

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Jussi Marttinen

KUPARIN HITS AUS KATTAVILLA LAATUVAATIMUKSILLA

Työn tarkastajat:

Professori Jukka Martikainen

DI Veijo Nikula

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Jussi Marttinen

Kuparin hitsaus kattavilla laatuvaatimuksilla

Diplomityö

2015

112 sivua, 70 kuvaa, 13 taulukkoa ja 1 liite

Työn tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
 DI Veijo Nikula

Hakusanat: kuparin hitsaus, laatuvaatimukset, pronssi, menetelmäkoe, YVL-ohjeet, TIG-hitsaus, ydinvoima

Kuparin ja kupariseosten hitsaus eroaa merkittävästi esimerkiksi terästen hitsauksesta. Suuri lämmönjohtavuus, lämpölaajeneminen, pehmeneminen ja kuparin taipumus liuottaa kaasuja sulaan asettavat hitsaukselle haasteita. Kuparia on perinteisesti hitsattu kaasuhitsaamalla ja kaasukaarihitsausprosesseilla, mutta uudemmat menetelmät kuten laserhitsaus, elektronisuihkuhitsaus ja FSW-hitsaus tarjoavat uudenlaisia käyttökohteita korkealla laadulla.

ISO 3834-2 asettaa noudatettavat vaatimukset hitsaustoiminnalle laatuvaatimusten ollessa kattavia. Ydinvoimalaitoksella hitsauksessa tulee lisäksi noudattaa Säteilyturvakeskuksen YVL-ohjeita, joissa on määritetty lisävaatimuksia liitosten materiaalivalinnoille, pätevyttämiseksi ja tarkastamiseksi.

Tässä työssä tutkittiin kuparimetallien hitsauksen mahdollisuutta Loviisan ydinvoimalaitoksella juottamisen sijasta siten, että kattavat laatuvaatimukset täyttyisivät. Hitsauskokeissa ja laboratoriotutkimuksissa testattiin hitsausta erilaisilla hitsausaineilla ja hitsausprosesseilla. Koetulosten pohjalta toteutettiin hitsausmenetelmä deoksidoitun kupariputken ja tinapronssilaipan TIG-hitsaukselle.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jussi Marttinen

Welding of Copper with Comprehensive Quality Requirements

Master's thesis

2015

112 pages, 70 figures, 13 tables and 1 appendix

Keywords: copper welding, quality requirements, bronze, welding procedure test, YVL guides, TIG welding, nuclear power

Welding of copper and copper alloys is significantly different from, for example, welding of steel. High thermal conductivity, thermal expansion, softening and copper's tendency to dissolve gases in the molten weld set challenges for welding. Copper has traditionally been welded using gas welding and gas shielded arc welding processes but newer methods, such as laser welding, electron beam welding and FSW welding, offer a new range of applications with high quality.

ISO 3834-2 sets requirements to be complied during welding operations when quality requirements are comprehensive. In nuclear power plants, welding must also comply with the Radiation and Nuclear Safety Authority's YVL guides which set additional requirements for material choices, qualification and testing.

In this thesis, the possibility of welding of copper and copper alloys with comprehensive quality requirements instead of brazing in Loviisa Nuclear Power Plant is examined. In welding experiments and laboratory studies, welding with different welding materials and welding processes were tested. On the basis of the test results, a welding procedure was carried out for TIG welding of deoxidized copper pipe and tin bronze flange.

ALKUSANAT

Tämä Diplomityö on tehty Fortum Power and Heat Oy:lle Loviisan ydinvoimalaitoksella.

Haluan kiittää Fortumia ja työn ohjaajaa IWE Saku Partasta saamastani mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö mielenkiintoisesta aiheesta ainutlaatuisessa työympäristössä. Haluan myös kiittää työn tarkastajia professori Jukka Martikaista ja DI Veijo Nikulaa saamistani neuvoista ja palautteista. Kiitän myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston erikoislaboratoriomestari Antti Heikkistä ja laboratorioinsinööri Esa Hiltusta avusta ja asiantuntevista neuvoista koekappaleiden tutkimuksissa. Erityisen suuren kiitoksen ansaitsevat myös kaikki hitsauskokeisiin ja koekappaleiden valmistukseen osallistuneet Loviisan ydinvoimalaitoksen hitsaushallin työntekijät.

Jussi Marttinen

Loviisassa 3.9.2015

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus	9
1.3	Työn rakenne.....	10
1.4	Yritysesittely	10
2	KUPARIN HITSATTAVUUS	13
2.1	Hitsattavuuteen vaikuttavat ominaisuudet	13
2.2	Kupariseosten hitsattavuus.....	18
2.3	Eripariliitosten hitsattavuus.....	22
3	KUPARIN HITSAUS	24
3.1	Esivalmistelut.....	24
3.2	TIG-hitsaus.....	25
3.3	MIG-hitsaus	29
3.4	Kaasuhitsaus.....	30
3.5	Puikkohitsaus	31
3.6	Sädehitsaus	32
3.7	Muut prosessit	33
3.8	Jälkilämpökäsittelyt.....	36
4	LAATUVAATIMUKSET	37
4.1	Hitsauksen laatu	37

4.2	ISO 3834-2:n asettamat vaatimukset	38
4.3	Hitsiluokkavaatimukset.....	41
4.4	Metallurginen laatu	42
5	HITSAUKSEN TOTEUTTAMINEN	48
5.1	Hitsaajien päteyttäminen.....	48
5.2	Hitsausohjeet.....	49
5.3	Menetelmäkoheet	50
6	YDINVOIMALAITOKSEN ERITYISVAATIMUKSET HITSAUKSELLE	52
6.1	Metallurgiset erityisvaatimukset	52
6.2	Turvallisuusluokittelu	54
6.3	STUK:n asettamat vaatimukset.....	56
7	HITSAUSKOKEET	59
7.1	Koejärjestelyt ja hitsauskoheet.....	60
7.1.1	Kuparin hitsauskoheet.....	60
7.1.2	Kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen hitsauskoheet	71
7.1.3	Veto- ja taivutuskokeet	81
7.1.4	Makro- ja mikrohetarkastukset	83
7.2	Tulokset ja niiden tarkastelu	85
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	101
	LÄHTEET	104
	LIITTEET	

LIITE I: pWPS

LYHENNELUETTELO

^{110m}Ag	Metastabiili hopea-110m-isotooppi
ASME	American Society of Mechanical Engineers, standardeja ylläpitävä järjestö
^{64}Cu	Kupari-64-isotooppi
^{67}Cu	Kupari-67-isotooppi
CuAl8	Alumiinipronssi noin 8 % alumiiniseostuksella
CuSi3	Piipronssi noin 3 % piiseostuksella
CuSn6	Tinapronssi noin 6 % tinaseostuksella
CuSn12	Tinapronssi noin 12 % tinaseostuksella
CuP	Fosforilla seostettu kupari
^{58}Co	Koboltti-58-isotooppi
^{60}Co	Koboltti-60-isotooppi
DHP	Phosphorus-deoxidized copper - high residual phosphorus, runsaalla fosforilla deoksidoitu kupari
EN	CEN:n vahvistamien standardien tunnus
ETP	Electrolytic tough pitch, elektrolyttisesti puhdistettu happipitoinen kupari
EYT	Ei ydinteknisesti turvaluokiteltu
FSW	Friction stir welding, kitkahitsaus pyörivällä työkalulla
HAZ	Heat-affected zone, hitsin muutosvyöhyke
HB	Hardness Brinell, Brinell-kovuus
HV	Hardness Vickers, Vickers-kovuus
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
MIG	Metal inert gas welding, metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla
NDT	Nondestructive testing, rikkomaton aineenkoetus
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet
OF	Oxygen-free, hapeton kupari

OFHC	Oxygen-free high thermal conductivity, hapeton kupari korkealla sähkönjohtavuudella
pWPS	Preliminary welding procedure specification, alustava hitsausohje
R _m	Murtolujuus
R _{p0.2}	Myötöraja 0,2 %:n venymällä
¹²⁴ Sb	Antimoni-124-isotooppi
STUK	Säteilyturvakeskus
TIG	Tungsten inert gas arc welding, kaasukaarihitsaus sulamattomalla elektrodilla
WPQR	Welding procedure qualification record, hitsauksen menetelmäkoepöytäkirja
WPS	Welding procedure specification, hitsausohje
YVL	Säteilyturvakeskuksen ydinvoimalaitosohje

1 JOHDANTO

Kuparilla ja kupariseoksilla on laajasti erilaisia sovelluksia teollisuudessa. Kuparin käyttö on lisääntynyt maailmalla tasaisesti viime vuosikymmeninä, ja kasvanut sähkönjohtavuuden tarve elektroniikan lisääntyessä on myös nostanut jossain määrin kuparin laadukkaan hitsauksen ja muun liittämisen tarvetta. Erilaisia kupareja ja kupariseoksia on pitkään käytetty korroosionkeston takia esimerkiksi putkistoissa ja venttiileissä, mutta kokemusta ja osaamista kuparien hitsauksesta löytyy vain harvoilta.

1.1 Työn tausta

Tämän diplomityön taustana oli Fortumin Loviisan ydinvoimalaitoksen lämmönvaihtimien kupariputkistoissa ilmennyt tarve liittää kuparimetalleja toisiinsa. Liitoksia on aiemmin toteutettu juottamalla, mutta liitosten onnistumisen ajoittain vaikean arvioinnin takia juottamisen ohella päätettiin suunnitella ja toteuttaa menetelmäkokeet ja pätevyitys myös hitsaukselle. Lisäksi samalla haluttiin tutkia myös hitsauksen mahdollisuutta kuparien liittämismenetelmänä yleisesti muissa voimalaitoksen kohteissa ja testata erilaisia hitsausparametreja ja -menetelmiä sekä saada lisää tietämystä yrityksen tulevia tarpeita varten.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän työn tavoitteena oli löytää kuparimetallien hitsaamiseen soveltuvia menetelmiä käytettävissä olevilla laitteilla ja resursseilla sekä saada toteutettua menetelmillä hyväksytyt EN-standardien (CEN:n hyväksymien eurooppalaisten standardien) mukaiset menetelmäkokeet, jotta Loviisan voimalaitoksella olisi valmiudet jatkossa liittää kuparimetalleja myös hitsaamalla. Koska kuparin hitsauksesta ja erityisesti kaasukaarihitsauksesta on vain vähän tutkimustietoa, oli tämän työn tavoitteena lisäksi saada uutta tutkimustietoa kuparin käyttäytymisestä hitsauksessa erilaisilla järjestelyillä.

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, miten kuparin hitsaus saadaan parhaiten liitettyä osaksi yrityksen muuta toimintaa, ja millaisia haasteita kuparin hitsaus aiheuttaa hitsauksen laatuvaatimusten ollessa korkeita kansainvälisen standardoimisjärjestön standardin ISO 3834-2 mukaisesti. Kuparin hitsauksen pätevoittämisen ja

menetelmäkokeiden suorittamisen ongelmana oli yrityksen vähäinen kokemus kuparin hitsaamisesta. Lisäksi saatavilla oli vain vähän tietoa muun muassa kuparimetallien eripariliitosten hitsaukseen soveltuvista menetelmistä ja hitsausaineista sekä suosituksista poikkeamisen vaikutuksesta hitsauksen lopputulokseen ja suoritukseen.

Tämä diplomityö rajattiin koskemaan kuparin hitsattavuutta ja hitsausta sekä hitsausohjeiden laatimista, menetelmäkokeen suunnittelua ja toteutusta sekä hitsaajien pätevyttämistä. Voimalaitoksella suoritettut hitsauskokeet rajoittuivat käytettävissä oleviin hitsausprosesseihin ja hitsausaineisiin.

1.3 Työn rakenne

Tämä diplomityö koostuu kirjallisuustutkimuksesta, käytännön hitsauskokeista sekä niihin liittyvistä laboratoriokokeista. Kirjallisessa osuudessa esitellään kuparin hitsausta ja hitsattavuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä standardissa ISO 3834-2 esitettyjen kattavien laatuvaatimusten edellyttämiä toimenpiteitä yrityksen toiminnassa. Lisäksi työssä esitellään ydinvoimalaitoksella tapahtuvia hitsaustöitä ja laitteistoa koskevia erityisvaatimuksia ja -piirteitä. Käytännön osuudessa esitellään Loviisan voimalaitoksella suoritettujen alustavien hitsauskokeiden sekä Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla tehdyn koekappaleiden laboratoriotutkimuksen toteutus ja tulokset.

1.4 Yritysesittely

Fortum on energiayhtiö, jonka ydinosuudesta on hiilidioksidipäästötön tehokas sähkön ja lämmön tuotanto. Toimintaa Fortumilla on Pohjoismaissa, Baltiassa, Venäjällä ja Puolassa. Henkilöstä yrityksessä on noin 8000 ja sähköasiakkaita noin 1,3 miljoonaa. (Fortum, 2015a.)

Fortumin Loviisan voimalaitos koostuu kahdesta painevesireaktorista, joiden sähköntuotanto yhdessä on noin 8 TWh vuodessa. Reaktorit kuumentavat veden primääripiirissä noin 300 °C:een, mutta se on 123 barin paineessa, jolloin se ei kiehu. Vesi siirtää lämmön reaktoreista höyrystimiin, joissa osa lämmöstä taas siirtyy putkien läpi sekundääripiiriin veteen. Sekundääripiiriin vesi höyrystyy ja virtaa turbiineihin, jotka muuttavat lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi. Turbiinit pyörittävät roottoreita

generaattoreissa, jotka muuttavat mekaanisen energian sähköenergiaksi. Vesihöyry siirtyy turbiineista lauhduttimiin, joissa se meriveden avulla lauhdutetaan takaisin nesteeksi. Lauhdevesi pumpataan lauhdevesisäiliöön, josta se kiertää takaisin höyrystimiin. (Fortum, 2015b.)

Kuparia käytetään voimalaitoksella esimerkiksi lämmönvaihtimien putkistoissa. Kupari soveltuu hyvin voimalaitoksella muun muassa tällaisiin kohteisiin hyvän lämmönjohtavuutensa sekä korroosiokestävyytensä ja mikrobikasvustojen vähäisyytensä takia. Lisäksi muita kuparimetalleja kuten alumiinipronssia, tinapronssia ja punametallia käytetään muun muassa laippojen materiaalina erilaisissa kohteissa. Kuvassa 1 on lämmönvaihtimeen liittyviä kupariputkia Loviisan ydinvoimalaitoksella.



Kuva 1. Lämmönvaihtimen kupariputkia Loviisan ydinvoimalaitoksella.

Loviisan voimalaitoksella on oma hitsaushalli, jossa tämän diplomityön hitsauskokeet on toteutettu. Ainetta rikkovat testaukset tehtiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, sillä Loviisan voimalaitoksella ei ole siihen laitteistoja, koska

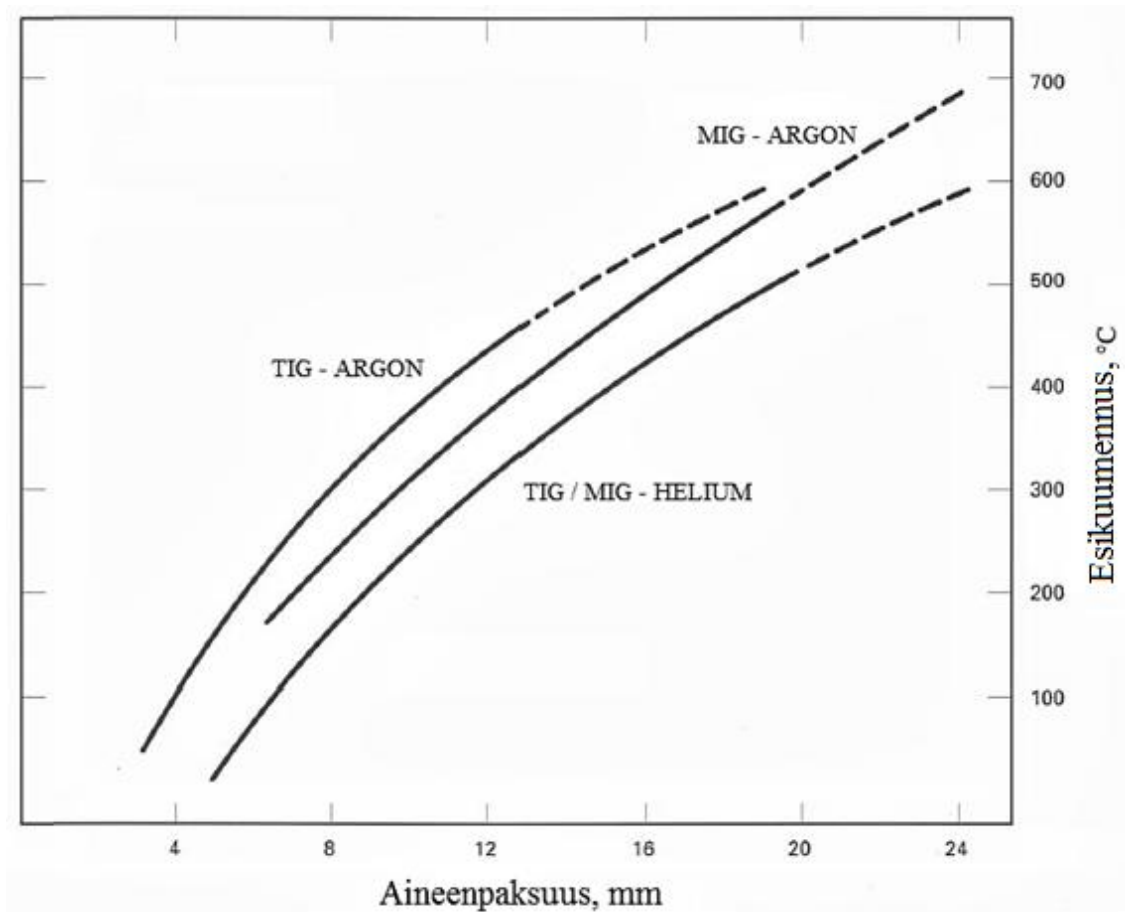
viranomaismääräykset edellyttävät, että testauksen tekee hyväksynnän saanut kolmas osapuoli. Eniten hitsaustöitä on vuosihuollon aikaan eli loppukesästä ja alkusyksystä. Hitsaustyöt toteutetaan mahdollisuuksien mukaan hitsaushallilla, mutta osa töistä joudutaan tekemään myös laitosalueella. Hitsauksen laadunhallinnassa, menetelmäkokeissa ja päteväittämisessä sovelletaan voimassaolevia EN-standardeja. Lisäksi hitsaustöissä noudatetaan viranomaisten määräyksiä ydinenergiain ja painelaitelain pohjalta laadittujen YVL-ohjeiden eli ydinvoimalaitosohjeiden mukaisesti sekä osittain ASME-standardien (American Society of Mechanical Engineers) vaatimuksia. Hitsauksen laatuvaatimukset ovat yleisesti korkeita.

2 KUPARIN HITSATTAVUUS

Kupari on monoforminen metalli, joka esiintyy pintakeskisenä kuutiollisena kiderakenteena. Puhtaan kuparin tiheys on $8,94 \text{ kg/dm}^3$ eli noin 15 % suurempi kuin teräksen tiheys. Lämmönjohtavuus on teräkseen nähden noin 6-10-kertainen lämpötilasta riippuen, ja lämpölaajenemiskerroin on noin 1,5-kertainen. Kuparia on helppo muokata ja työstää sekä kuumana että kylmänä. Muita olennaisia ominaisuuksia käytön ja hitsattavuuden kannalta kuparimetalleilla ovat hyvä korroosionkesto, hyvä kulumisenkesto, korkea sähkönjohtavuus, kyky liuottaa kaasuja sulassa tilassa, hyvä juotettavuus sekä hyvä lujuus muokkauksen ja seostuksen jälkeen. (Pettinen, 2009, s. 220-224; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200.)

2.1 Hitsattavuuteen vaikuttavat ominaisuudet

Kuparin suuri lämmönjohtavuus vaikuttaa olennaisesti hitsattavuuteen. Kun lämmönjohtavuus on korkea, johtuu lämpö nopeasti pois hitsistä. Tämän takia hitsaus vaikeutuu, joten hitsauksessa on tuotava paikallisesti paljon lämpöä, ja suuret kappaleet tulee tavallisesti esikuumentaa. Jos kupari on muokatussa tilassa, syntyy siihen suuren lämmöntonnin seurauksena pehmeä vyöhyke, joka on altis halkeamille, jos kappaletta työstetään voimakkaasti. Lämmöntonnin hallinta sekä oikeat esikuumennus- ja välipalkolämpötilat ovat tärkeitä haitallisten muutosten välttämiseksi. Kuvassa 2 on esitetty esikuumennuksen arviointikäyrät TIG- (tungsten inert gas arc welding) ja MIG-hitsaukselle (metal inert gas welding) suojakaasun ja aineenpaksuuden mukaan. (Pettinen, 2009, s. 224.)



Kuva 2. Kuparin esikuumennus aineenpaksuuden ja suojakaasun mukaan MIG- ja TIG-hitsauksella (mukaillen: CDA, 1997, s. 20).

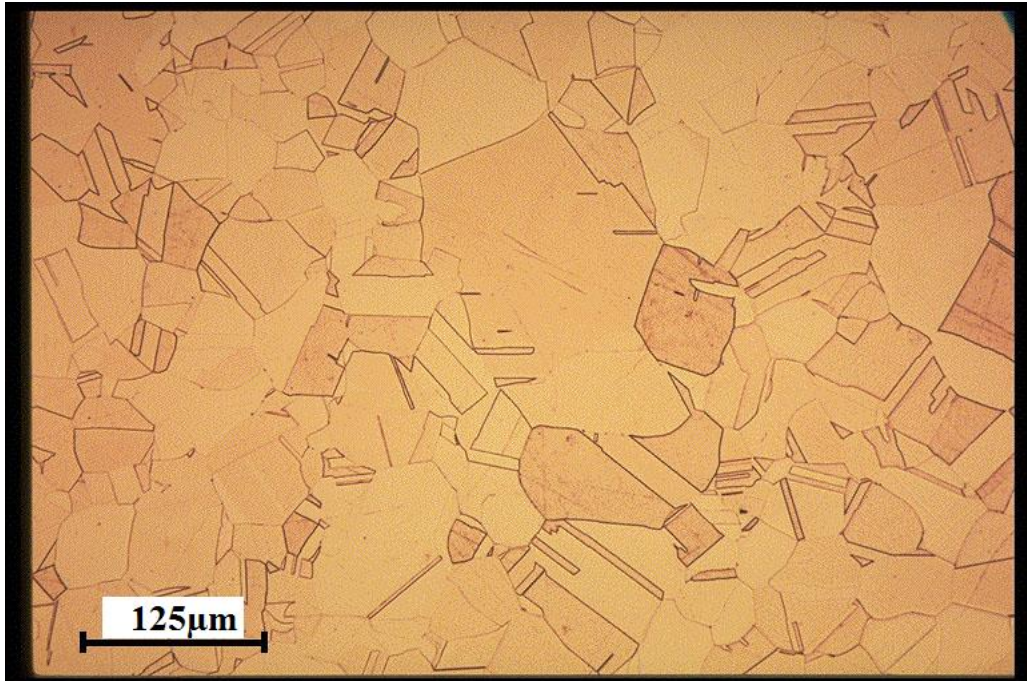
Lämpölaajeneminen hitsisulassa ja kiinteässä aineessa vaikuttaa liitoksen lopputulokseen, joten se täytyy huomioida suunniteltaessa hitsausjärjestystä ja hitsauskiinnittimiä. Myös railo voidaan joutua muotoilemaan kiilamaiseksi ja pitämään ilmarako oikeana puristimien avulla. Puristimet poistetaan hitsauksen edetessä. Tämä tapa on usein parempi kuin silloitus. Kiinnitysleukojen kautta voidaan myös tarvittaessa johtaa kuumaa vettä hitsauksen helpottamiseksi. Taulukossa 1 on esitetty eräiden kuparimetallien hitsaukseen vaikuttavia ominaisuuksia. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 114-117.)

Taulukko 1. Kuparimetallien fysikaalisia ominaisuuksia (mukailten: Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 18).

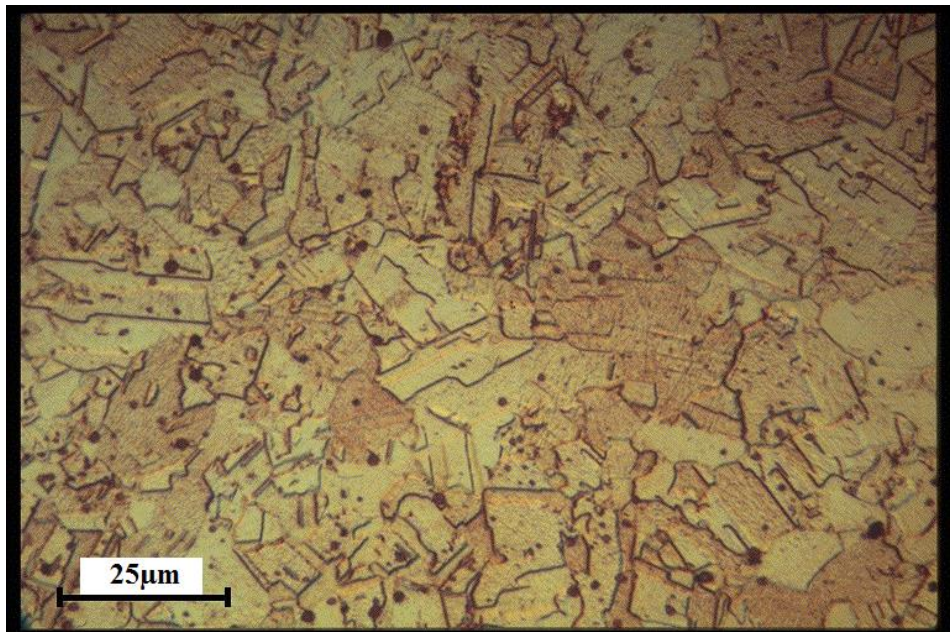
Seos	Sulamislämpötila (°C)	Pituuden lämpötilakerroin (10 ⁻⁶ 1/K 20...300 °C)	Lämmönjohtavuus (20°C W/Km)
Cu-OF	1083	17,7	395
Cu-DLP	1083	17,7	335...390
Cu-DHP	1083	17,7	295...365
CuZn20	970...1010	19	140
CuZn37	900...920	21	125
CuZn39Pb3	875...890	21	120
CuZn39Pb2	880...895	21	115
CuZn36Pb3	885...900	20	115
CuZn39Pb0,5	885...900	21	120
CuZn20Al2As	935...1010	20	100
CuSn6	910...1040	18	70
CuNi12Zn24	1000...1040	16	40
CuNi10Fe1Mn	1100...1150	16	45

Kuparin toimitustila ja suoritettavat lämpökäsittelyt vaikuttavat oleellisesti hitsauksen lopputulokseen. Koska kupari muodostuu vain yhdestä kidelaadusta, ei lämpökäsittelyllä yleisesti voida parantaa kuparin lujuutta. Raerakenne kuitenkin soveltuu hyvin muokkaukseen, joten kupareja on usein lujitettu erilaisilla muokkauskäsittelyillä ja niihin liittyvillä hehkuuksilla. Beryllium-, kromi-, boori-, nikkeli-, pii- ja zirkoniumseosteisia kupareita voidaan kuitenkin erkautuskarkaista, sillä ne muodostavat kuparin kanssa rakennetta lujittavia erkaumia. Puhtailla ja niukasti seostetuilla kupareilla tavallinen tapa saada suurempi lujuus on kylmämuovaus. Kuparin lujuus ja kovuus kasvavat muokkausasteen kasvaessa, mutta sitkeys pienenee vastaavasti. Usein kylmämuokkauksen aiheuttamat jännitykset poistetaan hehkuuttamalla alemmissa lämpötiloissa, jolloin sisäiset jännitykset pienenevät toipumisilmiön vaikutuksesta, ja lujuus säilyy lähes muuttumattomana. Korkeammissa lämpötiloissa hehkuuttaessa kuitenkin tapahtuu rekristallisaatio muokkautuneiden rakenteiden jännitysten vapauduttua, jolloin lujuus ja kovuus pienenevät. Rekristallisaation jälkeen tapahtuu etenkin korkeammissa lämpötiloissa rakeenkasvu, mikä vaikuttaa materiaalin ominaisuuksiin. Se kuitenkin tapahtuu paljon hitaammin kuin rekristallisaatio, sillä rakeenkasvun aiheuttama energia on paljon heikompi kuin muokkauksen yhteydessä rakenteeseen sitoutunut energia. Kuvassa 3 on esitetty yksifaasinen puhtaan muokkaamattoman kuparin mikrorakenne ja kuvassa 4 yksifaasinen puhtaan muokatun

ja hehkutetun kuparin mikrorakenne. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 71-75; Pettinen, 2009, s. 225.)

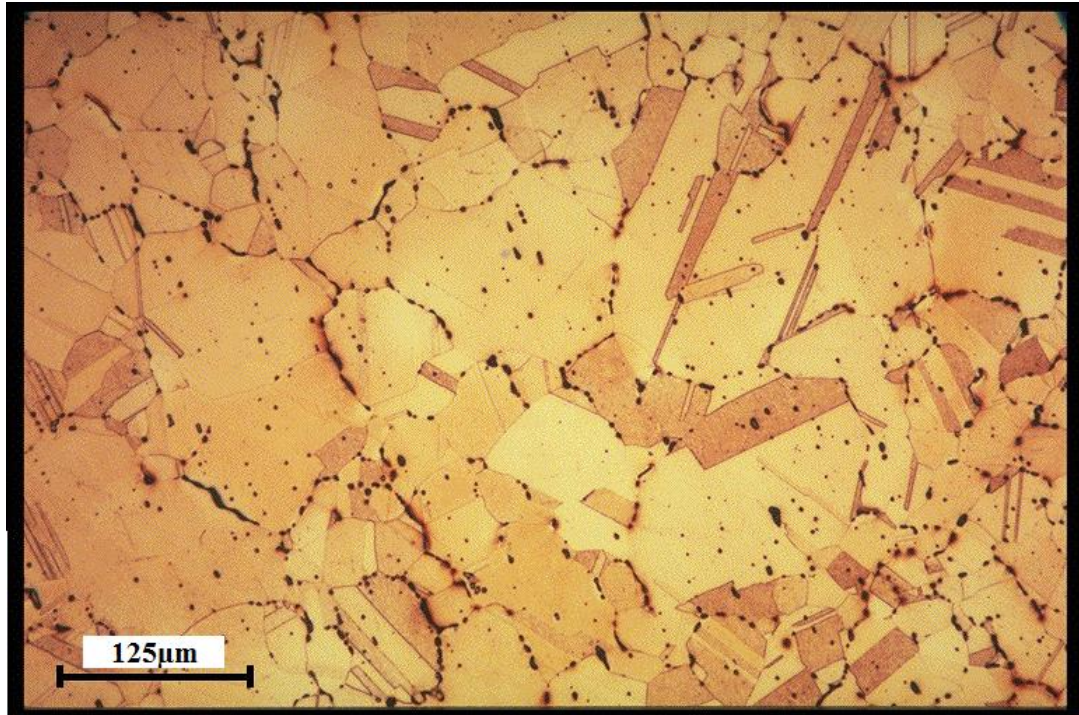


Kuva 3. Puhtaan ja muokkaamattoman kuparin mikrorakenne kiinteässä tilassa (mukaiillen: CDA, 2015a).



Kuva 4. Muokatun ja hehkutetun kuparin mikrorakenne kiinteässä tilassa (mukaiillen: CDA, 2015a).

Seostamattomilla kupareilla merkittävin hitsattavuuteen vaikuttava epäpuhtaus on happi. Happipitoista kuparia on helppo valmistaa, mutta sitä on hyvin hankala hitsata tai juottaa. Ohuita happipitoisia kuparilevyjä voidaan hitsata TIG-hitsauksella, mutta yleensä happi tekee hitsistä huonolaatuisen. Deoksidoidulla lisäaineella ja pienellä hitsisulalla voidaan muissakin tapauksissa hitsata happikuparia tyydyttävästi. Vaikka happipitoisissa kupareissa on vain noin 0,02 % happea kuparioksiduulin muodossa, haurastuttaa se helposti rakenteen, jos sulaan pääsee vetyä. Kun happi yhdistyy vetyyn, syntyy vesihöyryä, joka aiheuttaa huokosia ja repeämiä raerajoille. Ilmiötä kutsutaan vetyhauraudeksi tai vetysairaudeksi. Kuvassa 5 on esitetty vedyn aiheuttama haurastumisilmiö happipitoisessa kuparissa. Mustat pisteet raerajoilla ovat höyrystyneen veden aiheuttamia huokosia. Hapettomilla ja deoksidoiduilla kupareilla vastaavanlaista ongelmaa ei ole. Hapeton kupari on täysin seostamatonta, mutta sen valmistaminen on kallista. Deoksidoiduissa kupareissa pelkistetään happipitoista kuparisulaa lisäämällä siihen 0,003-0,050 % fosforia. Kupari ei tämän jälkeen sisällä happea, mutta siihen jää ylimääräistä fosforia. Fosfori kuitenkin pienentää lämmönjohtavuutta, jolloin hitsattavuus paranee. Lisäksi fosfori estää kuparin rakeenkasvua. Hapettomilla ja deoksidoiduilla kupareilla ei ole lähtökohtaisesti mitään hitsausmetallurgisia ongelmia. Kaasujen lisäksi hitsausta vaikeuttavat myös lyijy, telluuri, rikki ja vismutti, koska ne haurastuttavat hitsiä. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 21 ja 114-116; Pettinen, 2009, s. 221.)



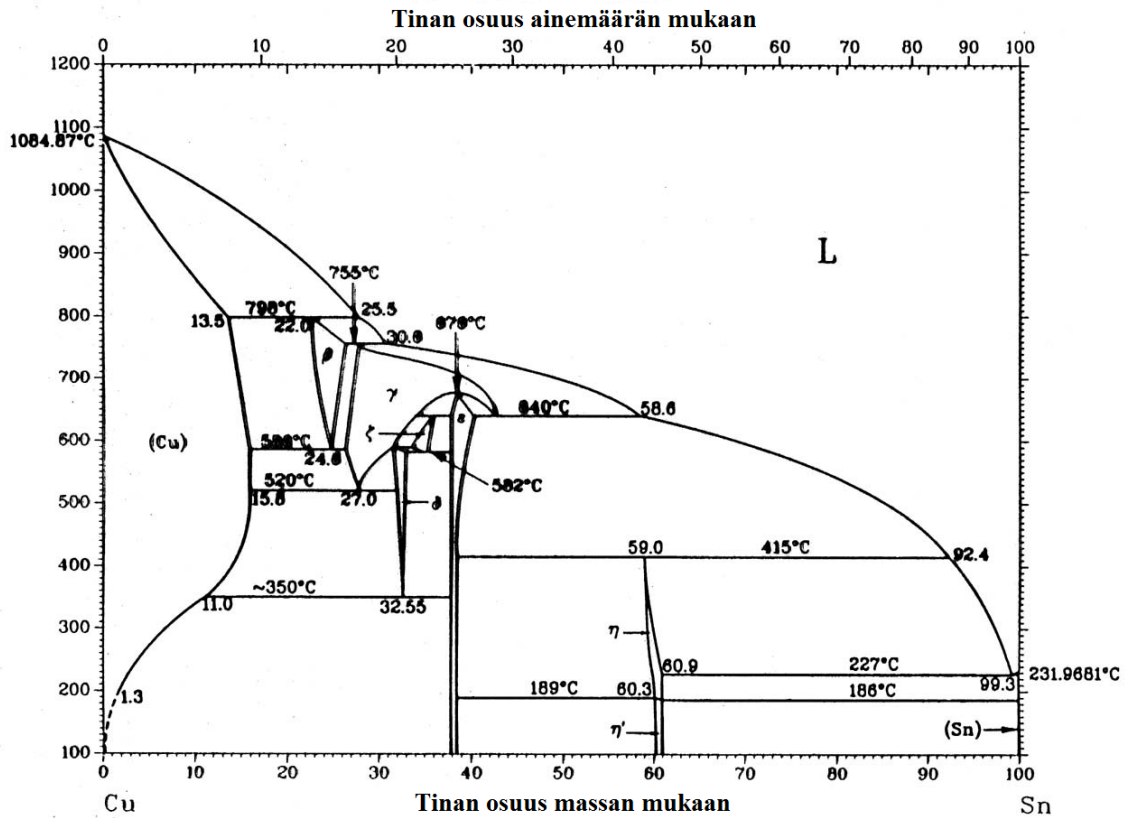
Kuva 5. Raerajoilla muodostuneen vesihöyryn aiheuttamaa huokoisuutta ja haurautta happipitoisessa kuparissa (mukaillen: CDA, 2015a).

