa. Lämmöntuonti voidaan laskea molemmista kaavoista ja käytetään sitä kaava, joka antaa pienemmän lämmöntuonnin arvon.

8.2.1 Työlämpötila

Työlämpötila vaikuttaa huomattavasti lämmöntuonnin suuruuteen. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrät on laadittu niin, että työlämpötila vastaa huoneenlämpötilaa (20 °C). Näin lämmöntuonti määritetään aina automaattisesti huoneenlämpötilan mukaan. Jos työlämpötilaa korotetaan huoneenlämpötilasta, on käyttäjän asetettava työlämpötilan arvo koneeseen. Tällöin koneessa pitää olla asetettuna materiaalin lisäksi myös liitosmuoto sekä aineenpaksuus, jolloin kone voi määrittää laskukaavojen perusteella uuden lämmöntuonnin, joka vastaa S-käyrältä näkyvää jäähtymiskäyrää/-nauhaa. Kun jäähtymisajat $t_{8/5}$ ja lämmöntuonnit määritetään, pitää määrittää myös, kuinka paljon laskukaavoilla saadut arvot poikkeavat todellisista mitatuista arvoista. Poikkeaman perusteella voidaan kaventaa jäähtymisajan $t_{8/5}$ raja-arvoja, jolloin pysytään jäähtymisnauhan sallituissa raja-arvoissa myös, kun käytetään laskukaavoja lämmöntuonnin määrittämiseen.

8.2.2 Liitosmuoto

Taulukossa 1 kuvattiin liitosmuodon vaikutusta jäähtymisaikaan. Siitä nähdään, että pienaliitoksen vaikutus jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ voi olla suuri verrattuna päittäisliitokseen. Kuten on todettu, pienaliitos jäähtyy nopeammin kuin päittäisliitos. Tämän takia S-käyrästä saatavat lämmöntuonnin arvot tulee määrittää erikseen sekä päittäis- että pienaliitoksille.

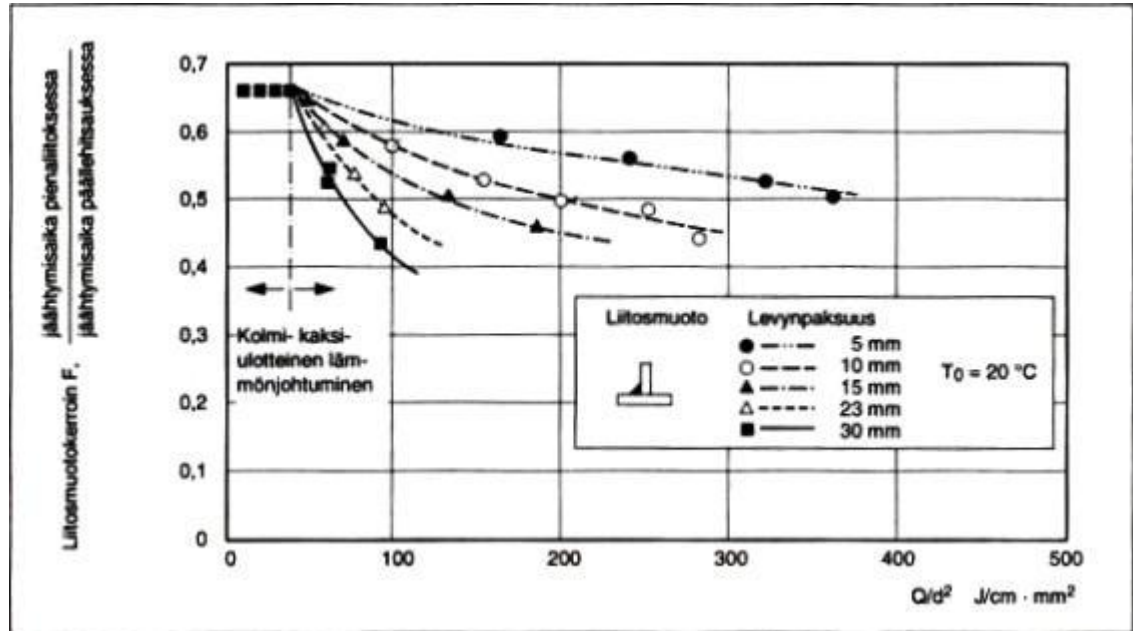
Jos jatkuvan jäähtymisen S-käyriä määritetään kokeellisesti, pitää tutkia voidaanko ne laatia eri liitosmuodoille erikseen. Tällöin jäähtymiskäyrä/-nauha vastaisi juuri kyseisen liitoksen jäähtymistä. Gleebleä käytettäessä, simuloinnissa käytetään yleensä pieniä koekappaleita, jotka ovat sylinterimäisiä ja normaalisti halkaisijaltaan 9,5 mm ja pituudeltaan 127 mm (Adonyi 2006, s. 42). Jos Gleebleä käytetään jatkuvan jäähtymisen S-käyrien määrittämiseen, liitosmuotoa ei voida ottaa huomioon simuloinnissa. Tällöin

liitosmuoto pitää ottaa huomioon, kun määritetään jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavia lämmöntuonteja hitsauskokeilla. Näin voidaan tehdä myös, jos käytetään valmiita S-käyriä.

Kun lämmöntuonti määritetään erikseen hitsauskokeiden avulla, voidaan samalla ottaa huomioon liitosmuodon vaikutus. Tässä tapauksessa hitsauskokeita tehdään pienaliitokselle eri lämmöntuonnin arvoilla ja mitataan niitä vastaavat jäähtymisajat $t_{8/5}$, jolloin saadaan huomioitua liitosmuoto.

Jos lämmöntuonnin määrittämiseen käytetään laskukaavoja, pitää liitosmuotokertoimen vaihtelut ottaa huomioon. Kuten taulukosta 1 nähtiin, 2D-lämmönjohtumisessa esimerkiksi T-liitoksen liitosmuotokerroin vaihtelee 0,30:stä 0,67:ään.

Kuvassa 40 on esitetty lämmöntuonnin ja aineenpaksuuden vaikutus liitosmuotokertoimeen pienaliitoksessa. Kuvasta 40 voidaan todeta, että lämmöntuonnin kasvaessa liitosmuotokerroin pienenee. Koska lämmöntuontia ei tiedetä, pitää liitosmuotokerroin pystyä määrittämään jäähtymisajan $t_{8/5}$ sekä aineenpaksuuden perusteella. Jäähtymisaika $t_{8/5}$ vastaa aina jotain tiettyä lämmöntuontia tietyllä aineenpaksuudella, liitosmuodolla ja työlämpötilalla. Kuvan 40 liitosmuotokertoimen F arvot on saatu jakamalla jäähtymisaika pienaliitoksessa päällehitsauksen jäähtymisajalla. Kun tehdään hitsauskokeita ja mitataan jäähtymisaikoja, voidaan kokeet tehdä sekä pienahitseille että päällehitseille. Kun hitsauskokeissa saadaan määritettyä liitosmuotokerroin, voidaan se tallentaa koneen muistiin vastaamaan jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ pienaliitoksessa. Koneen saadessa tiedon jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvosta, se hakee muistista kyseistä jäähtymisaikaa vastaavan liitosmuotokertoimen. Eri teräslajeille voidaan tallentaa koneeseen halutut jäähtymisnauhat/-käyrät teräslajikohtaisesti, jolloin koneessa on valmiiksi muistissa jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvo tai sitten käyttäjä asettaa jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvon koneeseen. Kun käytetään laskukaavoja lämmöntuonnin määrittämiseen, käyttäjän pitää asettaa koneeseen materiaalin lisäksi aineenpaksuus, työlämpötila (jos korotettu) sekä liitosmuodoksi pienaliitos, jonka jälkeen kone hakee muistista liitosmuotokertoimen ja laskee sen jälkeen uudet lämmöntuonnin arvot.



Kuva 40. Lämmöntuonin ja aineenpaksuuden vaikutus liitosmuotokertoimeen pienaliitoksessa (Vähäkainu 2003, s. 29).

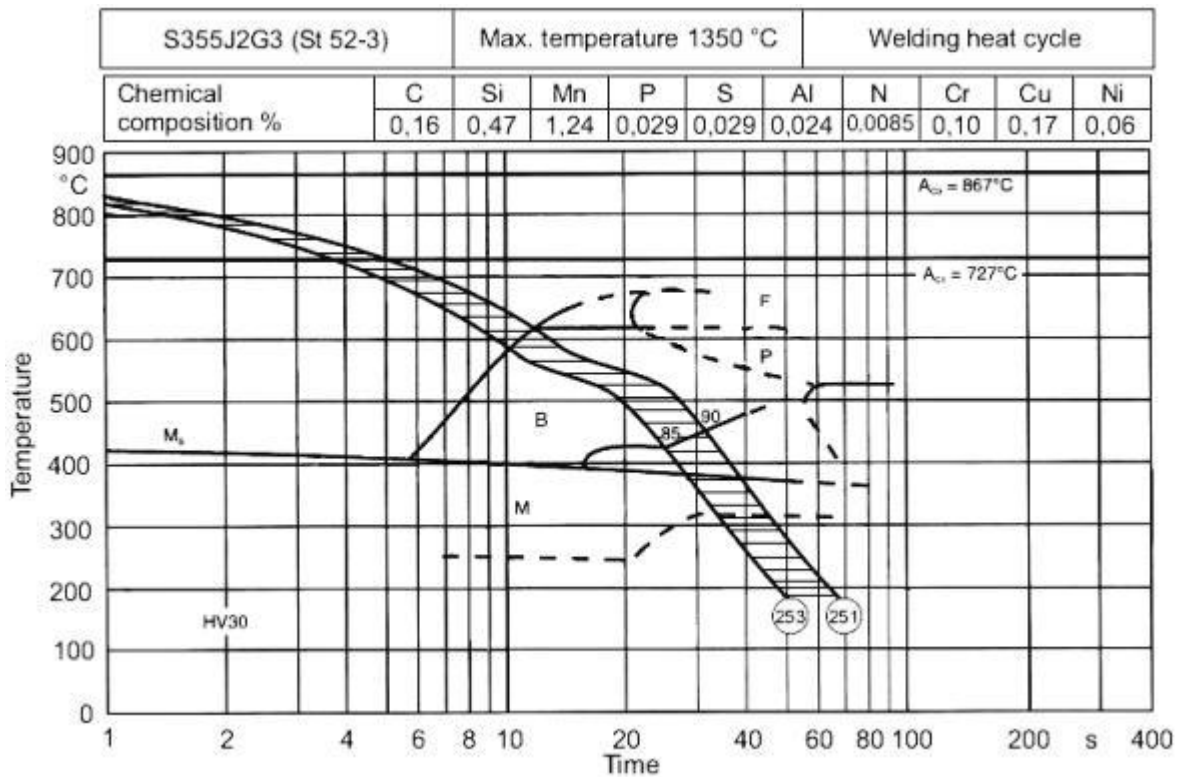
8.2.3 Aineenpaksuus

Aineenpaksuus vaikuttaa oleellisesti tiettyyn lämmöntuontiin liittyvään jäähtymisaikaan $t_{8/5}$. Kun hitsattavaa aineenpaksuutta vaihdetaan, muuttuu myös lämmöntuonti, jolla päästään haluttuihin jäähtymisajan raja-arvoihin. Laskukaavoja käytettäessä 3D-lämmönjohtumisessa paksuilla levyillä aineenpaksuus ei vaikuta lämmöntuontiin, mutta 2D-lämmönjohtumisessa aineenpaksuudella on vaikutusta.

Jos S-käyriä laaditaan, pitää tutkia voidaanko ne määrittää eri aineenpaksuuksille. Simuloinnissa käytetään pieniä koekappaleita, joten Gleebleä käytettäessä aineenpaksuutta ei oteta huomioon. Jos lämmöntuonti määritetään hitsauskokeiden perusteella, saadaan samalla määritettyä aineenpaksuuden vaikutus jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ ja lämmöntuontiin. Aineenpaksuuden vaikutusta jäähtymisnopeuteen voidaan tutkia kokeellisesti tekemällä hitsauskokeita eri lämmöntuonneilla sekä aineenpaksuuksilla ja mittaamalla liitoksen jäähtymisnopeus $t_{8/5}$.

Jotta jokaiselle aineenpaksuudelle ei tarvitsisi tehdä omaa S-käyrää tai hitsauskokeita, ne voidaan mahdollisesti määrittää eri aineenpaksuusväleille. Tällöin pitää määrittää, miten paljon aineenpaksuus vaikuttaa lämmöntuontiin ja mitkä aineenpaksuudet mahtuvat jäähtymisnauhan toleranssialueen sisälle.

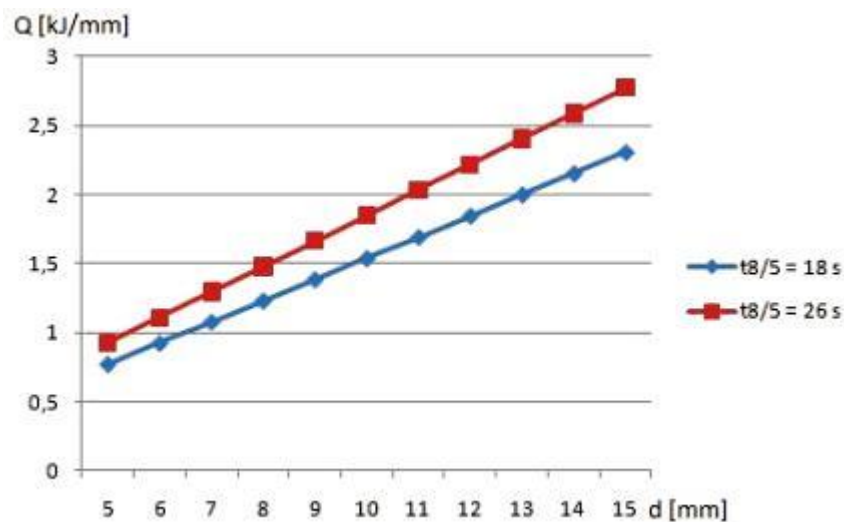
Seuraavassa tarkastellaan laskukaavojen (5) ja (6) avulla suuntaa antavia lämmöntuonnin arvoja eri aineenpaksuuksille. Esimerkkinä on aikaisemmin esitetty teräksen S355J2G3 jatkuvan jäähtymisen S-käyrä. Kyseisen teräksen jäähtymisnauhana voidaan käyttää esimerkiksi jäähtymisnauhaa, jonka $t_{8/5\min}$ on 18 s ja $t_{8/5\max}$ on 26 s, kuva 41.



Kuva 41. Teräksen S355J2G3 jatkuvan jäähtymisen S-käyrä, jossa näkyy jäähtymisnauha $t_{8/5\min}=18$ s ja $t_{8/5\max}=26$ s (Muokattu: Dilthey 2005, s. 19).

Kun laskukaavoilla tarkastellaan aineenpaksuuden vaikutusta lämmöntuontiin, kuvan 42 perusteella voidaan todeta, että lämmöntuonti kasvaa suhteellisen paljon, jos aineenpaksuus kasvaa yhden millimetrin. Lämmöntuonnin arvot on laskettu, kun T_0 on 20 °C, F_2 on 0,67

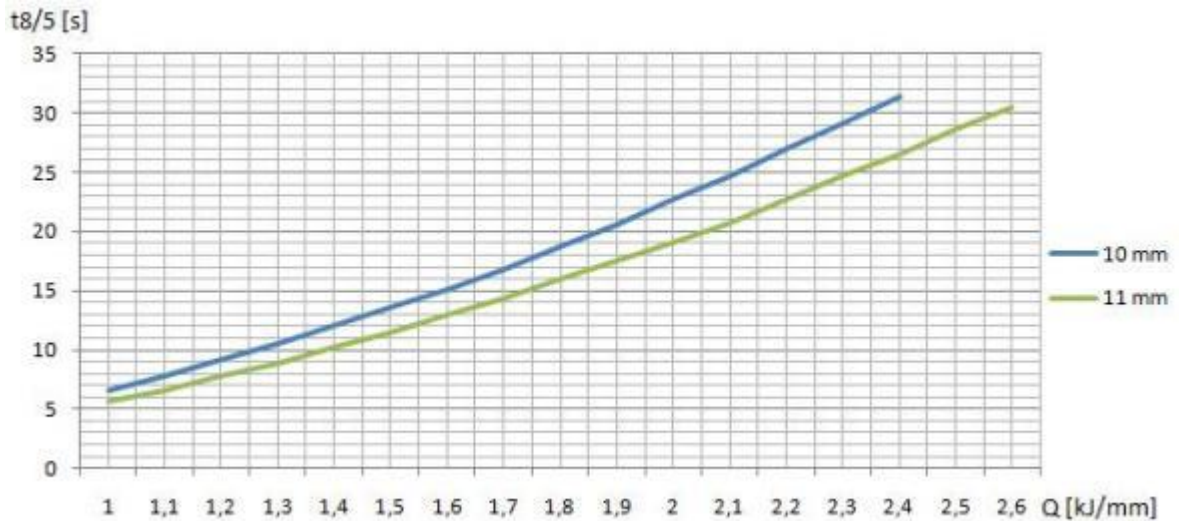
sekä jäähtymisaika $t_{8/5}$ on 18 s ja 26 s. Tällöin kuvasta 42 nähdään lämmöntuonnin minimi- ja maksimiraja-arvot eri aineenpaksuuksille, jos käytetään jäähtymisnauhaa, jonka jäähtymisajan raja-arvot ovat 18 s ja 26 s. Tässä tapauksessa liitosmuotokertoimen muutoksia ei ole huomioitu. Jos esimerkiksi halutaan käyttää vain jäähtymiskäyrää, jonka jäähtymisaika $t_{8/5}$ on 18 s, aineenpaksuuden muuttuessa yhden millimetrin, pitää lämmöntuontia nostaa noin 0,15 kJ/mm, jotta jäähtymisaika $t_{8/5}$ pysyy vakiona ja jäähtymisessä syntyy kyseisen jäähtymiskäyrän mukainen mikrorakenne.



Kuva 42. Lämmöntuonti eri aineenpaksuuksilla, kun $T_0=20\text{ °C}$, $F_2=0,67$ ja $t_{8/5}=18\text{ s}$ ja 26 s .

Kuvasta 42 nähdään, että lämmöntuonnin alue kasvaa aineenpaksuuden kasvaessa, mutta pienillä aineenpaksuuksilla lämmöntuonnin toleranssialue on kapea. Tarkasteltaessa esimerkiksi aineenpaksuusväliä 13–15 mm nähdään, että mikäli halutaan pysyä jäähtymisnauhan raja-arvojen sisällä kaikilla näillä aineenpaksuuksilla, lämmöntuonnin toleranssialuetta on supistettava niin, että se olisi välillä 2,3–2,4 kJ/mm. Tällöin virtalähteen ohjaukselle jäisi vain pieni lämmöntuonnin toleranssialue, jonka perusteella hitsausparametrien säätö suoritetaan. Pienemmillä aineenpaksuuksilla lämmöntuonnin toleranssialue on vielä kapeampi, eikä sen sisälle mahdu useita aineenpaksuuksia. Tästä johtuen jäähtymisnauhan samoja lämmöntuonnin arvoja ei voida käyttää eri aineenpaksuusväleille, vaan jokaiselle aineenpaksuudelle on määritettävä omat lämmöntuonnin raja-arvot.

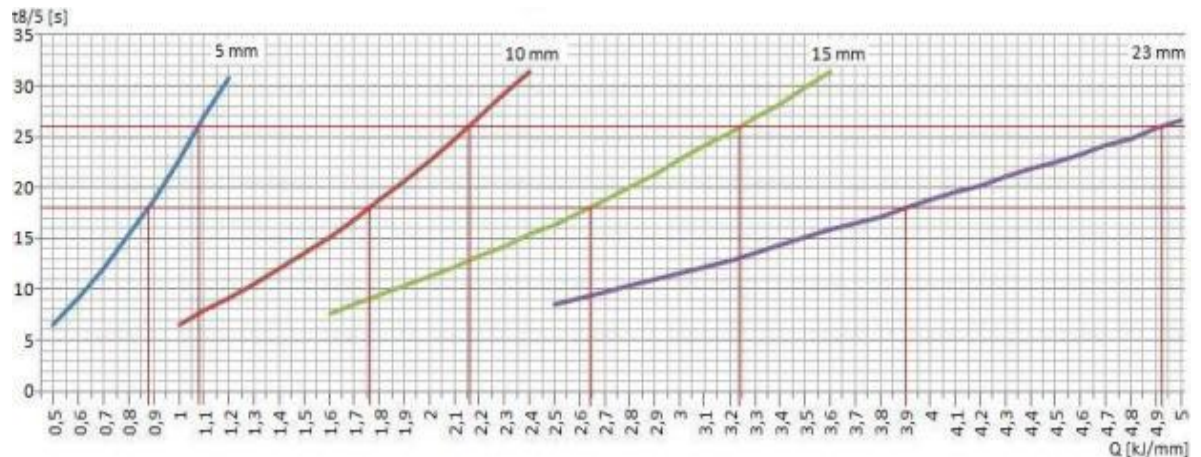
Kuvasta 43 nähdään lämmöntuonnin vaikutus jäähtymisaikaan kahdella eri aineenpaksuudella (10 mm ja 11 mm). Jäähtymisajat $t_{8/5}$ on laskettu lämmöntuonnin laskukaavoilla, kun T_0 on 20 °C. Liitosmuotokerroin F_2 on otettu huomioon kuvan 40 perusteella, jolloin se vaihtelee noin 0,6:sta 0,48:n.



Kuva 43. Lämmöntuonnin ja jäähtymisajan $t_{8/5}$ suhde aineenpaksuuksilla 10 mm ja 11 mm.

Kuvasta 43 nähdään, että kun jäähtymisajaksi $t_{8/5}$ halutaan 26 s kyseisellä liitosmuodolla ja työlämpötilalla, 10 mm aineenpaksuudella lämmöntuonnin tulee olla noin 2,16 kJ/mm ja 11 mm levyllä lämmöntuonnin tulee olla noin 2,37 kJ/mm. Hitsauskokeita tehtäessä voidaan tutkia miten lämmöntuonti muuttuu aineenpaksuuden muuttuessa. Kokeiden perusteella voidaan piirtää kuvan 43 mukaiset kuvaajat lämmöntuonnin ja jäähtymisajan $t_{8/5}$ suhteesta.

Hitsauskokeissa lämmöntuonnin vaikutusta jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ voidaan mitata eri aineenpaksuuksien välein. Kuvassa 44 on esimerkki, jossa lämmöntuonnin vaikutus jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ pienaliitoksessa aineenpaksuuksilla 5, 10, 15 ja 23 mm on piirretty kuvaajaksi. Jäähtymisajat $t_{8/5}$ on laskettu lämmöntuonnin laskukaavoilla, kun T_0 on 20 °C ja F_2 kuvan 40 mukaan määritetty. Kuvan 44 esimerkissä lämmöntuontia on nostettu 0,1 kJ/mm välein, joka on mahdollista myös hitsauskokeita suoritettaessa. Tällöin lämmöntuonnit saadaan määritettyä tarkasti.



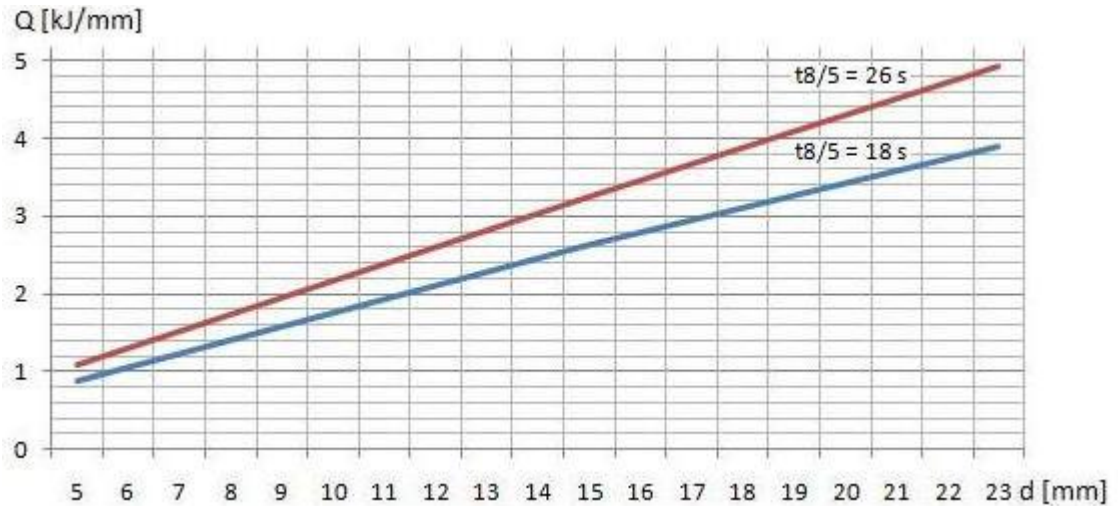
Kuva 44. Lämmöntuonnin vaikutus jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ eri aineenpaksuuksilla ja jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ 18 s ja 26 s vastaavat lämmöntuonnin arvot.

Kuvaajasta voidaan katsoa halutut jäähtymisaikojen arvot ja niitä vastaavat lämmöntuonnit. Jos käytetään jäähtymisnauhaa, jossa $t_{8/5min}$ on 18 s ja $t_{8/5max}$ on 26 s, kuvaajasta saadaan seuraavat arvot (taulukko 5):

Taulukko 5. $t_{8/5min}$ ja $t_{8/5max}$ arvoja vastaavat Q_{min} ja Q_{max} arvot eri aineenpaksuuksilla.

	$t_{8/5min}$	$t_{8/5max}$
d [mm]	Q_{min} [kJ/mm]	Q_{max} [kJ/mm]
5	0,88	1,08
10	1,76	2,16
15	2,64	3,24
23	3,9	4,93

Näiden arvojen perusteella voidaan piirtää jäähtymisnauha, kuva 45, josta voidaan määrittää lämmöntuonnin raja-arvot eri aineenpaksuuksille kyseiselle jäähtymisnauhalle. Tämän jälkeen voidaan tehdä jäähtymisaikojen $t_{8/5}$ mittauksia joiltain aineenpaksuuksilta jo tarkasteltujen aineenpaksuuksien väliltä ja tutkia päästäänkö kuvaajan mukaisilla lämmöntuonnin arvoilla jäähtymisnauhan mukaisiin jäähtymisaikoihin.



Kuva 45. Lämmöntuonnin raja-arvot eri aineenpaksuuksilla jäähtymisnauhalla, jossa $t_{8/5min}$ on 18 s ja $t_{8/5max}$ on 26 s.

Kuvasta 45 nähdään, että pienaliitoksella jäähtymisnauhan lämmöntuonnin arvot nousevat suuriksi aineenpaksuuden kasvaessa. Esimerkiksi Rautaruukin hitsaajan oppaassa on annettu maksimilämmöntuontisuositukset eri Rautaruukin valmistamille teräksille. Teräkselle S355J2G3 aineenpaksuudelle 15 mm maksimilämmöntuontisuositus on noin 3,5 kJ/mm. Käytettäessä edellä määritettyä jäähtymisnauhaa 15 mm levyllä pysytään tämän lämmöntuontisuosituksen rajoissa. Suuremmilla aineenpaksuuksilla kuitenkin ylitetään maksimilämmöntuontisuositus. Esimerkiksi 20 mm levyllä suositus on 4 kJ/mm, mikä ylittyy määritetyn jäähtymisnauhan lämmöntuonnin arvoilla. Tällaisissa tapauksissa jäähtymisnauhaa voidaan kaventaa pienentämällä jäähtymisajan keskiarvoa, jolloin maksimilämmöntuonti pienenee, tai voidaan suositella korotetun työlämpötilan käyttöä. Näillä aineenpaksuuksilla liikuttaessa hitsaus muuttuu monipalkohitsaukseksi, jolloin työlämpötilaa voidaan korottaa käyttämällä sopivaa hitsausjärjestystä palkojen välisen lämpötilan nostamiseksi.

Teräksen S355J2G3 edellisten kuvaajien perusteella määritetyt lämmöntuonnin raja-arvot aineenpaksuuksille 5–15 mm, jäähtymisnauhalle ($t_{8/5min}=18$ s ja $t_{8/5max}=26$ s) on esitetty taulukossa 6. Taulukosta 6 nähdään, että lämmöntuonnin raja-arvot poikkeavat keskiarvosta

noin ± 10 %. Määritetyt lämmöntuonnin raja-arvot voidaan tallentaa koneeseen vastaamaan kyseisen materiaalin jäähtymisnauhaa eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille.

Taulukko 6. Jäähtymisnauhaa vastaavat lämmöntuonnin raja-arvot eri aineenpaksuuksilla pienaliitokselle.

	$t_{8/5min}$	$t_{8/5max}$		
d [mm]	Q_{min} [kJ/mm]	Q_{max} [kJ/mm]	Q:n keskiarvo [kJ/mm]	Q:n toleranssialue
5	0,88	1,08	0,98	0,2
6	1,06	1,30	1,18	0,24
7	1,23	1,51	1,37	0,28
8	1,41	1,73	1,57	0,32
9	1,58	1,94	1,76	0,36
10	1,76	2,16	1,96	0,4
11	1,94	2,38	2,16	0,44
12	2,11	2,59	2,35	0,48
13	2,29	2,81	2,55	0,52
14	2,46	3,02	2,74	0,56
15	2,64	3,24	2,94	0,6

Aineenpaksuuden vaihtuessa uusi lämmöntuonti voidaan myös laskea laskukaavojen avulla. Tällöin käyttäjän on asetettava koneeseen materiaalin lisäksi käytettävä liitosmuoto, työlämpötila (jos korotettu) sekä aineenpaksuus, minkä perusteella kone laskee 2D- ja 3D-lämmönjohtumisen kaavoilla uudet lämmöntuonnin raja-arvot ja käyttää pienempiä lämmöntuonnin raja-arvoja virtalähteen ohjauksessa.

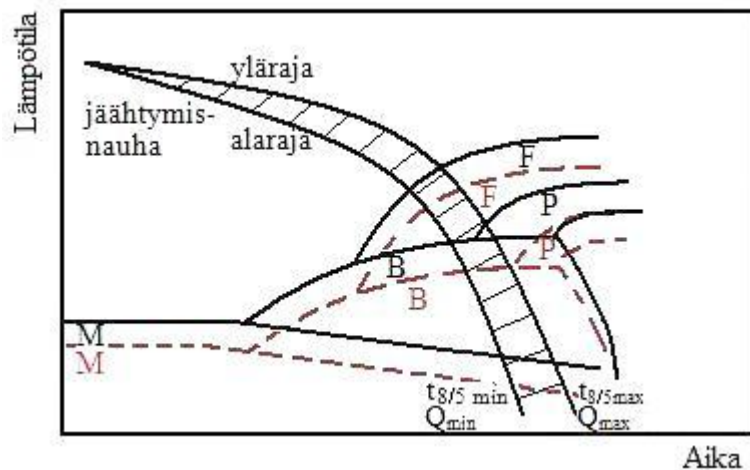
8.3 Koostumusvaihteluiden huomioon ottaminen

Seosaineiden tarkat vaikutukset jatkuvan jäähtymisen S-käyriin pitää määrittää kokeellisesti. S-käyriä pitää laatia teräslajikohtaisesti eri koostumuksilla, jolloin nähdään

miten ne vaikuttavat S-käyrien muotoon ja sijaintiin. Esimerkiksi teräslajeille S355N ja S355M määritetään omat S-käyrät, koska ne poikkeavat toisistaan paljon. Kun S-käyrät määritetään teräslajikohtaisesti, otetaan huomioon myös teräksen toimitustila. Jos S-käyriä ei laadita kokeellisesti, vaan käytetään jo olemassa olevia S-käyriä, voidaan niitä verrata keskenään, jolloin voidaan arvioida koostumusvaihteluiden vaikutuksia S-käyrään.

8.3.1 Jäähdytysnauhojen tai jäähdytyskäyrien käyttö S-käyrässä

Koostumusvaihtelut voidaan ottaa huomioon käyttämällä jäähdytyskäyrän sijasta jäähdytysnauhaa, kuva 46. Jäähdytysnauhalla on $t_{8/5}$ -minimiarvo sekä -maksimiarvo ($t_{8/5\min}$, $t_{8/5\max}$), minkä välillä jäähdytysaika $t_{8/5}$ voi vaihdella. Kun määritetään jäähdytysaikaa vastaava lämmöntuonti, jäähdytysnauhalle merkitään lämmöntuonnin minimi- ja maksimiarvot (Q_{\min} , Q_{\max}). Tämän toleranssialueen sisällä lämmöntuonti voi vaihdella ylä- ja alarajan välillä, jotta saavutetaan haluttu mikrorakenne. Koneen ohjauksessa lämmöntuonnin arvo pyritään pitämään lähellä sen jäähdytysnauhan keskiarvoa.