2.2 Kupariseosten hitsattavuus

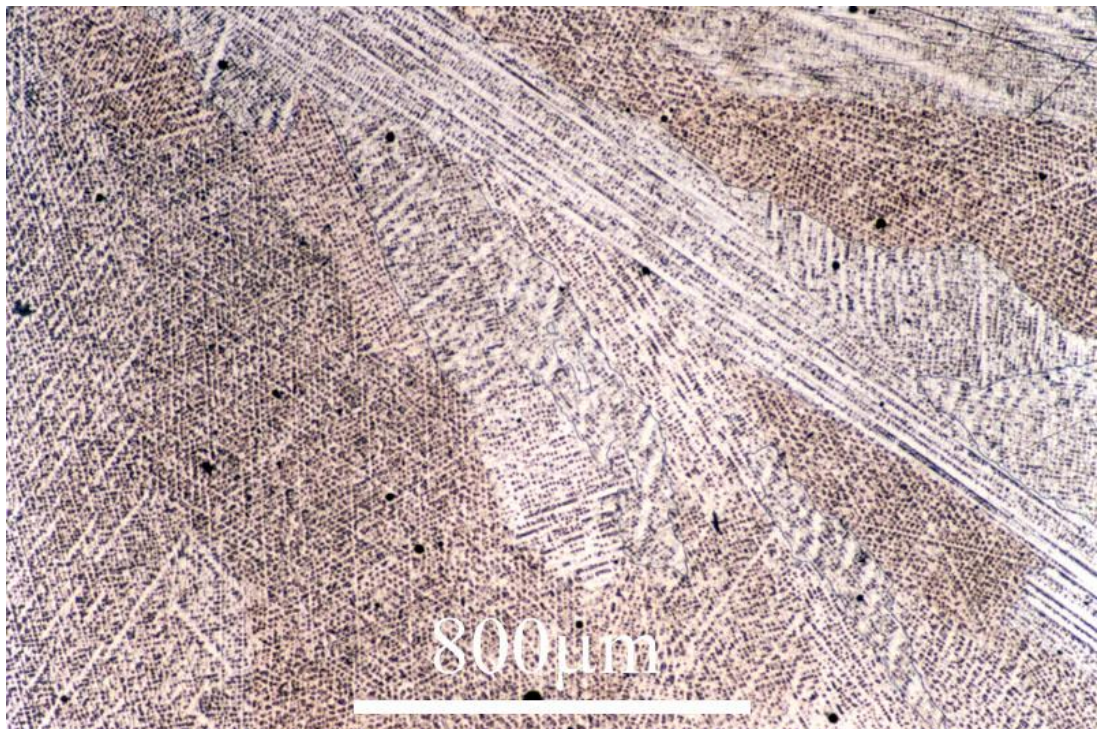
Kupariin lisätään fosforin ohella joskus vähäisiä määriä muitakin seosaineita parantamaan esimerkiksi lujuutta, lastuttavuutta tai kuumalujuutta. Kromilla ja raudalla saadaan parannettua lujuutta sekä hopealla ja tinalla kuumalujuutta. Hopea lisäksi parantaa sähkönjohtavuutta. Myös kadmium lisää tehokkaasti lujuutta, mutta sen myrkyllisyyden takia sen käyttöä on vähennetty. Tehokkaimmin kuparin pehmenemislämpötilaa nostaa zirkonium. Rikillä, seleenillä ja telluurilla saadaan aikaan lyhyempiä lastuja ja sitä kautta parannettua koneistettavuutta. Sulfidi, selenidi, ja telluridi eivät liukene kupariin, vaan ovat erillisiä sulkeumia, jotka auttavat lastun katkaisemisessa. Erkautuskarkaistuilla seoksilla tapahtuu hitsatessa ylivanhenemistä, jolloin materiaalin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Ominaisuuksien säilyttämiseksi erkautuvat seokset tulisi hitsata pehmeäsihehkutetussa tilassa ja karkaista vasta sen jälkeen. Esimerkiksi sinkillä, kadmiumilla ja fosforilla on matala kiehumispiste, jolloin ne kaasuuntuvat helposti ja voivat aiheuttaa hitsiin huokosia. Kaasuuntumista voidaan kuitenkin vähentää nostamalla hitsausnopeutta. (Pettinen, 2009, s. 221-226; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 22-24.)

Varsinaisia kupariseoksia ovat messingit, tinapronssit, uushopeat, nikkelikuparit, alumiinipronssit, piipronssit sekä erilaiset erikoisseokset. Messinki johtaa vain noin kaksi kertaa yhtä paljon lämpöä kuin teräs eli selvästi vähemmän kuin puhdas kupari 6-10-kertaisella lämmönjohtavuudella, joten lämmöntuonnin ja esikuumennuksen tarvekin on pienempi. Lämpöjännitysten aiheuttamia halkeamia ei hitsatessa yleensä synny, joten silloitus ja hitsaus voidaan tehdä vapaavalintaisessa järjestyksessä. Messingin sisältämän sinkin kiehumispiste on vain 907 °C, joten se höyrystyy helposti hitsattaessa. Höyrystynyt sinkki saattaa aiheuttaa hitsiin huokosia. Valokaari on kuumempi kuin kaasuliekki, joten höyrystymistä tapahtuu enemmän kaasukaarihitsauksessa kuin kaasuhitsauksessa. Höyrystymistä voidaan välttää käyttämällä lisäainetta, joka muodostaa oksidikerroksen hitsisulan päälle. Oksidikerros estää sinkkihöyryn poistumisen sulasta, jolloin vältetään huokosilta ja sinkinkadolta. Monissa messingeissä on myös lyijyä, joka aiheuttaa huokoisuutta ja halkeiluvaaraa. Lyijymessingit yleensä juotetaan hitsaamisen sijasta. Messinkien hitsien lujuusominaisuuksia voidaan parantaa vasartamalla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 204; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 116.)

Tinapronsseilla on myös selvästi puhdasta kuparia pienempi lämmönjohtavuus, mikä helpottaa niiden hitsausta. Tinapronssien jähmettymislämpötila-alue on suuri, joten rakenteeseen ehtii helposti syntyä suotautumia hitsauksen jälkeisessä jähmettymisessä. Tinapronssin tasapainopiirros on esitetty kuvassa 6. Suotautumat eli tinan epätasainen jakautuminen rakenteeseen tekevät siitä herkän kuumahalkeamille. Matalassa lämpötilassa sulavat faasit ovat dendriittien väleissä, jolloin niihin syntyvät kutistumisjännitykset voivat aiheuttaa halkeamia jähmettymisen aikana. Hitsistä tulisi siis saada jäähtyessä hienorakeinen. Kuumahalkeamia voidaan välttää vähentämällä jännityksiä hitsauksen aikana, minimoimalla lämmöntuonti sekä pienentämällä ilmaraon kokoa ja lisäämällä sulan kokoa juuripalossa. Kuvassa 7 on esitetty tinapronssin mikrorakenne, johon on jäähtyessä muodostunut lähes yksifaasinen dendriittinen rakenne. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 116; Pettinen, 2009, s. 225-226.)



Kuva 6. Kupari-tina-tasapainopiirros (mukailen: UC Santa Barbara, 2015).



Kuva 7. Lähes yksifaasista tinpronssia 5 %:n tinapitoisuudella (DoITPoMS, 2002).

Kupari ja nikkeli muodostavat muista kupariseoksista poiketen aukottoman liukoisuuden seoksen eli tuloksena on aina yksi faasi riippumatta seostussuhteesta. Kyseessä on siis jähmeä korvaussijaliuos. Nikkelikuparit kestävät hyvin merivettä, joten niitä käytetään tavallisesti lauhduttimien ja lämmönsiirtimien putkissa. Lämpöä ne johtavat suunnilleen saman verran kuin teräkset. Liitos on hitsattava mahdollisimman nopeasti, jotta hitsattava materiaali ei kuumene liikaa. Nikkelikuparit liuottavat helposti hitsatessa sulaan happea, vetyä, typpeä ja rikkiä, jotka voivat aiheuttaa hitsiin oksidisulkeumia, huokoisuutta ja kuumahaurautta. Hitsatessa tulisi siis välttää kaasujen liukenemistä ja käyttää deoksidoituja lisäaineita. Lisäaineen valinnassa tulisi myös huomioida hitsin seostuminen. Titaanilla seostetut nikkelikuparit sopivat parhaiten hitsattavien ohutlevyjen materiaaliksi. Myös nikkelikuparit pehmenevät merkittävästi hitsauksen seurauksena. Uushopeat ovat myös nikkellillä seostettuja kupareita, mutta käytännössä ne ovat usein messinkejä, joihin on seostettu nikkeliä värin takia. Niiden hitsausmetallurgia muistuttaa siis pitkälti messingin hitsausta. (Tampereen teknillinen yliopisto, 2005; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 207; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 32 ja 117; CDA, 1997, s. 10.)

Alumiinipronssin sisältämä alumiini vaikeuttaa hitsaamista, koska se muodostaa hitsisulan pinnalle alumiinioksidikerroksen, joka täytyy poistaa esimerkiksi erikoisjuoksutteella tai käyttämällä hitsauksessa vaihtovirtaa. Yksifaasiset vähemmän seostetut alumiinipronssit eli alle 7 % alumiinia sisältävät seokset eivät ole lämpökäsiteltäviä. Ne eivät myöskään vaadi yleensä esikuumennusta, mutta ne ovat alttiita muutosvyöhykkeen halkeamille. Yleisesti noin 9,5-11,5 % alumiinilla seostetut seokset ovat kaksifaasisia ja lämpökäsiteltäviä, jolloin hitsaus voi heikentää lämpökäsittelyllä saavutettuja ominaisuuksia. Korkeampi alumiinipitoisuus parantaa alumiinipronssien sitkeyttä ja samalla hitsattavuutta. Lämmönjohtavuus ei ole alumiinipronsseilla kovin suuri, mikä myös helpottaa hitsausta. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 206; CDA, 1997, s. 9.)

Piipronssit ovat lujia, korroosionkestäviä ja hyvin hitsattavia. Niille kuitenkin tulisi suorittaa jännityksenpoistohehkutus tai pehmeäsihehkutus ennen hitsausta, ja työlämpötilaan lämmityksen tulisi tapahtua hitaasti. Piipronssit tulisi myös jäähdyttää nopeasti kriittisen lämpötila-alueen läpi. Pii muodostaa erkaumia ja pintaoksidikalvon,

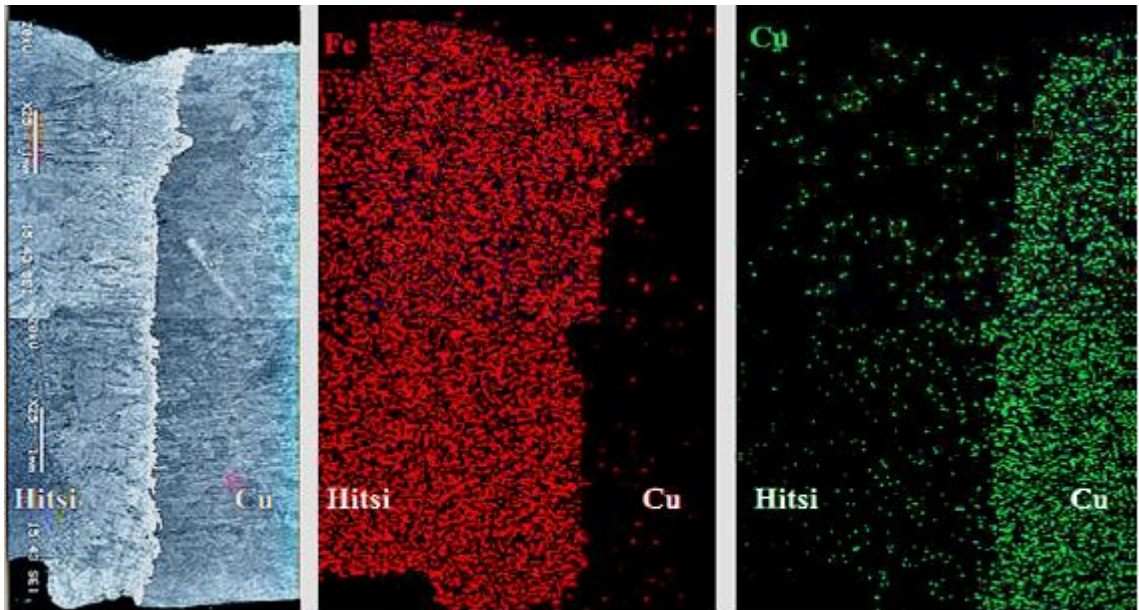
jotka voivat vaikeuttaa hitsauksen suoritusta. (CDA, 1997, s. 10; Pettinen, 2009, s. 225-226.)

2.3 Eripariliitosten hitsattavuus

Kupareita ja monia kupariseoksia voidaan liittää onnistuneesti toisiinsa hitsaamalla. Muun muassa tinapronsseja, alumiinipronsseja, piipronsseja ja nikkelikupareita voidaan kaikkia liittää keskenään ja seostamattoman kuparin kanssa. Myös messinkejä voidaan liittää esimerkiksi piipronssin ja nikkelikuparin kanssa seostamattoman kuparin lisäksi. (Davis, 2001, s. 293-294; Wisconsin Wire Works, 2015.)

Kuparia voidaan liittää toisten kuparimetallien lisäksi muihinkin materiaaleihin. Eripariliitoksissa olennaista on huomioida, että materiaalit sopivat yhteen metallurgisesti. Lisäaine tulee valita niin, että kummastakin perusaineesta voi liueta siihen materiaalia, jotta halkeamilta vältyttäisiin. Erilaiset lämmönjohtavuudet ja lämpölaajenemiset tulee myös huomioida lisäaineen valinnassa, jotta se kestäisi niiden aiheuttamat jännitykset. Materiaalien välinen diffuusio tulee hallita ja joissain tapauksissa sitä tulee myös rajoittaa. Oikeanlainen sekoittuminen saadaan aikaan hitsin muotoilulla, hitsausprosessilla ja suoritustekniikalla. (Pettinen, 2009, s. 269-267.)

Kuparia voidaan hitsata niukasti seostettuihin teräksiin ja ruostumattomiin teräksiin, mutta kupari muodostaa raudan kanssa hauraita faaseja, joten suurta sekoittumista tulee välttää. Ongelmana terästen ja kuparien liittämisen on kuumahalkeamat teräksen muutosvyöhykkeellä, kun kupari sekoittuu teräksen puolelle. Kuvassa 8 on esitetty rauta- ja kupariatomien sekoittumista eripariliitoksessa. Kaasukaarihitsauksessa kaari tulisi kohdistaa kuparin puolelle lämmönjohtavuuden erojen takia. Kupari on myös olennaista esikuumentaa. Laserhitsauksessa säde voi olla tarpeen kohdistaa teräksen puolelle heijastumisen takia. (Totalmateria, 2006; Mai & Spowage, 2004, s. 228-229.)



Kuva 8. Kuparin ja teräksen eripariliitos. Teräs sekoittuu kupariin selvästi huonommin kuin kupari teräkseen. (mukaillen: Yao et al., 2009, s. 812.)

Alumiinin ja kuparin hitsaaminen onnistuu yleensä kohtuullisen hyvin. Kuparilla ja alumiinilla on yhdessä useita erilaisia faaseja, joita voi hitsauksessa muodostua. Halkeamariskiä esiintyy suurempien lujuusluokkien alumiinien kanssa, mutta matalammilla lujuuksilla voidaan saada aikaan hyvälaatuisia hitsejä. (Mai & Spowage, 2004, s. 231-232.)

Kuparin ja magnesiumin liittäminen hitsaamalla onnistuu heikosti. Hitsauksessa muodostuvat $MgCu_2$ - ja Mg_2Cu -yhdisteet ja oksidit tekevät hitsistä hauraan. Liitoksen lujuutta voidaan parantaa laittamalla kappaleiden väliin esimerkiksi teräslevy. (Liming, Shengxi & Limin, 2008, s. 206-209.)

3 KUPARIN HITSAUS

Kuparin hitsaus eroaa merkittävästi suuren lämmönjohtavuutensa ja lämpölaajenemisensa takia esimerkiksi teräksen hitsauksesta. Korotetun työlämpötilan lisäksi kuparia hitsattaessa tulee huomioida huolellinen pintojen puhdistus ja kuivaus sekä kappaleiden huolellinen kiinnittäminen. Yleisesti kuparin hitsauksessa käytettyjä hitsausprosesseja ovat TIG-, MIG-, puikko- ja kaasuhitsaus. Lisäksi voidaan käyttää muun muassa piste-, kiekko-, tyssä-, leimu-, plasma-, laser- ja elektronisuihkuhitsausta sekä useita harvinaisempia erikoisprosesseja. Hitsauksen tilalla kuparin liittämässä käytetään usein juottamista. (Impomet, 2013, s. C3.1; Pettinen, 2009, s. 224-226; CDA, 1997, s. 10-13.)

Monet kuparimetallien seosaineet ovat itse kuparin ohella haitallisia hitsaajalle. Tällaisia haitallisia aineita ovat esimerkiksi arseeni, beryllium, kadmium, kromi, lyijy, mangaani ja nikkeli. Hitsauksessa tulee siis huolehtia riittävästä ilmanvaihdosta, koska hitsauksessa syntyvillä huuruilla voi olla haitallisia terveysvaikutuksia. Esimerkiksi kuparin ja sinkin huurut ja pöly saattavat aiheuttaa pahoinvointia, ongelmia hengitysteissä ja silmissä, kuumetta sekä ihon ärtymistä. Kadmiumin ja berylliumin huurut ovat myrkyllisiä hengitettäessä. (Davis, 2001, s. 294.)

3.1 Esivalmistelut

Kuparien taipumus liuottaa itseensä kaasuja tulee huomioida hitsauksen esivalmistelussa. Railopintojen tulee olla puhtaita, rasvattomia ja hapettumattomia, joten ne tulee puhdistaa kemiallisesti tai mekaanisesti ennen hitsausta. Lisäksi lisääaineiden tulee olla kuivia ja puhtaita. Myös lämpölaajeneminen tulee huomioida railon muodossa, ja silloitusta tulisi välttää joissain tapauksissa etenkin kuparin ja tinapronssin hitsauksessa. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 176; Nupponen et al., 1985, s. 68.)

Kupareita ja hyvin lämpöä johtavia kupariseoksia hitsattaessa railokulma on suurempi kuin teräksiä hitsatessa, jotta saavutetaan riittävä liittyminen ja tunkeuma. Lisäksi railosta voidaan joutua muotoilemaan pituussunnassa kiilamainen. Messingeillä,

tinapronsseilla ja nikkelikupareilla lämmönjohtavuus ei ole niin suuri, joten railo voi olla lähempänä teräksen vastaavaa railoa, ja silloitusta voidaan käyttää. Tinapronsien kohdalla voi olla kuitenkin tarpeen käyttää siltahitsien sijasta puristimia, koska silloitus lisää kuumahalkeamien riskiä. (CDA, 1997, s. 15; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 119.)

Hitsattavien pintojen ja niiden lähistön tulee olla puhtaita, ja öljy, rasva, maali, lika ja oksidit tulee poistaa. Harjaus ei sovellu puhdistamiseen, jos kupariseos muodostaa pintaoksideja kuten alumiinipronssit, vaan pinnat tulee silloin puhdistaa asianmukaisella kemikaalilla tai abrasiivisesti hiomalla. Rasvanpoisto on myös suositeltavaa sopivaa rasvanpoistoainetta käyttäen. (CDA, 1997, s. 15.)

Esikuumennus on yleisin keino vähentää kuparin suuren lämmönjohtavuuden aiheuttamia vaikutuksia hitsauksessa. Korotetun työlämpötilan valitseminen riippuu hitsausprosessista, perusaineesta, aineenpaksuudesta ja jossain määrin myös hitsattavan kappaleen koosta. Ohuet paksuudet ja korkeamman energiatiheyden prosessit kuten elektronisuihkuhitsaus ja laserhitsaus vaativat vähemmän esikuumennus kuin paksut kappaleet ja matalamman energiatiheyden prosessit. MIG-hitsaus vaatii tavallisesti vähemmän esikuumennusta kuin TIG- ja kaasuhitsaus. Kupari vaatii kupariseoksia enemmän esikuumennusta sen suuremman lämmönjohtavuuden takia, ja alumiinipronsseja ja nikkelikupareita ei tulisi esikuumentaa ollenkaan. Korotetun lämpötilan tulisi esikuumentaa olla yhtä korkea joka kohdassa liitosta ja se tulee pitää samana hitsauksen loppuun asti. Jos hitsaus joudutaan keskeyttämään, tulee kappale lämmittää uudestaan ennen hitsauksen jatkamista. (CDA, 1997, s. 15.)

3.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus soveltuu yleisesti hyvin erilaisille kuparimetalleille sen paikallisen korkean lämmöntuontinsa eli energiatiheydensä vuoksi. Sitä ei suositella runsaasti lyijyllä seostetuille kupareille, sillä juottaminen soveltuu niille paljon paremmin. TIG-hitsaus soveltuu huonosti myös happipitoiselle kuparille ja runsaasti sinkillä seostetulle messingille. Tehokkaimmillaan kuparin hitsauksessa TIG-hitsaus on liitettäessä alle 3 mm paksuja kappaleita, mutta hitsaus onnistuu hyvin 16 mm:iin asti. (CDA, 1997, s. 11; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200; Aufhauser, 2015.)

TIG-hitsaus soveltuu hyvin käsinhitsaukseen, mekanisoituun ja automatisoituun hitsaukseen. Hitsistä tulee aina jonkin verran lujempi kuin pehmeäksihehkutetusta kuparista lujuuden kannalta edullisen jähmettymisrakenteen takia. Hitsiä ei tarvitse tavallisesti vasaroida. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 121.)

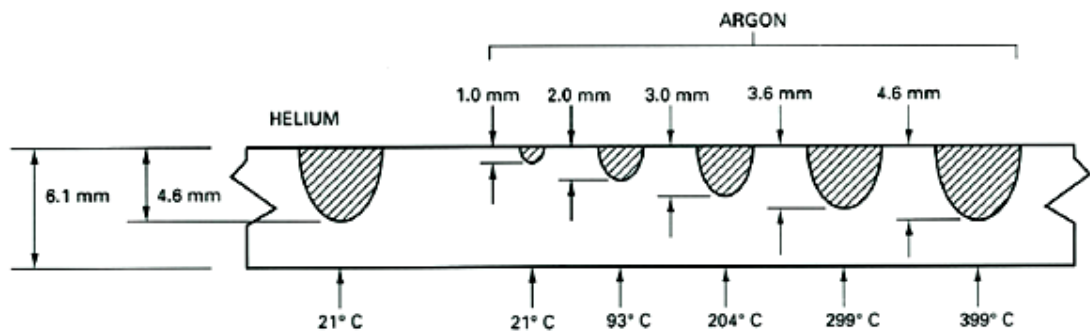
Hitsaus suoritetaan tavallisesti tasavirralla elektrodi miinusnavassa. Alumiinipronsseja hitsattaessa kuitenkin käytetään vaihtovirtaa alumiinioksidikalvon poistamiseksi. Suojakaasuna TIG-hitsauksessa suositellaan argonia ohuille paksuuksille ja argonin ja heliumin seosta vaihtelevasti 1,5-3,3 mm:n paksuudesta ylöspäin valokaaren suuren lämpösisällön takia. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200; CDA, 1997, s. 11; Aufhauser, 2015; Pettinen, 2009, s. 226.)

Käytettäväksi elektrodiksi suositellaan usein ensisijaisesti toriumseosteista elektrodiä, sillä se kestää hyvin korkeita lämpötiloja liukenematta hitsisulaan. Kuitenkin myös lantaaniseosteinen yleiselektrodi on suositeltu kuparimetalleille. Toriumseosteisesta elektrodista poiketen se soveltuu myös vaihtovirralla hitsaamiseen, eikä se sisällä radioaktiivista ja haitallista toriumia. (Aufhauser, 2015; CDA, 1997, s.20; Miller, 2015; Materion, 2011; Tooloutlet, 2015.)

Hitsauksessa on pyrittävä käyttämään hitsauskiinnittimiä ja saamaan siltahitsit niin vahvoiksi, että ne voivat olla osa tulevaa hitsiä. Pieniä kappaleita hitsattaessa silloitus jätetään usein tekemättä ja kappaleiden väliin jätetään kiilamainen ilmarako, joka ottaa huomioon hitsauksen liikkeen aikaisen lämpölaajenemisen. Kuparia hitsattaessa juurikaasun ja juurituen käyttö on suositeltua. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200-201.)

Railojen pohjapalkojen tulee olla riittävän paksuja, jotta ne kestäisivät muiden palkojen hitsauksesta aiheutuvat lämpöjännitykset. Elektrodiä tulee kuljettaa hieman työntävässä asennossa eli noin 70-90 asteen kulmassa, ja lisäainetta syötetään hitsisulan etuosaan, jolloin samanaikaisesti tehdään hitsaimella väistöliike taaksepäin. Lisäainetta ei saa päästää hapettumaan, vaan se tulee pitää suojakaasualueella myös syöttötauojen aikana. Jos hitsaus joudutaan keskeyttämään, tulee valokaari sytyttää hitsipalon etuosan päällä ja saatava se sulamaan ennen kuin lisäainetta aletaan syöttää. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 212).

Esikuumennusta suositellaan kuparin TIG-hitsauksessa noin 3-4 mm:n aineenpaksuudesta ylöspäin. Käytettäessä heliumia suojakaasuna käytetään korotettua työlämpötilaa yli 8 mm paksuille kappaleille. Kuvassa 9 on esitetty esikuumennuksen vaikutus tunkeumaan kuparissa argonilla ja heliumilla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200-201.)



Kuva 9. Esikuumennuslämpötilan vaikutus tunkeumaan kuparissa TIG-hitsauksessa virran ollessa 300 A ja polttimen kuljetusnopeuden 204 mm/min (mukaillen: CDA, 1997, s. 21).

Kuparimetalleja hitsattaessa tulee lisäaineet valita perusaineen koostumuksen mukaan. Tinaseosteinen kuparilanka soveltuu parhaiten kuparien hitsaamisen yleiskäyttöön. Mikäli liitokselta vaaditaan hyvää sähkönjohtavuutta, käytetään hopeaseosteista lisäainetta. TIG-hitsauksessa ei tulisi käyttää kaasuhitsaukseen tarkoitettuja lisäainelankoja, koska ne sisältävät fosforia ja aiheuttavat hitsiin huokosia. Paksuudeltaan pienten kappaleiden hitsauksessa ei välttämättä tarvita lisäainetta. Taulukossa 2 on esitetty ohjeellisia arvoja kuparin TIG-hitsaukseen argonilla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 201-202; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 121.)

Taulukko 2. Ohjearvoja kuparin TIG-hitsaukseen (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 201).

Aineen- paksuus mm	Hitsausvirta A	Wolframi- elektrodin \emptyset mm	Lisäaine- langan \emptyset mm	Suojakaasun virtaus l/min	Korotettu työlämpötila $^{\circ}\text{C}$
1	80	1,6	1,6	5	-
1,5	120	1,6-2,4	1,6	6	-
2	140	2,4	1,6	6	-
2,5	150	2,4	2,4	7	-
3	160	2,4	2,4	7	-
4	200	2,4	3,2	8	150
6	240	3,2	3,2	8	200
8	300	3,2	4,8	9	300
10	350	4	4,8	9	400

Taulukon arvot on tarkoitettu seostamattomalle kuparille. Messingeillä ja pronseilla suositellut arvot eroavat etenkin esikuumennuksen osalta. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 205-207.)

Mikäli kupariputkien hitsauksessa tavoitellaan parempaa tuottavuutta ja lyhyempiä läpimenoaikoja, voidaan TIG-hitsaus mekanisoida orbitaalihitsauksen avulla. Orbitaali-TIG-hitsaus on osoittautunut laadukkaaksi ja hyvin sovellettavaksi menetelmäksi etenkin nikkelikuparisilla putkilla telakkateollisuudessa, jossa niitä näytetään paljon laivoissa hyvän meriveden kestävyuden takia. Hitsin laatu on erinomainen, hitsaus on helppo toteuttaa ja se vie vain kymmenesosan vastaavanlaisen liitoksen juottamiseen kuluvaan aikaan verrattuna. Lisäksi orbitaali-TIG-hitsauksella voidaan parantaa hitsin toistettavuutta ja ergonomiaa, eikä koneenkäyttäjä tarvitse yhtä hyvää kädentaitoa kuin käsinhitsaaja. Orbitaalihitsaustyökalulla voidaan myös päästä paremmin hitsaamaan hankalasti luoksepäästäviä kohteita. Tavallisesti yli 6 mm:n aineenpaksuuksilla nikkelikupariputkin hitsauksessa siirrytään TIG-hitsauksesta MIG-hitsaukseen paremman tuottavuuden takia, mutta orbitaali-TIG-hitsaus mahdollistaa kustannustehokkaan hitsauksen myös suuremmilla aineenpaksuuksilla. Kuvassa 10 on esitetty putken orbitaali-TIG-hitsauksen suoritus. (Lahti & Lukkari, 2002, s. 9-10; Lukkari, 2010, s. 48; TWI, 2015.)



Kuva 10. Putken orbitaali-TIG-hitsausta (Lukkari, 2010, s. 49).

3.3 MIG-hitsaus

Kupareja ei hitsata kovin paljoa MIG-hitsauksella hitsin huokosten ja kuonassulkeumien vuoksi. Hitsatessa käytetään kuumakaari- tai pulssikaarihitsausta, ja soveltuvuus eri kuparimetalleille on vastaavanlainen kuin TIG-hitsauksessakin. Suojakaasuksi suositellaan argonia puhtaana, 0-3 %:n happiseostuksella tai 25 %:n heliumseostuksella. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää heliumia, johon on seostettu 25 % argonia. Puhdas helium soveltuu kuparin MIG-hitsaukseen huonosti, sillä se tekee valokaaresta epävakaa ja lisää roiskeiden määrää. Alle 6 mm paksuja kappaleita voidaan hitsata I-railolla, mutta sitä paksummilla tulisi käyttää V-railoa 90 asteen kulmalla. Taulukossa 3 on esitetty ohjeellisia arvoja kuparin MIG-hitsaukseen argonilla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 203; CDA, 1997, s. 11; Aufhauser, 2015.)

Taulukko 3. Ohjearvoja kuparin MIG-hitsaukseen (mukaillen: Aufhauser, 2015).

Aineen- paksuus mm	Lisäaine- langan ø mm	Korotettu työlämpötila °C	Hitsausvirta A	Kaarijännite V	Suoja- kaasun virtaus l/min	Langansyöttö- nopeus mm/min
1,6	0,9	75	150-200	21-26	10-15	500
3	1,2	75	150-200	22-28	10-15	450
6	1,2	75	180-250	22-28	10-15	400
6	1,6	100	160-280	28-30	10-15	350
10	1,6	250	250-320	28-30	15-20	300
12	1,6	250	290-350	29-32	15-20	300
>16	1,6	250	320-380	29-32	15-20	250

Kuparia hitsatessa käytetään yleensä kuumakaari- tai pulssikaarihitsausta, ja hitsauspoltin kytketään plusnapaan. Paras laatu saavutetaan yleensä pulssikaarihitsauksella. Tavallisesti esikuumennusta käytetään silloin, kun aineenpaksuus on yli 4 mm. Poltinta kuljetetaan kohtisuorassa tai hieman työntävässä asennossa. Siltahitsien tulee olla niin vahvoja, että ne kestävät hitsauksen aiheuttamat suuret jännitykset ja niiden päät tulee ohentaa hiomalla hitsauksen edetessä, jotta välttyään liitosvirheiltä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 213).

Messinkiä tulisi hitsata MIG-hitsauksella vain erikoistapauksissa kuten putkistoissa ja laivan potkureissa. Myöskään tinapronssia tai punametallia ei tulisi MIG-hitsata muuten kuin silloin, kun lujuudelle ei aseteta erityisiä vaatimuksia. Laajan jähmettymisvyöhykkeen aiheuttaman halkeiluriskin takia hitsisula tulee pitää pienenä ja poltinta kuljettaa suurella nopeudella. Alumiinipronssia hitsattaessa tulisi poltin kytkeä plusnapaan, jotta valokaari rikkoo oksidikalvon. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 203-206; Aufhauser, 2015.)

3.4 Kaasuhitsaus

Kaasuhitsausta ei suositella happikupareille, berylliumpronsseille, kadmiumilla tai kromilla seostetulle kupareille, lyijypitoisille messingeille eikä alumiinipronssille.

Parhaiten kaasuhitsaus soveltuu uushopealle, piipronssille ja deoksidoidulle kuparille. (CDA, 1997, s. 11.)

Hitsatessa sydänliekin etäisyys sulasta on 5-10 mm, ja polttimen ja lisäaineen kuljettamisessa tehdään pientä kaarevaa sivuttaisliikettä. Kuparin kaasuhitsaaminen on hidasta, eikä sitä tulisi käyttää kuin pieniin ja vähemmän kriittisiin kohteisiin kuten korjaushitsaukseen. Liekin tulee olla neutraali ja hitsisulaa täytyy aina suojata sillä. Sulan tulee myös antaa jähmettyä liekin hunnun suojassa. Kuparin hitsaamisessa käytetään aina korotettua työlämpötilaa, joka on 600-750 °C. Silloitusta ei tavallisesti käytetä. Lujuuden lisäämiseksi ja jännitysten poistamiseksi hitsiä voidaan myös vasaroida. Lisäaine valitaan perusaineen mukaan, ja juoksutetta käytetään vaikeasti hitsattavilla materiaaleilla. Taulukossa 4 on esitetty ohjeellisia arvoja kuparin kaasuhitsaukseen. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 202; CDA, 1997, s. 12.)

Taulukko 4. Ohjearvoja kuparin kaasuhitsaukseen (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 202).

Aineen- paksuus mm	Polttimen koko l/h	Lisäaine- langan ø mm
1	150	2
2	300	2
3	500	3,2
4	500	3,2
5	750	3,2
6	1000	3,2

Messinkiä hitsattaessa hitsaus suoritetaan voimakkaasti hapettavalla liekillä, ja hitsaamisessa käytetään juoksutetta. Sinkkikatoa voidaan vähentää piiseosteisella lisäaineella. Tinapronssin ja punametallin hitsaus tulisi suorittaa neutraalilla liekillä mahdollisimman nopeasti yhdellä palolla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 204-205.)

3.5 Puikkohitsaus

Puikkohitsausta käytetään kuparin hitsauksessa vain vähän ja lähinnä pakottavissa tapauksissa. Tyypillisiä käyttökohteita ovat pienet korjaustyöt, vaikeasti luoksepäästävät

pienaliitokset ja kuparin hitsaus johonkin toiseen materiaaliin. Riittävän lämmöntonin saavuttamiseksi käytetään mahdollisimman paksua puikkoa. Puikko kytketään plusnapaan, ja hitsauksessa käytetään tasavirtaa. Puikkoa tulee kuljettaa kohtisuorassa kappaleen pintaan nähden, ja valokaari tulee pitää lyhyenä. Suuremmat aineenpaksuudet vaativat esikuumennuksen kuten muillakin prosesseilla. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 203; CDA, 1997, s. 24.)

Puikkohitsaus soveltuu hyvin lähinnä alumiinipronssille ja noin 10 %:a nikkeliä sisältävälle kuparille. Lisäksi puikkohitsausta on käytetty jonkin verran paksuseinämaisille tinapronseille. Tinapronssia hitsatessa käytetään tinapronssipuikkoa ja punametallia hitsatessa piipronssipuikkoa. Pakottavissa tapauksissa messinkiä voidaan hitsata piimanganipronssipuikolla. Puikot tulee säilyttää kosteustiiviissä pakkauksessa, jotta ne eivät kostu kuljetuksessa tai varastoinnissa. (CDA, 1997, s. 11; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 122-125; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 204-206.)

3.6 Sädehitsaus

Kuparin laserhitsauksella on hyvin rajalliset käyttökohteet valon heijastumisen takia. Kupari heijastaa noin 99 % CO₂-laserin infrapunaa aallonpituudesta. Heijastuminen riippuu kuitenkin kuparin lämpötilasta, joten materiaalin lämmitessä absorptiokin paranee. Kupari kuitenkin johtaa lämpöä tehokkaasti, joten absorptio pysyy herkästi heikkona. Lyhyemmillä aallonpituuksilla toimivia lasereita voidaan kuitenkin käyttää joidenkin kuparimetallien hitsauksessa. Esimerkiksi Nd:YAG-laserin (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) aallonpituus absorboituu hieman paremmin kupariin. Kupari voidaan kuitenkin päällystää ohuella kerroksella jotakin muuta metallia, jolloin heijastus vähenee. Eripariliitoksia hitsattaessa voidaan lisäksi kohdistaa säde enimmäkseen tai kokonaan vähemmän heijastavan metallin puolelle. Hitsin laatuun voidaan vaikuttaa laserin modulaatiolla, jolla saadaan aikaan tasaisempi hitsin laatu, syvempi tunkeuma ja vakaampi avaimenreikä, vaikkakin huokosten määrä saattaa siten lisääntyä. (CDA, 1997, s. 12; Mai & Spowage, 2004, s. 224; Heider et al., 2011, s.81.)

Elektronisuihkuhitsaus soveltuu hyvin kuparin hitsaukseen sekä ohuille että paksuille materiaaleille. Sitä voidaan käyttää tyhjiön lisäksi myös tyhjiön ulkopuolella.