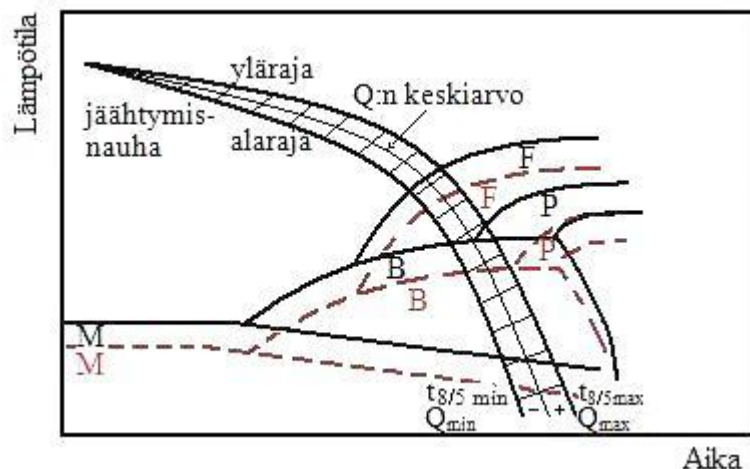
Kuva 46. Kaaviollisesti esitetty kuva jäähdytysnauhasta.

Kuvassa 46 katkoviivat esittävät seosaineiden vaikutuksia, jolloin käyrät liikkuvat pidemmille ajoille ja matalammille lämpötiloille. Kun materiaalille on laadittu tai löydetty S-käyriä eri koostumuksilla, niitä voidaan verrata kuvan 46 mukaisesti. Tämän jälkeen

voidaan määrittää jäähtymisnauhat, jotka tuottavat halutun mikrorakenteen kaikilla kyseisen materiaalin koostumuksilla.

Jos käytetään yhtä jäähtymisnauhaa, eri teräslajeille voidaan tallentaa koneeseen lämmöntuonnin keskiarvot ja raja-arvot eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille. Koneeseen voidaan myös tallentaa vain lämmöntuonnin keskiarvo ja suorittaa ohjaus siten, että keskiarvosta ei saa poiketa enempää kuin $\pm 10\%$. Kun koneeseen on tallennettu valmiiksi lämmöntuonnin arvot ja käyttäjä asettaa koneeseen materiaalin, aineenpaksuuden ja liitosmuodon, kone tunnistaa mitä lämmöntuonnin arvoja hitsauksessa käytetään. Tällöin käyttäjän ei tarvitse valita tai asettaa lämmöntuonnin arvoja koneeseen. Tämä nopeuttaa säätöjen tekemistä ja helpottaa koneen käyttöä.

Jäähtymisnauhaa käytettäessä voidaan käyttää myös lämmöntuonnin keskiarvoa pienempiä tai suurempia arvoja, jotka voidaan ottaa huomioon säädettäessä virtalähdettä, kuva 47. Jos halutaan käyttää pieniä lämmöntuonnin arvoja, konetta voidaan säätää niin, että se käyttää keskiarvoa pienempiä arvoja. Jos lämmöntuontia halutaan korottaa, voidaan konetta säätää niin, että se käyttää lämmöntuonnin keskiarvoa suurempia arvoja.

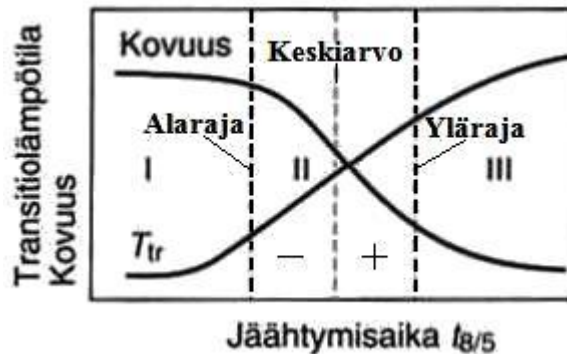


Kuva 47. Jäähtymisnauha, jossa näkyy lämmöntuonnin keskiarvo.

Kuvan 47 esimerkin mukaisesti päästään lähelle samaa mikrorakennetta, kun käytetään jäähtymisnauhan lämmöntuonnin keskiarvoa pienempiä arvoja koostumuksen ollessa

yhtenäisten viivojen mukainen ja kun käytetään jäähtymisnauhan lämmöntuonnin keskiarvoa suurempia arvoja koostumuksen ollessa katkoviivojen mukainen. Jos S-käyrien muoto muuttuu paljon teräslajin koostumuksen vaihtuessa, ei jäähtymisnauhaa käyttämällä välttämättä päästä samoihin mikrorakenteisiin eri koostumuksilla, mutta sen avulla voidaan saavuttaa aina vaadittava metallurginen laatu.

Käyttämällä jäähtymisnauhan ala- tai ylärajan läheisiä arvoja voidaan vaikuttaa materiaalin iskutkeysominaisuuksiin sekä kovuuteen muutosvyöhykkeellä. Jäähtymisnauhan keskiarvoa pienempien ja suurempien arvojen vaikutuksia voidaan kuvata aikaisemmin esitetyn kuvan 2 avulla. Kuten aiemmin kerrottiin, liitoksen optimaalisten ominaisuuksien, kannalta jäähtymisajan tulee osua alueelle II jäähtymisnauhan ala- ja ylärajan väliin, kuva 48. Tällöin on tehty kompromissi liitoksen iskutkeysominaisuuksien ja kovuuden suhteen. Käyttämällä keskiarvoa pienempiä tai suurempia arvoja liitoksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa, varsinkin tilanteissa, joissa liikutaan lähellä sallittavaa kovuuden maksimiarvoa tai iskutkeyden minimiarvoa.



Kuva 48. Jäähtymisnauhan (II) keskiarvoa pienempien arvojen (-) ja keskiarvoa suurempien arvojen (+) vaikutus kovuuteen ja iskutkeyden transitiolämpötilaan (Muokattu: Vähäkainu 2003, s. 23).

Jos hyvät iskutkeysominaisuudet ovat määräävä tekijä valittaessa hitsausolosuhteita, voidaan valita, että käytetään lämmöntuonnin arvoja jäähtymisnauhan alarajan ja keskiarvon väliseltä alueelta. Tällöin muutosvyöhykkeen kovuus nousee, mutta iskutkeysominaisuudet paranevat. Jos puolestaan on vaarana, että muutosvyöhyke

karkenee helposti ja sen kovuutta pitää rajoittaa, voidaan lämmöntuonniksi valita jäähtymisnauhan keskiarvon ja ylärajan välisen alueen lämmöntuonnin arvot.

Ohjauksen toteutuksen kannalta jäähtymisnauhojen Q_{\min} ja Q_{\max} arvot pyritään pitämään $\pm 10\%$ sisällä jäähtymisnauhan keskiarvosta. Jos ohjaukseen käytetään jäähtymisnauhaa, voidaan lämmöntuontia säätää omasta lämmöntuonnin tehonsäätimestä. Tehonsäätimestä voidaan lisätä (+) tai vähentää (-) prosentteina lämmöntuonnin tehoa sen keskiarvosta. Säätimen ollessa keskiasennossa lämmöntuonti pyritään pitämään lähellä sen keskiarvoa. Jos halutaan käyttää keskiarvoa pienempiä lämmöntuonnin arvoja, voidaan tehonsäädintä kääntää miinuspuolelle, jolloin lämmöntuonnin arvot laskevat keskiarvoa pienemmiksi. Jos halutaan käyttää keskiarvoa suurempia lämmöntuonnin arvoja, voidaan puolestaan kääntää tehonsäädintä pluspuolelle, jolloin lämmöntuonnin arvot nousevat keskiarvoa suuremmiksi.

Sallittujen jäähtymisaikojen rajojen ollessa laajat, voi jäähtymisnauhoja olla mahdollisesti useampia. Tällöin olisi mahdollista valita laajemmin halutut liitoksen ominaisuudet. Jos käytetään useampia jäähtymisnauhoja, pitää niiden olla kapeita, jotta ne mahtuvat sallittujen jäähtymisaikojen rajojen sisäpuolelle. Jäähtymisnauhan lämmöntuonnin kapeat raja-arvot voivat tuottaa ongelmia ohjauksessa varsinkin lämmöntuonnin tehonsäädössä, jos pyritään käyttämään keskiarvoa pienempiä tai suurempia arvoja. Pienillä aineenpaksuuksilla lämmöntuonnin raja-arvot ovat kapeammat kuin suuremmilla aineenpaksuuksilla. Jäähtymisnauhoja ei mahdu kahta erillistä nauhaa enempää sallittujen jäähtymisaikojen rajojen sisälle laskukaavoilla tehdyn lämmöntuonnin arvojen tarkastelun perusteella, muuten jäähtymisnauhoista tulee liian kapeita. Kahta jäähtymisnauhaa käytettäessä käyttäjän pitää asettaa lämmöntuonnin raja-arvot koneeseen tai valita kumman käyrän arvoja käytetään koneen ohjauksessa, jos koneeseen tallennetaan molempien jäähtymisnauhojen lämmöntuonnin arvot.

Käytettäessä jäähtymiskäyriä voidaan haluttu jäähtymiskäyrä valita sallittujen jäähtymisaikojen rajojen sisäpuolelta. Tällöin lämmöntuonnilla pitää olla joku toleranssialue, jonka sisällä se voi vaihdella. Tässäkin tapauksessa käyttäjän on itse asetettava lämmöntuonnin arvo koneeseen tai valita, minkä jäähtymiskäyrän arvoja

käytetään koneen ohjauksessa, jos koneeseen tallennetaan eri jäähtymiskäyrien lämmöntuonnin arvot.

Jos tutkimuksissa havaitaan, että teräslajin koostumusvaihtelut eivät vaikuta merkittävästi S-käyrien muotoon tai sijaintiin, ei kahden jäähtymisnauhan tai jäähtymiskäyrien käyttö ole tarpeellista. Tällaisessa tapauksessa yhtä jäähtymisnauhaa käyttämällä voidaan saavuttaa optimaaliset liitoksen ominaisuudet. Jos koostumusvaihtelut puolestaan vaikuttavat paljon S-käyrien muotoon tai sijaintiin, voidaan koostumuksen perusteella valita jäähtymisnauha tai jäähtymiskäyrä, millä saavutetaan liitoksen optimaaliset ominaisuudet. Seuraavassa, taulukko 7, on vertailtu jäähtymisnauhan, kahden jäähtymisnauhan ja jäähtymiskäyrien etuja ja rajoituksia.

Taulukko 7. Jäähdytysnauhan, kahden jäähdytysnauhan ja jäähdytyskäyrien käytön vertailu.

Lämmöntuonti S-käyrältä	Etuja	Rajoituksia
Jäähdytysnauha	<ul style="list-style-type: none"> • Lämmöntuonnin arvot voidaan tallentaa valmiiksi koneeseen • Selkeä käyttäjälle • Mahdollisuus käyttää jäähdytysnauhan keskiarvoa suurempia ja pienempiä lämmöntuonnin arvoja <ul style="list-style-type: none"> ○ Voidaan vaikuttaa liitoksen ominaisuuksiin • Koostumusvaihtelut otetaan huomioon • Jos käytetään laskukaavoja lämmöntuonnin määrittämiseen, koneen muistissa $t_{8/5}$ -arvot valmiina 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaikille teräslajin koostumuksille yksi jäähdytysnauha, jolla pitää saavuttaa vaadittava metallurginen laatu <ul style="list-style-type: none"> ○ Jos koostumusvaihtelut vaikuttavat paljon S-käyrien muotoon tai sijaintiin, voi aiheuttaa ongelmia
Kaksi jäähdytysnauhaa	<ul style="list-style-type: none"> • Mahdollisuus vaikuttaa enemmän syntyvään mikrorakenteeseen • Teräslajin koostumuksen perusteella (CE-luokka) voidaan valita oikea jäähdytysnauha • Lämmöntuonnin arvot voidaan tallentaa valmiiksi koneeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Käyttäjän pitää asettaa lämmöntuonnin arvot koneeseen tai valita käytettävä jäähdytysnauha • Pienillä aineenpaksuuksilla pienet lämmöntuonnin raja-arvot • Jos käytetään laskukaavoja lämmöntuonnin määrittämiseen, pitää käyttäjän asettaa $t_{8/5}$-arvot tai valita käytettävä jäähdytysnauha • Jäähdytysajan sallitut rajat pitää olla laajat
Jäähdytyskäyrät	<ul style="list-style-type: none"> • Mahdollisuus vaikuttaa enemmän syntyvään mikrorakenteeseen • Teräslajin koostumuksen perusteella (CE-luokka) voidaan valita oikea jäähdytyskäyrä • Lämmöntuonnin arvot voidaan tallentaa valmiiksi koneeseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Käyttäjän pitää asettaa lämmöntuonnin arvo koneeseen tai valita käytettävä jäähdytyskäyrä • Ei lämmöntuonnin tehonsäätöä • Jos käytetään laskukaavoja lämmöntuonnin määrittämiseen, pitää käyttäjän asettaa $t_{8/5}$-arvo tai valita käytettävä jäähdytyskäyrä

8.3.2 Arviointi hiilikvivalentin perusteella

Materiaalin koostumusvaihteluiden huomioon ottamisessa voidaan käyttää hiilikvivalenttia (CE), jolla voidaan teräksen kemiallisen koostumuksen perusteella

arvioida karkenevuutta. Yleisin on IIW:n (International Institute of Welding) kaava, joka soveltuu teräksille, joiden muutosvyöhyke ei karkene täysin käytännön hitsausenergioilla. (Vähäkainu 2003, s. 37.) Seostamattomille ja niukkaseosteisille rakenneteräksille sekä hienoraeteräksille soveltuva IIW:n kaava on (Martikainen 2011, s. 34):

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (7)$$

Toinen CE-arvon määrittämiseen käytettävä kaava, joka soveltuu myös seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille sekä hienoraeteräksille, on (Martikainen 2011, s. 34):

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (8)$$

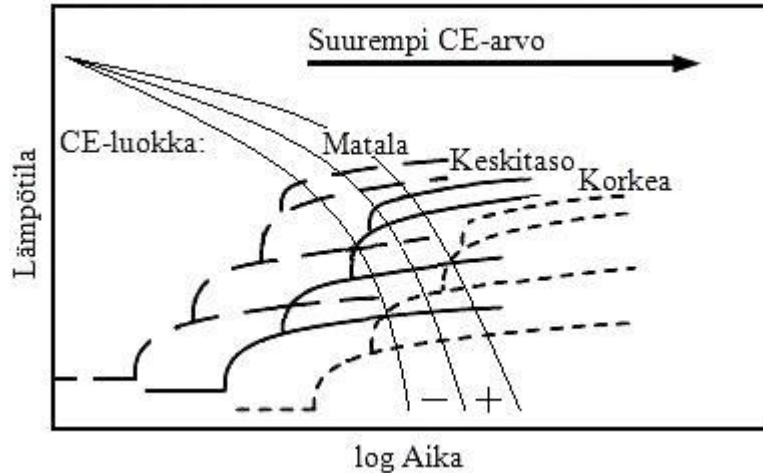
Kun CE-arvo on alle 0,41, kylmähalkeiluriskiä arvioitaessa teräs on hyvin hitsattavaa tavallisilla menetelmillä (Vähäkainu 2003, s. 37). Hiiliequivalentin arvo on arvioitu sen perusteella, kuinka seosaineet vaikuttavat teräksen faasimuutosominaisuuksiin, mukaan lukien M_s -lämpötilaan. Esimerkiksi liikkuvatko jatkuvan jäähtymisen S-käyrän alueet pidemmille vai lyhyemmille ajoille. CE-arvo antaa viitteitä syntyvästä mikrorakenteesta hitsin muutosvyöhykkeelle jäähtymisajan suhteen. Tarkemmin, se antaa viitteitä voiko martensiittia syntyä muutosvyöhykkeelle. (Easterling 1992, s. 133.)

Karkenevuutta lisäävät seosaineet siirtävät S-käyriä pidemmille ajoille. Mitä suurempi hiiliequivalentin arvo on, sitä pidemmällä ajoilla S-käyrät sijaitsevat. Hiiliequivalentti ei ota huomioon kaikkia seosaineita, mutta sen perusteella voidaan saada tietoa kyseisen koostumuksen S-käyrän sijainnista. Hiiliequivalentti ei myöskään ota huomioon materiaalin toimitustilaa. S-käyrien pitää olla teräslajikohtaisia, jolloin myös eri toimitustilat otetaan huomioon. S-käyriä tutkittaessa pitää tutkia, miten CE-arvon muutos vaikuttaa kyseisen teräslajin S-käyrien muutokseen. Eri materiaaliryhmille ja koostumuksille on kehitetty eri hiiliequivalenttikaavoja, joten materiaalikohtaisesti pitää miettiä mitä hiiliequivalentin kaavaa käytetään. Edellä esitettyjen hiiliequivalenttikaavojen lisäksi on myös esimerkiksi

säröparametri P_{cm} . P_{cm} -kaava, joka soveltuu lujille rakenneteräksille, on (Martikainen 2011, s. 35):

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (9)$$

Hiiliekvivalentin arvoista voidaan laatia teräslajikohtaisesti esimerkiksi CE-luokat. Jos koostumusvaihteluita tutkittaessa havaitaan millä CE-arvoilla tai seosainepitoisuuksilla S-käyrät muuttuvat, voidaan sen perusteella määrittää eri CE-luokat. CE-luokat voivat esimerkiksi olla matala, keskitaso ja korkea, riippuen CE-arvon vaikutuksesta S-käyriin, kuva 49. Jos jatkuvan jäähtymisen S-käyriä laaditaan teräslajikohtaisesti, voidaan lopullinen S-käyrä tehdä kyseisen teräslajin yleisimmän koostumuksen mukaisesti ja tämän koostumuksen CE-arvo merkitään S-käyrään. S-käyriin voidaan antaa ohjeelliset lämmöntuonnin arvot eri CE-luokille tai suositukset käyttää jäähtymisnauhan keskiarvoa pienempää tai suurempaa lämmöntuontia.



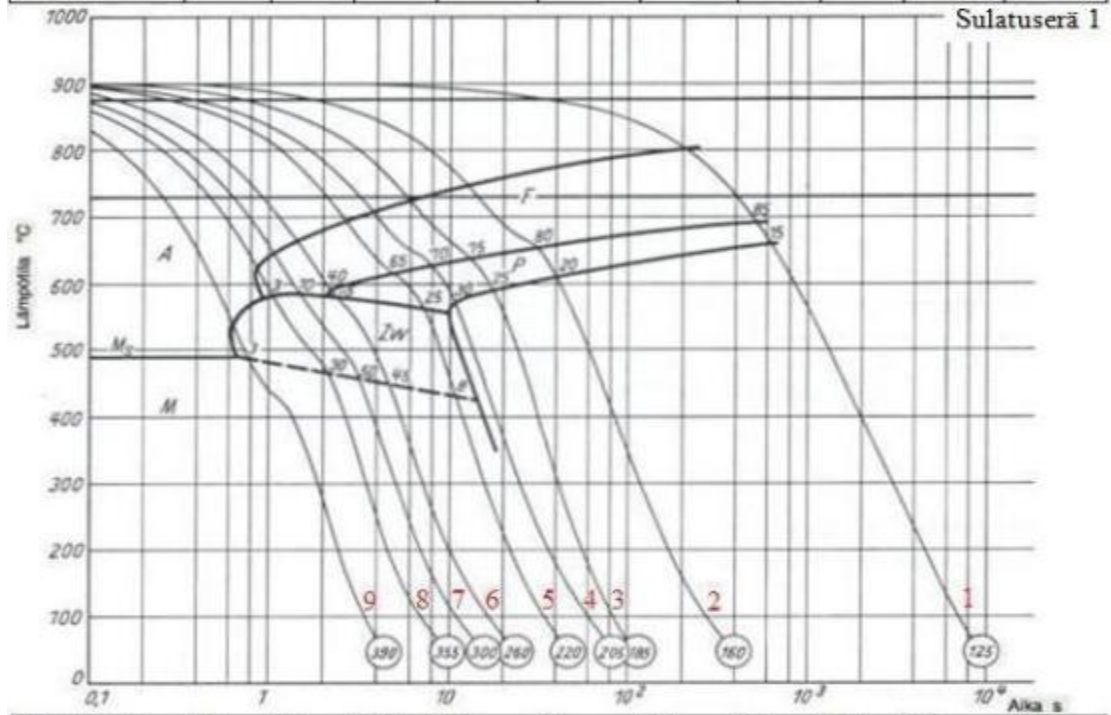
Kuva 49. Kaaviollinen esitys CE-luokista.

Jos käytetään jäähtymisnauhaa, voidaan CE-arvon ollessa matala suositella käyttämään pienimpiä mahdollisia lämmöntuonnin arvoja, jolloin iskutkeysominaisuudet eivät heikkene liikaa. CE-arvon ollessa keskitasoa voidaan konetta säätää haluttujen liitoksen ominaisuuksien perusteella. CE-arvon ollessa korkea suositellaan käytettäväksi suurimpia mahdollisia lämmöntuonnin arvoja, jotta liitoksen kovuus ei kasva liian suureksi.

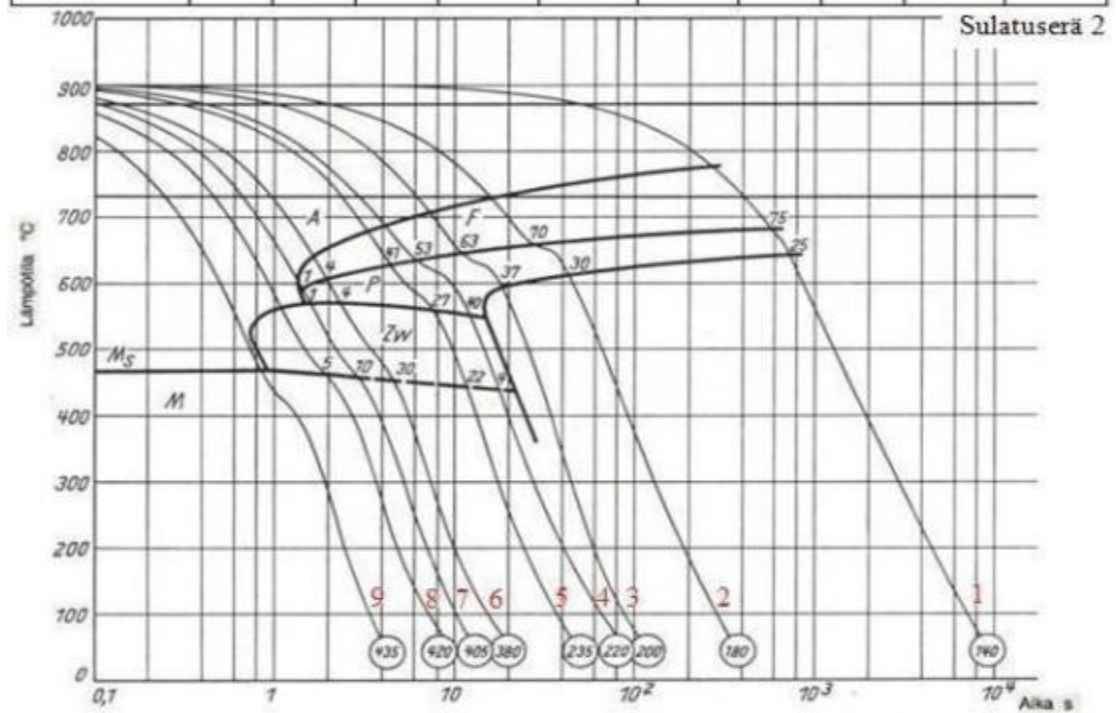
Käytettäessä kahta jäähtymisnauhaa tai jäähtymiskäyriä voidaan eri CE-luokille suositella käytettäväksi tiettyä jäähtymisnauhaa tai jäähtymiskäyrää. Käytettävällä jäähtymisnauhalla/-käyrällä saavutetaan optimaaliset liitoksen ominaisuudet, kun S-käyrä on tietyn CE-luokan mukainen. Jos CE-luokkia on kuvan 49 esimerkin mukaisesti kolme, voi eri jäähtymiskäyriä olla myös kolme, joita kutakin käytetään eri CE-luokalla.

Kuvasta 50 nähdään esimerkki CE-arvon vaikutuksesta teräslajin S-käyrän muutokseen. Sulatuserän 1 CE(IIW) on 0,251 ja sulatuserän 2 CE(IIW) on 0,294. CET-kaavalla lasketut CE-arvot ovat puolestaan: 1. sulatuserälle 0,203 sekä 2. sulatuserälle 0,236. Kuvasta nähdään myös seosaineiden vaikutus M_s -lämpötilaan, kun pienemmällä CE-arvolla se on 490 °C ja suuremmalla 465 °C. Kyseisten S-käyrien jäähtymisajat $t_{8/5}$ ovat melko samat, mutta pienemmällä CE-arvolla kovuudet eivät kasva yhtä suuriksi kuin suuremmalla CE-arvolla. Sulatuserän 1 S-käyrän ferriittialue on laajempi ja nopeassa jäähtymisessä martensiittia ei muodostu yhtä paljon kuin sulatuserän 2 S-käyrällä. Esimerkiksi kun jäähtymisaika $t_{8/5}$ on noin 3 s (jäähtymiskäyrä 6) sulatuserän 1 mikrorakenteeseen syntyy 40 % ferriittiä, 5 % perliittiä, 40 % bainiittiä ja 15 % martensiittiä kovuuden ollessa 260 HV10. Samalla jäähtymisajalla puolestaan sulatuserän 2 korkeammalla seosainepitoisuudella mikrorakenteeseen syntyy 4 % ferriittiä, 4 % perliittiä, 30 % bainiittiä ja martensiittiä 62 %, minkä johdosta kovuus on 380 HV10.

Kemiallinen koostumus %	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	CE
	0,14	0,23	0,48	0,014	0,032	0,014	0,07	0,19	0,07	0,251



Kemiallinen koostumus %	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	CE
	0,16	0,28	0,68	0,012	0,030	0,028	0,06	0,08	0,05	0,294



Kuva 50. Teräksen StE 26 kahden eri koostumuksen jatkuvan jäähtymisen S-käyrät. CE-arvot laskettu IIV:n kaavalla (Rose & Hougardy 1972, s. 260–261).

Kuvan 50 jatkuvan jäähtymisen S-käyrissä jäähtymisnauhana voitaisiin käyttää käyrien 3–4 välistä aluetta. Tällä välillä jäähtymisajat $t_{8/5}$ ovat noin 13–24 s ja niitä voidaan hieman kaventaa, jos lämmöntuonti poikkeaa kyseisillä jäähtymisajoilla yli ± 10 % keskiarvosta. Sulatuserällä 1 kyseisellä jäähtymisnauhalla syntyy ferriittis-perliittinen mikrorakenne. Sulatuserällä 2 mikrorakenteeksi tulee myös kyseisellä jäähtymisnauhalla suurimmaksi osaksi ferriittiä ja perliittiä, mutta täysin ferriittis-perliittinen vain, kun lämmöntuonnin arvot ovat sen keskiarvoa suuremmat. Tarkasteltaessa syntyvien mikrorakenteiden kovuuksia nähdään, että suuremmalla CE-arvolla käyrien 3–4 kovuudet nousevat 15 HV-yksikköä.

Sulatuserän 2 suurempi CE-arvo nostaa siis liitoksen kovuutta. Tällöin kyseisen teräslajin sulatuserän 2 mukaiselle CE-arvolle ja suuremmille CE-arvoille voidaan suositella käytettäväksi jäähtymisnauhan suurimpia mahdollisia lämmöntuonnin arvoja. Näin liitoksen kovuutta saadaan rajoitettua.

8.4 Ohjauksen toteutus

Virtalähteen ohjauksessa hitsausparametrien säätö tapahtuu lämmöntuonnin arvon perusteella. Lämmöntuonnin arvon perusteella tiedetään tarvittava hitsausteho. Tämän jälkeen koneen pitää vielä määrittää optimaalinen langansyöttönopeus, jännite ja hitsausnopeus. Kone säätää itseään niin, että lämmöntuonti pysyy koko hitsauksen ajan haluttujen rajojen sisällä MIG/MAG-hitsauksessa. Asetuksia, joita käyttäjän pitää tehdä ennen hitsausta, jotta lämmöntuontia voidaan käyttää hitsausparametrien säädössä, ovat:

- Materiaali
- Liitosmuoto
- Aineenpaksuus
- Työlämpötila (jos korotettu)
- (Lämmöntuonti, jos ei ole tallennettu koneen muistiin)
- Mekanisoidussa hitsauksessa tieto kuljetusnopeudesta

Muut esiasetukset, joiden perusteella koneen ohjauselektroniikka valitsee muistista oikean ohjauksessa käytettävän synergiakäyrän, ovat:

- Lankamateriaali
- Langanhalkaisija
- Suojakaasu

Jos lämmöntuonnin valitsemiseen käytetään S-käyrältä yhtä jäähtymisnauhaa, jossa on lämmöntuonnin raja-arvot valmiiksi määritetty, ei käyttäjän tarvitse asettaa lämmöntuonnin arvoja koneeseen. Tässä tapauksessa, kun käyttäjä valitsee materiaalin, liitosmuodon sekä aineenpaksuuden, kone hakee muistista jäähtymisnauhalle valmiiksi määritetyt lämmöntuonnin raja-arvot, jotka kone sijoittaa lämmöntuonnin kaavaan. Lämmöntuonnin arvojen perusteella kone osaa säätää kaavan muita muuttujia, jotka ovat virta, jännite sekä hitsausnopeus siten, että lämmöntuonnin arvo pysyy asetettujen raja-arvojen sisällä. Koneen muistiin tallennetaan siis lämmöntuonnin arvot valmiiksi teräslajikohtaisesti eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille. Jos ohjauksessa käytetään jäähtymiskäyrän lämmöntuonnin keskiarvoa suurempia tai pienempiä arvoja, käyttäjä voi erillisestä tehonsäätimestä lisätä tai vähentää lämmöntuontia prosentteina.

Jos käytetään jäähtymiskäyriä tai kahta jäähtymisnauhaa, joista voidaan valita lämmöntuonnin arvot, pitää käyttäjän valita mitä lämmöntuonnin arvoja käytetään. Jäähtymiskäyrien tai -nauhojen lämmöntuonnin arvot voidaan tallentaa koneeseen ja käyttäjän tehtäväksi jää valita käytettävä jäähtymisnauha/-käyrä. Tällöin kun käyttäjä asettaa materiaalin, liitosmuodon sekä aineenpaksuuden, kone hakee muistista valitulle jäähtymisnauhalle/-käyrälle lämmöntuonnin arvot. Käyttäjä voi myös asettaa koneeseen käytettävän jäähtymisnauhan/-käyrän lämmöntuonnin arvot. Nämä arvot voivat näkyä esimerkiksi hitsausohjeessa, johon on valittu lämmöntuonnin arvot jatkuvan jäähtymisen S-käyrän perusteella. Kun kone saa tiedot lämmöntuonnin arvoista, se sijoittaa ne lämmöntuonnin kaavaan, jolloin se voi säätää kaavan muita muuttujia siten, että lämmöntuonnin arvo pysyy asetettujen raja-arvojen sisällä.

Jos käytetään korotettua työlämpötilaa, kone laskee uuden lämmöntuonnin laskukaavojen avulla ja sijoittaa tämän arvon lämmöntuonnin kaavaan. Tällöin käyttäjä asettaa työlämpötilan arvon koneeseen aineenpaksuuden ja liitosmuodon lisäksi. Käyttäjän valitseman materiaalin perusteella kone hakee muistista jäähtymisnauhan jäähtymisaikojen $t_{8/5}$ raja-arvot, joita vastaavat uudet lämmöntuonnit kone määrittää. Asetetun liitosmuodon ja materiaalin perusteella kone myös hakee jäähtymisnauhan jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvon, jonka perusteella kone valitsee liitosmuotokertoimen, kun uudet jäähtymisaikoja vastaavat lämmöntuonnin raja-arvot lasketaan. Jos käytetään jäähtymisnauhoja/-käyriä, käyttäjän pitää asettaa myös jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvo koneeseen, tai valita mitä jäähtymisnauhaa/-käyrää käytetään, jotta kone tunnistaa jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvon. Samalla tavalla kone hakee muistista jäähtymisajan $t_{8/5}$ raja-arvot, joita vastaavat uudet lämmöntuonnit kone määrittää, kun käyttäjä valitsee käytettävän jäähtymisnauhan/-käyrän. Käyttäjä voi myös asettaa itse jäähtymisajan $t_{8/5}$ raja-arvot koneeseen, jos niitä ei ole tallennettu valmiiksi.