Lisäaineen käyttö on myös mahdollista langansyötöllä. Elektronisuihkuhitsauksen on havaittu soveltuvan hyvin ainakin hapettomalle kuparille, deoksidoidulle kuparille, nikkelikuparille, alumiinipronssille ja piipronssille. Hitseistä saadaan tehtyä hyvin korkealaatuisia, joten elektronisuihkuhitsauksen käyttöä on tutkittu kuparista valmistettujen ydinjätteen säilytysastioiden sulkemisessa. Niihin liittyvissä hitsauskokeissa on onnistuneesti hitsattu 57,3 mm syviä hitsejä 1,3 mm:n railolla. Kuvassa 11 on hapolla käsitelty elektronisuihukilla hitsattu kupariliitos. (CDA, 1997, s. 11-12; Tampere University of Technology, 2013; Karhula, 2014, s. 13.)



Kuva 11. Elektronisuihukilla hitsattu kupariliitos (Tampere University of Technology, 2013).

3.7 Muut prosessit

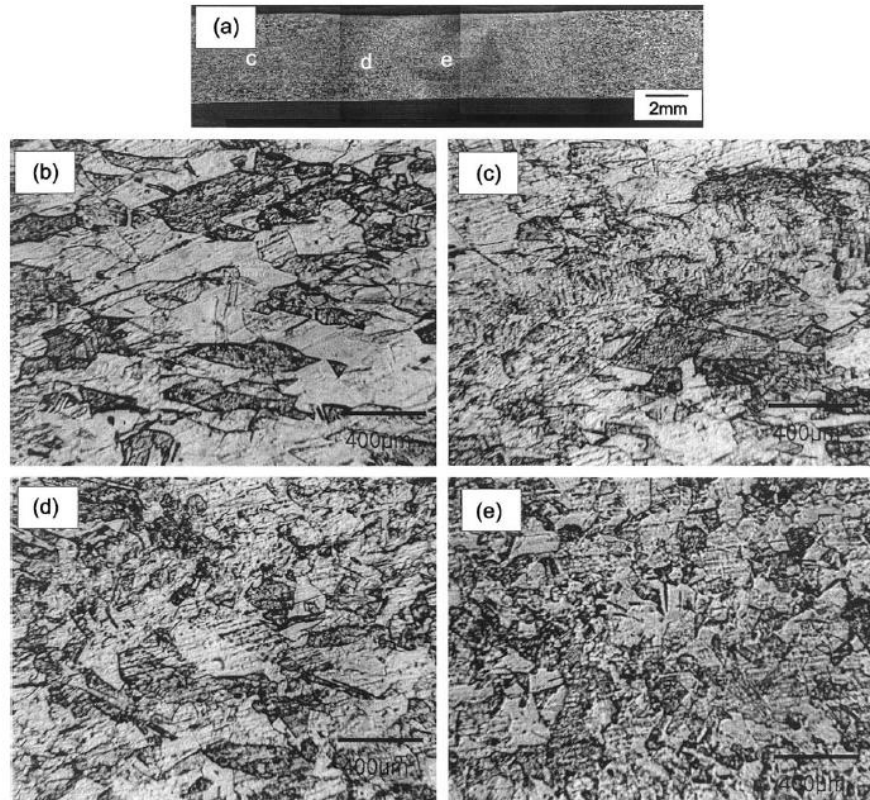
Jauhekaarihitsausta voidaan käyttää kuparimetalleille yli puolen tuuman paksuisille eli vähintään 12,7 mm paksuille kappaleille. Sopivat railojen muodot ovat samankaltaisia MIG-hitsauksen kanssa. Jauhekaarihitsaus soveltuu lähinnä nikkelikupareille. Nikkelikuparien hitsausta varten on saatavilla erilaisia jauheita, joiden perusteella hitsausparametrit määräytyvät. Oikealla suoritustekniikalla on mahdollista saavuttaa hyvä laatu. (CDA, 1997, s. 35.)

Piste- ja kiekkohitsausta käytetään enimmäkseen päällekkäisliitoksissa. Suuren lämmönjohtavuuden takia tarvitaan usein voimakastehoiset erikoiskoneet, jotta päästään riittävään virranvoimakkuuteen. Sopivin aineenpaksuus on alle 1 mm. Monilla kupariseoksilla ei ole yhtä korkea lämmönjohtavuus, joten niiden hitsaus on helpompaa. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 127.)

Leimuhitsauksella liitetään tankoja, lankaa tai profiileja päittäisliitoksella. Tyssähitsauksella liitetään pienempiä tankoja ja lankoja. Myös suurtaajuus- ja induktioprosesseilla voidaan liittää kuparimetallinauhoja. Ultraäänihitsaus soveltuu ohuille materiaaleille, mutta materiaalien tulee olla helposti kylmänä muovautuvia. Mikäli ainakin toinen liitettävistä materiaaleista on hyvin kylmänä muokattavissa, voidaan käyttää myös kylmäpuristushitsausta. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 127.)

Plasmahitsausta voidaan myös käyttää kuparien liittämiseksi. Suojakaasuna käytetään TIG-hitsauksen tapaan argonia tai argonin ja heliumin seosta. Helium antaa vastaavasti suuremman tehotiheyden, ja vetyä ei tulisi lisätä kumpaankaan kaasuun. (CDA, 1997, s. 22.)

Kitkahitsausta käytetään kuparimetalleilla etenkin pyörähdyskappaleiden hitsauksessa pyörittämällä vähintään toista liitososista ja painamalla niitä yhteen. Käyttökohteet ovat samankaltaiset kuin tyssä- ja leimuhitsauksessakin, mutta poikkipinnat voivat olla suurempia. Lisäksi kitkahitsausta voidaan tehdä pyörivällä työkalulla kappaleen ollessa paikallaan, jolloin puhutaan FSW-hitsauksesta. Elektronisuihkuhitsauksen ohella myös tällä tavalla on suljettu tutkimuksissa onnistuneesti kuparisia ydinjätteen säilytysastioita. Hitsistä saadaan helposti virheetön ja sen lujuus on hieman parempi kuin elektronisuihkuhitsauksessa ja lähellä perusaineen lujuutta. FSW-hitsauksen pienen lämmöntuonnin ja hyvän laadun takia sitä käytetään laajasti esimerkiksi alumiinin, kuparin, sinkin ja lyijyn hitsauksessa. Hitsattavat aineenpaksuudet vaihtelevat 1-50 mm:n välillä. Kuvassa 12 on esitetty mikrorakenteen muutokset pyörivällä työkalulla tehdyssä kitkahitsauksessa 4 mm paksulla kaupallisella puhtaalla kuparilevyllä. Kuvassa (b) esittää perusainetta. Muiden mikrorakenteiden paikat on esitetty kohdassa (a). Hitsaus on saanut aikaan pienemmän raekoon perusaineeseen verrattuna. (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 127; Lee & Jung, 2003, s. 1042-1045; Lin, Chang & Wu, 2014, s. 296.)



Kuva 12. Mikrorakenteen muutokset kuparissa kitkahitsauksen jälkeen (Lee & Jung, 2003, s. 1042).

Jos kappaleet eivät siedä korkeiden lämpötilojen aiheuttamia mikrorakenteen ja muodon muutoksia, voidaan ne railoituksi eli hitsausjuotoksi. Hitsausjuotossa perusaine ei sulaa, joten se ei ole hitsausta, mutta prosessi muistuttaa muuten kaasuhitsausta suorituksen osalta. Juotteena käytetään yleensä messinki- tai uushopeajuotteita. Hitsausjuotto sopii hyvin seostamattomille kupareille, mutta kupariseoksille selvästi kovajuottoa ja pehmeäjuottoa huonommin perusaineen ja juotteen sulamislämpötilojen pienen eron takia. Erityisesti vaaleilla kupariseoksilla hitsausjuotettavuus on huono. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 72; Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 41 ja 128-189.)

Ohutlevyjä voidaan myös MIG-juottaa eli kaarijuottaa. Juottaminen tapahtuu tavallisella MIG-laitteistolla, ja valmis liitos muistuttaa ulkonäöltään hitsiä, vaikka perusaine ei prosessissa sulakaan. Yleisimmät käyttökohteet ovat sinkittyjen ohutlevyjen ja ruostumattomien teräslevyjen liittämisen, mutta myös erilaisia eripariliitoksia kuten kuparin ja terästen liitoksia MIG-juotetaan. Lisäainelankana käytetään tavallisesti

erilaisia pronssilankoja, joista yleisimpiä ovat CuSi3- (piipronssi) ja CuAl8-langat (alumiinipronssi). (Lepola & Makkonen, 2006, s. 237-240.)

3.8 Jälkilämpökäsittelyt

Hitsauksen jälkeen kuparimetalleille voi olla tarpeen suorittaa jälkilämpökäsittelyitä, jos materiaalia saadaan siten lujitettua tai jos olosuhteet voivat aiheuttaa halkeilua jännityskorroosion takia. Messingit runsaalla sinkkiseostuksella, mangaanipronssit, nikkelimangaanipronssit, jotkin alumiinipronssit ja uushopeat ovat alttiita jännityskorroosiolle. Hitsauksen jäännösjännitykset voivat aiheuttaa näiden seosten rikkoutumisen. Karkenevat kupariseokset voivat ylivanheta hitsauksen takia, joten myös niille voidaan joutua tekemään jälkilämpökäsittelyitä. (CDA, 1997, s. 16.)

Jännityksenpoistohehkutuksella poistetaan hitsauksen aiheuttamia jäännösjännityksiä heikentämättä merkittävästi materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Hitsattua kappaletta hehkutaan rekristallisaatiolämpötilan alapuolella vähintään tunti kupariseokselle määritetyssä lämpötilassa, minkä jälkeen kappaleen annetaan jäähtyä hitaasti. Yli tuuman paksuisia eli yli 25,4 mm paksuja kappaleita joudutaan yleensä hehkuttamaan kauemmin, jolloin nyrkkisääntö on, että jokaista tuumaa kohti hehkutetaan tunti lisää. (CDA, 1997, s. 17.)

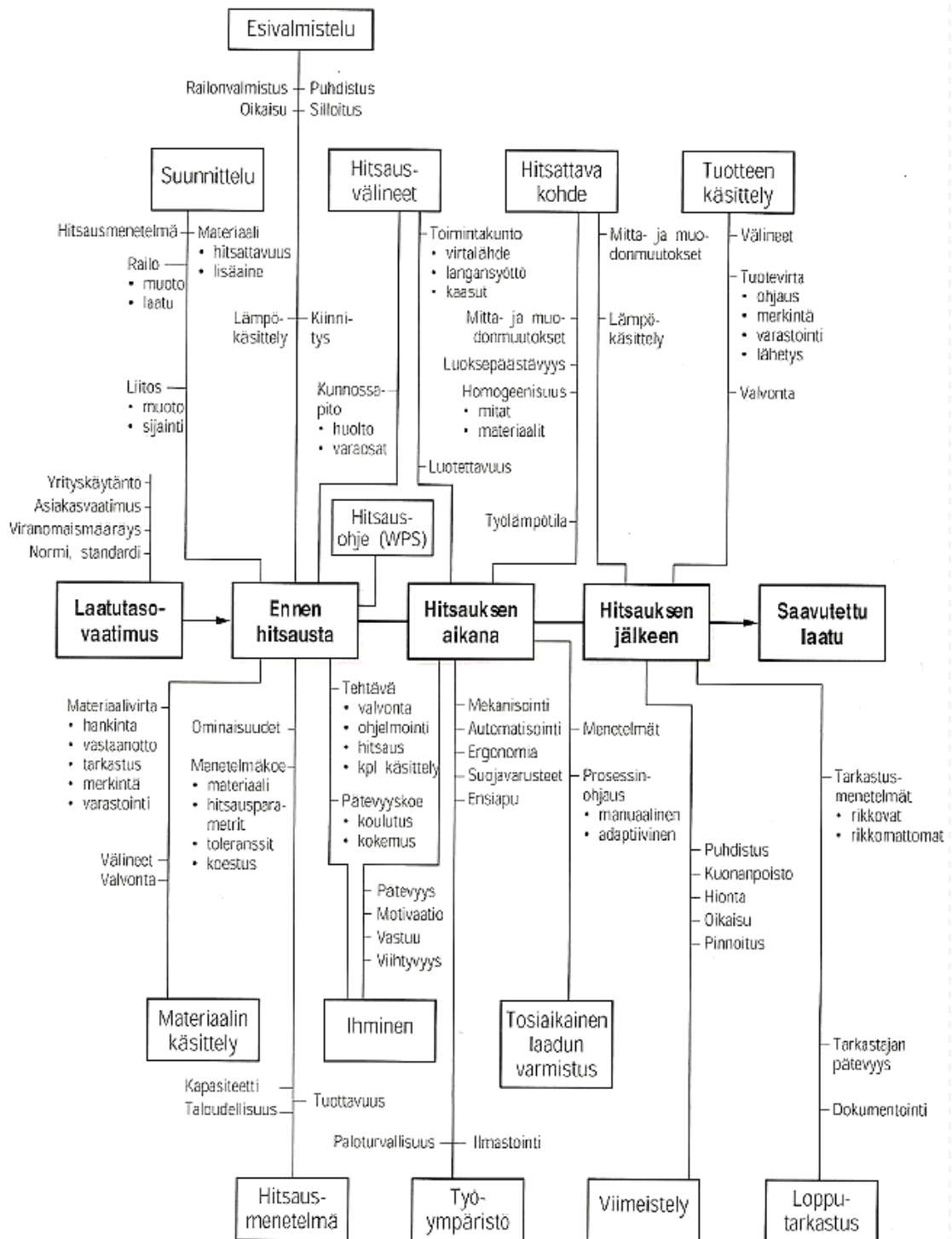
Pehmeäsihehkutuksella vähennetään jännityksiä ja homogenisoidaan kareneita kappaleita paremman metallurgisen rakenteen saavuttamiseksi. Pehmeäsihehkutus suoritetaan selvästi jännityksenpoistohehkutusta korkeammassa lämpötiloissa. Liian pitkät hehkutusajat tai liian korkea hehkutuslämpötila voivat aiheuttaa liiallista rakeenkasvua, joka laskee materiaalin lujuutta ja voi aiheuttaa muita epätoivottuja seurauksia. (CDA, 1997, s. 17-18.)

4 LAATUVAATIMUKSET

Hitsauksessa saadaan aikaan hyvä laatu hyvällä laadunvalvonnalla ja koko toiminnan kattavalla laatujärjestelmällä. Hyvä ammattitaito ja hitsausohjeet ovat tärkeitä laadukkaan hitsaavan toiminnan saavuttamiseksi. Laadukas hitsi on riittävän luja ja kestävä siihen kohdistuvia erilaisia kuormituksia vastaan riittävällä luotettavuudella. Laadunvarmistus ei koske pelkästään lopullista hitsiä, vaan se alkaa tuotteen suunnittelusta ja voi jatkua aina käyttöön asti. Näitä toimintoja ohjaavat hitsauksen laatujärjestelmät. Loviisan voimalaitoksella on käytössä ISO 3834 -laatustandardin mukainen toimintajärjestelmä kattavilla laatuvaatimuksilla eli standardin osa 2. Se antaa ohjeet laadun tarkkailuun ja dokumentoitujen toimintaohjeiden noudattamiseen. (Lukkari, 2002; SFS, 2013.)

4.1 Hitsauksen laatu

Hitsauksen hyvä laatu saavutetaan laatimalla yritysکوhtainen laatujärjestelmä, jossa on huomioitu laaduntuottokelijät ennen hitsausta, sen aikana ja sen jälkeen. Hitsauksen laaduntuottokelijät on esitetty kuvassa 13. Kuparia hitsattaessa erityistä huomioita tulisi niistä kiinnittää ennen hitsausta kuparin ominaisuuksien takia tavanomaisesta poikkeavaan suunnitteluun ja esivalmisteluun sekä hitsauksen aikana ja sen jälkeen mitta- ja muodonmuutoksiin. Laadunvarmistus alkaa jo hitsauksen suunnittelussa, kun huomioidaan rakenteen vaatima laatutaso. Laadunvalvontaa toteutetaan hitsauksen aikana, jotta mahdolliset hitsausvirheet saadaan estettyä ja korjattua mahdollisimmat nopeasti. Laadunvalvontaan osallistuvat hitsauksen työnjohtajien lisäksi myös itse hitsaajat. Valmis hitsausliitos tarkastetaan rikkomattomilla ja rikkovilla menetelmillä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 55-56.)



Kuva 13. Laaduntuottotekijät hitsauksessa (Lepola & Makkonen, 2006, s. 55).

4.2 ISO 3834-2:n asettamat vaatimukset

ISO 3834 -järjestelmä voidaan toteuttaa kolmella eri tasolla, joista ISO 3834-2 on kattavin. Se on tarkoitettu sulahitsaukselle ja on sovellettavissa sekä konepajalla että asennuspaikalla. Erityistapauksissa voidaan vaatimuksia perustellusti lisätä tai poistaa,

mutta muutoin tulee standardin vaatimukset täyttää kokonaisuudessaan. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 6.)

Hitsauksen suunnitteluun sisältyy vaatimusten katselmus ja tekninen katselmus. Katselmuksissa käydään läpi esitetyt vaatimukset. Hitsauksen toteuttajan on varmistettava, että kaikki tarpeellinen tieto on saatavissa ennen työn aloittamista. Hitsauksen toteuttajan täytyy myös pystyä osoittamaan, että kaikki vaatimukset ja riittävä suunnittelu laatuun vaikuttaville toiminnoille voidaan täyttää. Vaatimusten katselmuksessa tarkastellaan yleisten vaatimusten lisäksi erilaiset lisävaatimukset, standardit, lakisääteiset vaatimukset ja viranomaisvaatimukset. Teknisessä katselmuksessa tarkastellaan tarkemmin hitsien yksityiskohdat, laatuvaatimukset, ympäristön vaikutus, pätevyudet, hitsausohjeet, menetelmät, tarkastukset, poikkeamat ja mahdollisten alihankkijoiden käyttö. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 8.)

Hitsaushenkilöstön tulee olla pätevää, ja henkilöstöä on oltava riittävästi suunnitteluun, suorittamiseen ja valvontaan. Hitsaajien ja hitsausoperaattorien tulee olla tehtävää työtä varten pätevoidettyjä. Käytettävissä tulee olla myös riittävä henkilöstö hitsauksen koordinoimista varten. Laatutoiminnoista vastaavien henkilöiden tehtävät ja vastuurajat tulee määrittellä selkeästi, sillä heillä tulee olla riittävät valtuudet toimenpiteiden suorittamiseksi. Tarkastukseen ja testaukseen tulee olla riittävästi pätevoidettyä henkilöstöä. NDT-tarkastajien (ainetta rikkomattoman tarkastuksen tekijöiden) tulee olla pätevoidettyjä, mutta silmämääräiselle tarkastukselle ei vaadita pätevoidintä. Vaikka pätevoidintä ei vaadita, tulee tarkastajien pätevyys työhön silti pystyä osoittamaan. Jos käytetään alihankkijaa, niin samat standardin mukaiset soveltuvat vaatimukset täytyy silti täyttää. Alihankkijalle tulee antaa kaikki asiaan kuuluvat tiedot katselmuksista. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 10.)

Hitsauksessa tulee olla saatavilla vaadittava tuotanto- ja testauslaitteisto. Tuotantoon vaadittavia laitteita ovat hitsausvirtalähteet ja muut koneet, leikkauslaitteet, railon valmistukseen ja pinnan viimeistelyyn käytettävät laitteet, esikuumennus- ja jälkilämpökäsittelylaitteet ja niihin liittyvät mittauslaitteet, ohjaimet ja kiinnittimet, tarvittavat nosto- ja käsittelylaitteet, hitsausaineiden säilytys- ja kuivauslaitteet sekä pinnan puhdistuslaitteet. Lisäksi saatavilla tulee olla turvalaitteet ja henkilösuojaimet,

jotka liittyvät suoraan valmistusprosessiin. Rikkovaa ja rikkomatonta aineenkoetusta varten tulee myös olla vaadittava laitteisto. Oleellisista laitteista tulee pitää luetteloa, josta selviää esimerkiksi suorituskyvyt ja mitat. Muut laitteet eritellään likimääräisesti laitetyyppin mukaan. Laitteiden tulee olla käyttötarkoitukseen sopivia, mutta hitsaus- ja kuumennuslaitteiden hyväksyntää ei yleensä vaadita, jos ei määritetä toisin. Uusille ja kunnostetuille laitteille tulee tehdä sopiva testaus, joka dokumentoidaan mahdollisuuksien mukaan sopivien standardien mukaisesti. Laitteiden huoltoa varten tulee olla dokumentoitu huoltosuunnitelma, jossa varmistetaan hitsausparametreihin vaikuttavien osien huoltotarkastus. Suunnitelma voidaan rajoittaa koskemaan vain laadun kannalta oleellisia kohtia. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 12-14.)

Hitsauksesta tulee laatia tuotantosuunnitelma, jossa käydään läpi hitsauksen menettely, olosuhteet, tarkastukset ja hallinnolliset asiat. Hitsausohjeet laaditaan niin, että ne soveltuvat tuotantoon ja niiden oikea käyttö on varmistettava. Hitsausohjeiden tulee olla hyväksytyjä ennen tuotantoa tuotestandardien tai spesifikaatioiden mukaisesti. Hitsausohjeiden lisäksi voidaan käyttää niiden pohjalta laadittuja työohjeita hitsaajan opastamiseen. Työohjeiden ei tarvitse olla hitsausohjeiden tavoin virallisesti hyväksytyjä. Lisäksi dokumentointiin tulee laatia erilliset menettelyohjeet, jotta laatuasiakirjoja voidaan laatia ja valvoa. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 14-16.)

Hitsausaineiden valvontaa varten tulee olla määritelty vastuut ja ohjeet. Hitsausaineet tulee testata eräkohtaisesti, jos niin on vaatimuksissa määritelty. Käsittelyssä ja varastoinnissa tulee olla ohjeet, jotka perustuvat hitsausainetoimittajan suosituksiin. Myös perusaineet tulee varastoida niin, että ne eivät vahingoitu ja pysyvät tunnistettavina. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 16.)

Hitsin jälkilämpökäsittelyn määrittäminen ja suorittaminen ovat valmistajan vastuulla. Jälkilämpökäsittelyä koskevat ohjeet tulevat laatia rakenteen, hitsin, tuotestandardien ja muiden vaatimusten mukaisesti. Tiedot jälkilämpökäsittelystä merkitään lämpökäsittelypöytäkirjaan, jonka pitää olla jäljitettävissä yksittäisiin tuotteisiin, ja josta ilmenee käytetty ohje. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 16.)

Vaatimukset tarkastuksesta ja testauksesta määräytyvät sopimuksen, tuotestandardin, hitsausprosessin ja rakenteen mukaan. Lisätestejä voidaan tehdä vapaasti eikä niiden kirjaamista vaadita. Ennen hitsausta tulee tarkastaa muun muassa aineiden tunnistettavuus, ohjeet, pätevyudet ja kiinnitykset. Hitsauksen aikana tarkastetaan sopivin välein hitsausparametrit, lämpötilat, muodonmuutokset ja hitsauksen suoritus. Hitsauksen jälkeen todetaan vaatimusten täyttyminen silmämääräisellä tarkastuksella, rikkovalla ja rikkomattomalla aineenkoetuksella sekä tarkastamalla rakenteen muoto. Tarkastuksen ja testauksen tila voidaan tarvittaessa ilmoittaa rakenteessa merkinnällä tai jäljitettävyysskortilla. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 16.)

Poikkeamien takia on ryhdyttävä toimenpiteisiin, jotta ne eivät toistuisi. Kun rakennetta korjataan, tulee sopivien ohjeiden kuvaus olla käytettävissä, ja kohde tarkastetaan ja testataan alkuperäisten vaatimusten mukaisesti. Mittaus-, tarkastus- ja testauslaitteiden kalibrointi ja hyväksyminen ovat valmistajan vastuulla. Laadun arvioimiseen käytetyt laitteet tulee tarkastaa ja kalibroida tai hyväksyä säännöllisin väliajoin. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 20.)

Tunnistettavuus, jäljitettävyyys ja laatuasiakirjojen hallinta tulee huomioida kaikissa valmistuksen vaiheissa. Aineet, ohjeet, korjaukset, tilapäiset kiinnitykset, hitsit ja tarkastajat tulevat olla jäljitettävissä ja tunnistettavissa dokumentaatiosta. Laatuasiakirjoja tulee säilyttää vähintään viisi vuotta, jos ei toisin sovita tai ei ole toisin määritetty. Laatuasiakirjojen tulee soveltuvin osin sisältää katselmusten pöytäkirjat, hitsausaineiden ja materiaalien todistukset, hitsausohjeet ja niiden hyväksynnän pöytäkirjat, laitteiden huoltoreportit, pätevyystodistukset, tuotantosuunnitelmat, lämpökäsittelyjen ohjeet ja todistukset, mittauksen ja testauksen ohjeet ja pöytäkirjat sekä korjausten pöytäkirjat ja poikkeamaraportit. Tarvittaessa voidaan vaatia myös muita asiakirjoja. (SFS-EN ISO 3834-2, 2006, s. 20-22.)

4.3 Hitsiluokkavaatimukset

Kupareilla hitsiluokkavaatimukset määräytyvät alumiineja koskevan standardin eli ISO 10042:n mukaan. Hitsauksen menetelmäkokeen tulokset on hyväksytty, kun ne täyttävät hitsausvirheiden osalta standardin mukaisen B-luokan vaatimukset lukuun ottamatta korkeaa kupua päittäis- ja pienahitseille, ylisuurta a-mittaa sekä korkeaa juurikupua.

Näille riittää luokan C mukaiset vaatimukset. Rikkovan aineenkoetuksen tulosten käsittely määritetään niitä koskevissa standardeissa. NDT-menetelmien hyväksymisrajojen ja standardin ISO 10042 mukaisten hitsiluokkien keskinäinen riippuvuus annetaan standardissa ISO 17635 eli rikkomattoman aineenkoetuksen yleisohjeessa metallisille materiaaleille. (SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 30-32.)

Silmämääräisessä tarkastuksessa hitsiluokan hyväksymisrajat ovat standardissa ISO 10042 mainitut vaatimukset lukuun ottamatta edellä mainittuja poikkeuksia kuparien kohdalla. Tunkeumanestetarkastuksessa B-luokkaan vaadittu raja ISO 23277:n mukaisesti on 2 X. Myös C-luokkaan vaadittu raja on 2 X, mutta D-luokassa riittää 3 X. Radiografisissa tarkastuksissa B-luokkaan vaaditaan ISO 10675-2:n mukainen hyväksymisraja 1, C-luokkaan 2 ja D-luokkaan 3. Muita NDT-tarkastusmenetelmiä ei sovelleta menetelmäkokeissa kupareille, ellei erityiset lisävaatimukset niin edellytä. (SFS-EN ISO 17635, 2010, s. 20-22; SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 22.)

4.4 Metallurginen laatu

Kuparin hitsausmetallurgiseen laatuun vaikuttavat tyypillisesti eniten muodostuneet oksidit, rakeenkasvu perusaineessa, huokokset hitsissä sekä lisäaineen huono seostuminen perusaineeseen ja huono liittyminen lämmön johduttua liian nopeasti pois hitsistä. Hitsauksessa syntyneellä tai materiaalissa valmiiksi olevalla kuparioksidilla on hitsin laatua heikentävä vaikutus, jos kuparioksidi pääsee kasautumaan jatkuviksi muodostumiksi. Pienellä määrällä tasaisesti jakautunutta kuparioksidia ei kuitenkaan ole suuria vaikutuksia liitoksen ominaisuuksiin. (Mosberg et al., 1951, s. 7.)

Kuparioksidi muodostaa vedyn kanssa reagoidessaan vettä. Hitsauksen aiheuttamassa korkeassa lämpötilassa vesi höyrystyy. Koska vesihöyry liukenee huonosti kupariin, se muodostaa kuplia tai kaasutaskuja. Kuparioksidit ovat yleensä raerajoilla, jolloin syntyneet kuplat aiheuttavat rakeita erottavia voimia, jotka taas aiheuttavat halkeamia rakenteeseen. Suojakaasusta huolimatta ilmankosteudesta voi päätyä vetyä hitsisulaan ilmaan kautta. (Lin, Chang & Wu, 2014, s. 301-303.)

Kuparin raekolla on suuri merkitys sen metallurgiseen laatuun. Kun kuparin raekoko pienenee, siitä tulee lujempaa ja raekoon kasvaessa päinvastoin. Kun raekoko on

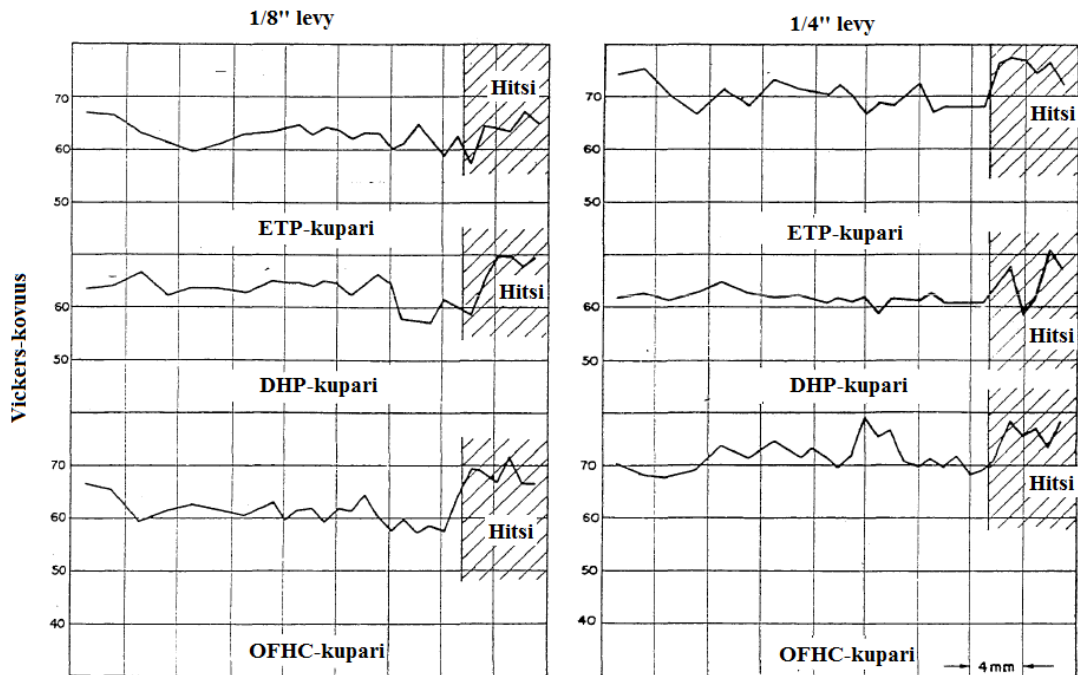
pienempi, dislokaatiot pystyvät liikkumaan lyhyemmän matkan, jolloin materiaali pystyy vastustamaan tehokkaammin plastista muodonmuutosta. Raekoko vaikuttaa lisäksi kuparin kovuuteen ja pinnan ulkonäköön. (CDA, 2015c.)

Raekoon ja kovuuden välistä yhteyttä voidaan kuvata Hall-Petchin yhtälöllä (Sun et al., 2000, s. 82):

$$H = H_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Lopullinen kovuus H saadaan lisäämällä vakiokovuuteen H_0 materiaalikohtainen vakio k jaettuna rakeen läpimitan d neliöjuurella. Kovuus on siis sitä suurempi, mitä pienempi raekoko on. Hall-Petchin yhtälö on kokeellisesti havaittu ja sitä on pidetty pätevänä 20 nm:n raekoosta ylöspäin. Kuitenkin sisäisillä jännityksillä, faasien sijoittumisella ja dislokaatioiden tiheydellä voi joissain tapauksissa olla suurempi vaikutus kuparin kovuuteen kuin raekoolla. Hyvin pienten raekokojen kohdalla Hall-Petchin yhtälön mukainen suhde esiintyy kuparilla vain silloin, kun koekappaleiden muut mikrorakenteelliset ominaisuudet raekokoa lukuun ottamatta ovat samanlaiset. (Sun et al., 2000, s. 82-87; Larkiola, 2011, s. 3; Jabbari & Tutum, 2013, s. 1-4; Pashazadeh, Masoumi & Teimournezhad, 2013, s. 290.)

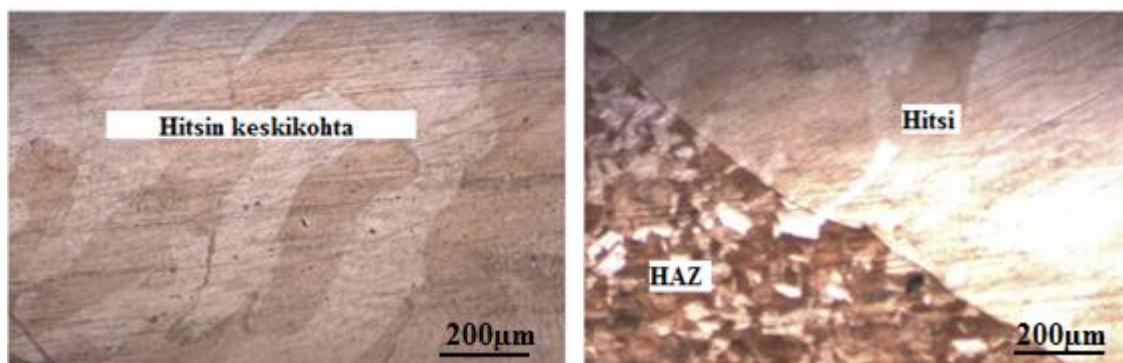
Vaikka kuparin rakeenkasvu olisi selkeää, kovuudella ja mittauspisteen etäisyydellä hitsistä ei siis välttämättä ole suoraa yhteyttä. Kupari voi muokkautua hitsauksen aikana epätasaisen kuumenemisen aiheuttamien muodonmuutosten takia, jolloin kasvaneen raekoon aiheuttama pehmeneminen saattaa kumoutua. Muokkautumisen ja rakeenkasvun yhteisvaikutuksen seurauksena kuparin kovuus saattaa joko laskea tai nousta. Kovuuden epäsäännöllisestä jakaumasta huolimatta perusaineen puolella kovuus yleisesti laskee huomattavan rakeenkasvun seurauksena erityisesti kaasuhitsauksessa. Kuvassa 14 on esitetty kuparilevyjen pintojen kovuusjakaumat deoksidoidulla puikolla hitsaamisen jälkeen. ETP tarkoittaa happipitoista kuparia, DHP fosforilla deoksidoidua kuparia korkealla fosforipitoisuudella ja OFHC hapetonta kuparia korkealla sähkönjohtavuudella. (Mosberg et al., 1951, s. 4-7.)



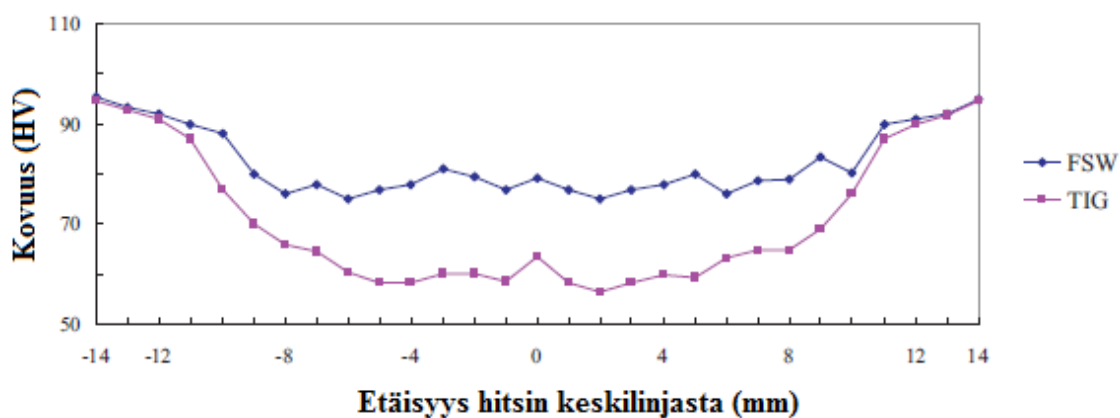
Kuva 14. Kuparin kovuusjakaumat puikkohitsauksen jälkeen (mukaillen: Mosberg et al., 1951, s. 4).