Koneessa pitää olla tallennettuna lämmöntuonnin laskukaavat (5) ja (6). Asetetun materiaalin perusteella kone laittaa kaavoihin jäähtymisajat $t_{8/5}$, jotka on tallennettu koneeseen materiaaliakohtaisesti. Käyttäjä valitsee onko kyseessä piena- vai päittäisliitos ja sen sekä jäähtymisajan $t_{8/5}$ keskiarvon perusteella kone valitsee oikeat liitosmuotokertoimet, jotka on tallennettu koneeseen, ja sijoittaa ne kaavoihin. Kone sijoittaa myös käyttäjän asettaman työlämpötilan ja aineenpaksuuden kaavoihin ja laskee molemmilla kaavoilla uudet lämmöntuonnin arvot. Kone käyttää ohjauksessa sen kaavan lämmöntuonnin arvoja, mistä on saatu pienemmät arvot.

Mekanisoidussa hitsauksessa tiedetään kuljetusnopeus ennalta. Tällöin kun käyttäjä asettaa koneeseen kuljetusnopeuden tiedon, kone voi laskea teoreettisen a-mitan. A-mitta näytetään koneen käyttäjälle, mikä helpottaa hitsaustyön arvioinnissa.

Kun esiasetukset on tehty koneeseen, prosessori saa langansyöttölaitteelta tiedot siihen tehdyistä asetuksista. Tietojen perusteella kone valitsee oikean synergiakäyrän muistista ja asettaa lämmöntuonnin raja-arvot tai keskiarvon lämmöntuonnin laskukaavaan.

Kun hitsaus aloitetaan, kone tunnistaa käytetyn hitsausnopeuden, jonka signaali tulee ulkoisesta lähteestä koneelle, ja asettaa sen laskukaavaan. Langansyöttönopeus pysyy vakiona ja jännite säättyy synergiakäyrän perusteella siten, että kone laskee esitallennetulta synergiakäyrältä lähimmän pisteen halutulle lämmöntuonnille ja käyttää hitsauksessa tämän pisteen käyräparametreja. Hitsauksen aikana prosessori mittaa virran ja jännitteen arvoja ja antaa teho-osalle ohjeen säätää jännitettä siten, että lämmöntuonti pysyy asetettujen raja-arvojen sisäpuolella. Jos hitsausnopeus vaihtelee hitsauksen aikana, prosessorille tulee koko ajan signaali hitsausnopeuden muutoksesta ja se hakee synergiakäyrältä oikeaa pistettä niin, että lämmöntuonti pysyy asetettujen raja-arvojen sisäpuolella.

8.5 Koehitsaukset

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä määritettyjen lämmöntuontien arvojen perusteella suoritettiin kahdet eri koehitsaukset. Ensimmäisissä koehitsauksissa testattiin, kuinka hyvin lämmöntuonnin arvot toimivat käytännön hitsauksessa. Toisissa koehitsauksissa tutkittiin, millaisia mikrorakenteita syntyy kyseisillä lämmöntuonnin arvoilla ja vastaavatko mikrorakenteet sekä kovuudet S-käyrältä ennustettuja mikrorakenteita sekä kovuuksia. Molemmat koehitsaukset suoritettiin pienaliitokselle.

8.5.1 Koehitsaukset 1

Ensimmäisissä koehitsauksissa testattiin, kuinka S-käyrältä määritetyt lämmöntuonnin arvot toimivat käytännön hitsauksessa. Materiaalina käytettiin 235-lujuusluokan terästä. Tässä tapauksessa lämmöntuonnin arvot määritettiin laskukaavojen (5) ja (6) avulla. Lämmöntuonnin perusteella tiedetään tarvittava hitsausteho. Muut hitsausparametrit on saatu laskemalla esitallennetulta hitsauskäyrältä lähin piste halutulle lämmöntuonnille ja tämän pisteen käyräparametreja on käytetty hitsauksessa.

Hitsauskokeissa käytettiin 5 mm, 10 mm ja 12 mm aineenpaksuuksia. Lämmöntuonnin arvot on määritetty jäähtymisnauhalle $t_{8/5\min}=18$ s ja $t_{8/5\max}=26$ s, jotka esitettiin taulukossa 6. Hitsausarvot pyrittiin asettamaan siten, että lämmöntuonnin arvo olisi mahdollisimman

lähellä sen keskiarvoa. Kokeet suoritettiin robotilla ja virtalähteenä käytettiin Kemparc 500 virtalähdettä. Lisäaineena oli 1,0 mm FE lanka ja suojakaasuna Air Liquide ARCAL21 (Ar + 8 % CO₂). Jokaisessa kokeessa kuljetusnopeutena käytettiin 200 mm/min.

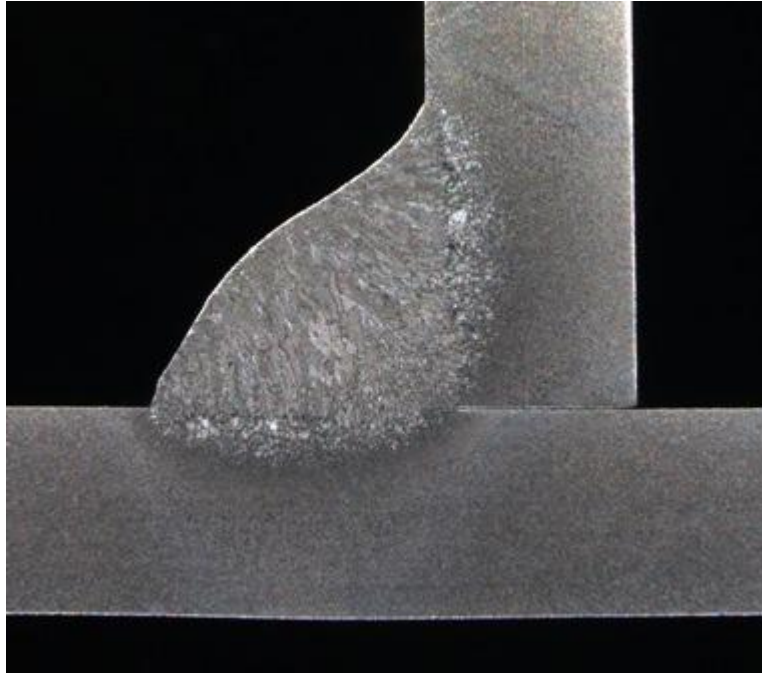
Hitsausarvot mitattiin langansyöttölaitteelta. Näin välikaapeliin jännitehäviötä ei huomioitu kaaritehoa laskettaessa. Hitsausteho laskettiin oskilloskoopilla, jolloin sen laskenta perustui hetkellisarvojen kertolaskuun. Koehitsausten hitsausparametrit ja tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Koehitsausten I hitsausparametrit ja tulokset.

Aineenpaksuus [mm]	Tavoite Q [kJ/mm]	Kuljetusnopeus [mm/min]	P [kW]	Langansyötön nopeus [m/min]	U [V]	I [A]	P vaihteluväli [kW]	Q vaihteluväli [kJ/mm]
5	0,98	200	4,08	7,1	21,4	190	3,9–4,1	0,94–0,98
10	1,96	200	8,16	12,6	30,4	267	7,9–8,2	1,90–1,97
12	2,35	200	9,78	14,8	33,0	295	9,7–9,9	2,33–2,38

5 mm aineenpaksuus

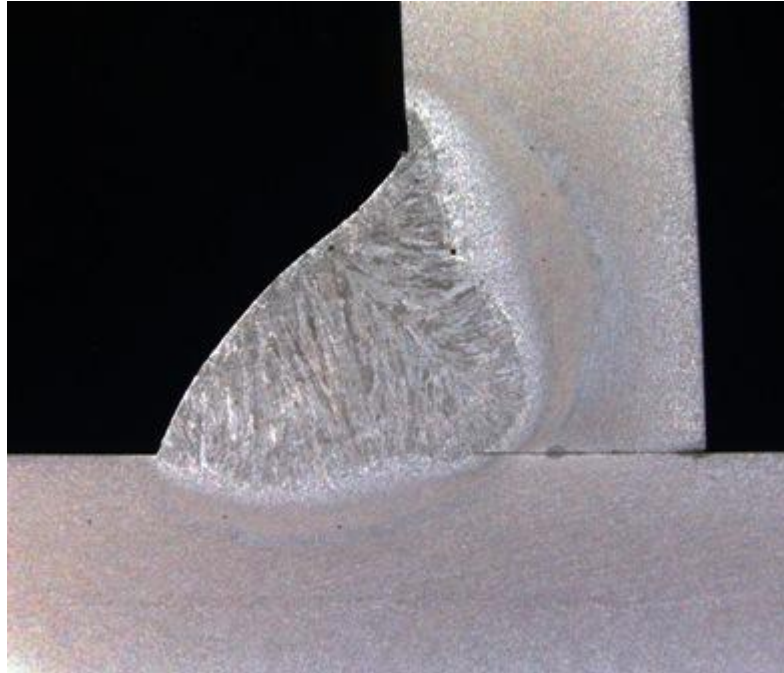
5 mm aineenpaksuudella tavoitearvo lämmöntonille oli 0,98 kJ/mm. Kun kuljetusnopeuden arvo oli 200 mm/min, tarvittava hitsausteho lämmöntonin saavuttamiseen oli 4,08 kW. Hitsauskokeessa teho vaihteli välillä 3,9–4,1 kW, jolloin lämmöntonin arvo vaihteli välillä 0,94–0,98 kJ/mm. Hitsausarvot olivat lyhytkaarihitsauksen arvoalueella. Hiekuva on esitetty kuvassa 51. Hitsauksessa poltinkulma on ollut hieman liian jyrkkä, joten liittymä alalevyn puolella on jyrkkä, mutta hyväksyttävissä.



Kuva 51. Hiekuva 5 mm aineenpaksuudelle.

10 mm aineenpaksuus

10 mm aineenpaksuudelle tavoitearvo lämmöntonille oli 1,96 kJ/mm. Kun kuljetusnopeus oli 200 mm/min, tarvittava hitsausteho lämmöntonin saavuttamiseen oli 8,16 kW. Hitsauskokeessa teho vaihteli välillä 7,9–8,2 kW, jolloin lämmöntonin arvo vaihteli välillä 1,90–1,97 kJ/mm. Tässä tapauksessa hitsausarvot olivat jo kuumakaarihitsauksen arvoalueella. Hiekuva on esitetty kuvassa 52. Kaari on taipunut ylälevyn puolelle ja ylälevyssä on hieman syvempi tunkeuma. Poltinkulma on ollut hieman liian loiva, mutta nurkka on kuitenkin sulanut, joten hyväksyttävissä.



Kuva 52. Hiekuva 10 mm aineenpaksuudelle.

12 mm aineenpaksuus

12 mm aineenpaksuudelle tavoitearvo lämmöntonille oli 2,35 kJ/mm. Kun kuljetusnopeuden arvo oli 200 mm/min, tarvittava hitsausteho lämmöntonin saavuttamiseen oli 9,78 kW. Hitsauskokeessa teho vaihteli välillä 9,7–9,9 kW, jolloin lämmöntonin arvo vaihteli välillä 2,33–2,38 kJ/mm. Hitsausarvot olivat kuumakaarihitsauksen arvoalueella. Hiekuva on esitetty kuvassa 53. Tässä lämmöntonin arvo on ollut liian suuri ja sula on valahtanut alalevyn puolelle aiheuttaen jyrkän liittymän ja ylälevylle alkavaa reunahaavaa. Tunkeuma on muuten hyvä.



Kuva 53. Hiekuva 12 mm aineenpaksuudelle.

Tulosten analysointi

Koehitsausten tulosten perusteella S-käyrältä määritetyt lämmöntuonnin arvot, joita käytettiin virtalähteen ohjauksessa, toimivat hyvin käytännön hitsauksessa. Käytetyillä hitsausarvoilla lämmöntuonnin vaihteluväli pysyi kapeana. 10 mm ja sitä pienemmille aineenpaksuuksille lämmöntuonnin arvot toimivat hyvin.

Aineenpaksuuden kasvaessa lämmöntuonnin arvot kasvavat suuriksi pienaliitoksessa, sillä 12 mm aineenpaksuudelle lämmöntuonti oli jo liian suuri. Aineenpaksuuden kasvaessa lämmöntuonti kasvaa entisestään ja ylittää maksimilämmöntuontisuositukset. Tällöin lämmöntuontia on rajoitettava. Tässä tapauksessa yli 10 mm aineenpaksuuksille voidaan käyttää pienahitsauksessa jäähtymisnauhaa, jonka jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvot ovat pienempiä, siihen aineenpaksuuteen asti, jossa aletaan käyttää monipalkohitsausta. Näin ollen myös tarvittava lämmöntuonti pienenee. Jäähtymisnauha pitää kuitenkin valita koostumusvaihteluiden vaikutusten perusteella sekä liitoksen ominaisuuksien perusteella. Jos pienempiä jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvoja ei voida käyttää, pitää suositella käytettäväksi

korotettua työlämpötilaa. Tällöin lämmöntuonti ei pääse kasvamaan liian suureksi ja pienemmällä lämmöntuonnilla päästään jäähtymisnauhan mukaisiin jäähtymisaikoihin.

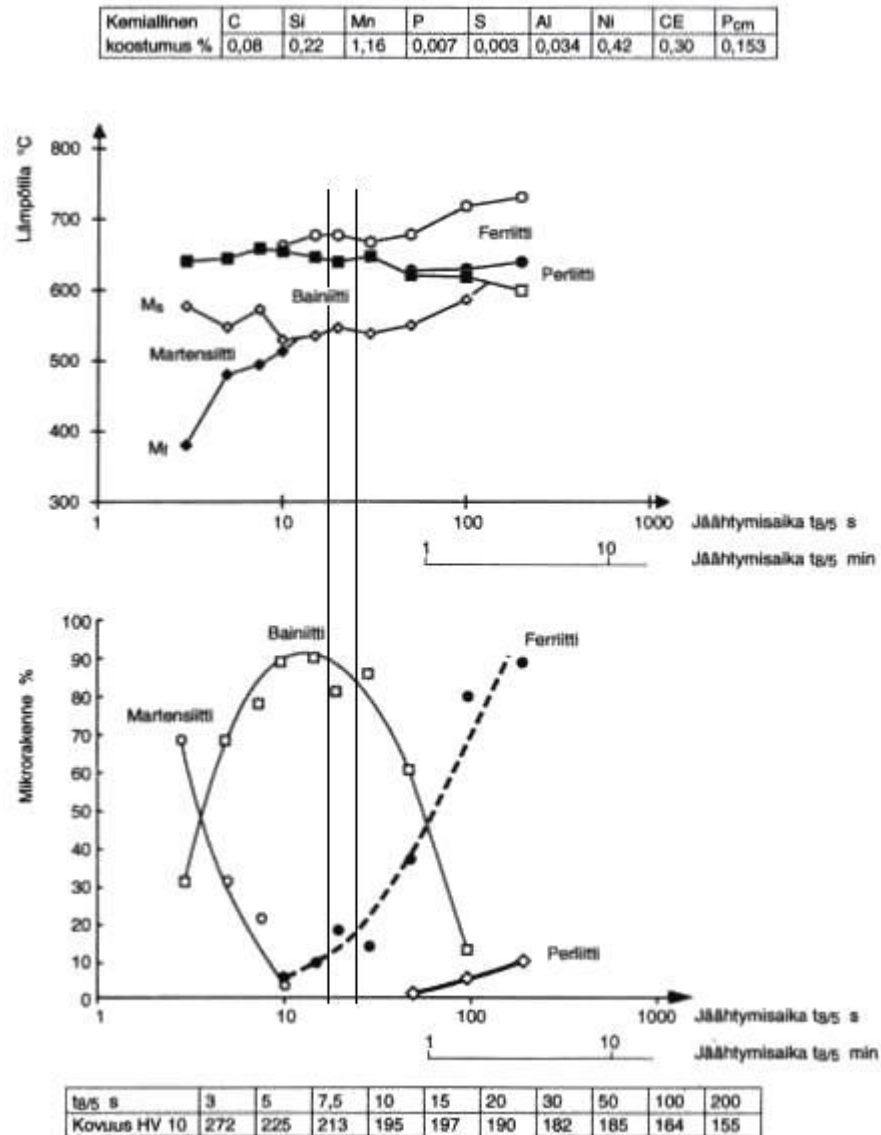
8.5.2 Koehitsaukset 2

Toisissa koehitsauksissa tutkittiin S-käyrältä määritettyjen lämmöntuonnin arvojen perusteella hitsatun liitoksen metallurgisia ominaisuuksia. Materiaalina käytettiin Ruukki Laser 355 MC teräslajia, jonka kemialliset koostumukset on ilmoitettu taulukossa 9. Lämmöntuonnin arvot koehitsauksiin määritettiin laskukaavojen (5) ja (6) avulla. Hitsausparametrit määritettiin samalla tavalla kuin 1. koehitsauksissa.

Taulukko 9. Koehitsauksissa 2 käytetyn teräksen kemialliset koostumukset.

Aineenpaksuus [mm]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Nb [%]	V [%]	Cu [%]	Cr [%]
5	0,058	0,016	0,686	0,010	0,006	0,033	0,029	0,007	0,024	0,045
10	0,060	0,012	0,746	0,008	0,0043	0,035	0,026	0,005	0,022	0,040
12	0,056	0,014	0,742	0,009	0,0038	0,038	0,026	0,006	0,018	0,038

Hitsauskokeissa käytettiin 5 mm, 10 mm ja 12 mm aineenpaksuuksia myös toisissa koehitsauksissa. Kuvassa 54 on esitetty termomekaanisesti valssatun S355ML teräksen jatkuvan jäähtymisen S-käyrä ja sen alapuolella eri jäähtymisajoilla $t_{8/5}$ syntyvä mikrorakenne sekä kovuus. Kyseinen S-käyrä poikkeaa aikaisemmin esitetyistä S-käyristä siten, että siinä on vaaka-akselilla esitetty jäähtymisaika $t_{8/5}$. Kyseistä S-käyrää voidaan käyttää, kun arvioidaan koehitsauksissa syntyviä mikrorakenteita, koska sen kemiallinen koostumus, joka on esitetty kuvassa 54, on melko lähellä koehitsauksissa käytetyn teräksen kemiallista koostumusta. Lämmöntuonnit on määritetty jäähtymisnauhalle $t_{8/5min}=18$ s ja $t_{8/5max}=26$ s, joka näkyy myös kuvassa 54.



Kuva 54. Termomekaanisesti valssatun teräksen S355ML jatkuvan jäähtymisen S-käyrä ja syntyvä mikrorakenne. Hehkutuslämpötila 1350 °C, määritetty termomekaanisella Gleeble 1500 -simulaattorilla, jäähtymisnauha $t_{8/5\min}=18$ s ja $t_{8/5\max}=26$ s lisätty kuvaan (Muokattu: Vähäkainu 2003, s. 21).

Kuvasta 54 nähdään, että syntyvä mikrorakenne on pääosin bainiittia. Liitoksen sularaja-alueelle pitäisi syntyä myös vähän ferriittia. Martensiittia ei pitäisi muodostua lainkaan, kun käytetään kyseistä jäähtymisnauhaa. S-käyrän teräksen kovuudet, jotka on mitattu jäähtymisajoille $t_{8/5}$ 30 s ja 15 s, ovat 182 HV10 ja 197 HV10. Koehitsausten kovuuksien

pitäisi olla edellä esitettyjä kovuuksia matalampia sularaja-alueella, koska koehitsauksissa käytetty materiaali on vähemmän seostettua kuin kuvan 54 S-käyrän materiaali, taulukko 10.

Taulukko 10. Koehitsauksissa 2 käytetyn materiaalin ja S-käyrän materiaalin CE(IIW)- ja P_{cm} -arvojen vertailu.

Materiaali	CE(IIW)	P_{cm}
S355ML (S-käyrän koostumus)	0,30	0,153
Laser 355 MC, 5 mm	0,184	0,097
Laser 355 MC, 10 mm	0,195	0,101
Laser 355 MC, 12 mm	0,189	0,096

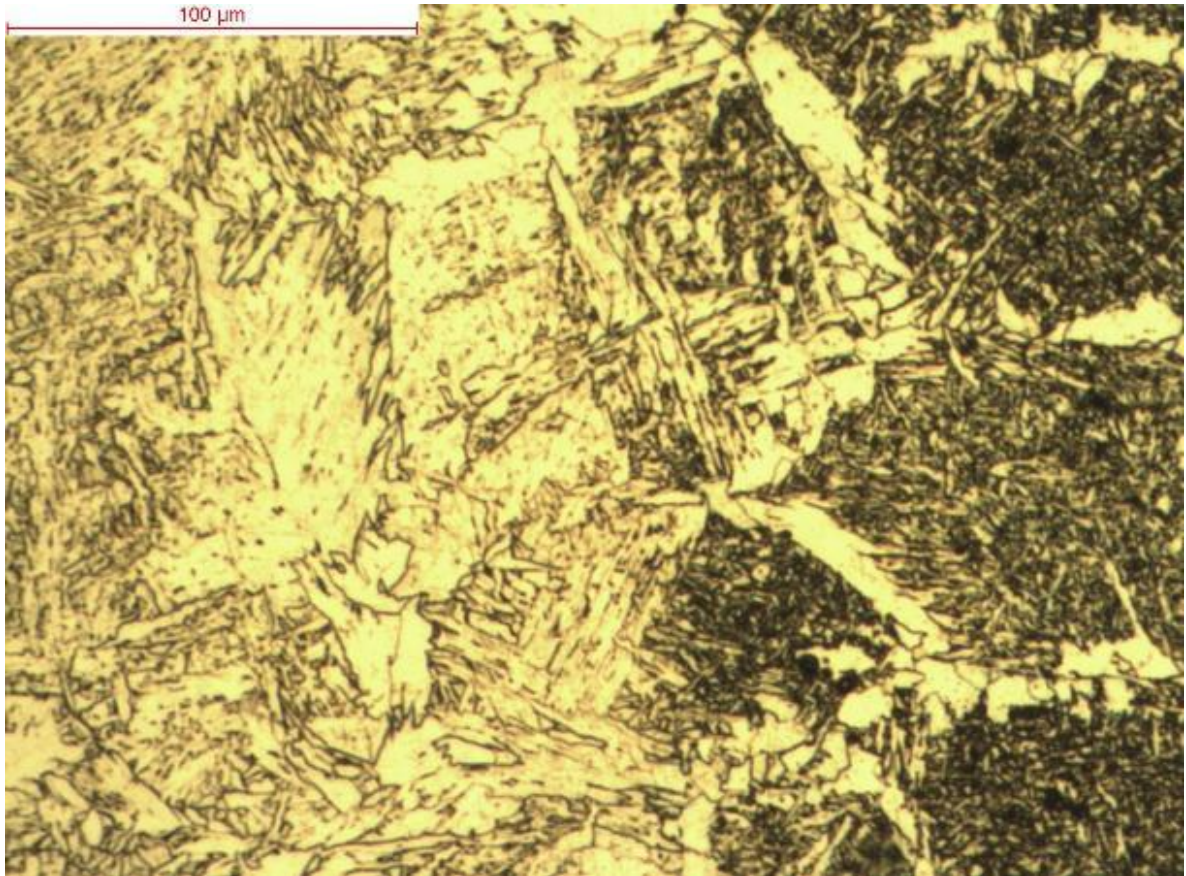
Koehitsaukset 2 suoritettiin robotilla ja virtalähteenä käytettiin Kemparc Pulse 450 virtalähdettä. Lisäaineena oli 1,0 mm FE lanka ja suojakaasuna Air Liquide ARCAL21 (Ar + 8 % CO₂). Jokaisessa kokeessa kuljetusnopeutena käytettiin 200 mm/min. Hitsausarvojen mittausta suoritettiin samalla tavalla kuin 1. koehitsauksissa, kuten myös hitsaustehon laskenta. Hitsausparametrit ja tulokset koehitsauksista 2 on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Koehitsausten 2 hitsausparametrit ja tulokset.

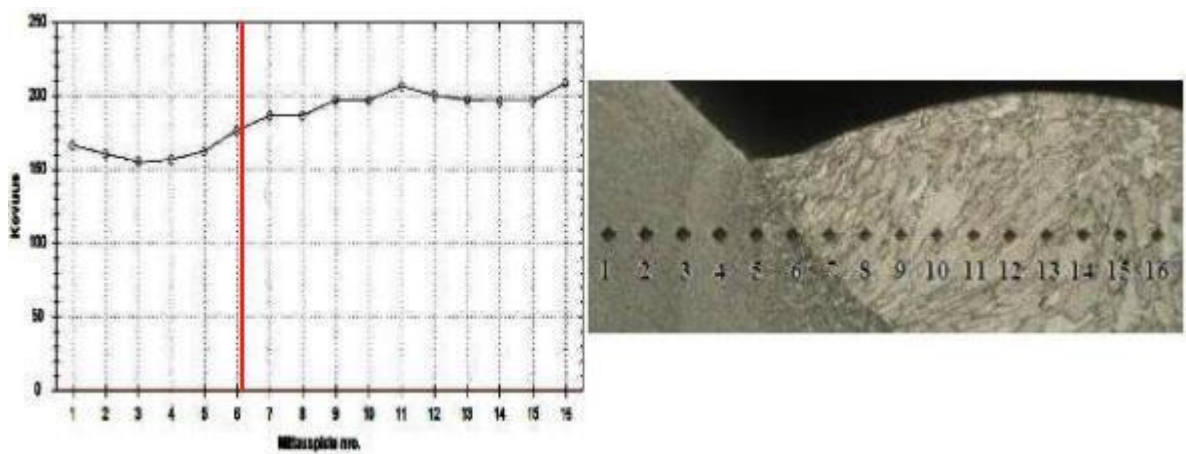
Aineen- paksuus [mm]	Asetusarvot					Toteutuneet arvot			
	Tavoite Q [kJ/mm]	Kuljetus- nopeus [mm/min]	P [kW]	Langansyöt- tönnopeus [m/min]	U [V]	I [A]	U [V]	P vaihtelu- väli [kW]	Q vaihtelu- väli [kJ/mm]
5	0,98	200	4,08	8,1	22,0	203	21,0	4,0–4,2	0,96–1,01
10	1,96	200	8,16	12,7	31,6	269	30,3	8,1–8,3	1,94–1,99
12	2,35	200	9,78	17,0	30,4	335	28,9	9,5–10,0	2,28–2,40

Koekappaleista otettiin mikrokuvat sekä mitattiin Vickers-kovuudet viiden kilogramman massalla. Kuvissa 55, 57 ja 59 on esitetty eri aineenpaksuuksien mikrorakenne sularajalta ja kuvissa 56, 58 ja 60 on esitetty liitoksien kovuudet sekä makrokuvat, joista nähdään kovuusmittauspisteiden sijainnit. Hitsiaine sijaitsee oikealla puolella kaikissa kuvissa.

5 mm aineenpaksuus

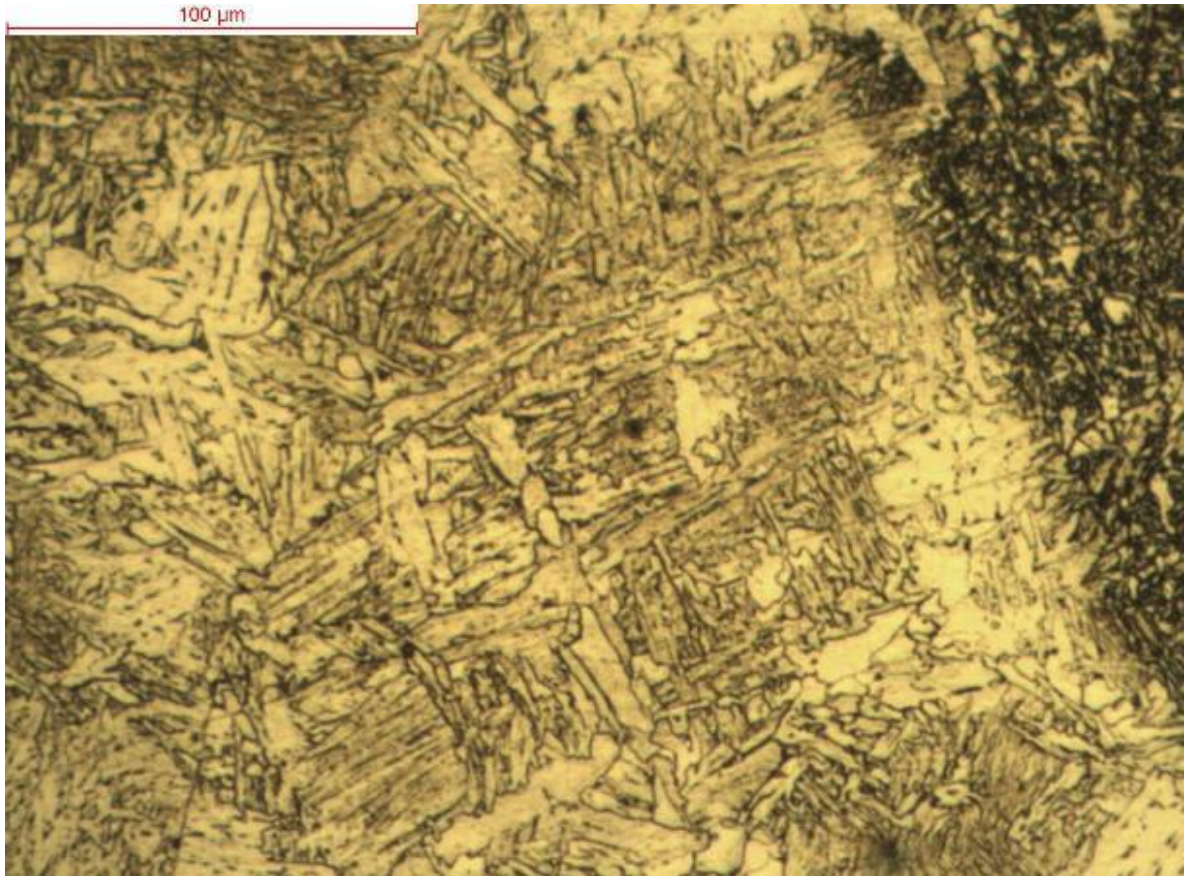


Kuva 55. Mikrokuva sularajalta 5 mm aineenpaksuudelle. Hitsiaine oikealla.

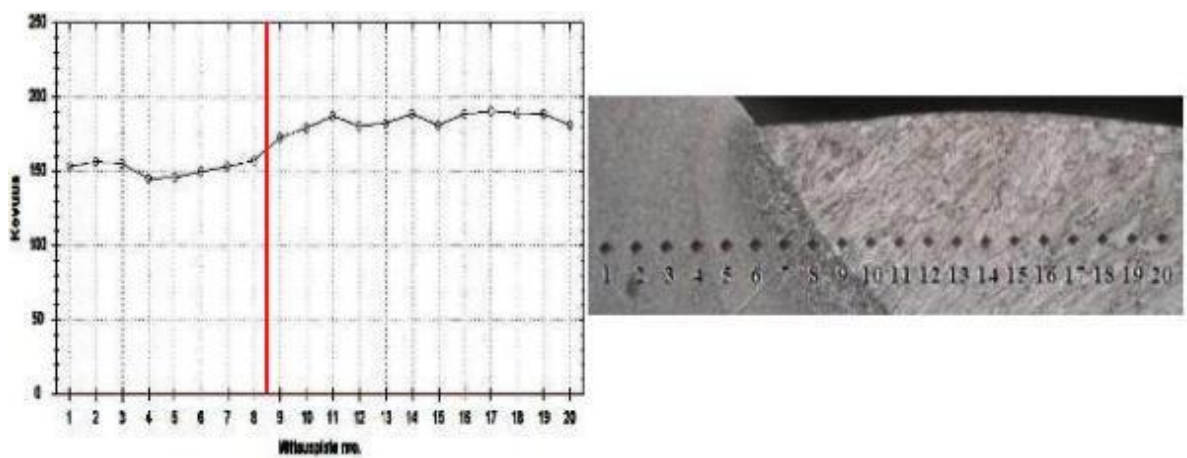


Kuva 56. Liitoksen kovuusjakauma 5 mm aineenpaksuudelle ja kovuusmittauspisteiden sijainnit. Kovuusjakaumaan on merkitty sularaja, jonka oikealla puolella on hitsiaine.