TIG-hitsauksessa kuparin kovuus tavallisesti laskee liitoksessa perusaineeseen verrattuna. FSW-hitsauksessa kovuus saattaa laskea tai kasvaa riippuen työkalun pyörimisnopeudesta, joka vaikuttaa lämpötilaan ja siihen, millä mekanismeilla hitsi muodostuu. Hitsauksessa syntyneiden dislokaatioiden ja jännitysten takia FSW-hitsit eivät usein noudata Hall-Petchin yhtälöä kovuuden ja raekoon suhteen. TIG-hitsauksessa nopea lämpeneminen ja jäähtyminen tekevät rakeista pidempiä hitsissä. Hitsin ja HAZ:n (hitsin muutosvyöhykkeen) raja on myös selkeämpi kuin FSW-hitsauksessa, koska hitsissä on huomattavasti suurempi raekoko, mikä laskee hitsin lujuutta ja kovuutta. HAZ:n hienon raekoon takia muodonmuutoskyky on TIG-hitsauksessa kuitenkin pienempi. FSW-hitsauksessa liitoksen lujuus laskee hitsialueella, mutta lujuus jakautuu siellä kuitenkin tasaisesti. TIG-hitsauksessa lujuus ei jakaudu yhtä tasaisesti, vaan murtuma alkaa hitsin keskeltä, jossa lämpövaikutus on ollut suurinta. TIG-hitsauksessa liitoksen iskutilaus laskee merkittävästi perusaineeseen verrattuna toisin kuin FSW-hitsauksessa, jossa se nousee. Kuvassa 15 on esitetty sularaja TIG-hitsatussa mikrorakenteessa 3 mm paksussa hapettomassa kahdella palolla lisäaineen kanssa hitsatussa kuparilevyssä. Kuvassa 16 on verrattu TIG-hitsatun levyn

kovuusjakaumaa vastaavanlaiseen FSW-hitsattuun levyyn. (Lin, Chang & Wu, 2014, s. 298-300; Jabbari & Tutum, 2013, s. 1-4.)



Kuva 15. Hitsi ja HAZ TIG-hitsatussa kuparilevyssä (mukaillen: Lin, Chang & Wu, 2014, s. 300).

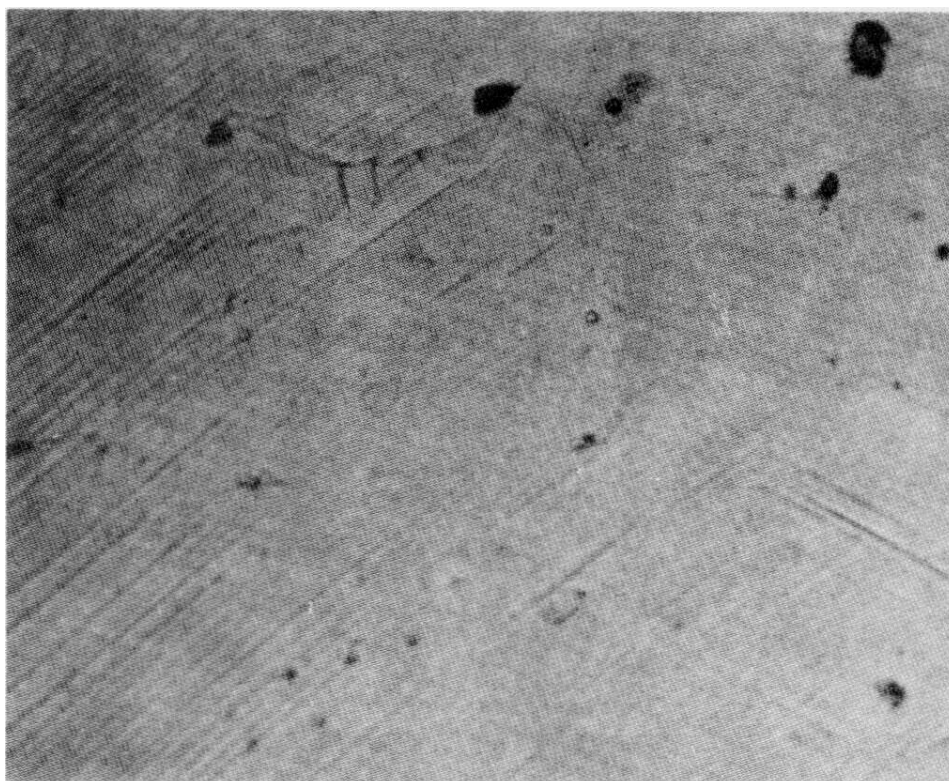


Kuva 16. Kuparin kovuusjakauma TIG-hitsattuna kahdella palolla verrattuna FSW-hitsaukseen (mukaillen: Lin, Chang & Wu, 2014, s. 299).

Puhtaalla kuparilla raekoko vaikuttaa iskusitkeyteen. Kun raekoko on pieni, iskusitkeys on suuri ja kun raekoko on suuri, iskusitkeys on pieni. Kuparin ja kupariseosten lujuus ja sitkeys tavallisesti kasvavat lämpötilan laskiessa, ja iskusitkeys pysyy hyvänä 20 kelviniin asti, jota alemmissa lämpötiloissa myös myötölujuus laskee hieman. (CDA, 2015b.)

Kupariseoksilla ominaisuudet ja metallurginen laatu määräytyvät seosaineiden lopullisella sijoittumisella kuparin pintakeskiseen kuutiohilaan. Seosaineiden atomit voivat korvata kupariatomeja hilassa, yhdistyä kuparin kanssa muodostaen faaseja tai

jähmettymällä isommiksi alueiksi kuparirakeiden väliin. Tinapronseissa tina-atomit korvaavat kupariatomeja hilassa, jolloin atomien etäisyydet vaihtelevat hilassa ja se lujittuu. Hilarakenne pysyy kuitenkin edelleen pintakeskisenä kuutiohilana. Yksifaasiseksi jähmettyneet tinapronssit ovat sekä lujuus- että sitkeysominaisuuksiltaan hyviä, joten niitä käytetään vaativissa kohteissa kuten esimerkiksi ydinreaktoreiden merivesijärjestelmissä. Yleensä yli 11 % tinalla seostetuissa pronseissa osa seoksen alfafaasista muuttuu jäähtyessä deltafaasiksi. Deltafaasissa on huomattavasti enemmän tinaa, joten se on kovempaa ja lujempaa, mutta ei yhtä sitkeää. Deltafaasia voidaan erottaa mikrokuvista selvästi erottuvissa tummissa saarekkeissa ja se säilyy rakenteessa paremmin nopeassa jäähtymisessä. Kuvassa 17 on esitetty tinapronssin mikrorakennekuva, jossa näkyy deltafaasia. Kovuuden kasvun myötä myös kulumisenkesto paranee. Monet alumiinipronssit ja mangaanipronssit saavat kovuutensa ja lujuutensa vastaavalla tavalla, vaikka mekanismit ovat hieman erilaisia. Kupariseosten hitsausmetallurginen laatu määrittyy siis faasien muodostumisen ja sijoittumisen mukaan. Mikrorakenteeseen levinneet kovemmat ja lujemmat faasit toimivat ikään kuin ankkureina, jotka rajoittavat liukutasojen liikkeitä. (Nielsen, 2015.)



Kuva 17. Deltafaasia tummissa saarekkeissa tinapronssin mikrorakenteessa (Nielsen, 2015).

Hitsin metallurginen laatu voidaan todeta makro- ja mikrorakennetutkimuksilla. Makrorakennetarkastuksessa suurennos on tyypillisesti enintään noin 20-kertainen, mutta mikrorakennetarkastuksessa voidaan käyttää jopa 1000-kertaista suurennosta. Tarkastusten dokumentointi tehdään kuvaus- ja mittausohjelmistoja käyttäen. Mikrorakennetarkastuksessa tutkitaan tarkemmin perusaineen ja hitsin eri vyöhykkeiden mikrorakenteita, jolloin hitsauksen vaikutukset materiaaleihin ja metallurginen laatu tulevat paremmin selville. Tarkastaja arvioi kokeissa ammattitaitoonsa nojautuen mikrorakenteen asianmukaisuuden. (Nieminen, 2004, s. 39.)

Hitsin makro- ja mikrorakennetta tutkitaan tekemällä hitsistä hie, josta arvioidaan liitoksen rakennetta. Makro- ja mikrohiettutkimuksen koekappaleita voidaan tutkia syövytyksellä tai ilman syövytystä. Syövyttämällä kuitenkin voidaan tutkia koekappaleista enemmän ominaisuuksia. Makrohiettutkimuksessa ei havaita raerajoja, raerakenteita tai erkautumista, joten niitä varten täytyy tehdä mikrohiettutkimus. Koekappaleet tehdään ja tutkitaan esimerkiksi standardin ISO 17639 mukaisesti. (SFS-EN ISO 17639, 2013, s. 10.)

5 HITSUKSEN TOTEUTTAMINEN

Laatuvaatimukset, tuotestandardit, viranomaisvaatimukset ja muut spesifikaatiot vaativat tiettyjä edellytyksiä hitsauksen toteuttamiselle. Laatustandardit edellyttävät asianmukaisten hitsaajan pätevyyttä ja hitsausohjetta koskevien standardien noudattamista, jolloin ne täytyy ottaa osaksi hitsaavaa toimintaa, kun kattavat laatuvaatimukset halutaan täyttää.

5.1 Hitsaajien päteyttäminen

Hitsaus on yksi metalliteollisuuden vaativimmista ammateista, joten hitsien laadun varmistamiseksi vaaditaan hitsaajilta osoitusta pätevyydestä työhön. Monet sovellusstandardit edellyttävät hitsaajilta standardin mukaisten pätevyyskokeiden avulla hankittuja pätevyystodistuksia. Hitsaajien tulee kyetä seuraamaan kirjallisia ja suullisia ohjeita ja heillä tulee olla riittävä käytännön kokemus hitsausprosesseista, materiaaleista ja turvallisuusmenettelyistä. Hitsaajan pätevyyskoe koostuu hitsauskokeesta ja koekappaleen testauksesta. Myös tietopuolinen koe voidaan suorittaa, mutta sitä ei yleensä vaadita. Hitsauskokeella voidaan samalla hyväksyttää hitsausohje, jos menetelmäkoevaatimukset täyttyvät. (SHY, 2008a, s. 1.)

Hitsaajan pätevyyskoestandardin mukaisiin kuparimetalleihin luetaan puhdas kupari eli ryhmä W 31, messingit (W 32), tinapronssit (W 33), nikkelikuparit (W 34), alumiinipronssit (W 35) ja uushopeat (W 36). Levyille vaaditaan yksi koekappale hitsausasentoa kohti. Putkille vaaditaan vähintään 150 mm:n hitsauspituus, mutta ei enempää kuin kolme kappaletta. Pätevyysalueen yleissääntönä on, että koe pätevoittää myös kaikki vastaavanlaiset helpommiksi katsotut hitsaukset. Kuparin hitsauskokeiden pätevyysalueet on annettu standardissa ISO 9606-3. (SFS-EN ISO 9606-3, 1999, s. 8.)

Pätevyyskoetta seuraa osapuolten hyväksymä tai määräysten vaatima kokeen valvoja. Koekappaleet tulee merkitä ennen hitsausta valvojan ja hitsaajan tunnistusmerkinnällä. Kokeen valvoja voi keskeyttää hitsauskokeen, jos olosuhteet eivät ole asianmukaiset tai jos hitsaajalla ei ole edellytyksiä saavuttaa vaatimuksia. Hitsaaja saa korjata pintapalkokerroksen pintavirheitä lukuun ottamatta vähäiset virheet kokeen valvojan

luvalla. Kaikki hitsit tarkastetaan silmämääräisesti hitsauksen jälkeen. Lisäksi voidaan myös tehdä tunkeumanestetarkastus. Silmämääräisesti hyväksytylle koekappaleelle tehdään radiografinen kuvaus, taivutus- tai murtokoe ja haluttaessa myös makrohietutkimus. (SFS-EN ISO 9606-3, 1999, s. 14-16.)

Jos jokin koekappaleista ei täytä standardin edellyttämiä vaatimuksia, tulee hitsaajan hitsata uusi koekappale. Hitsaajan tulee kuitenkin suorittaa lisäharjoitusta, jos todetaan, että hylkääminen johtuu hitsaajan ammattitaidosta. Hyväksytyt pätevyyskoe kirjataan hitsaajan pätevyystodistukseen. (SFS-EN ISO 9606-3, 1999, s. 24.)

Hitsausoperaattoreilla pätevyyskoetta tulee täydentää tietopuolisella toimivuuskokeella, jotta voidaan varmistua siitä, että hitsausoperaattori ymmärtää hitsausaseman toiminnan. Hitsaustekniikkaan liittyvää tietopuolista koetta ei vaadita, mutta myös sillä voidaan täydentää pätevyyskoetta. Toimivuuskokeessa testataan hitsausoperaattorin tietämystä hitsausohjeiden vaatimuksista ja parametreista, railonmuodoista, hitsausvirheistä, pätevyysalueista sekä prosessin käytöstä. (SFS-EN ISO 14732, 2013, s. 16-20.)

5.2 Hitsausohjeet

Hitsausohje eli WPS on asiakirja, jossa esitetään yksityiskohtaisesti hitsausmenetelmän toistettavasti suorittamiseen vaadittavat tiedot. Se siis sisältää esimerkiksi hitsausparametrit, käytettävän hitsausprosessin, railon muodon ja hitsausasennon. Hitsausohje on laadunhallinnan työkalu, sillä sen avulla varmistetaan hitsauksen oikea suoritus. Hitsausohje toimii myös hitsaajalle avustavana työkaluna. Hitsaajan tulee kuitenkin tarkastaa hitsausohjeen käytännöllisyys ja korjata mahdolliset epäkohdat. (SHY, 2008b, s. 1.)

Hitsausohje saatetaan ottaa käyttöön esimerkiksi paremman laadun saavuttamiseksi ja asiakkaan tai viranomaisen vaatimusten takia. Hitsausohjeen käyttö kuitenkin vähentää myös hitsausvirheitä, yhtenäistää koulutusta ja toimii dokumentaation tukena. Kattavilla laatuvaatimuksilla sovellettaessa se on välttämätön laadunhallinnan työkalu. Ennen kuin hitsausohje voidaan ottaa käyttöön tuotannossa, tulee se hyväksyttäväksi. Hyväksyminen voi tapahtua käyttämällä hyväksytyjä hitsausaineita, aikaisemmalla kokemuksella,

standardimenetelmällä, menetelmäkokeella tai esituotannollisella kokeella. (SHY, 2008b, s. 1.)

5.3 Menetelmäkokeet

Hitsauksen menetelmäkoe on yksi tapa pätevoittää hitsausohje. Se antaa hyvät tiedot hitsatun liitoksen ominaisuuksista ja paremmat mahdollisuudet menetelmän käyttökelpoisuuden arviointiin kuin muut pätevoitystavat. Menetelmäkokeella tehty pätevoitys myös yleensä antaa laajimman käyttöalueen hitsausohjeelle. Menetelmäkokeessa tehdään alustavan hitsausohjeen eli pWPS:n mukaisesti tuotannossa käytettävää liitosmuotoa edustava koekappale. Koekappaleiden vähimmäismitat ja niiden kattamat pätevyysalueet on kerrottu standardisarjassa ISO 15614. Tuotestandardit tai muut spesifikaatiot saattavat edellyttää myös joitain lisäkokeita, mikä tulee huomioida koekappaleita valmistaessa. Kappaleisiin tulee merkitä materiaalin tunnus, sulatusnumero ja tarvittaessa valssaussuunta. Esivalmistelut ja hitsaus suoritetaan tuotantohitsausta vastaavissa olosuhteissa. Koehitsausta valvoo valmistajan oma edustaja, ulkopuolinen valvoja tai jossain tapauksissa samanaikaisesti useamman eri tahon edustajia. Kokeen valvoja valvoo myös koekappaleiden testausta. (Nieminen, 2004, s. 33-34.)

Kuparin ja kupariseosten kaasu- ja kaarihitsausta koskevat menetelmäkoevaatimukset on kerrottu standardissa ISO 15614-6. Esimerkiksi teräksestä poiketen kuparimetalleille ei tehdä iskutkeys-kokeita eikä ultraäänitarkastusta. Kupari ei ole magneettinen, joten myöskään magneettijauh tarkastusta ei tehdä. Myöskään kovuuden mittausta ei vaadita. Valukappaleilla tai valetun ja muokatun kappaleen yhdistelmällä taivutuskoe voidaan korvata murtokokeella. Tuotestandardit ja muut hitsausta koskevat spesifikaatiot saattavat kuitenkin vaatia lisätestauksia kuten pitkittäisen vetokokeen, puhtaan hitsiaineen taivutuskokeen, korroosiokokeen, kemiallisen analyysin tai kovuuskokeen. Kuparimetalleille ei ole mainittu menetelmäkoestandardissa minkään eripariliitoksen pätevyysaluetta, vaan kaikki eripariliitokset tulee pätevoittää erillisellä menetelmäkokeella, joka ei pätevoitä mihinkään muihin perusaineisiin. Menetelmäkoestandardi ja pätevyyskoestandardi eroavat jonkin verran pätevyysalueissa, koekappaleen mitoissa ja vaadituissa testauksissa, joten haluttaessa pätevoittää hitsaaja samalla kokeella tulee ottaa molempien standardien vaatimukset

huomioon. Taulukossa 5 on esitetty kuparien testaukset menetelmäkokeissa. (SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 22-42.)

Taulukko 5. Testauksen laajuus kupareilla (SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 22).

Koekappale	Testaus	Testauksen laajuus	Alahuomautus
Läpihitsattu päittäisliitos – (kuvat 1, 2 ja 3)	Silmämääräinen tarkastus Radiografia Tunkeumanestetarkastus Poikittainen vetokoe Poikittainen taivutuskoe Makrohietutkimus	100 % 100 % 100 % 2 koesauvaa 2 juuri- ja 2 pintataivutussauvaa 1 hie	– – – – a,) b,) c,) –
Läpihitsattu T-liitos – (kuva 4) Läpihitsattu putken haaraliitos – (kuva 5)	Silmämääräinen tarkastus Tunkeumanestetarkastus Makrohietutkimus	100 % 100 % 2 hiettä	d) d) d)
Pienahitsit – (kuvat 4 ja 5)	Silmämääräinen tarkastus Tunkeumanestetarkastus Makrohietutkimus	100 % 100 % 2 hiettä	d) d) d)
a) Taivutuskokeet ks. 8.4.3. b) 2 juuri- ja 2 pintataivutussauvan sijasta suositellaan 4 sivutaivutuskoesauvaa, kun $t \geq 12$ mm. c) Valetulle materiaaleille tai muokattu/valu- yhdistelmille taivutuskokeet voidaan korvata standardin ISO 9017 mukaisella murtokokeella. d) Määritetyt testit eivät anna tietoa hitsausliitoksen mekaanisista ominaisuuksista. Kun tällaiset ominaisuudet ovat oleellisia sovellutuksen kannalta, tehdään lisäkokeita, esim. päittäishitsille.			

Jos koekappale hylätään silmämääräisessä tarkastuksessa tai NDT-tarkastuksessa, hitsataan uusi koekappale, jolle tehdään samat testaukset. Jos uusi koekappale ei täytä vaatimuksia, on menetelmäkoe silloin hylätty. Jos jokin koesauva ei täytä vaatimuksia, koe uusitaan jokaista hylättyä sauvaa kohti kahdella uudella sauvalla. Menetelmäkoe on hylätty, jos yksikin uusista koesauvoista tulee hylätyksi. Vaatimusten määrittämisen helpottamiseksi on usein aiheellista lähettää testaajalle ainestodistus, vaikka sitä ei standardeissa edellytetäkään. Näin voidaan varmistaa, että testaajalla on tiedossa oikea materiaalilaatu. Kerättyjen tietojen ja testausten perustella laaditaan menetelmäkoepöytäkirja eli WPQR. Jos testaustulokset ovat hyväksyttäviiä eikä muita hylkäämiseen johtavia syitä ilmene, valvoja vahvistaa menetelmäkoepöytäkirjan. WPQR:n ja pWPS:n pohjalta voidaan sen jälkeen laatia varsinainen hitsausohje. Tarvittaessa valvoja voi vahvistaa myös hitsausohjeen hyväksymisen. (Nieminen, 2004, s. 35-36.)

6 YDINVOIMALAITOKSEN ERITYISVAATIMUKSET HITSAUKSELLE

Hitsauksen vaatimukset eroavat ydinvoimalaitoksissa joissain tapauksissa tavanomaisemmista kohteista. Säteilevä ympäristö, tarkat turvallisuustoimet ja ydinenergialain mukaisesti laaditut YVL-ohjeet asettavat lisävaatimuksia, jotka tulee huomioida hitsauksessa ja sen suunnittelussa.

6.1 Metallurgiset erityisvaatimukset

Ydinvoimalaitoksissa pyritään välttämään kobolttipitoisten materiaalien käyttöä primääripiirissä, sillä koboltti aktivoituu neutronisäteilyn vaikutuksesta ja nostaa laitoksen aktiivisuustasoa. Kun koboltti-59 kulkeutuu reaktorin sydämeen, se muuttuu 58- ja 60-isotoopeiksi. Koboltti-58 katoaa nopeasti piiristä, sillä sen puoliintumisaika on 78 päivää. Koboltti-60:n puoliintumisaika on 5,27 vuotta, joten se aiheuttaa merkittävämpiä haittoja laitoksen työntekijöille. Tämän takia kobolttia sisältäville kohteille on pyritty löytämään korvaavia materiaaleja. (Kosonen, 1996, s. 7.)

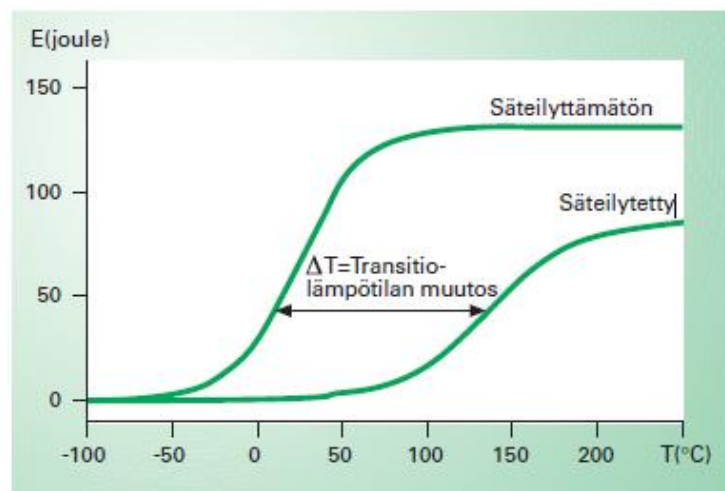
Koboltin tavoin myös antimoni aktivoituu neutronisäteilyn vaikutuksesta primääripiirissä. Antimonia on käytetty muun muassa mekaanisten tiivisteiden metalliseoksissa, joista sitä on vapautunut käyttöjakson aikana putkistoihin, jolloin se on aiheuttanut noin puolet laitoksen työntekijöiden säteilyannoksista Loviisan ydinvoimalaitoksella. Myös antimonin käyttöä on pyritty vähentämään, ja ensimmäiset antimonittomat korvaavat tiivisteet otettiin pääkiertopumppujen antimonipitoisten tiivisteiden tilalle Loviisassa käyttöön 2012. (Fortum, 2014.)

Muita aktivoitumisen takia huomioitavia materiaaleja ovat nikkeli ja hopea. Primääripiirissä ja sen kanssa kosketuksissa olevissa laitteistoissa käytettävät rakenneaineet tulisi valita niin, että nikkeli-, koboltti-, hopea- ja antimonipitoisuudet ovat mahdollisimman pieniä, jotta vältytään erityisesti aktivoitumistuotteilta ^{58}Co (koboltti-58-isotooppi), ^{60}Co (koboltti-60-isotooppi), $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (metastabiili hopea-110-isotooppi), ja ^{124}Sb (antimoni-124-isotooppi). Samat materiaalivalintojen kriteerit tulee huomioida myös hitsausaineissa. Materiaalivalinnat, valintoja koskevat

yksityiskohtaiset tiedot ja materiaalien vaikutus aktiivisuustasoon tulee esittää turvallisuusselosteessa ja rakennesuunnitelmissa. (Stuklex, 2013a.)

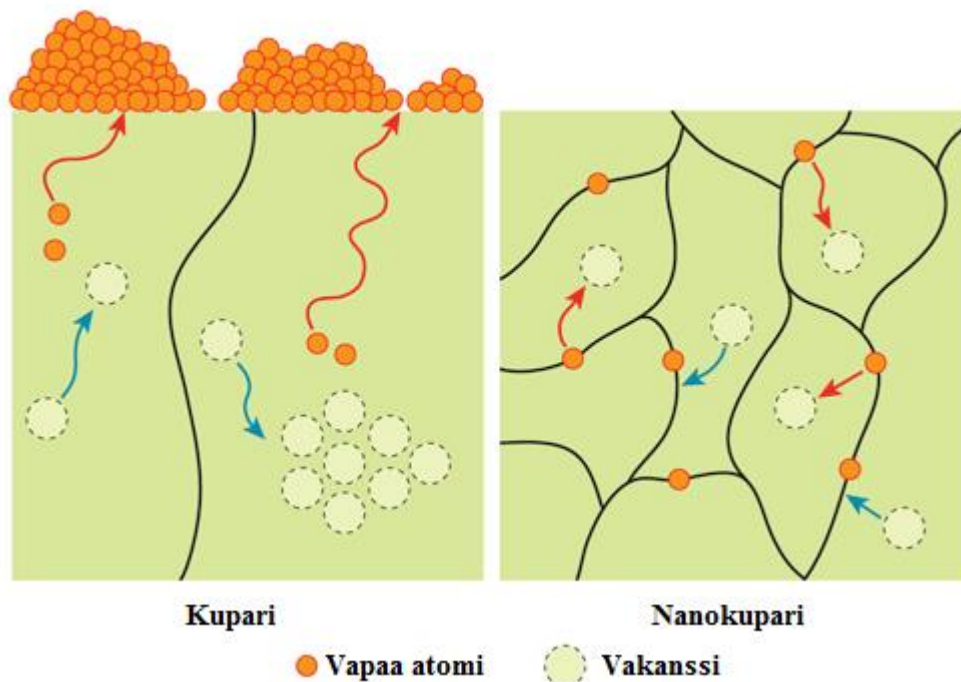
Kuparilla on kaksi vakaata ja useita epävakaita aktiivisia isotooppeja. Kuitenkin aktiivisten kuparin isotooppien puoliintumisajat ovat esimerkiksi kobolttiin verrattuna lyhyitä. Pisin puoliintumisaika on ^{67}Cu -isotoopilla, jolla se on 61,83 tuntia. ^{67}Cu on myös samalla yksi vaikeimmista isotoopeista valmistaa keinotekoisesti ja sitä syntyy reaktoreissa lähinnä sinkin säteilyttämisen seurauksena. ^{64}Cu -isotoopilla puoliintumisaika on 12,7 tuntia ja se on hyvin epätavallinen. ^{67}Cu -isotoopin tavoin ^{64}Cu -isotooppia syntyy ydinreaktoreissa sinkistä. Muilla kuparin isotoopeilla puoliintumisajat ovat selvästi lyhyempiä. (Firestone & Ekström, 2004; Asabella et al., 2014; NIDC, 2015.)

Ydinvoimalaitoksen rakenteissa tulee myös huomioida säteilyhaurastumisen vaikutus. Ferriittisillä teräksillä transitiolämpötila on tyypillisesti alhainen käyttölämpötilaan nähden, mutta neutronisäteilyn aiheuttamat mikrorakennemuutokset saavat transitiolämpötilan vähitellen nousemaan eli tapahtuu transitiolämpötilan säteilysiirtymä. Teräksen sitkeysominaisuudet voidaan kuitenkin palauttaa hehuttamalla. Käytännössä säteilyhaurastumisen riskit koskevat vain reaktoripainesäiliöiden hitsejä ja reaktorin sisäosia. Kuvassa 18 on mitattu säteilyn aiheuttama transitiolämpötilan nouseminen hitsiä vastaavissa koekappaleissa kolmen vuoden käytön jälkeen Loviisa 1:n reaktoripainesäiliössä. (STUK, 2004a, s. 119-120.)



Kuva 18. Säteilyhaurastumisen vaikutus iskusitkeyteen (STUK, 2004a, s. 120).

Myös kupari on altis säteilyn aiheuttamalle haurastumiselle. Kun neutronit osuvat kupariin, aiheutuu ketjureaktio, jonka seurauksena kupariatomeja irtoaa hilasta. Suurin osa niistä palautuu takaisin paikoilleen, mutta muutamat irtoavat hilasta pysyvästi. Jos kupari altistuu pidempään säteilylle, kerääntyvät hilasta irronneet atomit hiljalleen kappaleen pinnalle haurastuttaen materiaalia. Pinnalle siirtyneiden atomien takia kappaleen koko kasvaa, jolloin mittatarkkuus kärsii. Nanokupareilla vastaava ongelma on paljon pienempi, koska raerajoja on paljon enemmän, jolloin irronneet atomit eivät pääse niin helposti kappaleen pinnalle, vaan jäävät raerajoille "jumiin". Kun vakanssit ovat tarpeeksi lähellä, hilasta irronneet atomit täyttävät ne, jolloin materiaali korjaa itseään. Kuvassa 19 on esitetty säteilyn vaikutuksen periaate kuparilla ja nanokuparilla. (Saunders, 2010.)



Kuva 19. Säteilyn vaikutus kupariin ja nanokupariin (mukaiillen: Saunders, 2010).

6.2 Turvallisuusluokittelu

Ydinenergialain mukaan Säteilyturvakeskuksen eli STUK:n tulee Suomessa asettaa lain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat turvallisuusvaatimukset. Ydinvoimalaitos jaetaan erilaisiin järjestelmiin, jotka taas jaetaan rakenteisiin ja laitteisiin. Rakenteille ja laitteille määritetään turvallisuusluokka niiden

turvallisuusmerkityksensä perusteella. Uusien YVL-ohjeiden mukaan YVL-luokkia ovat 1, 2, 3 ja EYT eli luokka, joka ei ole ydinteknisesti turvaluokiteltu. Loviisan voimalaitoksella noudatetaan vielä vanhempia ohjeita, joissa on lisäksi luokka 4. (Stuklex, 2013b; STUK, 2000, s. 3.)

Turvallisuusluokka 1 on korkein luokitus. Siihen sisällytetään järjestelmät, joiden vioittuminen aiheuttaisi suoran uhan ydinreaktorin jäähdytykselle tai sammutukselle ja edellyttäisi turvajärjestelmien käyttöönottoa. Luokkaan 2 sisällytetään järjestelmät, joiden toiminta on välttämätöntä reaktorin onnettomuustilanteissa. Lisäksi siihen sisältyy järjestelmät, joiden viat tai vauriot estäisivät tuotannon jatkamisen ja samalla reaktorin jäähdyttämisen sekä järjestelmät, joiden toiminnan pettäminen aiheuttaisi hallitsemattomia vaaroja tai joiden vioittuminen seisokkitilanteessa aiheuttaisi reaktorin jälkilämmön poistamisen estymisen käyttötilassa. Turvallisuusluokkaan 3 sijoitetaan järjestelmät, joiden toiminta on luotettavuuden kannalta olennaista reaktorin sammutuksessa, alikriittisen tilan ylläpidossa, jäähdytyksessä, jälkilämmön poistossa ja käytetyn polttoaineen jälkilämmön poistossa. Lisäksi turvallisuusluokkaan 3 kuuluvat radioaktiivisten aineiden leviämiseen ja vakavien onnettomuuksien lieventämiseen liittyvät järjestelmät. Turvallisuusluokkaan 3 sisällytetään myös järjestelmät, joilla valvotaan edellä mainittuja toimintoja sekä turvallisuustoimintojen käyttöönottoa ehkäisevät järjestelmät. Turvallisuusluokkaan 4 sisällytetään järjestelmät, jotka eivät kuulu ylempiin turvallisuusluokkiin, mutta joiden vioista ja vaurioista voi aiheutua vaaraa ympäristölle tai turvallisuustoiminnalle säteilyn, paineen, liikkeen tai lämmön takia. Lisäksi turvallisuusluokkaan 4 sisällytetään esimerkiksi tietokone-, palontorjunta- ja tulvasuojausjärjestelmät. (STUK 2000, s. 4-5.)

EYT-luokkaa lukuun ottamatta kaikissa turvallisuusluokissa edellytetään rakenteiden ja laitteiden luetteloimista kaikissa luokitelluissa järjestelmissä. Myös EYT-luokitelluissa järjestelmissä painelaitteet ja järjestelmän osana olevat turvallisuusluokitellut laitteet tulee esittää luetteloissa. Turvallisuusluokat antavat lisävaatimuksia hitsaukseen ja hitsattujen rakenteiden suunnitteluun. (STUK, 2000, s. 6.)

6.3 STUK:n asettamat vaatimukset

Taulukossa 6 on STUK:n suorittamien valmistuksen tarkastusten laajuus turvallisuusluokittain eri kohteissa. STUK tekee tarvittaessa tarkastuskäyntejä toimipisteisiin, joissa tehdään vaativia hitsaustöitä tai lämpökäsittelyitä. STUK:lle tulee siis toimittaa selvitys eri valmistusvaiheista ja niiden ajankohdista tarkastuskäyntejä varten. STUK ei tarkasta vain hitsien laatua, vaan myös laatujärjestelmiä, rakenneaineita ja valmistusmenetelmien edellyttämiä päteväintejä taulukon 6 mukaisesti. Jos hitsauksessa käytetään alihankkijoita, tulee hitsaajien pätevyydestä varmistua esimerkiksi teettämällä hitsaajille työkokeita ja järjestämällä heille koulutusta valmistajan vaatimusten osalta. Teetetyistä työkokeista tulee myös laatia tallenteet. (STUK, 1999, s. 5-6.)

Taulukko 6. STUK:n valmistuksen tarkastusten laajuus turvallisuusluokittain (STUK, 1999, s. 7).

Laite	Laatu-järjestelmän tarkastus	Rakenneaineet ²⁾	Pätevöimiskokeet	Hitsaus	Lämpökäsittely
Painesäiliöt	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2
Putkistot ¹⁾	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2
Venttiilit toimilaitteineen	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1	1
Pumput moottoreineen ja dieselmoottorit	1 ja 2	1 ja 2	1 ja 2	1	1
Teräksinen suojakuori	2	2	2	2	2
Nosto- ja siirtolaitteet	3	—	3	3	—
Teräsrakenteet	2	—	2	2	—

1) Turvallisuusluokassa 2 putkistot $d \geq 100$ mm.

2) Hitsauslisäaineet turvallisuusluokassa 1.

Ydinvoimalaitosten mekaanisten laitteiden ja rakenteiden NDT-tarkastuksen saa tehdä vain STUK:n hyväksymä kolmas osapuoli. Tällaisia ovat NDT-testauslaboratoriot ja NDT-tarkastuslaitokset, joille on haettu hyväksyntä. STUK arvioi niiden toimintaedellytyksiä selvitysten ja tarkastuskäyntien perusteella. NDT-tarkastajan tulee todeta, etteivät rakenneaineet ole vioittuneet valmistuksen aikana tai hitsit poikkea rakennesuunnitelmassa asetetuista vaatimuksista. Erityisesti tarkastajan tulee kiinnittää huomiota hitsin tasaisuuteen, korkeuteen, reunahaavoihin, juurivirheisiin ja sytytysjälkiin. Lisäksi muotopoikkeamat sekä aputukien ja kannattimien asianmukainen poisto tulee todeta. Rikkova aineenkoetus tehdään akkreditoituissa testauslaitoksissa,

jotka STUK hyväksyy ydinvoimalaitosten testauksiin ilman erillistä hakemusta. (STUK, 2003, s. 4-5; STUK, 2008, s. 5.)

Putkistojen hitsauksessa tulee laatia yleistarkastussuunnitelma, josta käy ilmi periaatteet hitsausaineiden, esivalmistelujen ja menetelmien tarkastamiseksi. Siinä selvitetään valmistuksen ja valvonnan menettelyt sekä riippumattoman kolmannen osapuolen valvonta turvallisuusluokkien 1 ja 2 putkistoille. Hitsien sijoittelussa ja muotoilussa tulee varmistaa, että kunnonvalvonta ja tarkastus voidaan suorittaa esteettömästi. Lisäksi hitsien määrä tulee pitää mahdollisimman pienenä, jotta tarkastustarvekin olisi mahdollisimman pieni. Putkistojen hitsauksessa ja valmistamisessa saa käyttää vain rakennesuunnitelmassa eriteltyjä hyväksytyjä hitsausaineita ja materiaaleja. Valinnassa on aina huomioitava ympäristö- ja käyttöolosuhteiden vaikutus putkistoon. Tällaisia vaikutuksia ovat esimerkiksi säteily, korroosio sekä tarkastuksen ja valmistuksen asettamat edellytykset. Putkistossa käytettävien materiaalien valinnassa tulee myös huomioida, että austeniittisten valuterästen käyttö putkistojen osissa turvallisuusluokissa 1 ja 2 eli ole sallittua, jos niiden määräaikaistarkistuksia ei pystytä luotettavasti toteuttamaan. Muoviputkistot ovat sallittuja vain luokissa 3 ja 4. Lopullisen hitsausliitoksen tulee täyttää rakenneainetiedoissa annetut mekaaniset ja kemialliset vaatimukset. Hitsauksen toteuttajalla tulee olla kehittynyt laadunhallintajärjestelmä sekä asianmukaiset pätevyudet, laitteet ja menetelmät. Hitsausohjeiden tulee olla pätevoidettyjä menetelmäkokeilla. (STUK, 2006, s. 5-14.)