10 mm aineenpaksuus

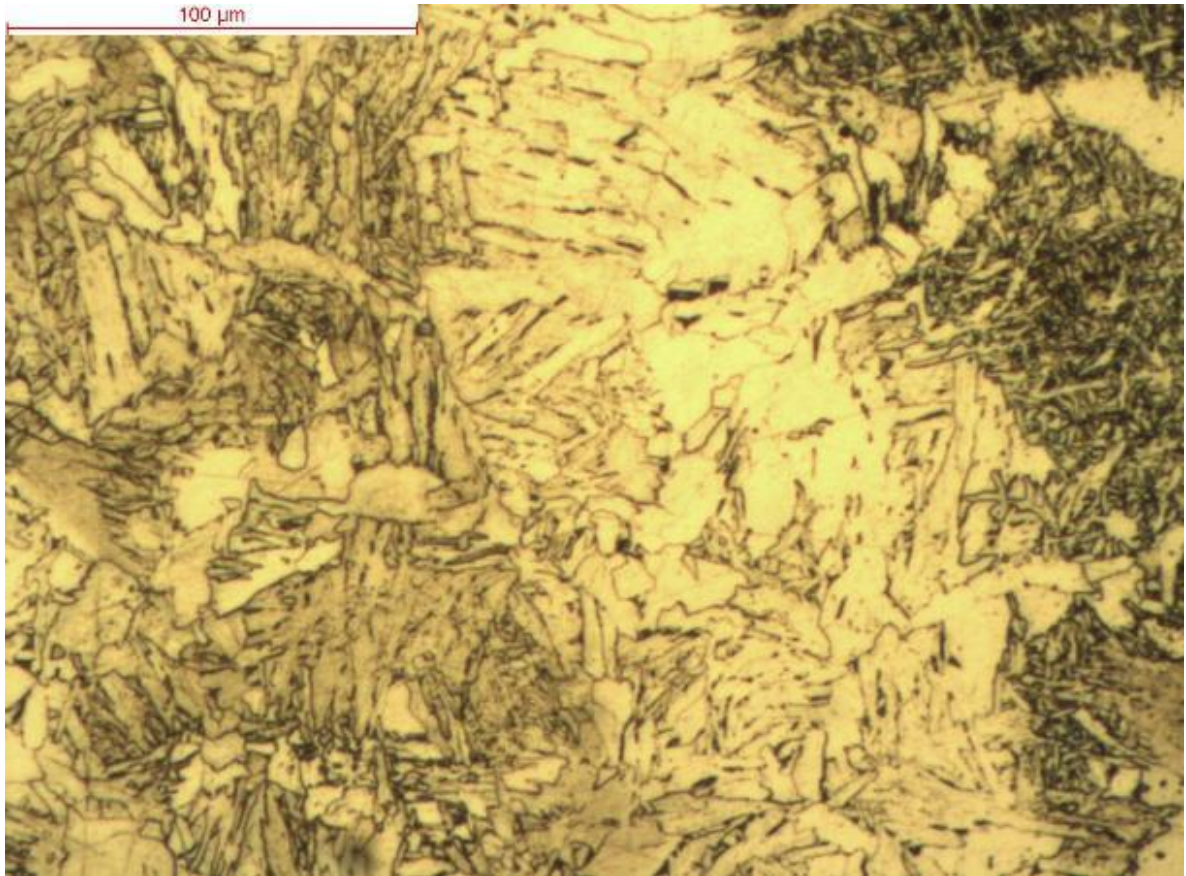


Kuva 57. Mikrokuva sularajalta 10 mm aineenpaksuudelle. Hitsiaine oikealla.

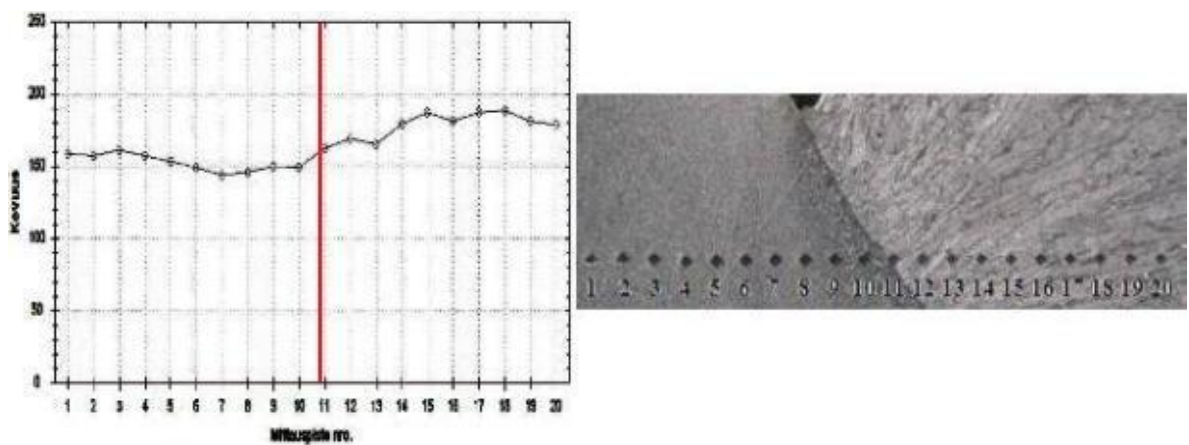


Kuva 58. Liitoksen kovuusjakauma 10 mm aineenpaksuudelle ja kovuusmittauspisteiden sijainnit. Kovuusjakaumaan on merkitty sularaja, jonka oikealla puolella on hitsiaine.

12 mm aineenpaksuus



Kuva 59. Mikrokuva sularajalta 12 mm aineenpaksuudelle. Hitsiaine oikealla.



Kuva 60. Liitoksen kovuusjakauma 12 mm aineenpaksuudelle ja kovuusmittauspisteiden sijainnit. Kovuusjakaumaan on merkitty sularaja, jonka oikealla puolella on hitsiaine.

Tulosten analysointi

Kuten mikrokuvista nähdään, mikrorakenteet ovat samankaltaisia sularaja-alueella kaikilla aineenpaksuuksilla. Ilman tarkempia tutkimuksia eri faasien prosenttiosuuksia ei pystytä määrittämään. Kuvien perustella mikrorakenteet ovat pääsääntöisesti bainiittia ja ferriittia, eikä martensiittia ole havaittavissa mikrokuvissa. Tämän tarkastelun osalta koehitsausten mikrorakenteet vastaavat mikrorakenteita, joita voidaan ennustaa syntyviksi jatkuvan jäähtymisen S-käyrän perusteella.

Liitoksen kovuuskuvaajista nähdään, että 5 mm aineenpaksuudella kovuudet ovat hieman suurempia verrattuna 10 ja 12 mm aineenpaksuuksiin. Hienorakeisella vyöhykkeellä 5 mm aineenpaksuuden kovuus on 155 HV5, sularaja-alueella (kuvan 56 mittauspiste 6) kovuus on noussut arvoon 176 HV5 ja hitsiaineen kovuus on noin 200 HV5. Aineenpaksuuksilla 10 mm ja 12 mm vastaavasti hienorakeisella vyöhykkeellä kovuus on noin 145 HV5 ja hitsiaineenkovuus on noin 185 HV5. Aineenpaksuudella 10 mm sularaja-alueella (kuvan 58 mittauspisteiden 8 ja 9 välillä) kovuus on noin 165 HV5 ja 12 mm aineenpaksuudella sularaja-alueella (kuvan 60 mittauspiste 11) kovuus on 162 HV5. Aineenpaksuudella 5 mm liitoksen kovuudet ovat siis hieman suurempia, joten sen jäähtymisnopeus on ollut suurempi kuin 10 mm ja 12 mm aineenpaksuuksilla, sillä kaikkien aineenpaksuuksien koostumukset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämä voi johtua siitä, että lämmöntonin arvot on laskettu laskukaavojen avulla, jotka eivät ole aivan tarkkoja. Myöskään liitosmuotokertoimen arvot eivät ole täysin tarkkoja. Näin lämmöntonin arvoihin voi syntyä eroja eri aineenpaksuuksilla.

Koehitsauksissa saavutetut liitoksien sularaja-alueiden kovuudet ovat matalampia kuin S-käyrän vastaavat kovuudet, mikä oli odotettavissa koemateriaalin pienemmän seostuksen ja erityisesti hiilipitoisuuden takia. Koehitsausten tulosten perusteella virtalähteen ohjauksessa käytettävän S-käyrän koostumuksen pitää olla vielä lähempänä hitsattavan materiaalin koostumusta, jotta saavutetaan samat liitoksen ominaisuudet kuin S-käyrältä voidaan ennustaa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kun virtalähdettä ohjataan lämmöntuonnin ja S-käyrän perusteella, pitää ottaa huomioon niin virtalähteen ohjaus- ja säätötekniisiä asioita kuin myös teräksen metallurgisia ominaisuuksia sekä lämmöntuontiin vaikuttavia tekijöitä. Ohjauksessa täytyy siis ottaa huomioon monia tekijöitä, jotta hitsausparametrien säätö on mahdollista lämmöntuonnin perusteella, taulukko 12.

Taulukko 12. Ohjauksessa huomioon otettavia tekijöitä.

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrät:	Lämmöntuonti Q:	Virtalähteen ohjaus:
<ul style="list-style-type: none"> • Voidaan laatia termomekaanisella simulaattorilla Gleeblellä tai etsitään jo olemassa olevia S-käyriä 	<ul style="list-style-type: none"> • Jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavat lämmöntuonnit voidaan määrittää hitsauskokeilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Jäähtymisaikojen ja lämmöntuonnin arvojen tallentaminen virtalähteeseen teräslajikohtaisesti
<ul style="list-style-type: none"> • Pitää vastata hitsausolosuhteita 	<ul style="list-style-type: none"> • Lämmöntuontiin vaikuttaa: aineenpaksuus, liitosmuoto ja työlämpötila 	<ul style="list-style-type: none"> • Muiden tarvittavien parametrien sekä laskukaavojen tallentaminen
<ul style="list-style-type: none"> ○ Austenitointilämpötila 1300–1350 °C 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Aineenpaksuus ja liitosmuoto saadaan huomioitua hitsauskokeissa 	<ul style="list-style-type: none"> • Hitsausparametrien adaptiivinen säätö lämmöntuonnin perusteella
<ul style="list-style-type: none"> • Koostumusvaihtelut pitää ottaa huomioon 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Työlämpötila voidaan ottaa huomioon laskukaavojen avulla 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hitsausparametrien määrittäminen synergiäkäyrältä
<ul style="list-style-type: none"> ○ Tutkitaan teräslajikohtaisesti (toimitustila otetaan huomioon) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavat lämmöntuonnit määritetään myös laskukaavojen avulla 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hitsausparametrien säätö hitsausnopeuden muuttuessa niin, että lämmöntuonti pysyy asetettujen arvojen sisällä
<ul style="list-style-type: none"> ○ CE-luokkien valinta (jos käytetään) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Selvitetään kuinka tarkasti mitatut ja lasketut arvot vastaavat toisiaan 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hitsausnopeuden mittaaminen ja tunnistus
<ul style="list-style-type: none"> • Oikean jäähtymisnauhan valinta (ominaisuudet) 		<ul style="list-style-type: none"> • Käyttöliittymän kehittäminen
<ul style="list-style-type: none"> ○ Nauhan leveys $\pm 10\%$ lämmöntuonnin keskiarvosta 		

Jatkuvan jäähtymisen S-käyrien pitää vastata hitsauksen olosuhteita, jolloin austenitointilämpötilan tulee olla 1300–1350 °C. S-käyrältä pitää näkyä syntyvien

faasirakenteiden määrä prosentteina sekä liitoksen kovuus huoneenlämpötilassa. Käytettävyyden kannalta S-käyrältä pitää näkyä myös lämmöntuonnin arvot, joita käytetään virtalähteen ohjauksessa. Lähtökohtana voidaan pitää, että käytetään yhtä jäähtymisnauhaa, jossa näkyy lämmöntuonnin raja-arvot tai sen keskiarvo. Teräslajikohtaisesti pitää kuitenkin tutkia, onko kahden jäähtymisnauhan tai jäähtymiskäyrien käytöstä hyötyä, kun koostumusvaihteluiden vaikutus on saatu selville. Lämmöntuonnin toleranssialue voi olla noin $\pm 10\%$. Yhtä jäähtymisnauhaa käytettäessä voidaan toteuttaa parhaiten lämmöntuonnin tehonsäätö, jolla voidaan säätää lämmöntuonti keskiarvoa suuremmaksi tai pienemmäksi. Tällöin pystytään vaikuttamaan liitoksen ominaisuuksiin.

Koostumusvaihteluiden vaikutuksia S-käyrään tutkitaan teräslajikohtaisesti, minkä perusteella valitaan oikea jäähtymisnauha. Teräslajikohtaisten koostumusvaikutus-tutkimusten perusteella voidaan miettiä myös tarvitaanko joillekin teräslajeille yhtä jäähtymisnauhaa enemmän mahdollisuuksia vaikuttaa syntyvään mikrorakenteeseen. Tällöin voidaan käyttää kahta jäähtymisnauhaa tai useampia jäähtymiskäyriä. Jos CE-arvon vaikutus näkyy hyvin S-käyrien sijainnissa, voidaan laatia teräslajikohtaisesti CE-luokat. Eri CE-luokille voidaan antaa ohjeelliset lämmöntuonnin arvot tai suositukset käyttää jäähtymisnauhan keskiarvoa pienempää tai suurempaa lämmöntuontia.

S-käyrien laatiminen ja koostumusvaihtelututkimukset voidaan suorittaa termomekaanisella simulaattorilla Gleeblellä. Tällöin Gleeblessä pitää olla myös dilatometri, jolla saadaan mitattua faasimuutoksien aiheuttamat tilavuuden muutokset koekappaleessa. Jos käytetään jo olemassa olevia S-käyriä, koostumusvaihteluiden vaikutuksia voidaan tutkia vertailemalla eri koostumuksen omaavia S-käyriä keskenään.

Jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ vastaavat lämmöntuonnit voidaan määrittää hitsauskokeiden avulla. Tällöin saadaan otettua huomioon myös liitosmuoto ja aineenpaksuus. Jäähtymisaika $t_{8/5}$ voidaan mitata eri lämmöntuonnin arvoilla tietyin aineenpaksuusvälein tietyllä liitosmuodolla. Mittaustuloksista voidaan piirtää kuvaaja, jossa näkyy lämmöntuonnin ja jäähtymisajan $t_{8/5}$ yhteys. Siitä voidaan halutuilla jäähtymisajan arvoilla puolestaan piirtää kuvaaja, josta nähdään tarvittavat lämmöntuonnin arvot eri aineenpaksuuksille kyseisille

jäähtymisajan arvoille. Näin määritetyt lämmöntuonnit voidaan tallentaa koneeseen eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille. Koska teräksen koostumus ei vaikuta jäähtymisaikaan $t_{8/5}$, riittää, että suoritetaan yhdet hitsauskokeet, joiden perusteella kaikille seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille saadaan määritettyä jäähtymisaikoja $t_{8/5}$ vastaavat lämmöntuonnin arvot.

Jos käytetään korotettua työlämpötilaa, on parasta määrittää sitä vastaava lämmöntuonti laskukaavojen avulla. Tällöin koneeseen pitää tallentaa laskukaavat, materiaalia vastaavat jäähtymisajat $t_{8/5}$ sekä liitosmuotokertoimet. Jäähtymisaika mittauksissa pitää tutkia, kuinka tarkasti laskukaavoilla saadut lämmöntuonnin arvot vastaavat todellisia arvoja.

Koehitsauksissa osoittautui, että lämmöntuonnin arvot kasvavat liian suuriksi aineenpaksuuden kasvaessa, kun kyseessä on pienaliitos. Tässä tapauksessa pitää teräslajikohtaisesti tutkia voidaanko jäähtymisnauhan jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvoja pienentää. Eri aineenpaksuuksille voidaan käyttää eri jäähtymisnauhoja, esimerkiksi yli 10 mm aineenpaksuuksille voidaan käyttää pienempiä jäähtymisajan $t_{8/5}$ arvoja kuin tätä pienemmille aineenpaksuuksille. Lämmöntuonnin kasvaessa liian korkeaksi suositellaan käyttämään korotettua työlämpötilaa, jolloin pienemmällä lämmöntuonnilla päästään jäähtymisnauhan mukaisiin jäähtymisaikoihin. Koehitsauksien perusteella nähtiin myös, että S-käyrän koostumuksen pitää vastata tarkemmin hitsattavan materiaalin koostumusta kuin koehitsauksissa, jotta syntyvä mikrorakenne sekä liitoksen kovuus ovat vastaavia kuin S-käyrältä voidaan ennustaa.

Virtalähteen käytettävyyteen on kiinnitettävä huomiota. Yksinkertaisimmillaan käyttäjän on asetettava koneeseen materiaali, liitosmuoto sekä aineenpaksuus, joiden perusteella kone valitsee oikeat lämmöntuonnin arvot hitsausta varten. Lisäksi käyttäjä asettaa koneeseen lankamateriaalin, langanhalkaisijan ja suojakaasun, minkä perusteella koneen ohjauselektronikka valitsee muistista oikean synergiakäyrän.

Jos jollekin teräslajille ei saada määritettyä jatkuvan jäähtymisen S-käyriä tai lämmöntuonnin arvoja tai, jos koostumusvaihteluista johtuen niistä ei voida luotettavasti

määrittää lämmöntuonnin arvoja, voidaan ohjaukseen käyttää myös muuten määritettyjä lämmöntuonnin arvoja. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi teräsvalmistajien lämmöntuontisuositusten mukaisia lämmöntuonnin arvoja, jotka voidaan tallentaa koneeseen materiaaliakohtaisesti.

Jatkokehitys

Jatkuvan jäähtymisen S-käyriä tutkittaessa pitää tarkastella monia eri asioita, jotta lämmöntuonti saadaan määritettyä luotettavasti S-käyrältä. Ensiksi pitää tutkia, miten S-käyriä tehdään, jos uudet S-käyrät laaditaan. Sen lisäksi pitää tutkia teräslajin koostumusvaihteluiden vaikutuksia S-käyriin, määrittää oikeat jäähtymisajat teräslajille sekä löytää jäähtymisaikoja vastaavat lämmöntuonnit eri liitosmuodoille sekä aineenpaksuuksille.

Ensimmäinen jatkokehitystarve ja tutkimuskohde on jatkuvan jäähtymisen S-käyrien laatiminen tai valmiiden S-käyrien etsiminen. Jos uudet S-käyrät tehdään, pitää ensimmäiseksi tutkia, miten ne laaditaan. Jos taas käytetään jo olemassa olevia S-käyriä, ensimmäiseksi pitää kartoittaa, mistä sopivia S-käyriä löytyy.

S-käyrien laatimisen yhteydessä tutkitaan tarkasti, miten koostumusvaihtelut vaikuttavat tietyn teräslajin S-käyrän muotoon. Tällöin selvitetään teräslajin koostumuksen vaihteluvälit ja laaditaan S-käyriä eri koostumuksilla. Valmiita S-käyriä käytettäessä, voidaan niiden perusteella arvioida koostumusvaihteluiden vaikutuksia vertailemalla S-käyriä keskenään.

Kun teräslajille on tehty tai hankittu jatkuvan jäähtymisen S-käyrä, pitää määrittää, mikä jäähtymisnauha valitaan kyseiselle teräslajille, jotta hitsauksessa liitokseen syntyy haluttu mikrorakenne. Jäähtymisnauha pitää valita niin, että saavutetaan vaadittava metallurginen laatu.

Seuraava jatkotoimenpide on hitsauskokeet. Hitsauskokeissa tutkitaan, millä lämmöntuonneilla päästään haluttuihin jäähtymisaikoihin. Eri aineenpaksuuksilla pienaliitokselle tehdään hitsauskokeita käyttäen eri lämmöntuonnin arvoja. Samat kokeet voidaan tehdä tämän jälkeen päittäisliitoksille ja päällehitseille, jolloin saadaan määritettyä myös liitosmuotokertoimet.

Kun jäähtymisnauha on valittu S-käyrältä ja sille on määritetty lämmöntuonnin raja-arvot eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille, pitää näillä parametreilla tehdä koehitsauksia. Koehitsauksissa nähdään toimivatko valitut parametrit hitsauksessa ja täyttääkö hitsi hitsiluokkalaatuvaatimukset sekä metallurgiset laatuvaatimukset. Jotta voidaan tarkistaa, että myös metallurginen laatu täyttyy, pitää koehitseille tehdä standardien mukaiset menetelmäkokeet.

Lämmöntuonnin raja-arvot eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille voidaan tallentaa hitsauskoneeseen. Seuraava vaihe onkin tarvittavien kaavojen ja parametrien integroiminen hitsauskoneeseen ja käyttöliittymän kehittäminen niin, että asetuksien tekeminen on käyttäjälle helppoa ja koneen käyttö yksinkertaista.

10 YHTEENVETO

Tämä diplomityö on tehty osana Kemppi Oy:n kehityshanketta, jossa on mukana myös Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Työssä tutkittiin, miten hitsausvirtalähteen ohjaustapaa, joka perustuu lämmöntuontiin ja jatkuvan jäähtymisen S-käyriin, voidaan kehittää.

Lämmöntuonti vaikuttaa oleellisesti hitsausliitoksen ominaisuuksiin, koska se vaikuttaa liitoksen jäähtymisnopeuteen, joka taas vaikuttaa liitokseen syntyviin mikrorakenteisiin. Jäähtymisnopeuden suurena käytetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$, johon vaikuttavat lämmöntuonti, aineenpaksuus, liitosmuoto sekä työlämpötila. Jäähtymisaika $t_{8/5}$ valitaan liitoksen iskutiheysominaisuuksien ja kovuuden perusteella. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrät kertovat teräksen jatkuvasti jäähtyessä austeniitin hajaantumisen ajan funktiona.

Niiden avulla voidaan ennustaa hitsausliitokseen syntyviä mikrorakenteita. Jatkuvan jäähtymisen S-käyrältä nähdään eri jäähtymisnopeuksilla syntyvä mikrorakenne muutosvyöhykkeelle sekä sen kovuus.

Työn tavoitteena oli selvittää eri vaihtoehtoja, miten koostumusvaihtelut ja lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät otetaan huomioon sekä miten hitsausvirtalähteen ohjaustapa voidaan toteuttaa lämmöntonin ja S-käyrän perusteella. Teoriaosassa käsiteltiin hitsausliitosta ja sen jäähtymisnopeutta, jatkuvan jäähtymisen S-käyriin liittyviä tekijöitä sekä invertterivirtalähteitä. Erityisesti keskityttiin jäähtymisaikaan $t_{8/5}$, liitokseen syntyviin mikrorakenteisiin, jotka ovat riippuvaisia jäähtymisajasta $t_{8/5}$, sekä tekijöihin, jotka vaikuttavat S-käyrien muotoon ja sijaintiin. Invertterivirtalähteiden yhteydessä keskityttiin niiden ohjaustekniikkaan ja hitsausparametrien säätöön.

Teoriaosan jälkeen käsiteltiin, miten koostumusvaihtelut ja lämmöntuontiin vaikuttavat tekijät voidaan ottaa huomioon sekä määritettiin S-käyrältä alustavia lämmöntonin arvoja, joiden perusteella tehtiin koehitsauksia. Tässä osassa käsiteltiin myös ohjauksen toteutusta lämmöntonin perusteella.

Jotta ohjauksen toteutus on mahdollista, jatkuvan jäähtymisen S-käyrien pitää vastata hitsausolosuhteita. S-käyrältä voidaan valita jäähtymisnauha, jolla saavutetaan halutut liitoksen ominaisuudet. S-käyrälle pitää määrittää jäähtymisnauhaa vastaava lämmöntonin arvo, joka voidaan määrittää erillisten hitsauskokeiden avulla eri aineenpaksuuksille sekä liitosmuodoille. Lämmöntonin arvot voidaan tallentaa hitsausvirtalähteeseen materiaalikohtaisesti, jolloin käyttäjän ei tarvitse asettaa tai valita sen arvoa. Jos käytetään korotettua työlämpötilaa, voidaan käyttää lämmöntonin laskukaavoja uuden lämmöntonin määrittämiseksi. Koehitsausten tulosten perusteella lämmöntonin voi kasvaa liian suureksi pienahitsauksessa aineenpaksuuden kasvaessa. Tällöin pitää pienentää käytettävää jäähtymisaikaa $t_{8/5}$, jolloin myös lämmöntonin pienenee tai käyttää korotettua työlämpötilaa, jotta lämmöntonin pysyy matalana. Tulosten perusteella myös virtalähteen ohjauksessa käytettävän S-käyrän koostumuksen pitää vastata hitsattavan materiaalin koostumusta tarkemmin kuin koehitsauksissa, jotta liitokseen

syntyvä mikrorakenne ja sen kovuus vastaavat S-käyrältä ennustettuja rakenteita ja kovuuksia.

Haluttuun jäähtymisaikaan $t_{8/5}$ johtava lämmöntuonti pitää saada määritettyä S-käyrään luotettavasti. Ensimmäinen jatkotutkimuskohde on jatkuvan jäähtymisen S-käyrät ja koostumusvaihteluiden vaikutukset niihin. Tutkimusten perusteella S-käyriin valitaan oikeat jäähtymisnauhat/-käyrät. Tämän jälkeen, seuraava jatkokehitystoimenpide on määrittää jäähtymisnauhoja/-käyriä vastaavat lämmöntuonnin arvot eri aineenpaksuuksille ja liitosmuodoille. Lämmöntuonnin arvot voidaan määrittää hitsauskokeiden avulla. Tämän jälkeen hitsauskokeissa saadut lämmöntuonnin arvot, muut parametrit ja tarvittavat kaavat integroidaan hitsauskoneeseen sekä kehitetään sen käyttöliittymää niin, että asetuksien tekeminen on koneen käyttäjälle helppoa ja koneen käyttö yksinkertaista.

LÄHTEET

Adonyi, Y. 2006. Heat-Affected Zone Characterization by Physical Simulations, An overview on the use of the Gleeble discusses the advantages and disadvantages of thermomechanical simulation. *Welding Journal*, October 2006, s. 42–47.

Bhadeshia, H. K. D. H. & Honeycombe, R. W. K. 2006. *Steels, Microstructure and properties*. 3. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd. 344 s.

Bleck, W., Frehn, A. & Ohlert, J. Niobium in dual phase and TRIP steels

[verkkodokumentti] [Viitattu 24.10.2011] saatavissa:

http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science_techno/table_content/sub_4/images/pdfs/039.pdf

Cary, B. H. & Helzer, C. S. 2005. *Modern Welding Technology*. 6. painos. Upper Saddle River: Pearson Education Ltd. 715 s.

Chen, C. C. & Pollack, A. 1993. Influence of Welding on Steel Weldment Properties. Teoksessa: *ASM Handbook, Volume 6. Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International. 1299 s.

Davies, A. C. 1993. *The science and practice of welding, Volume 2. The practice of welding*. 10. painos. Cambridge: Cambridge university press. 547 s.

Dilthey, U. 2005. *Lecture Notes, Welding Technology 2, Welding Metallurgy*. ISF – Welding and Joining Institute. RWTH – Aachen University. 143 s.

Easterling, K. 1992. *Introduction to the physical metallurgy of welding*. 2. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd. 280 s.

- Hiltunen, P. 2005. Adaptiivinen säätö ja käytön yksinkertaisuus yhdistyvät MinarcMig™ 150 Adaptivessa. *Kemppi ProNews*, 2/2005, s. 17–18.
- Hubo, R. & Schröter, F. 2001. *Stähle für den Stahlbau Auswahl und Anwendung in der Praxis*. Teoksessa: *Stahlbau Kalender 2001*. ed. Kuhlmann, U. Berlin: Ernst & Sohn. 726 s.
- Härkönen, S. & Kivivuori, S. 2004. *Lämpökäsittelyoppi*. Helsinki: Teknologiateollisuus ry. 287 s.
- Kaplan, D. & Murry, G. 2008. *Thermal, Metallurgical and Mechanical Phenomena in the Heat Affected Zone*. Teoksessa: *Metallurgy and Mechanics of Welding*. ed. Blondeau, R. London: ISTE Ltd. 496 s.
- Kou, S. 2003. *Welding Metallurgy*. 2. painos. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 461 s.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. *Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet*. Helsinki: WSOY. 429 s.
- Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. *Uudistettu Miekk-ojan metallioppi*. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava. 841 s.
- Lukkari, J. 2002. *Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus*. 4. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 292 s.
- Lukkari, J. 2003. Lämmöntuonti ja hitsausenergia, osa 1. *Hitsausuutiset*, 2/2003, s. 3–5; 18–21.
- Lukkari, J. 2009. MIG/MAG-hitsaus, säätämisen sietämätön helppous. *Hitsausuutiset*, 1/2009, s. 23–24.

Martikainen, J. 2009. Hitsausmetallurgia. Luentomoniste: Luennot 2009. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 511 s.

Martikainen, J. 2011. Hitsausmetallurgia. Luentomoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 540 s.

MET Raaka-ainekäsikirja 1. 2001. Muokatut teräkset. 3. uudistettu painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy. 361 s.

Metallurgia. Terästen hitsaukseen liittyvää metallioppia. Kurssimateriaali: Hitsausmetallurgia 2011. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 11 s.

Mäkimaa, T. 2000. Tömäkkä hitsauksen fysiikka. (Päivitetty 2010). 45 s.

Mäkimaa, T. 2005. Virtalähteiden tyypit ja sähköinen rakenne. (Päivitetty 2009). 21 s.

Mäkimaa, T. 2009. Valokaaren säätötekniikka. 26 s.

Mäkimaa, T. & Uusitalo, J. 2007. Lämmöntuonnilla yhä merkittävämpi osa hitsauksen suunnittelussa. Kemppi ProNews, 2/2007, s. 31–33.

Patenttijulkaisu. 2007. Menetelmä ja laitteisto hitsausta varten. Patentti- ja rekisterihallitus. FI 119529 B. 12 s.

Pohjola, J. 2007. Hitsausinvertertien tekniikkaa. Kemppi ProNews, 2/2007, s. 6–7.

Rose, A. & Hougardy, H. 1972. Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 2. Herausgegeben vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung. In Zusammenarbeit mit dem Werkstoffausschuß des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H. 309 s.

Schröter, F. 2001. Steel products for recent bridge constructions. Teoksessa: Arch'01, troisième Conférence internationale sur les ponts en arc. ed. Abdunur, C. Paris: Presses des Ponts. 996 s.

Scott Funderburk, R. 1999. Key concepts in welding engineering. Welding innovation Vol. XVI, No 1, 1999, s. 8–11.

Seppälä, E. 2007. Hitsin hyvä. Hitsaajan Käsikirja 5. Uudistettu 5. painos. Tampere: Offsetpalvelu Oy. 179 s.

SFS-EN 10025-2. 2004. Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 65 s.

SFS-EN 10025-4. 2004. Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 4: Termomekaanisesti valssatut hitsattavat hienoraerakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 45 s.

SFS-EN 1011-2. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksat. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 114 s.

Synergiset toiminnot. PowerPoint esitys. Kemppi Oy. 3 s.

Törölä, M. 2011. Invertteriosuudesta. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Severi Iso-Markku. Lähetetty 7.11.2011. [viitattu 14.11.2011]. Yksityinen sähköpostiviesti.

Uusitalo, J. 2007. Synergiset käyrät ja mukautetut hitsausprosessit helpottavat hitsaajan työtä. Kunnossapito, 3/2007, s. 54–57.

Uusitalo, J. 2011. Lämmöntuonnin säätö. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Severi Iso-Markku. Lähetetty 14.7.2011. [viitattu 29.9.2011]. Yksityinen sähköpostiviesti.

Vanitec. 1985. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for vanadium steels. Kent: Winterton House. 224 s.

Vähäkainu, O. 2003. Rautaruukin teräkset hitsaajan opas 2003. 3. painos. Keuruu: Otava. 112 s.