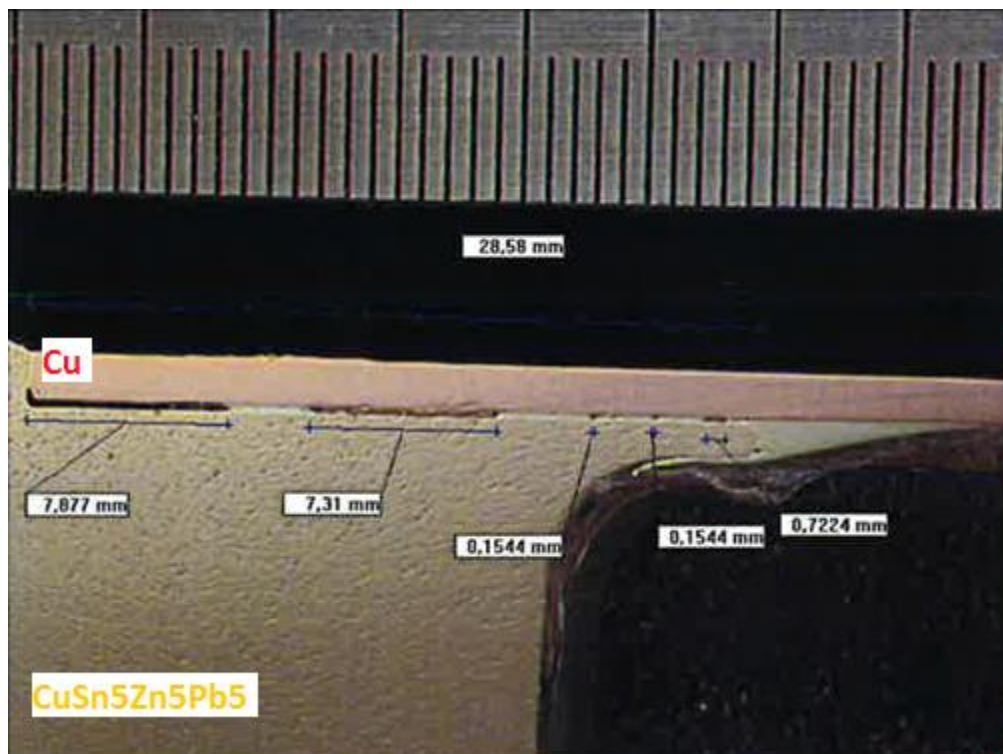
Putkistojen tavoin painelaitteissa tulee käyttää vain hyväksytyjä materiaaleja ja hitsausaineita, ja niiden käyttöolosuhteet tulee huomioida. Sekä ydinteknisesti turvaluokiteltujen että EYT-luokiteltujen painelaitteiden hitsausaineiden tulee olla luokiteltu luokittelustandardien mukaisesti. Hitsausaineiden ominaisuudet ja laadun tarkastaminen tulee esittää niitä koskevissa teknisissä spesifikaatioissa, joissa esitetään käyttötarkoituksen mukaan esimerkiksi hitsiaineen analyysi, vetolujuus, kuumalujuus ja iskusitkeys. Kemiallisessa koostumuksessa ja iskusitkeydessä tulee ottaa huomioon neutronisäteilyn vaikutus, jos hitsausainetta käytetään säteilyn vaikutusalueella. Säteilyn vaikutuksen alaisista hitseistä tulee laatia suunnitelma mekaanisten ominaisuuksien seuraamiseksi. Primääripiiriin kuuluvissa ja sen kanssa yhteydessä olevissa laitteissa tulee myös määritellä hitsausaineen aktivoituvien alkuaineiden sallitut enimmäismäärät.

Hitsausaineiden ja menetelmien soveltuvuus tulee todeta menetelmäkokeilla. Materiaalien ja hitsausaineiden valintaan vaikuttavat tekijät saattavat edellyttää standardeja laajemmat tarpeet aineenkoetukselle. Materiaalien ja hitsausaineiden koostumuksesta tulee olla aineodistukset. Turvallisuusluokissa 1 ja 2 vaaditaan paineenalaisille pääosille EN 10204:n mukaista vastaanottotodistusta 3.2 ja muille paineenalaisille osille todistusta 3.1. Muille kuin paineenalaisille osille riittää koetustodistus 2.2. Turvallisuusluokissa 3, 4 ja EYT vaaditaan paineenalaisille pääosille vastaanottotodistusta 3.1 ja muille osille koetustodistusta 2.2. Muille kuin paineenalaisille osille edellytetään luokissa 3 ja 4 koetustodistusta 2.2 ja luokassa EYT laatuvakuutusta 2.1. (STUK, 2004b, s. 3-8; Stuklex, 2013c.)

Painesäiliöillä on samanlaisia vaatimuksia kuin painelaitteilla ja putkistoillakin. Hitsien määrä tulee pitää mahdollisimman pienenä, ja hitsejä voimakkaasti säteilevissä painesäiliön osissa tulee välttää. Materiaalit ja hitsausaineet tulee olla hyväksytyjä painelaitteiden kanssa saman menettelyn mukaisesti. Hitsausohjeiden tulee myös olla menetelmäkokeilla hyväksytyjä. (STUK, 2005, s. 4-11.)

7 HITSAUSKOKEET

Alustavissa hitsauskokeissa tutkittiin kuparimetallien hitsausta käytettävissä olevilla hitsausaineilla ja laitteistoilla. Kokeiden tarkoituksena oli löytää sopiva menetelmä kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen hitsaamista varten ja testata hitsausta erilaisilla parametreilla. Kokeissa on käytetty tinapronssiputkea, jonka tarkoituksena on vastata tinapronssilaippaa, johon on muotoiltu putkimainen uloke. Vastaavanlainen juottamalla tehty liitos on esitetty kuvassa 20. Ongelmana juotetuissa koekappaleissa on ollut epätäydellinen liitoksen täytyminen. Hitsauskokeissa tutkittiin kuparimetallien käyttäytymistä hitsauksessa myös yleisesti, mutta niiden pääasiallinen tarkoitus oli löytää sopivia parametreja ja menetelmiä siten, että niille voitaisiin toteuttaa EN-standardien mukaiset hitsauksen menetelmäkokeet ja pätevyyttä hitsaajat niiden mukaisesti. Tutkimuksen lisäksi kokeiden oli myös tarkoitus antaa hitsaajille mahdollisuus harjoitella kuparimetallien hitsaamista ennen varsinaisia menetelmäkokeita, sillä kuparimetallien hitsaamisesta oli vain vähän kokemusta.



Kuva 20. Epätäydellisesti limityspituudelta täyttynyt laipan ja putken juotosliitos. Kuvaan merkityt mittaviivat kuvaavat epätäydellisesti liittyneiden kohtien pituutta.

7.1 Koejärjestelyt ja hitsauskokeet

Hitsauskokeet toteutettiin Loviisan voimalaitoksen hitsaushallissa. Kokeissa tutkittiin erilaisten hitsausparametrien ja -menetelmien soveltuvuutta kuparin ja tinapronssin hitsauksessa. Käytetyt havainnot ja parametrit kirjattiin ylös ja niitä hyödynnettiin seuraavissa kokeissa. Tässä kappaleessa esitetyt hitsauskokeet on tehty eri aikoina, joten suorituksissa on hitsaajasta riippuvia pieniä eroja. Ensimmäisessä tutkimuksessa hitsattiin kuparikoekappaleet 1, 2 ja 3 sekä eripariliitoskoekappaleet 1, 2 ja 3. Toisessa tutkimuksessa MIG-hitsattiin kuparikoekappale 4. Kolmannessa ja viimeisessä tutkimuksessa hitsattiin kuparikoekappaleet 5 ja 6 sekä eripariliitoskoekappaleet 4 ja 5. Kuparikoekappaleille 2 ja 6 sekä eripariliitoskoekappaleelle 5 tehtiin veto- ja taivutuskokeet sekä mikro- ja makrohietarkastus Lappeenrannan teknillisen yliopiston metallilaboratoriossa. Myös osalle muista koekappaleista tehtiin hietarkastuksia. Eripariliitoskoekappaleelle 5 tehtiin lisäksi röntgentarkastus ja kovuusmittaus.

Lämmöntuonti Q on kokeissa laskettu EN 1011-1:n mukaisesti yhtälöllä (SFS EN 1011-1, 2009, s.18):

$$Q = k \frac{UI}{v} 10^{-3} \left(\frac{kJ}{mm} \right) \quad (2)$$

Yhtälössä 2 U on kaarijännite volteissa, I on hitsausvirta ampeereissa, v on kuljetusnopeus millimetreinä sekunnissa ja k on yksikötön terminen hyötysuhde. Terminen hyötysuhde on jauhekaarihitsauksessa 1, puikko-, MAG- ja MIG-hitsauksessa 0,8 ja TIG- ja plasmahitsauksessa 0,6. (SFS-EN 1011-1, 2009, s.18-20.)

7.1.1 Kuparin hitsauskokeet

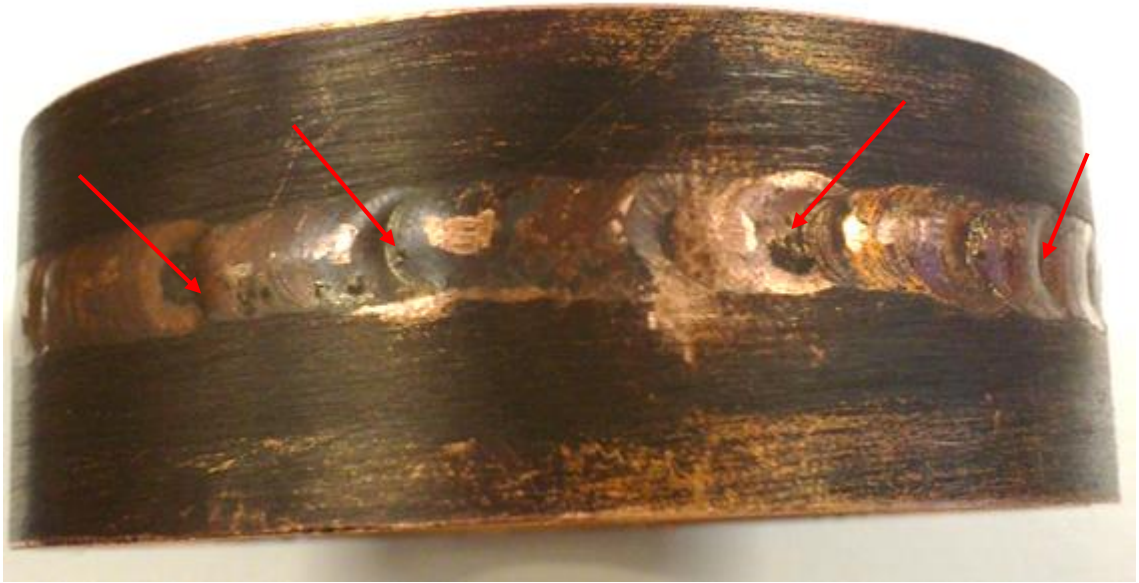
Kuparin hitsauskokeissa testattiin kupariputkien hitsaamista toisiinsa päittäisliitoksella. Kupari oli Cupori 110 Premium -putkea, joka oli toimitustilaltaan kovaa. Cupori 110 Premium on EN 1057 -standardin mukaista R290-putkea. Kemialliselta koostumukseltaan se on fosforilla deoksidoitua DHP-kuparia. Sen koostumuksesta on vähintään 99,9 % kuparia ja hopeaa sekä 0,015-0,04 % fosforia. Käytetyssä erässä fosforia oli 0,03 %. Taulukossa 7 on esitetty muut kokeissa käytetyn kuparin ominaisuudet. (Cupori, 2014, s. 16.)

Taulukko 7. Kokeissa käytetyn kuparin ominaisuudet (Cupori, 2014, s. 16-17).

Fosforia	Murtolujuus R _m	Venymäraja R _{p0,2}	Kovuus	Lämmönjohtavuus	Venymä A	Sulamislämpötila
0,03 %	>290 MPa	>250 MPa	125HV	295 W/mK	>3 %	1083 °C

Hitsauskokeissa laitettiin putket pöydässä olevaan kiinnikkeeseen 45 asteen kulmaan kiinni toisiinsa ilman ilmarakoa. Hitsausprosesseina olivat TIG-hitsaus tasavirralla elektrodi miinusnavassa, TIG-hitsaus vaihtovirralla, TIG-hitsaus vaihtovirran ja tasavirran sekoituksella sekä MIG-hitsaus poltin plusnavassa. Elektrodina oli ESAB:n GoldPlus, joka on wolframielektrodi, johon on seostettu 1,5 % lantaania (ESAB, 2015). Elektrodin halkaisija oli 2,4 mm. Hitsauksessa käytettiin suojakaasuna ja juurikaasuna puhdasta argonia eli argonia oli kaasussa yli 99,99 % (AGA, 2013, s. 8). Koekappaleita esivalmisteltiin hiomapaperilla, harjaamalla ja puhdistusaineella. Elektrodin etäisyys hitsatessa vaihteli noin 3-4 millimetrin välillä. Kupariputkien halkaisijat olivat 64 mm ja 54 mm sekä seinämänpaksuudet 2 mm ja 1,5 mm. Kappaleet esikuumennettiin liekkikumennuksella.

Kokeessa 1 hitsattiin halkaisijaltaan 64 mm:n kokoiset ja 2 mm:n paksuiset putket yhteen yhdellä palolla ilman lisäainetta. Suoja- ja juurikaasujen virtauksiksi laitettiin 12 l/min. Putket silloitettiin toisiinsa neljällä siltahitsillä, ja esikuumennusta ei käytetty. Hitsausvirraksi valittiin aluksi taulukon 2 mukaisesti 140 A. Sen kuitenkin havaittiin olevan liikaa putkien lämmentyessä, joten virtaa pudotettiin 120 A:iin. Polttimen kuljetusnopeus vaihteli 60-75 mm/min:n välillä. Kokeessa havaittiin, että aloituskohdissa hitsautumissyvyys jäi vajaaksi, joten hitsaus olisi pitänyt aloittaa arviolta noin 20 mm edellisen lopetuskohdan päältä. Lisäksi havaittiin, että hitsauksen suorituksen helpottamiseksi esikuumennus vastaavassa tilanteessa voisi olla tarpeen. Hitsissä ilmeni paljon vajaata kupua, joten todettiin, että myös lisäainetta saatettaisiin tarvita. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty ensimmäisen koehitsauksen hitsi juuren ja pinnan puolelta.



Kuva 21. Kuparikoekappale 1 pinnan puolelta. Hitsissä on vajaata kupua.



Kuva 22. Kuparikoekappale 1 juuren puolelta. Hitsautumissyvyys on aloituskohdassa jäänyt vajaaksi.

Kokeessa 2 käytettiin muuten samanlaista menetelmää, mutta edellisen kokeen tulosten perusteella kappaleet esikuumennettiin 168 °C:seen ja hitsausvirtaa pudotettiin. Hitsausvirraksi valittiin aluksi 125 A, mutta se ei riittänyt kunnolla silloitukseen, joten virtaa nostettiin 130 A:iin. Varsinaista liitoshitsiä varten virraksi laitettiin 122 A, ja hitsainta kuljetettiin 90 mm/min:n nopeudella. Kappaleen lämmitettyä virtaa laskettiin

113 A:iin ja polttimen kuljetusnopeutta aluksi 80 mm/min:iin ja sitten 50 mm/min:iin. Jännite oli lopuksi hitsatessa noin 17 V, jolloin EN 1011-1:n mukainen lämmöntuonti oli 1,4 kJ/mm. Putki hitsattiin neljässä osassa, ja lopuksi korjattiin hieman viimeisen osan jälkeistä kohtaa, jotta hitsin osat menivät paremmin toistensa päälle. Toisessa kokeessa välttyttiin vajaalta hitsautumissyvyydeltä, mutta vajaata kupua oli edelleen. Hitsi on esitetty kuvissa 23 ja 24.



Kuva 23. Kuparikoekappale 2 pinnan puolelta. Hitsissä on vajaata kupua.



Kuva 24. Kuparikoekappale 2 juuren puolelta. Juuri on muodostunut hyvin.

Kokeessa 3 hitsattiin samanlaista putkea käyttäen lisäaineena CuAl8-lankaa. Lisäainelanka oli MIG-hitsaukseen tarkoitettua ESAB:n OK Autrod 19.40 -lankaa 1 mm:n halkaisijalla ja sen koostumus on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. ESAB:n OK Autrod 19.40 -langan koostumus (ESAB, 2008, s. 360).

Cu	Al	Fe	Mn	Si
Loput	7,8 %	<0,5 %	<0,5 %	<0,1 %

Hitsaus tapahtui muuten samoin kuten ilman lisäainettakin, mutta esikuumennuslämpötila oli 300 °C, ja kappale hitsattiin kahdella palolla, jolloin juuripalko hitsattiin käyttäen vain vähän lisäainetta ja pintapalko runsaamman lisäaineen kanssa. Aluksi hitsausvirraksi laitettiin 135 A, mutta silloitusten jälkeen se pudotettiin 120 A:iin juurta hitsatessa. Virtaa pudotettiin kappaleen lämmitettyä 110 A:iin, ja kuljetusnopeus vaihteli 60-70 mm/min:n välillä. Pintapalkoa hitsatessa virta pidettiin ennallaan, mutta kuljetusnopeutta pudotettiin 30 mm/min:iin. Jännite oli palkoa hitsattaessa noin 16,5 V, jolloin lämmöntuonti oli 2,2 kJ/mm. Hitsatessa oli vaikeuksia saada lisäainetta sulamaan hitsiin, ja liitos näytti hapettuvan. Juuripalko oli onnistunut kohtuullisesti, mutta pintapalon pinta oli täynnä huokosia, ja hitsissä oli reunahaavaa. Pintapalko oli myös hyvin epätasainen. Hitsi on esitetty kuvissa 25 ja 26.



Kuva 25. Kuparikoekappale 3 pinnan puolelta. Hitsi on kuoppainen ja sen reunoilla on reunahaavaa. Reunahaava on merkitty nuolilla.



Kuva 26. Kuparikoekappale 3 juuren puolelta. Juuri on selvästi onnistunut pintaa paremmin.

Kokeessa 4 testattiin samojen kupariputkien MIG-hitsausta. Lisäainelankana käytettiin samaa ESAB:n OK Autrod 19.40 -lankaa. Suojakaasuna oli myös puhdas argon, jonka virtausnopeus oli 12 l/min, ja koekappale oli asetettu 45 asteen kulmaan. Hitsauksessa käytettiin Kempin FastMig X 450 -konetta, josta valittiin CuAl8-ohjelma. Hitsauspoltin kytkettiin plusnapaan. Alustavassa testissä kokeiltiin hitsaamista kupariputken pinnalla ilman railoa. Aluksi langansyötöksi valittiin 3,5 m/min, jolloin jännite hitsattaessa oli noin 17 V. Todettiin, että lämmöntuonti ei riitä, joten langansyötöksi valittiin 5 m/min. Hitsin lämmöntuonti ei vielä riittänyt, ja kaarityyppi pyöri sekakaarialueella, joten pulssivirta vaihdettiin päälle.

Kappaletta esikuumennettiin 320 °C:seen, ja hitsausta kokeiltiin erilaisilla arvoilla. Pulssivirtaa nostettiin hieman, ja langansyötöksi valikoitui vaiheittain 5 m/min, jolloin jännite oli noin 21 V ja virta 110 A. Hitsiä oli hyvin vaikea hallita ja se sulatti herkästi reiän kappaleeseen. Ongelmana oli, että lämmöntuonti oli alussa liian pieni, kun lisäaine vain kasaantui putken pinnalle ja lopussa liian suuri, kun hitsi alkoi valua putken läpi.

Alun liian pientä lämmöntuontia pyrittiin korjaamaan kytkemällä Hot Start -toiminto päälle. Hot Start on kuuma-aloitustoiminto, joka nostaa aloittaessa hitsaustehoa hetkellisesti asetettua tehoa korkeammaksi (Kempin, 2015a). Kun Hot Start lisäsi alussa

sekunnin ajan 50 % lisää virtaa, se ei tuonut riittävästi lämpöä. Kun se lisäsi 100 % lisää virtaa 2 sekunnin ajan, sulii putkeen heti alussa reikä. Hot Startin virranlisäykseksi laitettiin lopuksi 75 % 2 sekunnin ajaksi, mutta se ei poistanut alun liian pientä lämmöntuontia. Havaittiin, että hitsaus oli mahdollista vain ajallisesti ja pituudeltaan hyvin lyhyissä osissa, koska suutinta täytyi viedä koko ajan kauemmaksi hitsistä.

Hot Startin lisäksi otettiin myös WiseRoot-toiminto käyttöön, jotta lämmöntuonti olisi hallitumpaa. Kempin WiseRoot on räätälöity lyhytkaariprosessi juuripalkojen hitsaukseen (Kempin, 2010). Aluksi WiseRootia kokeiltiin ilman Hot Startia, ja havaittiin, että hitsaus oli hieman hallitumpaa kuin aikaisemmin, kun laitettiin langansyötöksi 6,5 m/min, jolloin jännite oli noin 15 V ja virta 140 A. Tämän jälkeen Hot Start kytkettiin päälle, mutta siitä ei ollut juurikaan hyötyä. Sula oli jatkuvasti liian kuuma ja alkoi sulattaa reikää hitsattaessa, kun lämpötila oli yli 300 °C. WiseRoot kuitenkin auttoi selvästi, vaikka siinä ei ollut kuparille tarkoitettua ohjelmaa, vaan käytettiin ruostumattoman teräksen ohjelmaa. Hitsausta kokeiltiin lopulta WiseRootin avustuksella päittäisliitokseen pienellä ilmaraolla. Langansyöttöä testattiin railoa hitsattaessa 5-6,8 m/min:n välillä, mutta hitsauksessa oli edelleen samanlaisia ongelmia kuin aikaisemmin. Lämmöntuonti oli hitsiä aloittaessa liian pieni, mutta nousi nopeasti liian suureksi. Välipalkolämpötilan tulisi siis olla tarkka, jos haluaisi hitsata kupariputkia tällaisella menetelmällä. Kuvassa 27 on esitetty keskellä WiseRootin avustuksella hitsattu railo. Kuvasta käy hyvin ilmi lämmöntuonnin vaikea hallinta, kun hitsin aloituskohdissa lisäaine on kasautunut kappaleen pinnalle, minkä jälkeen hitsi on hetken aikaa hyvä, kunnes lämpötila on kasvanut taas liian suureksi.



Kuva 27. Kuparikoekappale 4. Hitsaaminen on ollut heikosti hallittua. Railoon hitsattu hitsi on merkitty nuolella.

Kokeessa 5 testattiin halkaisijaltaan 54 mm:n kokoisten ja 1,5 mm paksujen kupariputkien liittämistä CuSn6-tinapronssilisäainelangalla TIG-hitsaamalla. Lisäainelanka oli 1,6 mm paksua Somotecin TIG CuSn6 -lankaa ja sen koostumus on esitetty koetustodistuksen 2.2 mukaisesti taulukossa 9. Hitsauksen järjestelyt olivat muuten samanlaiset kuin aiemmissa TIG-hitsauskokeissa, mutta kappaleet silloitettiin neljän siltahitsin sijaan kolmella, ja railon valmistelussa käytettiin harjausta ja puhdistusainetta hiomapaperin sijaan. Esikuumennusta ei käytetty.

Taulukko 9. Somotecin TIG CuSn6 -langan koostumus.

Cu	Fe	Ni	P	Pb	Sn	Zn
Loput	0,008 %	0,007 %	0,153 %	0,003 %	6,24 %	0,014 %

Juuren hitsaus aloitettiin 113 A:lla, jolloin jännite oli hitsatessa noin 12,5 V. Kuljetusnopeus vaihteli 40-60 mm/min välillä, jolloin lämmöntuonti oli 0,85-1,3 kJ/mm. Virtaa todettiin olevan liikaa, koska juuri vajosi hitsatessa, joten virtaa pudotettiin 110 A:iin pinnan hitsausta varten. Sekin oli liian paljon, joten virtaa pudotettiin lopulta 90 A:iin, jolloin jännite oli noin 14,6 V. Kuljetusnopeus oli 40

mm/min, joten lämmöntuonti oli 1,2 kJ/mm. Hitsauksessa syntyi hieman reunahaavaa, ja lisäainetta syötettiin pinnassa välillä liikaa, jolloin kuvusta tuli korkea. Hitsi on esitetty pinnan puolelta kuvassa 28.

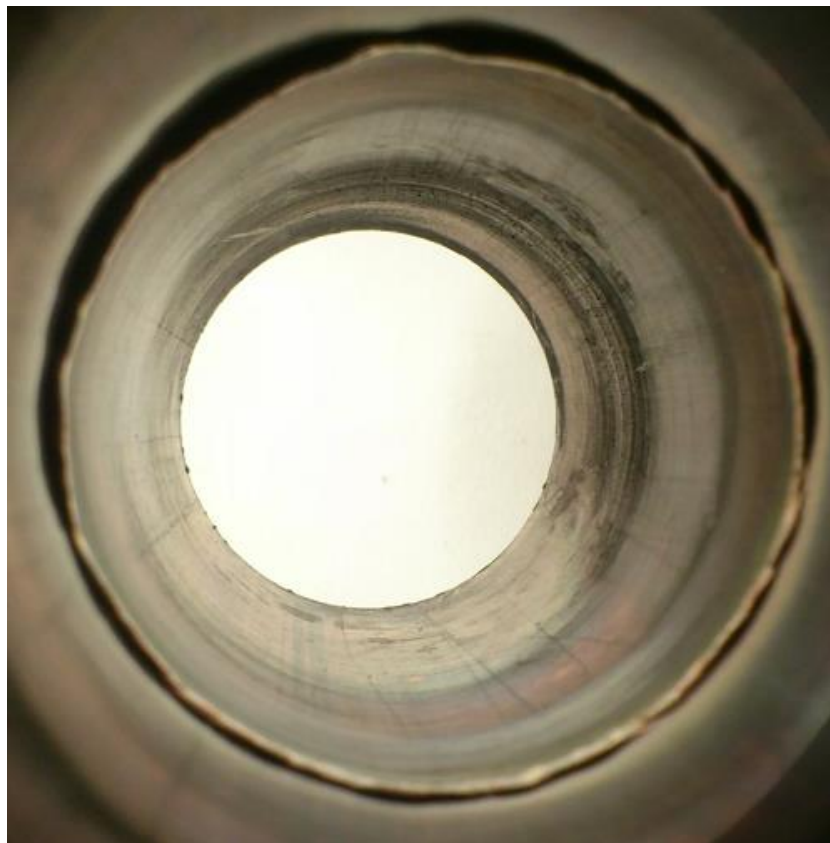


Kuva 28. Kuparikoekappale 5. Hitsissä on paikoittain korkeaa kupua.

Kokeessa 6 testattiin uuteen koekappaleeseen samanlaista hitsausta kuin kokeessa 5. Juuri hitsattiin nyt 90 A:lla, ja jännite oli noin 16 V. Pinnassa 90 A:n havaittiin olevan liikaa syntyvän reunahaavan takia, joten virtaa pudotettiin 85 A:iin. Jännite oli hitsatessa noin 15,5 V ja kuljetusnopeus 39 mm/min, joten lämmöntuonti oli myös kokeessa 6 pintaa hitsatessa 1,2 kJ/mm. Hitsauksessa syntyi edelleen hieman reunahaavaa, mutta hitsi oli silti selvästi kokeen 5 hitsiä parempi. Hitsi on esitetty pinnan puolelta kuvassa 29 ja juuren puolelta kuvassa 30. Juuren puolelta huomaa, että lisäainetta tuli selvästi enemmän läpi putken yläpuolelta.



Kuva 29. Kuparikoekappale 6 pinnan puolelta harjauksen jälkeen. Pinta on onnistunut hyvin.



Kuva 30. Kuparikoekappale 6 juuren puolelta. Juuressa ei näy virheitä.

Kuparin koehitsauksissa havaittiin, että vaikka esikuumennusta suositellaan TIG-hitsauksessa vasta noin 3-4 mm:n aineenpaksuudesta ylöspäin, helpottaa se hitsauksen aloittamista myös 2 mm:n aineenpaksuudella. Koska kuparilla on korkea lämmönjohtavuus, pakeni tuotu lämpö nopeasti liitoksesta perusaineeseen. Riittävä esikuumennuslämpötila 2 mm:n ainepaksuudelle oli arviolta 150-200 °C:n välillä. 1,5 mm:n aineenpaksuudella hitsaus onnistui hyvin ilman esikuumennusta, vaikkakin aluksi kappaletta joutui lämmittämään enemmän valokaarella ennen kuljetuksen aloittamista. (Aufhauser, 2015; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 200-201.)

Ohjeelliset hitsausvirrat olivat TIG-hitsauksessa hieman korkeammat havaittuihin sopiviin arvoihin nähden. Sopiva hitsausvirta vaihteli hitsauksen aikana esikuumennuksesta ja kuljetusnopeudesta riippuen 85-122 A:n välillä, mutta silloitusten hitsauksessa sitä voitiin laittaa enemmän. Ilman lisäainetta hitsattaessa suorituksen kannalta sopiva lämmöntuonti oli 1,4 kJ/mm. CuSn6-lisäaineen kanssa sopiva lämmöntuonti oli 1,2 kJ/mm. (Aufhauser, 2015; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 201.)

Puhdas argon soveltui hyvin suoja- ja juurikaasuksi, vaikka joidenkin suositusten mukaan yli 1,5-1,6 mm paksuilla kappaleilla tulisi käyttää argonin ja heliumin seosta. Lantaaniseosteinen elektrodi soveltui myös hyvin, vaikka kuparimetalleille suositellaan usein ensisijaisesti torium- tai ceriumseosteisia elektrodeja. (Aufhauser, 2015; CDA, 1997, s. 20; Miller, 2015; Materion, 2011.)

Alumiiniseosteinen lisäainelanka soveltui kuparin TIG-hitsaamiseen huonosti. Luultavasti syynä oli sama ilmiö kuin alumiinipronssisilla kappaleilla eli alumiinin lankaan aiheuttama pintaoksidi vaikeutti hitsauksen suoritusta ja lisäaineen sulamista hitsisulaan, koska alumiinioksidin sulamislämpötila on huomattavasti kuparia korkeampi. Alumiinioksidikalvon takia alumiinipronsseja hitsataan yleensä vaihtovirralla, ja alumiiniseosteinen kuparilankakaan ei soveltunut kokeissa tasavirralla hitsaukseen. Lisäaineeksi soveltui paljon paremmin tinapronssilanka. Vaihtoehtoisesti voitaisiin luultavasti käyttää jotakin niukkaseosteista kuparilankaa tai tinalla seostettua kuparien yleislisäainelankaa. (Pettinen, 2009, s. 226; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 201-206.)

Kuparin MIG-hitsaus oli hyvin hankalaa. Lämmöntuonnin hallinta aiheutti ongelmia, kun hitsausta aloittaessa lämpö ei riittänyt sulattamaan perusainetta kunnolla, mutta hetken päästä lämpöä oli jo liikaa. TIG-hitsauksessa pystyi aluksi lämmittämään valokaarella liitosta ennen lisääneen lisäämistä ja hallitsemaan tuodun lisääneen määrää, mikä ei MIG-hitsauksessa ollut mahdollista. Jos haluaisi hitsata testatun kaltaisia putkia MIG-hitsauksella, tulisi käytettävät arvot testata tarkkaan ja hallita hyvin välipalkkolämpötilaa, jotta liitos ei kuumenisi liikaa. Arvojen haussa kuitenkin suositellut virrat, jännitteet ja esikuumennus erosivat huomattavasti testien havaintoihin perustuvista arvoista (Aufhauser, 2015; Katainen & Mäkinen, 1995, s. 203). Kempin WiseRoot- ja Hot Start -toiminnot auttoivat hieman hitsauksen hallinnassa, mutta niidenkin avustuksella kuparin MIG-hitsaus on merkittävästi TIG-hitsausta hankalampaa.

7.1.2 Kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen hitsauskokeet

Kuparin ja tinapronssin hitsauskokeissa testattiin kupariputken ja PROMET 12 -tinapronssiputken eriparipäittäisliitosta. Käytetty PROMET 12 oli EN 1982 -standardin mukaista CuSn12-GC-tinapronssivalutankoa, josta tehtiin sorvaamalla putkea. Erän kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Kokeissa käytetyn tinapronssin koostumus.

Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	P	Fe
88,2 %	11,14 %	0,207 %	0,243 %	0,031 %	0,048 %	0,034 %
Si	Al	As	Sb	Bi	S	
<0,001 %	0,006 %	<0,001 %	0,033 %	<0,001 %	0,052 %	

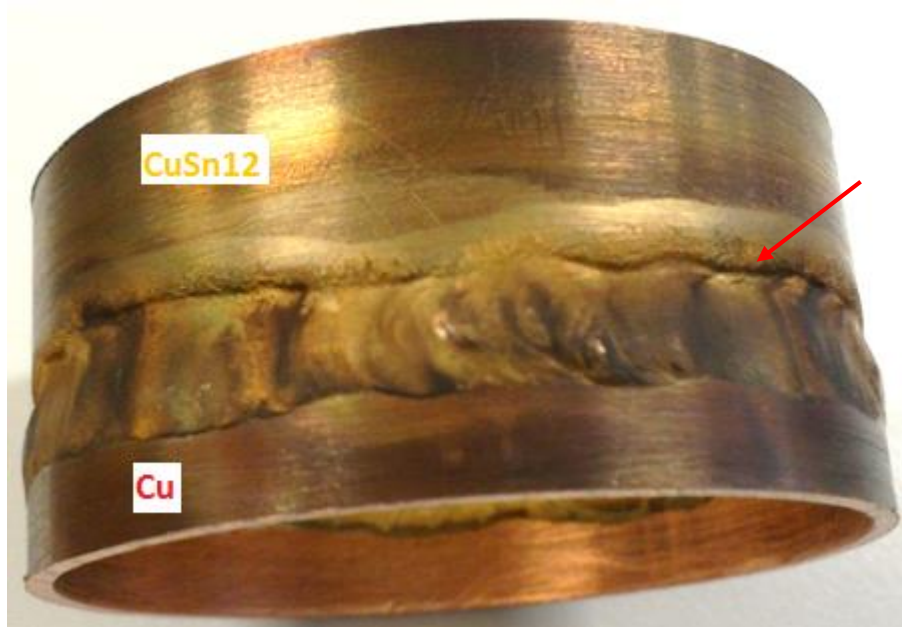
Koetustodistuksen mukaiset mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 11. Yleisesti materiaalilla lämmönjohtavuus on keskimäärin 54 W/mK ja alin sulamislämpötila 820 °C (Looser, 2005; Matbase, 2015). Kupariputki oli vastaavanlaista kuin aiemmissa kokeissa.

Taulukko 11. Kokeissa käytetyn tinapronssin mekaaniset ominaisuudet.

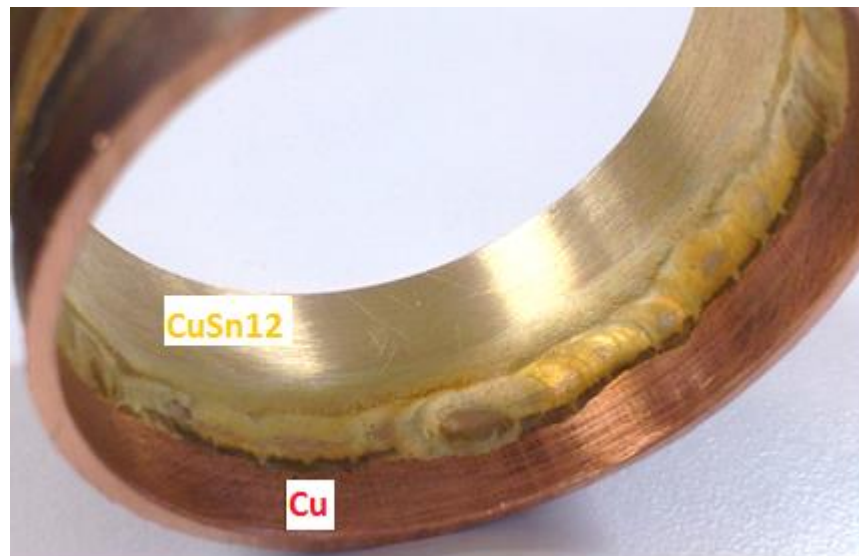
Murtolujuus R_m	Venymäraja $R_{p0,2}$	Kovuus	Murtovenymä A_s
280 MPa	150 MPa	90HB	5 %

Kokeiden järjestelyt olivat pääosin vastaavanlaisia kuin kuparin hitsauksessa. Suurimpina eroina olivat eripariliitos ja Kempin MIX TIG -toiminnon sekä vaihtovirran käyttö yhdessä kokeessa. MIX TIG -toiminto yhdistää hitsauksen aikana tasavirtaa ja vaihtovirtaa, jolloin niiden hyödyt sekoituksessa ja tunkeumassa yhdistyvät (Kempin, 2015b). Kokeissa kaikkien putkien halkaisijat olivat 54 mm ja aineenpaksuudet 1,5 mm. Hitsausasento oli kaikissa kokeissa sama eli hitsaus 45 asteen kulmassa.

Kokeessa 1 hitsattiin kupariputkea ja tinapronssiputkea päittäisliitoksella ilman lisäainetta. Kupariputki laitettiin kokeessa kiinnikkeessä alemmaksi ja pronssiputki sen päälle. Liitokohta esikuumennettiin 120 °C:seen. Putket kiinnitettiin toisiinsa neljällä siltahitsillä. Hitsausvirraksi laitettiin aluksi 120 A, mutta se oli tinapronssille liikaa, koska se aiheutti reunahaavaa. Hitsausvirtaa pudotettiin ensin 100 A:iin, sitten 90 A:iin ja lopuksi 82 A:iin. Virran pudottamisesta huolimatta hitsauksessa syntyi edelleen reunahaavaa koko hitsin pituudelta. Lisäksi tinapronssista tuli huokoista hitsin vierestä. Todettiin, että hitsaus aiheuttaa liikaa lämpöä tinapronssille, joten pronssiputki tulisi vaihtaa alemmaksi ja esikuumennus jättää pois. Hitsi on esitetty kuvissa 31 ja 32.



Kuva 31. Eripariliitoskoekappale 1 pinnan puolelta. Tinapronssin puolella on reunahaavaa ja hitsissä vajaata kupua. Reunahaava on merkitty nuolella.

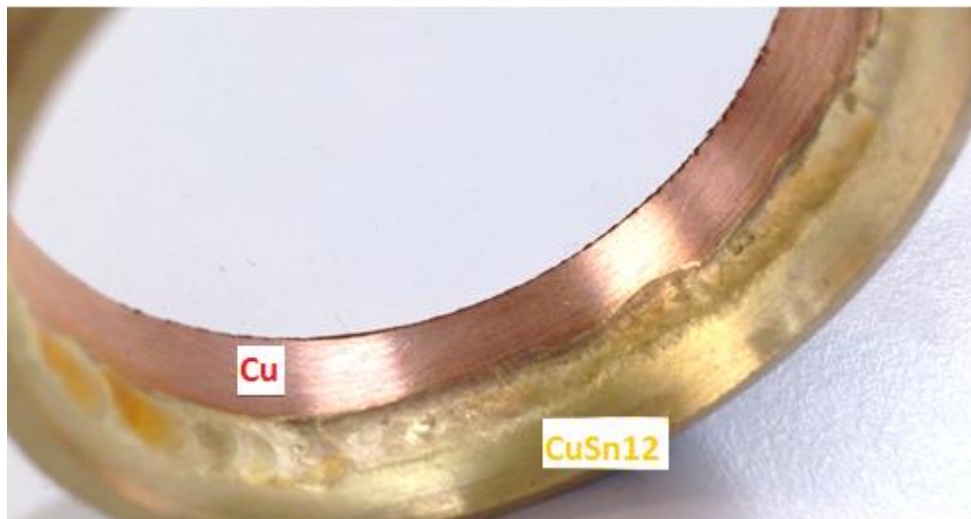


Kuva 32. Eripariliitoskoekappale 1 juuren puolelta. Juuressa ei ole näkyviä virheitä.

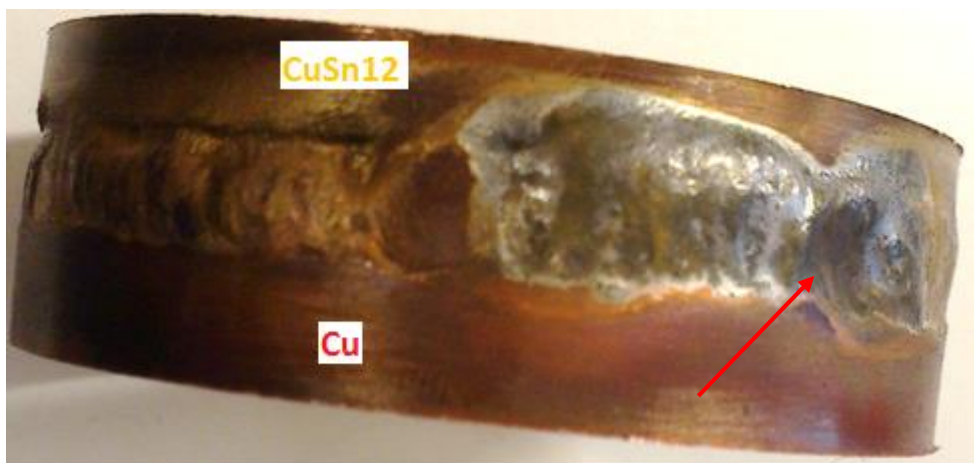
Kokeessa 2 testattiin kuparin ja tinapronssin liitosta muuten samalla tavalla kuin edellisessä kokeessa, mutta esikuumennus jätettiin pois, ja tinapronssinen putki laitettiin kiinnikkeessä alemmaksi. Hitsausvirraksi laitettiin aluksi 82 A. Hitsainta kuljetettiin 65 mm/min:n nopeudella jännitteen ollessa noin 15 V, joten lämmöntuonti oli 0,7 kJ/mm. Lämmöntuonti oli kuitenkin liian suuri tinapronssille, joten virtaa pudotettiin 75 A:iin. Virta oli tällöin noin 14,5 V ja lämmöntuonti 0,6 kJ/mm. Tinapronssin puolelle tuli edelleen reunahaavaa ja huokoisuutta perusaineessa, mutta ei niin paljoa kuin edellisessä kokeessa. Hitsiin syntyi lopussa läpimenevä reikä, joka paikattiin kaasuhitsaukseen tarkoitetulla kuparifosforilisäainelangalla. Kokeessa havaittiin, että kuparin ja tinapronssin hitsaus vaatii onnistuakseen lisäainetta. Hitsi on esitetty kuvissa 33 ja 34. Kuvassa 35 on esitetty fosforiseosteisen lisäaineen vaikutus.



Kuva 33. Eripariliitoskoekappale 2 pinnan puolelta. Reunahaavaa on vähemmän, mutta vajaata kupua on edelleen.

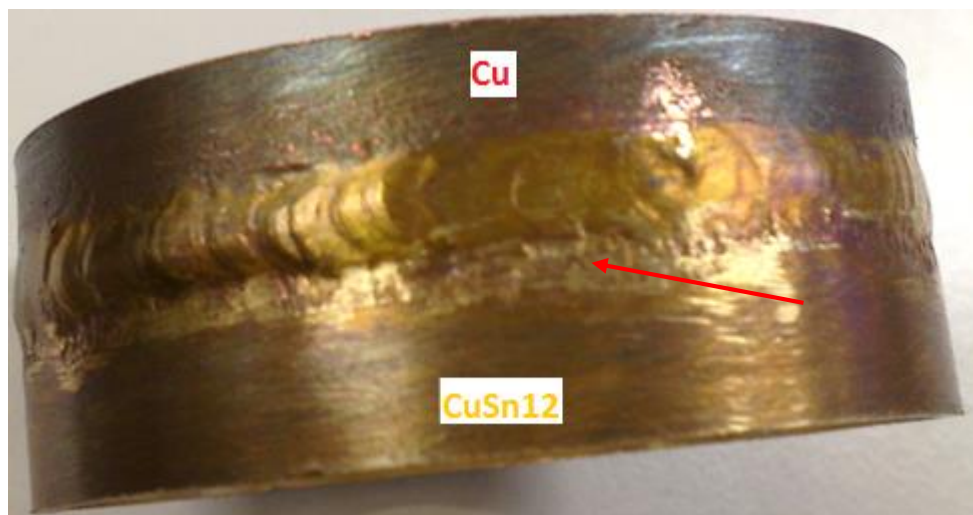


Kuva 34. Eripariliitoskoekappale 2 juuren puolelta. Juuri on onnistunut hyvin.

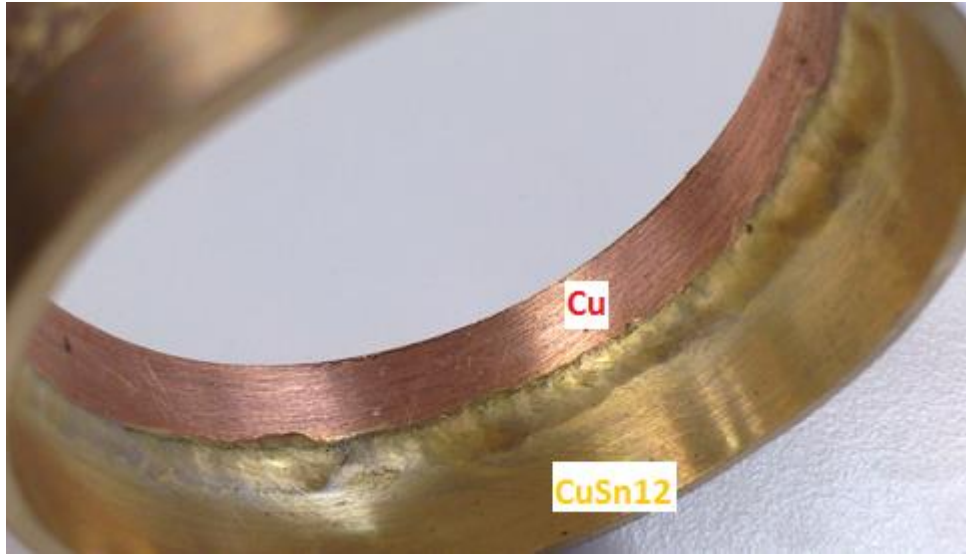


Kuva 35. CuP-lisäaineella (fosforiseosteinen kupari) paikattu eripariliitoskoekappaleen 2 hitsi. Lisäaine on liittynyt sulavasti pintaan. Paikattu reikä on merkitty nuolella.

Kokeessa 3 testattiin saman CuAl8-lisäaineen käyttämistä kuin pelkkää kuparia hitsattaessa. Kokeessa kuitenkin testattiin, miten vaihtovirta ja MIX TIG -toiminto vaikuttavat lisäaineen käyttäytymiseen. Koekappale hitsattiin kuparista poiketen yhdellä palolla. Alussa hitsausvirraksi laitettiin 90 A ja MIX TIG -toiminto laitettiin päälle. MIX TIG -toiminnolla hitsattiin neljä osaa liitoksesta pudottaen virtaa kolmannessa osassa 82 A:iin ja neljännessä 80 A:iin. Jännite oli lopussa noin 17 V. MIX TIG -toiminnolla saatiin selvästi parempi lopputulos kuin hitsattaessa tasavirralla kuparia samalla lisäaineella, mutta perusaine oli tinapronssin puolella edelleen hieman huokoinen hitsin vieressä. Liitoksen viimeistä osaa varten vaihdettiin virtalajiksi vaihtovirta MIX TIGin tilalle ja nostettiin virtaa 82 A:iin. Valokaari kuitenkin levisi hitsatessa, se siirtyi välillä elektrodin kärjestä sen sivuun ja hitsauksen suoritukselta tuli hyvin vaikeaa. Jännite oli vaihtovirralla hitsatessa noin 30 V. Valokaaren käyttäytymistä pyrittiin parantamaan pudottamalla suojakaasun virtausta 8 litraan minuutissa, mutta sillä ei ollut merkittävää vaikutusta. MIX TIG -toiminto vaihdettiin takaisin vaihtovirran tilalle ja liitos hitsattiin sillä loppuun 80 A:lla jännitteen ollessa noin 17 V. MIX TIG -toiminnolla saatiin hitsattua liitos CuAl8-lisäainelangalla selvästi paremmin, mutta suoritus oli hankalampaa kuin tasavirralla. Hitsi on esitetty kuvissa 36 ja 37.



Kuva 36. Eripariliitoskoekappale 3 pinnan puolelta. Reunassa on hieman epätasaisuutta tinapronssin puolella.



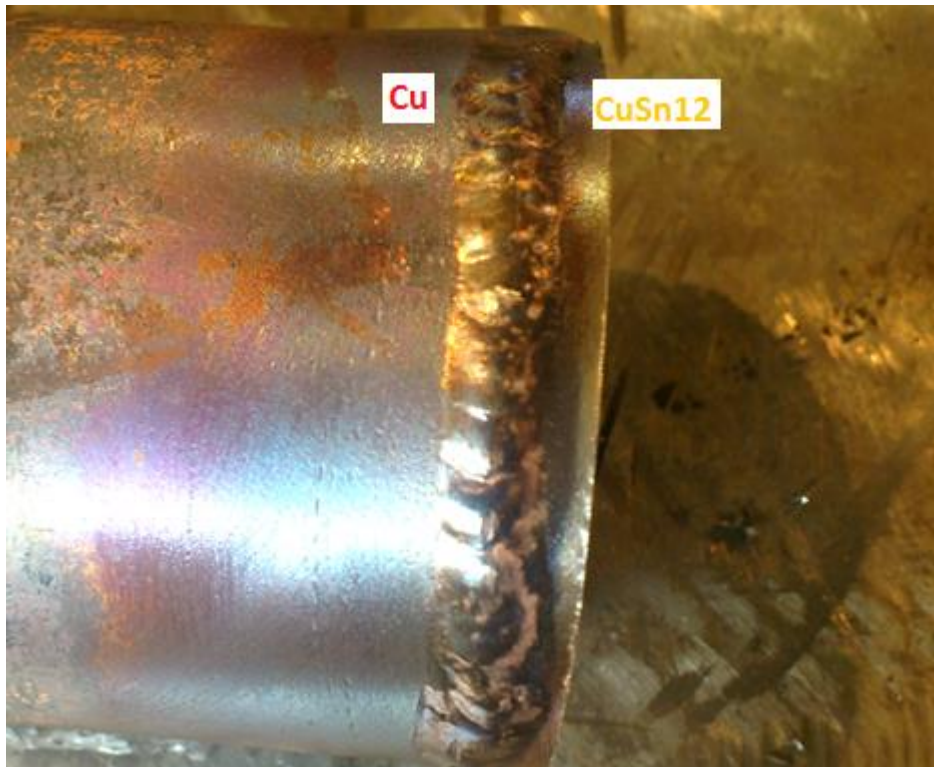
Kuva 37. Eripariliitoskoekappale 3 juuren puolelta. Juuri on onnistunut hyvin.

Kokeessa 4 TIG-hitsattiin kuparia ja tinapronssia käyttäen CuSn12-lisäainelankaa. Lisäainelanka oli 1,6 mm paksua Somotecin TIG CuSn12 -lankaa ja sen koostumus on esitetty koetustodistuksen 2.2 mukaisesti taulukossa 12. Kappaleet puhdistettiin harjaamalla ja puhdistusaineella. Myös lisäaine puhdistettiin puhdistusaineella. Kappaleet silloitettiin kolmella siltahitsillä, ja esikuumennusta ei käytetty.

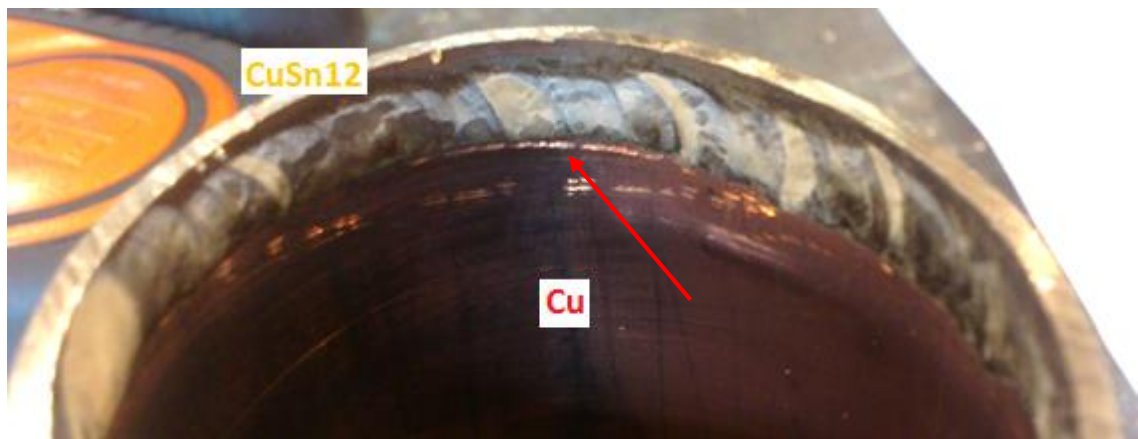
Taulukko 12. Somotecin TIG CuSn12 -langan koostumus.

Cu	Mn	Si	Al	Fe	Ni	P	Pb	Sn	Zn	Ag
Loput	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	0,2	0,004	12,45	0,011	0,002
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Hitsausvirraksi valittiin aluksi 59 A. Jännite oli hitsatessa noin 12,5 V ja kuljetusnopeus 23 mm/min, jolloin lämmöntuonti oli 1,15 kJ/mm. Juuripalko tuli huonosti läpi, joten hitsi sahattiin irti, ja juuri hitsattiin uudestaan. Hitsauksen helpottamiseksi kappaleet esikuumennettiin 184 °C:seen, ja siltahitsit jätettiin tällä kertaa pois. Virran annettiin edelleen olla 59 A, jolloin jännitteen ollessa noin 12 V ja kuljetusnopeuden 44 mm/min oli lämmöntuonti 0,58 kJ/mm. Noin 200 °C:n esikuumennuksen havaittiin olevan suuruusluokaltaan sopiva. Hitsissä oli hieman reunahaavaa, ja juuren puolella oli ylhäällä lopetuskohdassa terävää reunaa kuparin huonomman sulamisen takia. Kuvassa 38 on esitetty koekappale 4 pinnan puolelta ja kuvassa 39 juuren puolelta. Juuren puolella näkyy huonommin sulanut kohta keskellä.



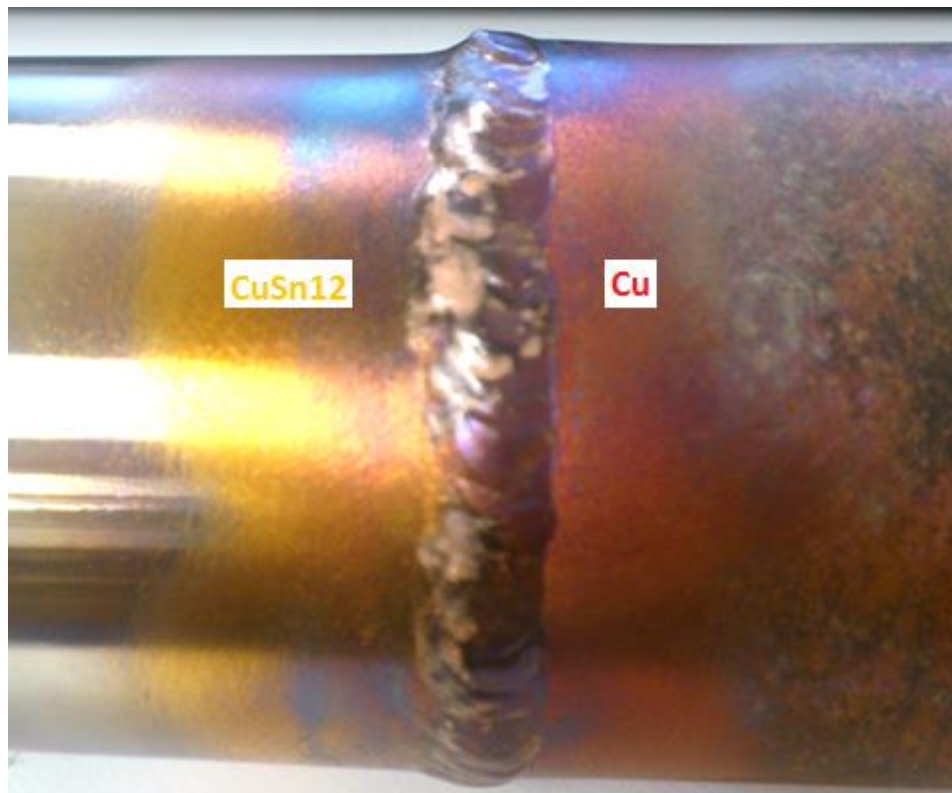
Kuva 38. Eripariliitoskoekappale 4 pinnan puolelta. Pintapalko on muodostunut hyvin.



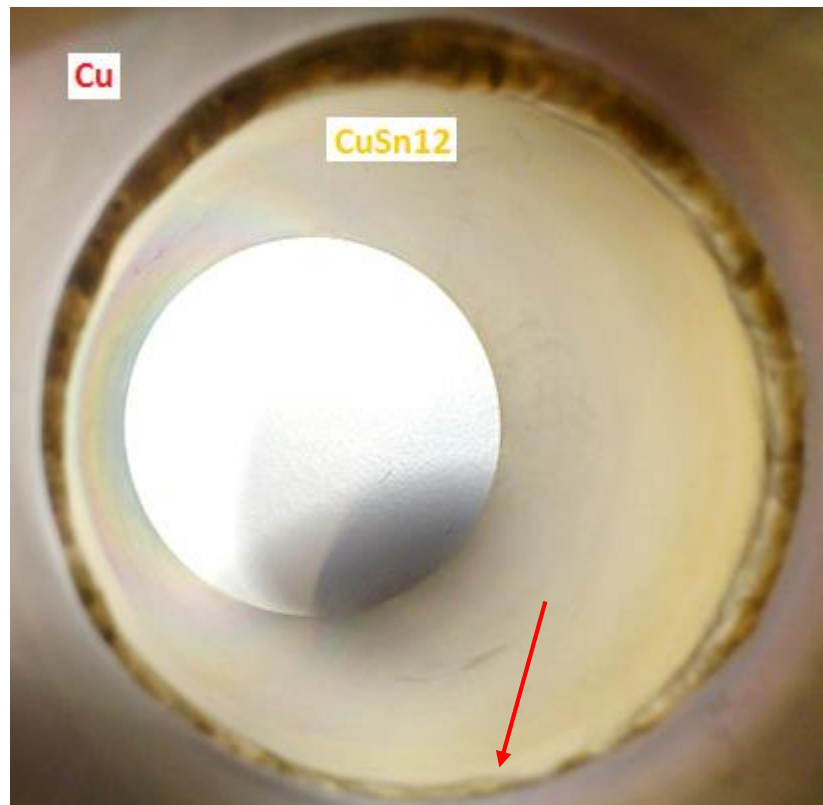
Kuva 39. Eripariliitoskoekappale 4 juuren puolelta. Keskellä näkyy vajaata hitsautumissyvyyttä.

Kokeessa 5 testattiin samanlaista hitsausta kuin kokeessa 4 käyttäen sen pohjalta löydettyjä sopivia arvoja. Tinapronssiputki harjattiin ja puhdistettiin puhdistusaineella, ja kupariputki hiottiin hiomapaperilla ja puhdistettiin puhdistusaineella. Myös lisäaine puhdistettiin samalla puhdistusaineella. Hitsaus suoritettiin kahdella palolla, joista molemmat hitsattiin kahdessa osassa. Kappaleet esikuumennettiin noin 200 °C:seen ja silloitettiin kolmella siltahitsillä. Virraksi valittiin aluksi juurta hitsatessa 59 A, jolloin

jännitteen ollessa noin 13 V ja kuljetusnopeuden 33 mm/min oli lämmöntuonti 0,84 kJ/mm. Lisäainelankaa kului juuren hitsaukseen 250 mm. Pintapalkoa hitsatessa jännite oli noin 14 V ja kuljetusnopeudet 28 mm/min ja 33 mm/min eli lämmöntuonti oli 0,9 kJ/mm:n ja 1,1 kJ/mm:n välillä. Pintapalkoon lisäainelankaa kului 330 mm. Juuren puolella oli alhaalla aloituskohdassa hieman terävää reunaa. Kuvassa 40 on esitetty koekappale 5 pinnan puolelta ja kuvassa 41 juuren puolelta. Juuren puolella lisäainetta on tullut putken yläpuolella selvästi enemmän läpi kuten pelkän kuparinkin kanssa. Kuvassa 42 on hitsin röntgentarkastuksen röntgenfilmeistä otetut havainnollistavat valokuvat. Kaikki hitsin ominaisuudet eivät niistä ilmene, mutta ne ovat suuntaa antavia. Kuvaussuunta A on hitsausasentoon nähden vaakasuunnassa ja B pystysuunnassa. Kuvassa 43 on tarkempi kuva B-suunnasta, jossa näkyy kuvassa alhaalla aloituskohdassa terävänä rajana vajaata hitsautumissyvyyttä juuressa kuparin puolella. Muita virheitä ei röntgentarkastuksessa havaittu.



Kuva 40. Eripariliitoskoekappale 5 pinnan puolelta. Pintapalkko on muodostunut hyvin.



Kuva 41. Eripariliitoskoekappale 5 juuren puolelta. Aloituskohdassa alhaalla lisäainetta on tullut juureen selvästi vähemmän kuin muualla hitsissä.



Kuva 42. Eripariliitoskoekappale 5 röntgenkuvissa. Hitsissä ei havaittu huokosia tai halkeamia.



Kuva 43. Vajaata hitsautumissyvyyttä eripariliitoskoekappaleen 5 röntgenkuvassa.

Kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen hitsaaminen on selvästi pelkän kuparin hitsaamista hankalampaa, koska sulamislämpötilat ja lämmönjohtavuudet eroavat merkittävästi. Lämpö johtui kuparin puolelta nopeammin pois, jolloin tinapronssi sulii hitsiin herkemmin. Lisäksi tinapronssi sulaa alhaisemmassa lämpötilassa, joten ilman lisäainetta reunahaavalta oli hyvin vaikeaa välttyä. Liitoksen molempien puolien riittävä sulaminen aiheutti herkästi tinapronssin puolelle liian suuren lämmöntonin, mikä aiheutti mikrorakenteessa pinnallakin näkyviä muutoksia perusaineessa. Kokeissa huomattiin, että esikuumennusta ei kannata käyttää ilman lisäainetta hitsatessa, eikä sitä tinapronssin hitsauksessa suositellakaan alle 10 mm aineenpaksuuksilla (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 206). Lisäaineen kanssa hitsatessa sen sijaan esikuumennus auttoi selvästi juuren hitsauksessa.

Siltahitsien käyttöä tulisi välttää tinapronssin hitsauksessa, mutta niiden pois jättämisellä ei havaittu olevan näkyviä eroja siltahitsien kanssa hitsaamiseen verrattuna (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 119). Kappaleet pysyivät pelkällä puristuksellakin hyvin paikoillaan hitsauksen ajan, mutta puristus olisi selvästi silloitusta vaikeampi toteuttaa käyttöpaikalla hitsatessa.

Kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen havaittiin olevan hyvin hankalan hitsata ilman lisäainetta. Tasavirralla hitsattaessa fosforiseosteisen kuparilisäainelangan huomattiin muodostavan paremman liitoksen kuin alumiiniseosteisen langan, vaikka kaasuhitsaukseen tarkoitettua lisäainelankaa ei saisikaan käyttää TIG-hitsauksessa,

koska sen sisältämä fosfori aiheuttaa hitsiin huokosia. Alumiiniseosteisella lisäainelangalla hitsaaminen kuitenkin onnistui kohtuullisesti Kempin MIX TIG -toimintoa käyttäen. Pätevöittämisen ja hitsaamisen kannalta parempi vaihtoehto olisi kuitenkin käyttää tasavirralla hitsattavaa lisäainetta, joka sopii tinapronssille ja kuparille. Tinapronssille suositellaan lisäaineeksi tinapronssilankaa, jossa on 6-13 % tinaa, ja tinapronssilanka sopii myös yleiskäyttöön kuparien hitsauksessa, koska pienikin tinaseostus parantaa hitsisulan juoksevuutta. Testattu CuSn12-lisäainelanka soveltui hyvin käytettyyn liitokseen. Hitsauksessa on siis suositeltavampaa käyttää tinaseosteista lisäainetta sen sijaan, että yrittäisi vaihtovirran avulla saada liitoksen tehtyä alumiiniseosteisella langalla. CuSn12-lisäaineella hitsatessa menetelmässä ei ollut mitään lähtökohtaisia ongelmia, vaan hitsi oli suoritusteknisiä virheitä lukuun ottamatta hyvä. Se siis soveltuu kuparin ja tinapronssin eripariliitoksiin hyvin, kunhan parametrit hienosäädetään kohdalleen ja suoritusta harjoitellaan riittävästi. Sopiva lämmöntuonti on noin 1 kJ/mm. Puhdas argon soveltui suositusten mukaisesti hyvin suojavaasiksi myös tinapronssille. Liitteessä I on hitsauskokeiden pohjalta laadittu alustava hitsausohje. (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 201-206; ESAB, 2008, s. 356-358; Mathers, 2015.)

7.1.3 Veto- ja taivutuskokeet

Kuparikoekappaleille 2 ja 6 sekä eripariliitoskoekappaleelle 5 tehtiin veto- ja taivutuskokeet. Vetokokeessa kuormitettiin poikittain hitsiin nähden otettuja vetokoesauvoja kasvavalla voimalla niiden murtumiseen asti. Koesauvat irrotettiin putkista, ja hitsin korkea kupu hiottiin pois molemmilta puolilta. Hitsin molemmille puolille merkittiin pisteet, joiden avulla määritettiin murtovenymä kokeen jälkeen. Alkumittapituudeksi valittiin 40 mm, jotta pisteet olivat tarpeeksi kaukana hitsistä. Koesauvoista mitattiin ohuimmat halkaisijat, joiden perusteella laskettiin poikkipinta-alan ja murtovoiman mukaan murtolujuus. Vetokokeet tehtiin huoneenlämmössä. Koesauvojen murtolujuuden tulee vetokokeessa täyttää perusaineelle asetettu vähimmäisvaatimus (SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 30). Veto- ja taivutuskokeissa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 44 ja testatut vetokoesauvat kuvassa 45. Kuvassa 45 vasemmalla on kuparikoekappaleesta 2, keskellä kuparikoekappaleesta 6 ja oikealla eripariliitoskoekappaleesta 5 tehdyt koesauvat.



Kuva 44. Veto- ja taivutuskokeiden laitteisto.



Kuva 45. Vetokoesauvat testauksen jälkeen. Vasemmalla on ilman lisäainetta hitsattu kupariliitos, keskellä lisäaineella hitsattu kupariliitos ja oikealla lisäaineella hitsattu eripariliitos.

Taivutuskokeissa taivutettiin taivutuskoesauvoja juuren ja pinnan suuntaisesti 180 astetta sitkeyden ja virheettömyyden toteamiseksi. Taivutintelan halkaisija oli 30 mm ja tukitelojen väli 38 mm. Taivutuskokeessa ei saa esiintyä yli 3 mm suuruisia vikoja, mutta nurkissa olevia virheitä ei oteta huomioon arvostelussa (SFS-EN ISO 15614-6, 2006, s. 30). Testatut taivutuskoesauvat on esitetty kuvassa 46. Kuvassa vasemmalla on kuparikoekappaleesta 2, keskellä kuparikoekappaleesta 6 ja oikealla eripariliitoskoekappaleesta 5 tehdyt koesauvat.



Kuva 46. Taivutuskoesauvat testauksen jälkeen. Lisäaine on lujittanut hitsejä. Vasemmalla on ilman lisäainetta hitsattu kupariliitos, keskellä lisäaineella hitsattu kupariliitos ja oikealla lisäaineella hitsattu eripariliitos.

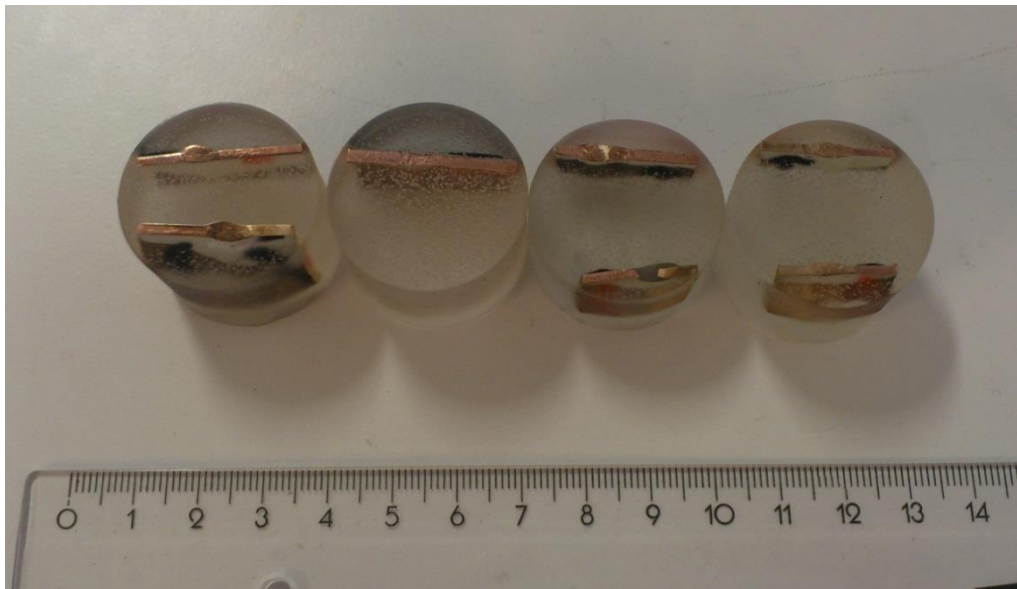
7.1.4 Makro- ja mikrohietarkastukset

Kuparikoekappaleista 2, 3 ja 6 sekä eripariliitoskoekappaleista 2, 3 ja 5 tehtiin hieet. Eripariliitoskoekappaleesta 2 otettiin hiepala kahdesta kohtaa. Mikro- ja makrohietutkimuksen tarkoituksena on arvioida hitsausliitoksen poikkipinnan rakennetta ja ominaisuuksia kuten raerakennetta, morfologiaa, erkaumia ja sulkeumia sekä niiden suhdetta erilaisiin halkeamiin ja onteloihin (SFS-EN ISO 17639, 2013, s. 10). Hiepalat valettiin muoviin, minkä jälkeen ne hiottiin hiomapaperilla ja kiillotettiin alumiinioksidiliuoksen avulla. Hieet pestiin ja syövytettiin suolahapon, rautakloridin ja

veden seoksella. Hieistä otettiin makrohiekuvat ja mikrohiekuvia. Kuvassa 47 on esitetty hiomisessa ja kiillottamisessa käytetty laite ja kuvassa 48 valmiit hieet.



Kuva 47. Hieiden valmistukseen käytetty laite.



Kuva 48. Valmiit muoviin valetut hieet.

Eripariliitoskoekappaleen 5 hieestä mitattiin lisäksi HV3-kovuusjakauma (Hardness Vickers). Hieen kovuuden mittaamiseen käytettiin Vickers-menetelmää, joka on muita kovuusmittausmenetelmiä laajempi mitta-alueeltaan ja soveltuu kaikkien metallien

kovuuksien mittaamiseen. Kupariputkien materiaalistandardissa käytetään HV5-kovuuksia, mutta mitatut tulokset ovat vertailukelpoisia niihin nähden (SFS-EN 1057, 2010, s. 20). Menetelmässä neliöpohjainen timanttipyramidi painetaan tutkittavaan materiaaliin, jolloin siihen syntyy neliön muotoinen painauma. (Finfocus Instruments, 2012.)

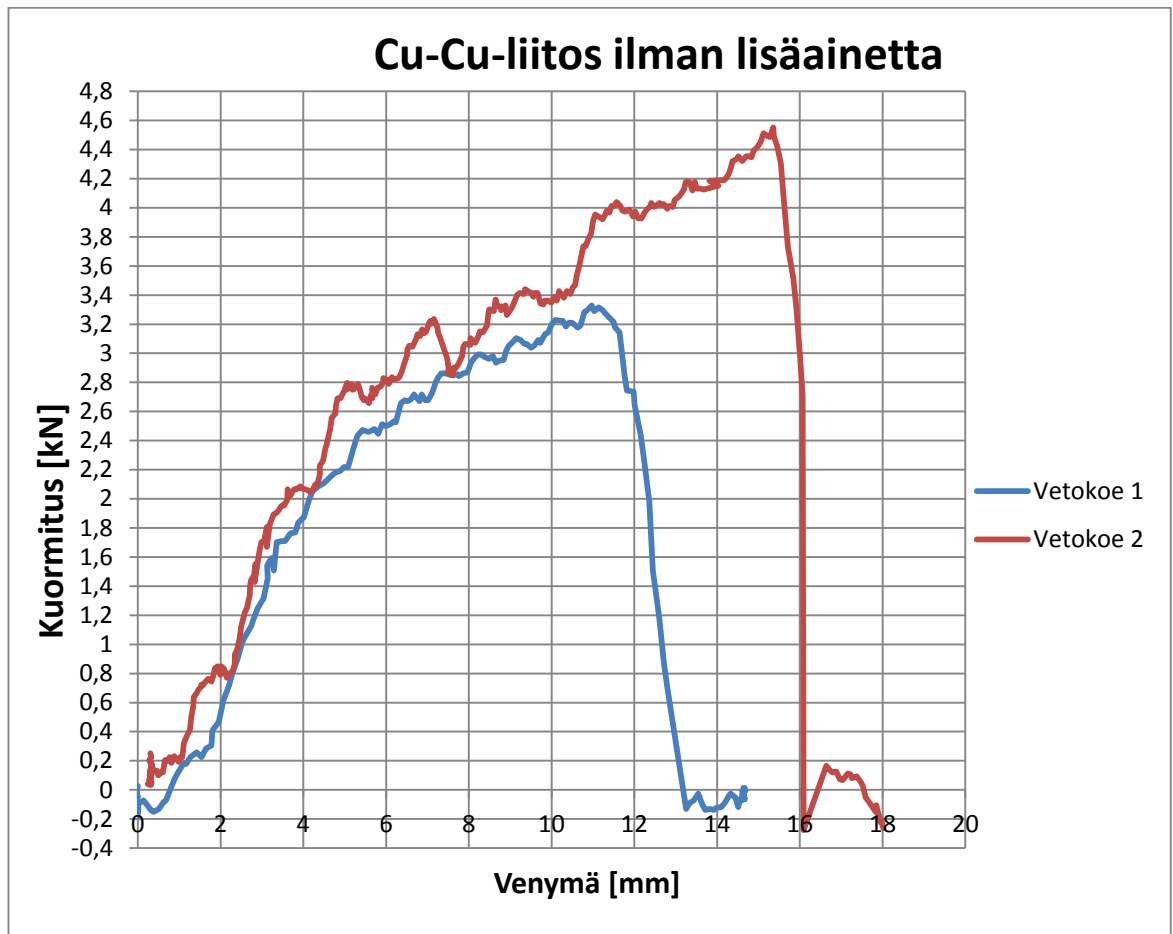
Painauman lävistäjien ja koevoiman avulla voidaan määrittää materiaalin kovuus seuraavasti (Finfocus Instruments, 2012):

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (3)$$

Yhtälössä 3 HV on Vickers-kovuus, F on käytetty koevoima ja d on painauman lävistäjien keskiarvo. Kovuuden tunnuksen HV perässä oleva numero kuvaa koevoimaa painimen kuormituksena kilogrammoina. (Finfocus instruments, 2012.)

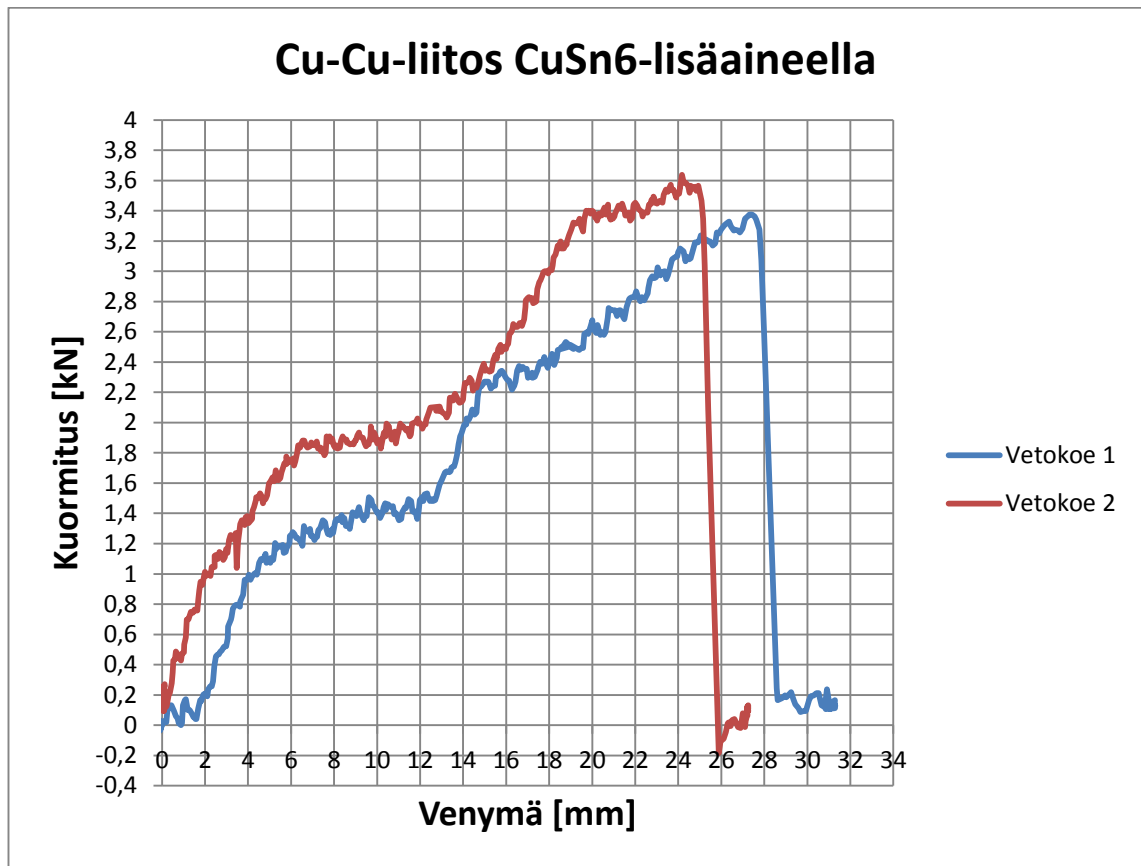
7.2 Tulokset ja niiden tarkastelu

Kuparikoekappaleen 2 eli ilman lisäainetta hitsatun kupariliitoksen kuormitukset on esitetty kuvassa 49. Murtuman sijainti oli molemmissa koesauvoissa keskellä hitsiä. Vetokokeessa 1 pienin poikkipinta-ala kappaleessa oli 24 mm² ja vetokokeessa 2 26 mm². Hitsin vajaan kupua ei ole huomioitu paksuudessa. Vetokokeessa 1 murtolujuus oli siis 138 MPa ja vetokokeessa 2 173 MPa. Murtovenymä oli 11 % vetokokeessa 1 ja vetokokeessa 2 17 %.



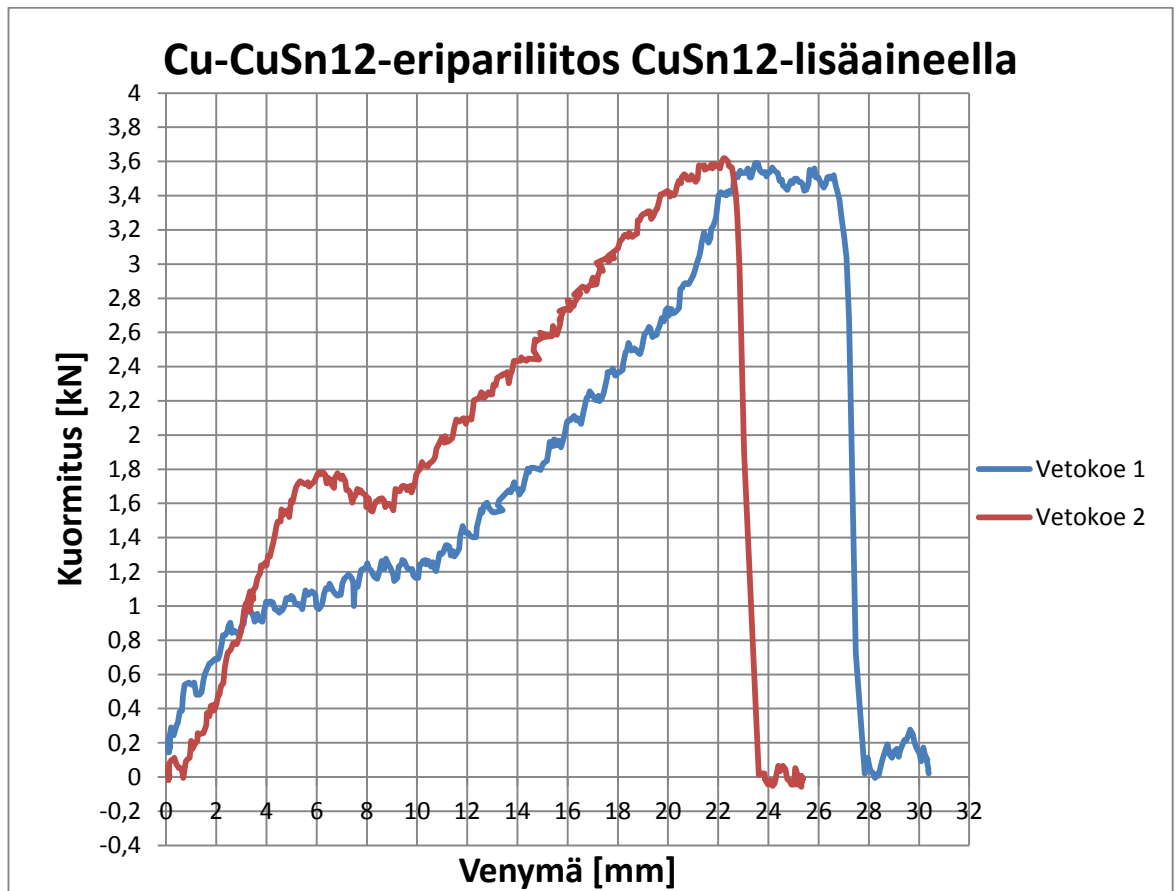
Kuva 49. Ilman lisäainetta hitsatun Cu-Cu-liitoksen vetokokeet.

Kuparikoekappaleen 6 eli CuSn6-lisäaineella hitsatun kupariliitoksen kuormitukset on esitetty kuvassa 50. Murtuman sijainti oli molemmissa koesauvoissa perusaineessa hitsin vieressä. Vetokokeessa 1 pienin poikkipinta-ala kappaleessa oli $16,5 \text{ mm}^2$ ja vetokokeessa 2 $18,75 \text{ mm}^2$. Vetokokeessa 1 murtolujuus oli siis 206 MPa ja vetokokeessa 2 195 MPa . Vetokokeessa 1 murtovenymä oli 26% ja vetokokeessa 2 22% .



Kuva 50. CuSn6-lisäaineella hitsatun Cu-Cu-liitoksen vetokokeet.

Eripariliitoskoekappaleen 5 eli CuSn12-lisäaineella hitsatun kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen kuormitukset on esitetty kuvassa 51. Murtuman sijainti oli vetokokeessa 1 hitsin vieressä kuparin puolella perusaineessa ja vetokokeessa 2 hieman kauempana hitsistä kuparin puolella. Vetokokeessa 1 pienin poikkipinta-ala kappaleessa oli 16,5 mm² ja vetokokeessa 2 18 mm². Vetokokeessa 1 murtolujuus oli siis 218 MPa ja vetokokeessa 2 200 MPa. Vetokokeessa 1 murtovenymä oli 17 % ja vetokokeessa 2 15 %.



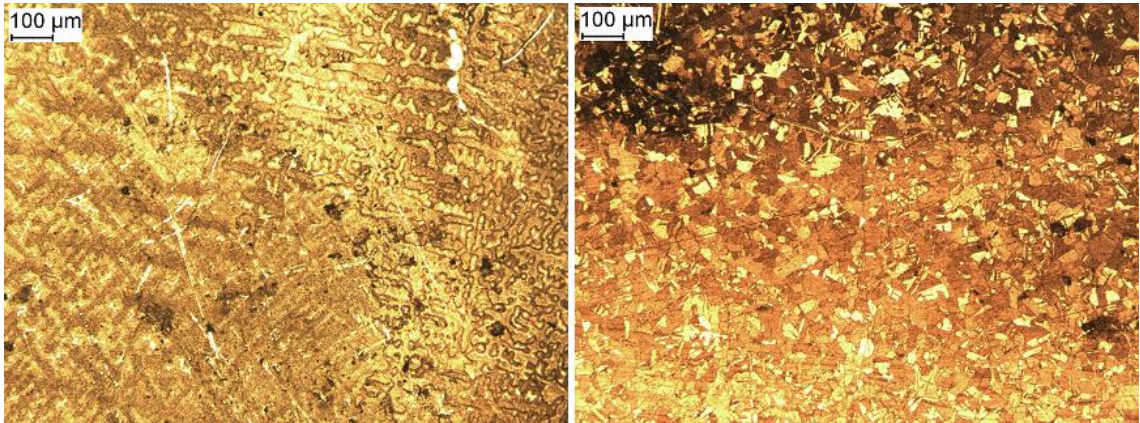
Kuva 51. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen vetokokeet.

Yhdessäkään taivutuskoekappaleessa ei ilmennyt virheitä. Kuvassa 46 näkyy, miten hitsi on lujittunut lisäaineen vaikutuksesta, jolloin perusaine on taipunut hitsiä helpommin. Kupari oli huomattavasti taipuisampaa kuin tinapronssi. Veto- ja taivutuskokeiden tulokset on esitetty kootusti taulukossa 13.

Taulukko 13. Veto- ja taivutuskokeiden tulokset.

Liitos	Vetokoe 1 [MPa]	Murtovenymä 1 [%]	Vetokoe 2 [MPa]	Murtovenymä 2 [%]	Pintataivutus 1	Pintataivutus 2	Juuritaivutus 1	Juuritaivutus 2
Cu+Cu ilman lisäainetta	138	11	173	17	OK	OK	OK	OK
Cu+Cu lisäaineella	206	26	195	22	OK	OK	OK	OK
Cu+CuSn12 lisäaineella	218	17	200	15	OK	OK	OK	OK

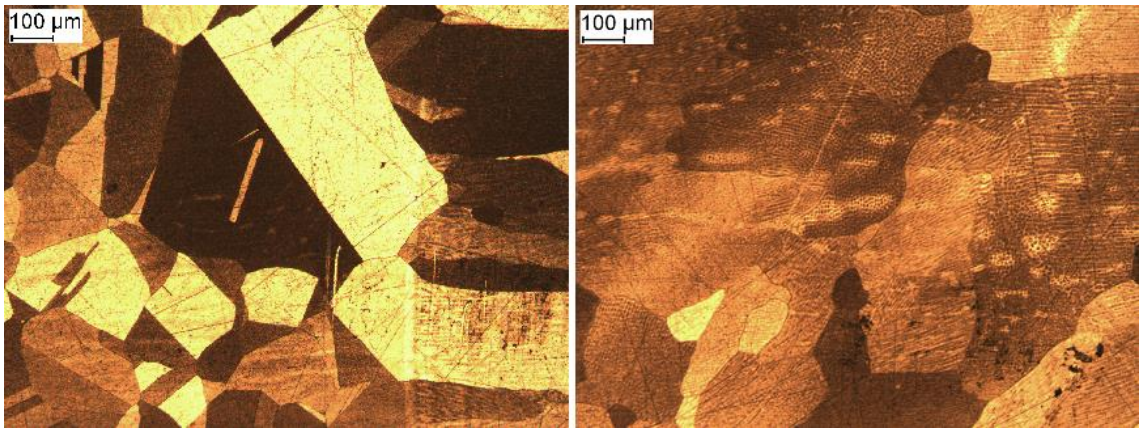
Perusaineiden mikrorakenteet on esitetty kuvassa 52. Kuvassa vasemmalla on tinapronssi ja oikealla kupari. Kuparikoekappaleen 2 makrohiekuva on esitetty kuvassa 53 ja mikrohiekuvat kuvassa 54. Kuvassa oikealla on hitsin mikrorakenne ja vasemmalla sularaja.



Kuva 52. Tinapronssin ja kuparin mikrorakenteet.



Kuva 53. Ilman lisäainetta hitsattu Cu-Cu-liitos. Hitsissä on suuri raekoko, ja vajaa kupu erottuu selvästi.

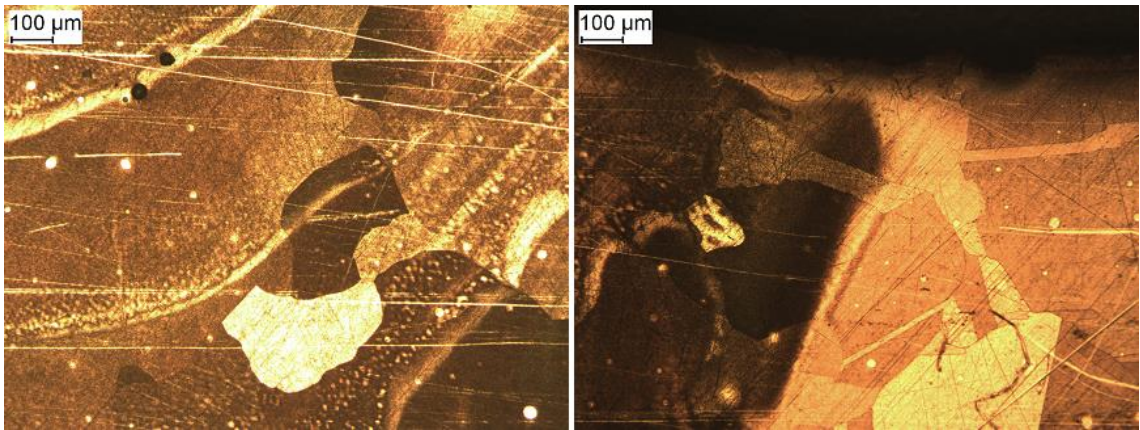


Kuva 54. Ilman lisäainetta hitsatun Cu-Cu-liitoksen sularaja vasemmalla ja hitsi oikealla. Perusaine liittyy hitsiin jouhevasti.

Kuparikoekappaleen 3 makrohiekkuva on esitetty kuvassa 55. Kuvassa 56 on vasemmalla liitoksen hitsin ja oikealla sularajan mikrorakenteet.

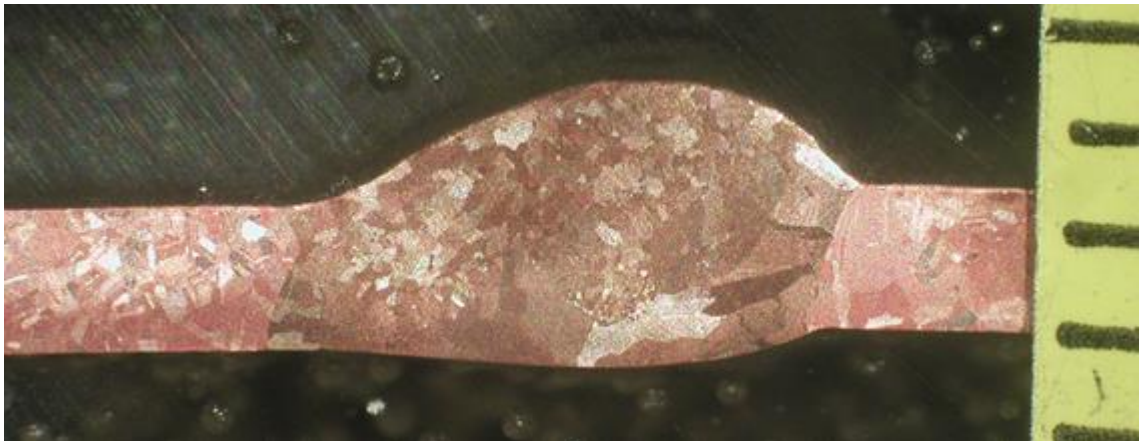


Kuva 55. CuAl8-lisäaineella hitsattu Cu-Cu-liitos. Hitsi on huokoinen, ja lisäaine on seostunut huonosti perusaineeseen.

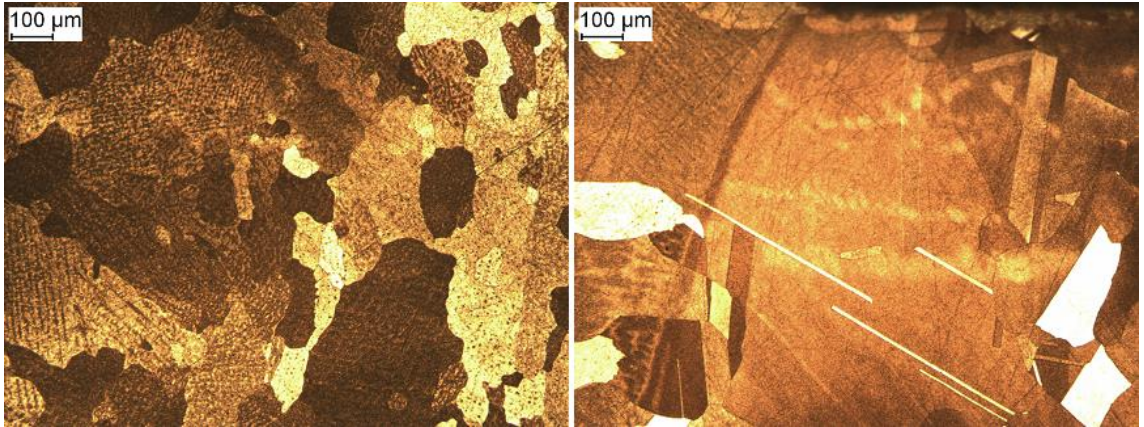


Kuva 56. CuAl8-lisäaineella hitsatun Cu-Cu-liitoksen hitsi vasemmalla ja sularaja oikealla. Sularaja on jyrkkä ja selvästi erottuva.

Kuvassa 57 on esitetty kuparikoekappaleen 6 makrohiekkuva. Kuvassa 58 on vasemmalla liitoksen hitsin ja oikealla sularajan mikrorakenteet.



Kuva 57. CuSn6-lisäaineella hitsattu Cu-Cu-liitos. Lisäaine on seostunut hyvin perusaineeseen.

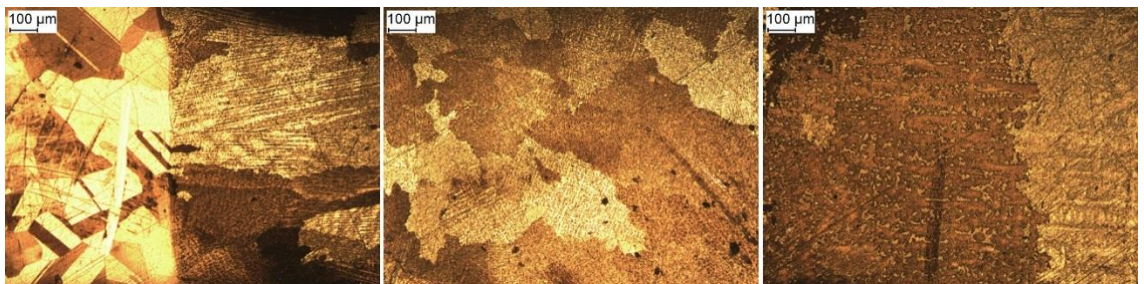


Kuva 58. CuSn6-lisäaineella hitsatun Cu-Cu-liitoksen hitsi vasemmalla ja sularaja oikealla.

Kuvassa 59 on esitetty eripariliitoskoekappaleen 2 makrohiekkuva, jossa kuparin puoli on vasemmalla. Kuvassa 60 on esitetty vasemmalta oikealle sularaja kuparin puolella, hitsi ja sularaja tinapronssin puolella.



Kuva 59. Ilman lisäainetta hitsattu Cu-CuSn12-eripariliitos. Kuparin puoli on sulanut huonosti tinapronssiin verrattuna.

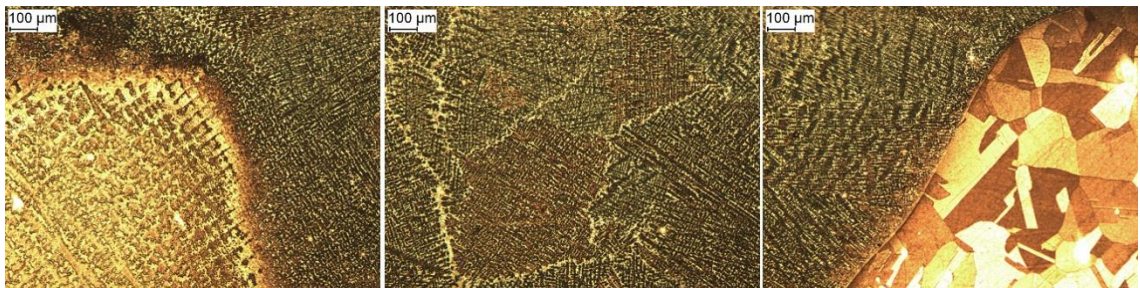


Kuva 60. Ilman lisäainetta hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen hitsi keskellä ja sularajat (vasemmalla kuparin puoli ja oikealla tinapronssin puoli).

Kuvassa 61 on esitetty CuP-langalla hitsattu kohta eripariliitoskoekappaleesta 2. Kuparin puoli on oikealla. Kuvassa 62 on esitetty vasemmalta oikealle sularaja tinapronssin puolella, hitsi ja sularaja kuparin puolella.

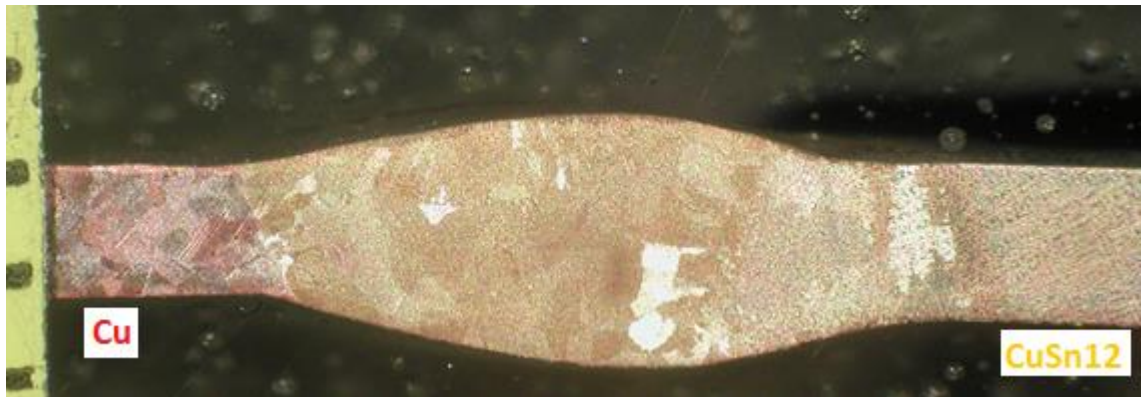


Kuva 61. CuP-lisäaineella hitsattu Cu-CuSn12-eripariliitos. Lisäaine on sekoittunut heikosti perusaineisiin.

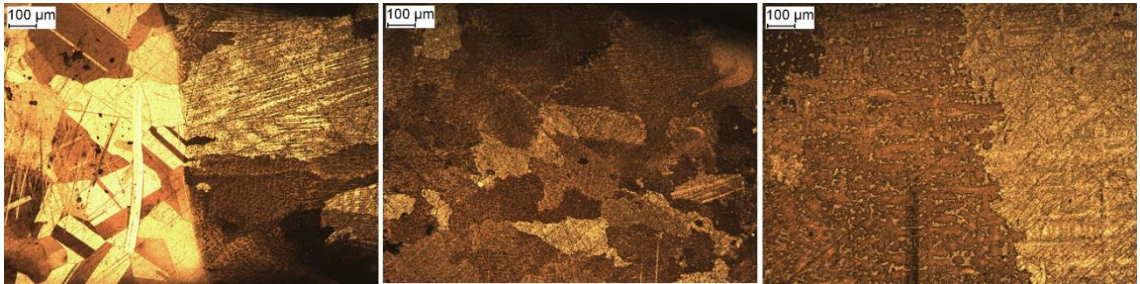


Kuva 62. CuP-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen hitsi keskellä ja sularajat (vasemmalla tinapronssin puoli ja oikealla kuparin puoli). Hitsin mikrorakenne eroaa merkittävästi perusaineista.

Kuvassa 63 on esitetty eripariliitoskoekappaleen 3 makrohiekkuva, jossa kuparin puoli on vasemmalla. Kuvassa 64 on esitetty vasemmalta oikealle sularaja kuparin puolella, hitsi ja sularaja tinapronssin puolella.

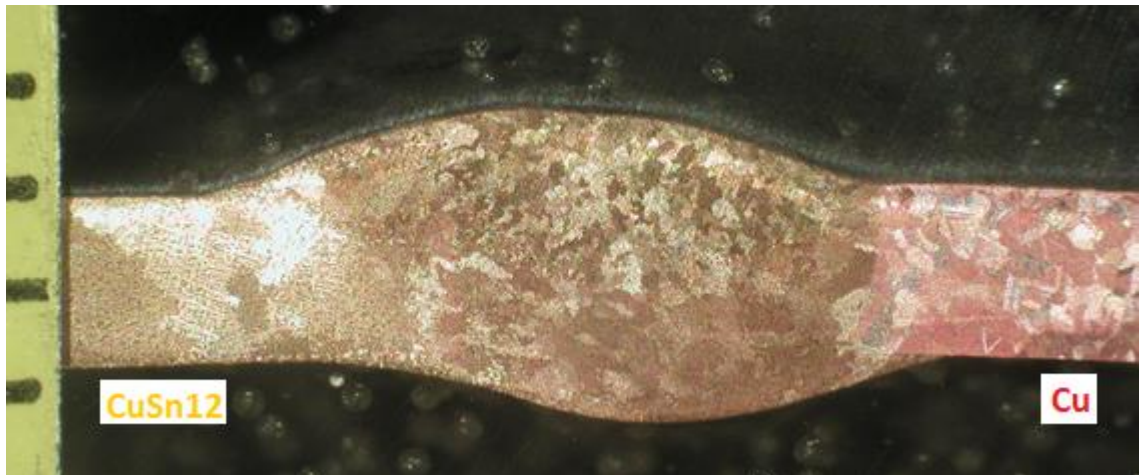


Kuva 63. CuAl8-lisäaineella MIX TIG -toiminnolla hitsattu Cu-CuSn12-eripariliitos. Kuparin puoli on selvästi sulanut, ja liitos on jouheva.

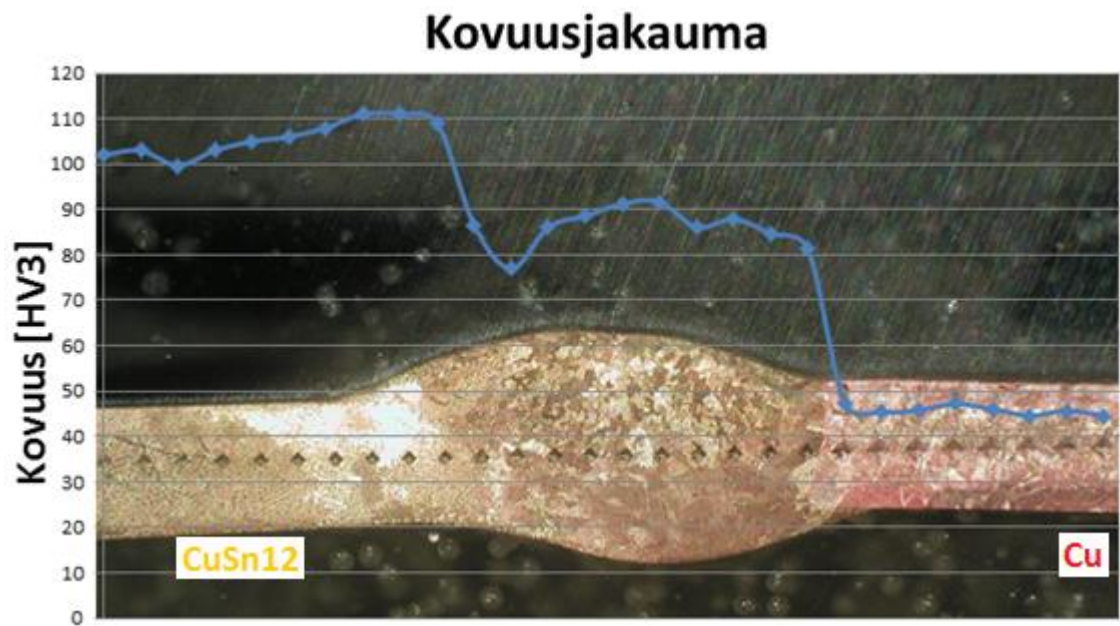


Kuva 64. CuAl8-lisäaineella MIX TIG -toiminnolla hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen hitsi keskellä ja sularajat (vasemmalla kuparin puoli ja oikealla tinapronssin puoli).

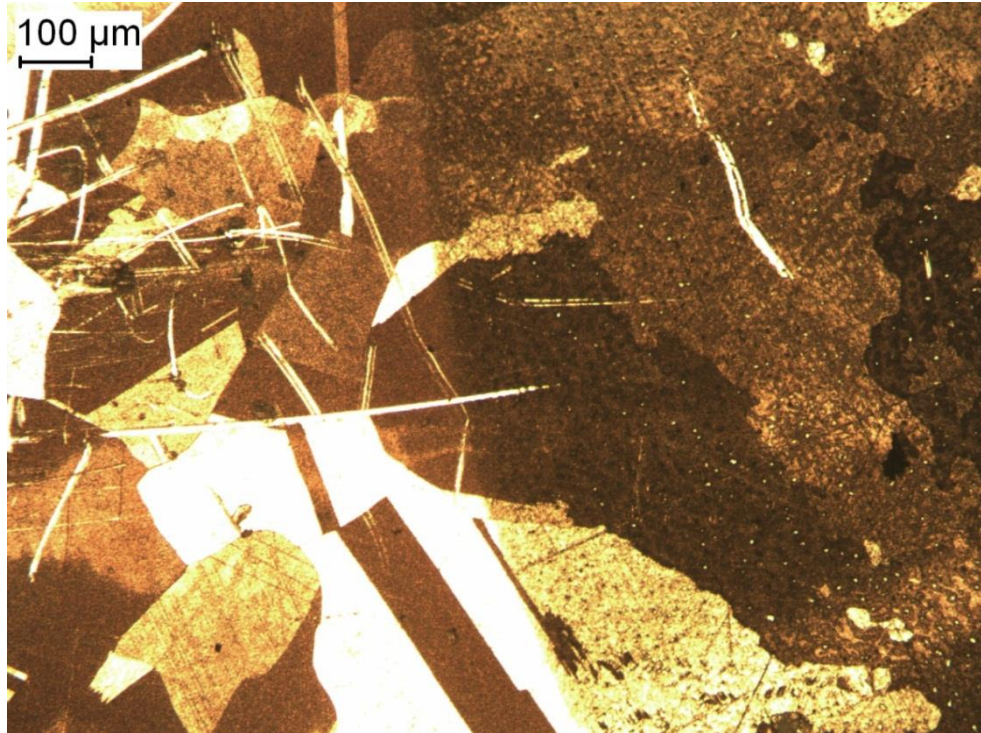
Kuvassa 65 on esitetty eripariliitoskoekappaleen 5 makrohiekkuva ja kuvassa 66 siitä mitattu kovuusjakauma. Kuvassa 67 on esitetty sularaja kuparin puolella, kuvassa 68 sularaja tinapronssin puolella ja kuvassa 69 hitsin mikrorakenne. Makrohiekkuva on peilikuva mikrohiekuviin nähden ja siinä kuparin puoli on oikealla.



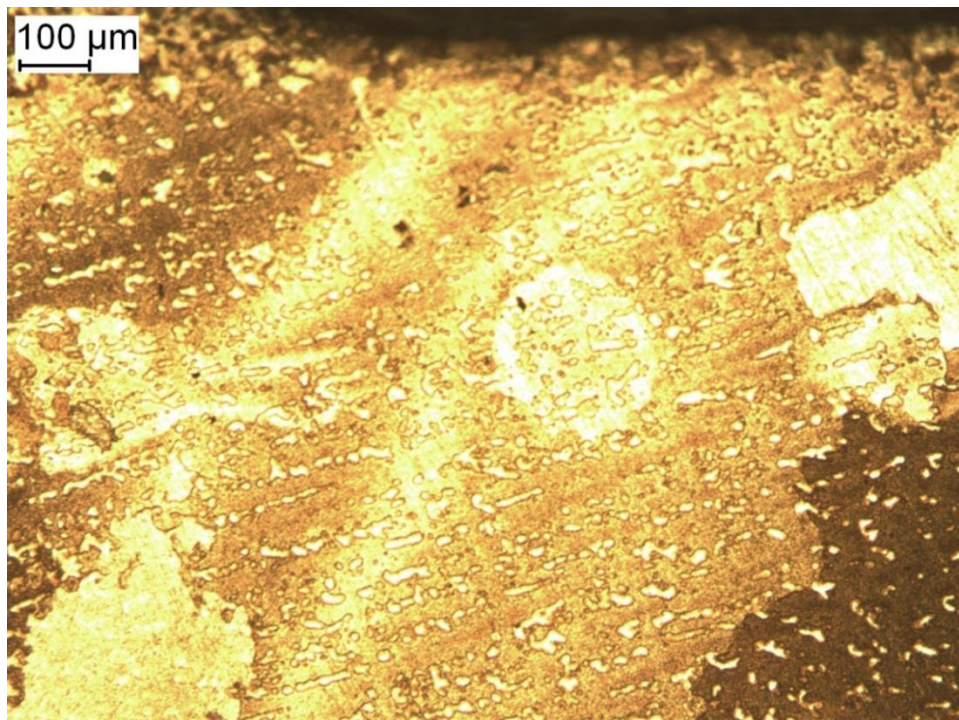
Kuva 65. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen makrohiekuva. Lisäaine on sekoittunut hyvin perusaineiden kanssa.



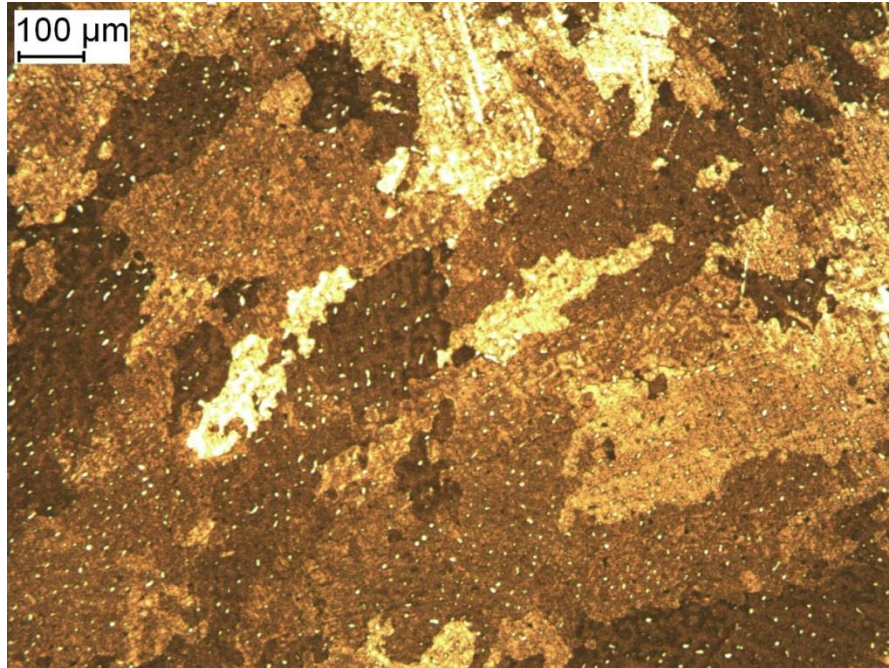
Kuva 66. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen kovuusjakauma. Tinapronssi on hitsauksen jälkeen huomattavasti kuparia kovempaa.



Kuva 67. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen sularaja kuparin puolella. Kuparin perusaine on sulanut hitsiin.



Kuva 68. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen sularaja tinapronssin puolella. Sularaja on heikosti erotettavissa hyvän seostumisen takia.



Kuva 69. CuSn12-lisäaineella hitsatun Cu-CuSn12-eripariliitoksen hitsin mikrorakenne. Hitsissä näkyy deltafaasipitoisia saarekkeitä tummina pisteinä.

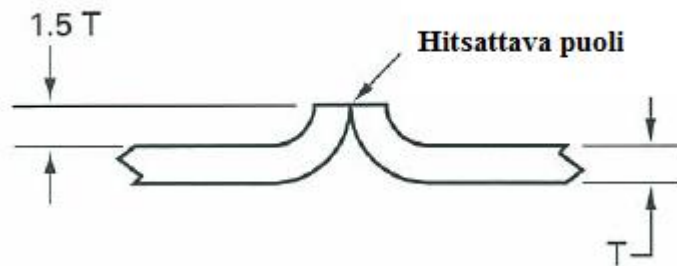
Kuparin vetokokeissa havaittiin, että lisäaine paransi selvästi liitoksen lujuutta, kun hitsissä ei tällöin ollut vajaata kupua. Kuitenkin CuSn6-lisäaineellakin hitsatessa keskimääräinen murtolujuus oli 200,5 MPa, mikä on merkittävästi EN 1057 -standardin mukaista nimellistä 290 MPa:n murtolujuutta alhaisempi. Kuvassa 52 esitettyä kuparin perusainetta ja hitsien kuvia vertaamalla nähdään, että rakeenkasvu on hitsatessa merkittävää, jolloin muokkauksella saavutettu lujuus ja kovuus pienenevät. Vastaavanlaisen pehmeäsihekkutetun kupariputken standardin mukainen vähimmäismurtolujuus on 220 MPa, mikä on myös hieman havaittuja lujuusarvoja korkeampi. Suurimman sallitun käyttöpaineen laskennassa kuitenkin käytetään murtolujuutena hekkutetulle kupariputkelle 200 MPa:n arvoa, joka vastaa koetuloksia (Cupori, 2014, s. 19). Murtovenymä oli lisäaineella hitsatuissa koesauvoissa keskimäärin 24 %, kun se taas pehmeäsihekkutetulla kupariputkella tulisi olla vähintään 40 %. CuSn6-lisäaineen käyttö siis selvästi pienentää liitoksen sitkeyttä. Ilman lisäainetta hitsatessa koesauvat murtuivat keskeltä hitsiä, joten se ei ole kelvollinen hitsausmenetelmä lujuutta vaativissa kohteissa. Lisäaineella hitsatut koesauvat murtuivat perusaineen puolelta, joten menetelmä on käyttökelpoinen, jos perusaineen lujuuden lasku on hyväksyttävissä rajoissa. Taivutuskokeissa ei ilmennyt minkäänlaisia virheitä kummassakaan tapauksessa. (SFS-EN 1057, 2010, s. 20.)

Tinapronssin ja kuparin eripariliitoksen vetokokeissa havaittiin, että tinapronssi on selvästi lujempi puoli liitoksesta, joten kuparin puoli on liitoksen kannalta kriittisempi. Koesauvojen murtolujuus oli kuitenkin keskimäärin 209 MPa eli hieman enemmän kuin lisäaineella hitsatussa kupariliitoksessa. Eripariliitoksessa käytettiin runsaammin seostettua CuSn12-lisäainelankaa, joten tinaa on myös seostunut enemmän kuparin puolelle lujittaen sitä. Murtovenymä oli selvästi pienempi kuin kuparikoetsauvoissa, koska käytetylle tinapronssille koetustodistuksen mukainen murtovenymä oli 5 %. Tinapronssi venyi siis selvästi kuparia vähemmän. Myöskään kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen taivutuskokeissa ei havaittu virheitä.

Kuvan 66 kovuusjakaumasta huomataan, että kuparin kovuus oli hitsin vieressä keskimäärin 45HV3. EN 1057:n mukaisella hehkutetulla putkella ohjeellinen kovuus on 40HV5-70HV5 eli liitoksen kovuus kuparin puolella vastaa suunnilleen hehkutettua kupariputkea (SFS-EN 1057, 2010, s. 20). Tinapronssin puolella kovuus on alimmillaan 100HV3 kauempana hitsistä ja se nousee 110HV3:n kovuuteen hitsiä lähestyttäessä. Koetustodistuksen mukaan tinapronssin Brinell-kovuus (HB) oli 90 eli Vickers-kovuutena noin 95 (Struers, 2015). Tinapronssissa ei siis ole havaittavissa pehmenemistä, vaan kovuus päinvastoin kasvaa hieman liitoksessa. Lisäainelanka on hieman tinapronssin perusainetta runsaammin seostettua, joten kovuus on odotetusti noussut sularajan lähellä, sillä tinapronssivaluilla kovuus kasvaa tina määrän kasvaessa (Paul & Sellamuthu, 2014, s. 1344; Scott, 1991, s. 121). Myös kuumenemisen aiheuttamat jäännösjännitykset ovat voineet lujittaa ja kovettaa liitosta hieman kuten kuvassa 14 esitetyissä hitsauskokeissa. Hitsin kovuus on suuremman raekoon takia selvästi tinapronssin perusainetta alhaisempi.

Ilman lisäainetta hitsatun Cu-Cu-liitoksen makro- ja mikrohiekuvista nähdään, että rakeenkasvu on hitsauksessa merkittävää. Perusaineessa kuparin raekoko on keskimäärin 40 μm , kun se taas sularajalla on arviolta 270 μm . Kovuuden ja lujuuden laskulta on siis hyvin vaikea välttyä hitsauksessa, sillä puhtailla kupareilla lujuutta ei voida palauttaa lämpökäsittelyillä, vaan kappaletta tulisi muokkauslujittaa (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 71). Jos arvioidaan kuparin kovuuden ja raekoon suhdetta yhtälön 1 mukaisesti, voidaan valita materiaalikohtaiseksi kertoimeksi $5700 \text{ MPa/nm}^{-1/2}$ (Khisamov, 2015). Jos vakiokovuudeksi valitaan hehkutetun kuparin

kovuus 40HV5, tulisi kuvan 67 kuparin 280 μm :n keskimääräisen raekoon perusteella kovuudeksi 50,8HV5 sularajan vieressä mitatusta 47,2HV3:n kovuudesta poiketen. Perusaineessa raekoon ollessa 40 μm tulisi kovuudeksi 68,5HV5 valmistajan ilmoittamasta keskimääräisestä 125HV5:n kovuudesta poiketen. Hall-Petchin yhtälö ei siis anna luotettavia tuloksia muokkauslujitettujen kuparien kohdalla, mutta hitsissä se antaa melko tarkan tuloksen ja sitä voidaan tulosten perusteella käyttää kovuuden karkeaan arviointiin. Liitoksesta muodostuu ilman lisäainetta hitsatessa jouheva, mutta siihen tulee vajaata kupua. Vajaa kupu voitaisiin välttää toisenlaisella liitoksen muotoilulla. Tällainen liitos on esitetty kuvassa 70. Kuvan mukainen laipparailo suositellaan hitsattavaksi ilman lisäainetta (Metalliteollisuuden keskusliitto, 2001, s. 118).



Kuva 70. 1,6 mm:n aineenpaksuudelle suositeltu liitosmuoto kuparin TIG-hitsauksessa (mukaillen: CDA, 1997, s. 16).

CuAl8-lisäaine sopi heikosti kuparin hitsaukseen tasaviralla, mikä oli havaittavissa jo silmämääräisesti hitsauksen jälkeen. Hitsissä on huokosia, ja sularajat ovat hyvin selkeät eli lisäaine ei ole seostunut perusaineeseen kunnolla. CuSn6-lisäaine soveltui kuparin hitsaukseen paljon paremmin, sillä hitsiin ei tullut huokosia, ja lisäaine liittyi perusaineeseen jouhevammin. Sularajat ovat kuitenkin selvästi erotettavissa makrokuvasta.

Ilman lisäainetta hitsatun kuparin ja tinapronssin eripariliitoksen makrohiekuvassa näkyy selvästi, miten erisuuruiset lämmönjohtavuudet vaikeuttavat hitsausta. Hitsin ja tinapronssin raja on jouheva, mutta kupari on selvästi sulanut heikommin. Se aiheuttaa reunahaavaa kuparin puolelle ja tekee sularajasta jyrkän.

Kuparifosforilisäainelangalla hitsattu eripariliitos vaikutti silmämääräisesti paremmalta kuin mikro- ja makrohiekuvat paljastavat. Lisäaine levittyi sulavasti pintaan ja juureen, mutta se on seostunut perusaineisiin hyvin vähän, joten liitos muistuttaa enemmän juotosta kuin hitsiä. Huokosia ei kuitenkaan ole havaittavissa, vaikka niiden takia kaasuhitsauslisäainelankaa ei suositella TIG-hitsauksessa (Katainen & Mäkinen, 1995, s. 202). MIX TIG -toiminnolla ja CuAl8-lisäaineella hitsattu eripariliitos on selvästi jouhevampi kuin tasavirralla samalla lisäaineella hitsattu kupariliitos. Sularajat eivät ole yhtä jyrkät, ja lisäaine on seostunut selvästi perusaineeseen etenkin tinapronssin puolella. Mikrorakenteeltaan liitos vaikuttaa käyttökelpoiselta. CuSn12-lisäaineella hitsattu eripariliitos on myös jouheva ja siinä sularaja tinapronssin puolella on vaikeasti erotettavissa mikrokuvissa. Myös kuparin puolella perusaine on liittynyt hyvin hitsiin, ja hitsin punertavan värin perusteella kuparia on seostunut hitsiin selvästi muita lisäaineellisia menetelmiä enemmän.

Perusaineen tavoin liitoksen mikrorakenteessa näkyy tinapronssin puolella lujittavia tummia deltafaasipitoisia saarekkeitä, kuten 12 %:n tinapitoisuudella oli odotettavissa. Teoriassa kupari voi muodostaa yksifaasisen rakenteen tina kanssa enintään 17 %:n tinapitoisuudella, mutta käytännössä raja on noin 14 %, vaikka silloinkin yksifaasisen rakenteen muodostuminen on hyvin harvinaista. Koska kuparin sulamispiste on korkeampi, kuparin hilarakenteeseen liukenematon tina rikastuu dendriittien reunoille muodostaen alfa- ja deltafaasin seosta, josta osa muodostaa mikrorakenteeseen saarekkeitä dendriittien väleihin. Käytännössä liitoksen hitsauksessa ei voida välttyä deltafaasin muodostumiselta, mutta pienissä määrissä se antaa liitokselle suuremman lujuuden, kovuuden ja kulumisen keston. Deltafaasi muodostuu $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ -yhdisteestä, jolloin tinapitoisuus siinä on 25,8 % eli selvästi muuta rakennetta enemmän, mikä tekee alfa- ja deltafaasin seoksesta muuta mikrorakennetta lujempaa ja kovempaa, jolloin se myös estää materiaalin plastista muodonmuutosta. Se on kuitenkin huomattavasti alfafaasia hauraampaa, joten liiallinen deltafaasin muodostuminen voisi olla haitaksi liitoksen sitkeydelle ja aiheuttaa liitokseen halkeamia. Muodostuminen on kuitenkin ollut mikrohiekuvien perusteella vähäistä, joten kappale on jäähtynyt riittävän hitaasti. (Nielsen, 2015; Scott, 1991, s. 15-25.)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Happipitoista kuparia lukuun ottamatta puhtailla kupareilla ei esiinny mitään lähtökohtaisia hitsausmetallurgisia ongelmia, vaan hitsaukseen haasteet liittyvät suoritustekniikkaan. Seostetuilla kupareilla ja kupariseoksilla seosaineiden muodostamat jähmettymisrakenteet saattavat olla hitsausliitoksen laadun kannalta haitallisia esimerkiksi ylivanhenemisen, halkeilun ja kaasuuntumisen takia. Kuparimetallien eripariliitoksissa eroavat lämmönjohtavuudet tulee huomioida valokaaren tai säteen kohdistamisessa, ja seosaineiden yhteensopivuudesta tulee varmistua.

Kuparimetalleja voidaan liittää kaasuhitsauksella, kaarihitsauksella, sädehitsauksella ja kitkahitsauksella. Myös muitakin erikoisprosesseja on mahdollista käyttää joissain kohteissa. Kaarihitsausprosesseissa kuparimetallien hitsaukseen soveltuu parhaiten TIG-hitsaus paikallisen korkean lämmöntonin ja lisäaineen tuonin hallinnan takia. Laserhitsauksella, elektronisuihkuhitsauksella ja FSW-hitsauksella voidaan saavuttaa TIG-hitsausta korkeampi hitsin laatu, mutta ne eivät ole yhtä yleiskäyttöisiä prosesseja, vaan sopivat rajallisemmin erikoissovelluksiin. Kupariputkien TIG-hitsauksessa voidaan myös hyödyntää orbitaali-TIG-hitsausta, jos hitsaustuotantoa halutaan mekanisoida.

Loviisan ydinvoimalaitoksen hitsauksen laatuvaatimukset muodostuvat ISO 3834-2:n asettamista vaatimuksista sekä STUK:n YVL-ohjeista. ISO 3834-2 toimii koko toiminnan kattavana laatujärjestelmänä, joka antaa ohjeet hitsauksen suunnitteluun, toteuttamiseen, valvontaan ja tarkastamiseen. YVL-ohjeet asettavat pätevoimiselle ja tarkastamiselle lisävaatimuksia. Hitsaavan toiminnan ja hitsien hyvä laatu saavutetaan hitsaajien pätevoimisellä ja käyttämällä menetelmäkokeilla pätevoityjä hitsausohjeita.

Ydinvoimalaitoksilla on muista työympäristöistä poikkeavia erityispiirteitä, jotka tulee huomioida hitsausta suunniteltaessa. Koboltin, antimoinin, hopean ja nikkelin käyttöä tulee niiden aktivoitumisen takia välttää rakenteissa, jotka altistuvat neutronisäteilylle. Ferriittisillä teräksillä neutronisäteily aiheuttaa säteilyhaurastumista, joka nostaa

teräksen transitiolämpötilaa. Kupariin kohdistuva neutronisäteily ei aiheuta merkittäviä säteilyturvallisuusriskejä, mutta se kuitenkin voi haurastuttaa myös kuparin rakennetta. Rikkomattoman ja rikkovan aineenkoetuksen tekee STUK:n vaatimuksesta kolmas osapuoli. Turvallisuusluokitelluista rakenteista tulee lähettää suunnitelmat hyväksyttäväksi STUK:lle ja niiden suunnittelussa tulee huomioida, että niiden tarkastus voidaan toteuttaa esteettömästi.

Hitsauskokeiden perusteella todettiin, että kuparin tai kuparin ja tinapronssin päittäisliitoksia ei kannata hitsata ilman lisäainetta. Testien perusteella sopivin lisäaine molemmissa tapauksissa oli tinapronssi. MIX TIG -toimintoa käyttämällä kuitenkin myös alumiinipronssi vaikutti mahdollisesti soveltuvan tinapronssin ja kuparin hitsaukseen. MIG-hitsauksen havaittiin soveltuvan huonosti kuparin hitsaukseen. Vaikka esikuumennusta ei yleensä suositella testatuilla aineenpaksuuksilla, sillä voidaan helpottaa hitsauksen aloittamista. Tinapronssin ja kuparin eripariliitoksen hitsaaminen on erilaisten lämmönjohtavuuksien takia haastavaa, joten se vaatii hitsaajalta harjoitusta. Lämmönjohtavuuserojen vaikutusta voidaan kuitenkin pienentää kohdistamalla valokaari selvästi kuparin puolelle.

Laboratoriotutkimukset osoittivat, että kuparin ja tinapronssin liittämässä hitsaus oli soveltuva menetelmä voimalaitoksen käyttöön. Ainoa havaittu ongelma oli, että kupariputki pehmenee huomattavasti hitsauksessa tuodun lämmön vaikutuksesta. Suunnittelussa kohteessa sen ei kuitenkaan pitäisi olla ongelma, sillä suurimmat sallitut käyttöpainet lasketaan pehmeäksihehkutetun kuparin lujuuden perusteella, jonka vetokokeissa testattu murtolujuus ylitti. Hitsi on liitoksessa kuparin perusainetta lujempi ja kovempi, joten se ei ole kriittinen kohta rakenteessa. Niukemmin seostetulla tinapronssilisäaineella hitsattu kupariliitos osoittautui myös kokeissa hyväksyttäväksi menetelmäksi, joten menetelmää voidaan käyttää myös voimalaitoksella, jos sille ilmenee joskus tarvetta. Ilman lisäainetta hitsattu kupariliitos ei ollut soveltuva syntyvän vajaan kuvun takia.

Tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että Loviisan ydinvoimalaitoksella voidaan ottaa kuparimetallien hitsaus osaksi laitoksen toimintaa niin, että ISO 3834:n ja YVL-ohjeiden asettamat vaatimukset täyttyvät. TIG-hitsaus on muutenkin hyvin

yleinen prosessi voimalaitoksen hitsaustöissä, joten kuparimetallien TIG-hitsaus voidaan helposti sisällyttää muuhun toimintaan. Juottamiseen verrattuna hitsauksessa kappaleiden esikuumennuksen tarve on huomattavasti pienempi, mikä nopeuttaa työn aloittamista. Liitoksen silmämääräinen arviointi on myös hitsauksessa huomattavasti helpompaa.

LÄHTEET

AGA. 2013. Teollisuuskaasut. [Viitattu 12.5.2015]. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20IG%20Gases%20White%20Paper%20FI634_120490.pdf

Asabella, A., Cascini, G., Altini, C., Paparella, D., Notaristefano, A. & Rubini, G. 2014. The Copper Radioisotopes: A Systematic Review with Special Interest to ⁶⁴Cu. [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: <http://www.hindawi.com/journals/bmri/2014/786463/>

Aufhauser. 2015. Copper Welding Procedures. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: http://www.brazing.com/techguide/procedures/copper_welding.asp

CDA. 1997. Welding Copper and Copper Alloys. [Viitattu 15.5.2015]. Saatavissa: http://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/a1050.pdf

CDA. 2015a. Coppers. [Viitattu 1.6.2015]. Saatavissa: <http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/coppers.html>

CDA. 2015b. Application Data Sheet: Mechanical Properties of Copper and Copper Alloys at Low Temperatures. [Viitattu 30.6.2015]. Saatavissa: http://www.copper.org/resources/properties/144_8/

CDA. 2015c. Grain Size. [Viitattu 3.7.2015]. Saatavissa: http://www.copper.org/applications/industrial/DesignGuide/props/grain_size.html

Cupori. 2014. Taskuopas. [Viitattu 12.5.2015]. Saatavissa: http://www.cupori.com/files/cupori/brochures/Cupori_taskukirja_FIN.pdf

Davis, J. 2001. Copper and Copper Alloys. 1. painos. Yhdysvallat: ASM International. 652 s.

DoITPoMS. 2002. Full record of micrograph 500. [Viitattu 25.6.2015]. Saatavissa: http://www.doitpoms.ac.uk/miclib/full_record.php?id=500

ESAB. 2008. Hitsauslisäaineet. 546 s.

ESAB. 2015. TIG-elektrodit. [Viitattu 15.5.2015]. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=450506&tab=4>

Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2013. Vihreän teknologian näkökulmat konstruktio materiaalien valinnassa. Lappeenranta: LUT Scientific and Expertise Publications. 364 s.

Finfocus Instruments. 2012. Kovuusmittaus: Vickers (SFS-EN ISO 6507-1). [Viitattu 12.8.2015]. Saatavissa: <http://static.ecome.fi/upload/43/Kovuus%20Vickers.pdf>

Firestone, R. & Ekström, L. 2004. Isotopes of Copper (Z=39). [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: http://ie.lbl.gov/education/parent/Cu_iso.htm

Fortum. 2014. Fortumin Loviisan voimalaitoksen vuosihuolto alkaa 20.7. [Viitattu 2.6 2014]. Saatavissa: <http://www.fortum.com/fi/media/pages/fortumin-loviisan-ydinvoimalaitoksen-vuosihuolto-alkaa-207.aspx>

Fortum. 2015a. Fortum lyhyesti. [Viitattu 9.7.2015]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/fi/konserni/fortum-lyhyesti/pages/default.aspx>

Fortum. 2015b. Voimalaitoksen toiminta. [Viitattu 15.5.2015]. Saatavissa: https://www.fortum.fi/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan_voimalaitos/vl-toiminta/sivut/default.aspx

Heider, A., Stritt, P., Hess, A., Weber, R. & Graf, T. 2011. Process Stabilization at welding Copper by Laser Power Modulation. Lasers in Manufacturing 2011, Nro. 12, Osa A, s. 81-87.

Impomet. 2013. Hitsin hyvä. [Viitattu 15.5.2015]. Saatavissa: http://www.impomet.com/media/downloadable_files/hitsaajan_kasikirja/hitsaajan_kasikirja.pdf

Jabbari, M. & Tutum, C. 2013. Optimum Rotation Speed for Friction Stir Welding of Pure Copper. [Viitattu 3.7.2015]. Saatavissa: <http://downloads.hindawi.com/journals/isrn/2013/978031.pdf>

Karhula, T. 2014. Metallographic Studies of Electron Beam Welded Copper Lid: Macroscopic Studies and Hardness Measurements of the Cross-Section of XK049 at 323deg. Posiva Working Report, Nro. 2014-24, 54 s.

Katainen, H. & Mäkinen, A. 1995. Aineliihostekniikka. 3.-4. painos. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö. 283 s.

Kemppi. 2010. Wise-ratkaisuilla tuottavaan lopputulokseen. [Viitattu 22.5.2015]. Saatavissa: http://www.kemppiweldingproducts.com/flash/fi/datasheets/datasheet_wise_fi.pdf

Kemppi. 2015a. Käytännön hitsausvinkkejä. [Viitattu 22.5.2015]. Saatavissa: <http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/Print/722ED1863EE07CE9C225718E0022A285?OpenDocument>

Kemppi. 2015b. TIG-menetelmät. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/FI/akp.nsf/frameset/Frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/FI/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=Empty&main=/inet/kemppi/contman.nsf/KemppiSearch?ReadForm&Query=tig&AdditionalSearch=FIELD+DocType+CONTAINS+FI&SearchOrder=3&start=1&count=10&top=/inet/kemppi/FI/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=News

Khisamov, R. 2015. How can I find constants of Hall-Petch relation for pure copper?. [Viitattu 11.8.2015]. Saatavissa: http://www.researchgate.net/post/How_can_I_find_constants_of_Hall-Petch_relation_for_pure_Copper

Kosonen, A. 1996. Kobolttivapaiden pinnoitteiden kulumiskestävyys ydinvoimalaitosolosuhteissa. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/005/28005591.pdf

- Lahti, K. & Lukkari, J. 2002. Welding of copper-nickel alloys at Kvaener Masa-Yards. Svetsaren, Osa 57, Nro. 2, s. 9-10.
- Larkiola, J. 2011. Mikrorakenteisten metallituotteiden joustava valmistus. [Viitattu 5.6.2015]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-06863-11.pdf>
- Lee, W. & Jung, S. 2003. The joint properties of copper by friction stir welding Materials Letters, Osa 58, Nro. 6, s. 1041-1046.
- Liming, L., Shengxi, W. & Limin, Z. Study on the dissimilar magnesium alloy and copper lap joint by TIG welding. Materials Science and Engineering, Osa 476, Nro. 1-2, s. 206-209.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2006. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1.-2. painos. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö. 429 s.
- Lin, J., Chang, H. & Wu, M. 2014. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding. Journal of Manufacturing Processes, Osa 16, Nro. 2, s. 296-304.
- Looser. 2005. Looser Bronze 65 (LB 65). [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: http://www.bronze.ch/katalog/kat_pdf/kap_07/Reg_07-7.pdf
- Lukkari, J. 2002. Hitsin laatu ja hitsausvirheet. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: http://www.tooloutlet.fi/upload/File/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf?rnd=1333530538
- Lukkari, J. 2010. Helppoa ruostumattomien putkien hitsausta. [Viitattu 25.6.2015]. Saatavissa: <http://www.industriacenter.fi/cms/tiedostot/tiedostopankki/OrbitaaliTIGHitsaus.pdf>
- Mai, T. & Spowage, A. 2004. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium. Material Science and Engineering, Osa 364, Nro. 1-2, s. 224-233.

Matbase. 2015. CuSn12. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: <http://www.matbase.com/material-categories/metals/non-ferrous-metals/cast-copper/material-properties-of-g-cusn12-cast-copper-grade.html#properties>

Materion. 2011. Welding Copper Beryllium. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: <http://materion.com/~media/Files/PDFs/Alloy/Tech%20Briefs/AT0014-0311%20-%20Tech%20Briefs%20-%20Welding%20Copper%20Beryllium.pdf>

Mathers, G. 2015. Copper alloys - brasses and bronzes. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-copper-alloys-brasses-and-bronzes-112/>

Metalliteollisuuden keskusliitto. 2001. Kuparimetallit. 2. uudistettu painos. Tampere: Tammer-Paino Oy. 185 s.

Miller. 2015. TIG Welding Tips. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: http://www.millerwelds.com/resources/tech_tips/TIG_tips/hints_tips.html

Mosberg, R., Bohl, R., Howland, F. & Munse, W. 1951. Tensile Tests and Metallurgical Studies of Welded Copper Joints. Civil Engineering Studies: Structural Research Series, Nro. 19, s. 1-10.

NIDC. 2015. Copper-67. [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: https://www.isotopes.gov/catalog/product.php?element=Copper&type=rad&rad_product_index=15

Nielsen, W. 2015. Metallurgy of Copper-Based Alloys. [Viitattu 25.6.2015]. Saatavissa: http://www.copper.org/resources/properties/703_5/

Nieminen, R. 2014. Menetelmäkoe ja testaus osana WPS:n hyväksyntää. Hitsaustekniikka, Nro. 1, s. 33-40.

Nupponen, P., Silenius, M., Siitonen, P. & Vuoristo, P. 1985. Raaka-ainekäsikirja 3: Kuparit, kevytmetallit. 1. painos. Tampere: Satapaino. 252 s.

Pashazedah, H., Masoumi, A. & Teimournezhad, J. 2013. Numerical modelling for the hardness evaluation of friction stir welded copper metals. *Materials & Design*, Nro. 49, s. 913-921.

Paul, C. & Sellamuthu, R. 2014. The Effect of Sn Content on the Properties of Surface Refined Cu-Sn Bronze Alloys. *Procedia Engineering*. Nro. 87, s. 1341-1347.

Pettinen, R. 2009. Hitsauksen materiaalioppi. 3. painos. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 288 s.

Saunders, F. 2010. Copper, Heal Thyself. [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: <http://www.americanscientist.org/issues/pub/copper-heal-thyself>

Scott, D. 1991. Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals. Singapore: Tin Wah Press. 151 s.

SFS. 2013. Hitsauksen laadunvarmistus on tärkeää. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: http://www.sfs.fi/ajankohtaista/tuoteuutiset/tuoteuutiset_2013/hitsauksen_laadunvarmistus_on_tarkeaa.1497.news

SFS-EN 1011-1. 2009. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksien Osa 1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 25 s. Vahvistettu 20.4.2009.

SFS-EN 1057. 2010. Kupari ja kupariseokset. Saumattomat pyöreät kupariputket LVI-käyttöön. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 62 s. Vahvistettu 20.4.2010.

SFS-EN ISO 3834-2. 2006. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 23 s. Vahvistettu 13.2.2006.

SFS-EN ISO 9606-3. 1999. Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 3: Kupari ja kupariseokset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 36 s. Vahvistettu 23.8.1999.

SFS-EN ISO 14732. 2013. Hitsaushenkilöstö. Hitsausoperaattoreiden ja hitsausasettajien pätevyyskokeet. Metallisten materiaalien mekanisoitu ja automatisoitu hitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 53 s. Vahvistettu 7.10.2013.

SFS-EN ISO 15614-6. 2006. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Menetelmäkokeet. Osa 6: Kuparin ja kupariseosten kaari- ja kaasuhitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 53 s. Vahvistettu 16.10.2006.

SFS-EN ISO 17635. 2010. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Yleisohjeet metallisille materiaaleille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 36 s. Vahvistettu 23.8.2010.

SFS-EN ISO 17639. 2013. Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Hitsin makro- ja mikrohietutkimus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 21 s. Vahvistettu 9.12.2013.

SHY. 2008a. Hitsaajan pätevyyskokeet. [Viitattu 4.6.2015]. Saatavissa: <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/A9.pdf>

SHY. 2008b. Hitsauksen suoritus 1. [Viitattu 4.6.2015]. Saatavissa: <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/A6.pdf>

Struers. 2015. Hardness Conversion Table. [Viitattu 13.8.2015]. Saatavissa: http://www.struers.com/default.asp?top_id=5&main_id=25&doc_id=344&target=_self&collapse=

STUK. 1999. Ydinlaitosten mekaaniset laitteet ja rakenteet. Valmistuksen valvonta. [Viitattu 2.7.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL1.14fi_1999-10-04.pdf

STUK. 2000. Ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden turvallisuusluokitus. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL2.1fi_2000-06-26.pdf

STUK. 2003. Ydinlaitosten mekaaniset laitteet ja rakenteet. Testaus- ja tarkastuslaitosten hyväksyminen. [Viitattu 10.7.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL1.3fi_2003-03-17.pdf

STUK. 2004a. Ydinturvallisuuden varmistaminen. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_3.pdf/

STUK. 2004b. Ydinvoimalaitosten painelaitteet. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL3.9fi_2004-11-05.pdf

STUK. 2005. Ydinlaitosten painesäiliöt. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL3.1fi_2005-07-01.pdf

STUK. 2006. Ydinlaitosten putkistot. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL3.3fi_2006-06-26.pdf

STUK. 2008. Ydinlaitosten mekaaniset laitteet ja rakenteet. Rakennetarkastus. [Viitattu 10.7.2015]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVL1.15fi_2008-04-28.pdf

Stuklex. 2013a. Ydinlaitoksen rakenteellinen säteilyturvallisuus, 15.11.2013. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLC-1>

Stuklex. 2013b. Ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu, 15.11.2013. [Viitattu 3.6.2015]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLB-2>

Stuklex. 2013c. Ydinlaitoksen painesäiliöt ja putkistot, 15.11.2013. [Viitattu 7.7.2015]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLE-3>

Sun, X., Reglero, R., Sun, X. & Yakaman, M. 2000. Microhardness of bulk and higher density nanocrystalline copper obtained by hot compaction. *Materials Chemistry and Physics*, Osa 63, Nro. 1, s. 82-87.

Tampere University of Technology. 2013. Electron beam weld of copper in the background image. [Viitattu 28.5.2015]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/en/about-tut/departments/materials-science/services-for-business/ebw/index.htm>

Tampereen teknillinen yliopisto. 2005. Pistemäiset hilavirheet. [Viitattu 29.6.2015]. Saatavissa: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_3_4_1.php

Tooloutlet. 2015. TIG-elektrodit. [Viitattu 15.5.2015]. Saatavissa: <http://www.tooloutlet.fi/fi/Tuotteet/Hitsaus+ja+juottaminen/Hitsauskoneet/Lis%C3%A4varusteet/TIG-Elektrodit/718/TIG-elektrodit+/2750>

Totalmateria. 2006. Welding of Dissimilar Metals. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=152>

TWI. 2015. Copper-nickel alloys. [Viitattu 25.6.2015]. Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/copper-nickel-alloys-113/>

UC Santa Barbara. 2015. Copper-Tin Phase diagram - Bronze. [Viitattu 1.6.2015]. Saatavissa: <http://www.mrl.ucsb.edu/~edkramer/LectureVGsMat100B/99Lecture14VGs/CuSnPhaseDiagramVG.html>

Wisconsin Wire Works. 2015. Welding Dissimilar Metals with Wisconsin Wire Works Copper-Base Filler Metals. [Viitattu 2.6.2015]. Saatavissa: http://www.wisconsinwireworks.com/dissimilar_metals.html

Yao, C., Xu, B., Zhang, X., Huang, J., Fu, J. & Wu, Y. 2009. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper–steel dissimilar joint. *Optics and Lasers in Engineering*, Osa 47, Nro. 7-8, s. 807-814.

Power and Heat
Loviisan voimalaitos
pWPS LO-3133TT01

Rev.

Standardi

SFS-EN ISO 15609-1

Käyttö

Putki

Liitosmuoto

BW

Halkaisija

54 mm

WPQR
Turvaluokka
Hitsi tyyppi
Paksuus
EYT
ML / monipalko
1,5 mm
Perusaine

Tyyppi tai merkki

Cupori 110 Premium (Cu-DHP)

Promet 12 (CuSn12)

Perusaineen luokitus

CEN ISO/TR 15608

31

33

Fillers

Alue Lisäaine

1-2 TIG CuSn12

Luokitukset

EN ISO 14640

S-Cu 5410 (CuSn12P)

Alue Lisäaine

Luokitukset

Kaasu

Tyyppi

EN ISO 14175

Virtaus [l/min]

Suutin

Argon

II

12

Juuri

Argon

II

12

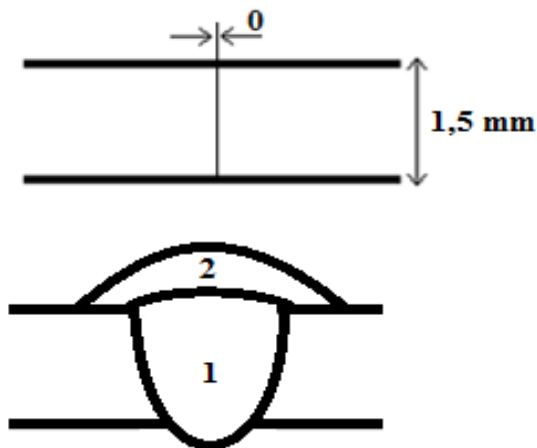
Asento

 EN ISO 6947
(ASME IX)

H-L045 (6G)

Aineen siirtyminen

-

Piirustus

Suoritus

ss nb

Pinnat puhdistettava mekaanisesti ja/tai kemiallisesti

ESAB GOLD+ -elektrodi

Pronssiputki alemmaksi

Silloitus 3 siltahitsillä

Railo

Hionta tai koneistus

Juuri

Ei ilmarakoa

Lisäaineen käsittely

Kuiva ja puhdas lisäaine

Jälkilämpökäsittely

Ei

Esilämmitys

200 °C

Välipalkolämpötila

-

Prosessit ja muuttujat

Alue	Prosessi	Lisäaine ø [mm]	Virta		Teho		min. kuljetusnopeus max. Teholla mm/min.	Langan syöttö [m/min]	ISO/TR 17671-1 Lämmöntuonti kJ/mm
			Laji	Napaisuus	Jännite (V)	Virta (A)			
1-2	141	1,6	dc	-	13-14	59	30	-	0,92-0,99

Lähtötiedot
Lisätiedot

 Päivämäärä
19.8.2015

 Laatija
Jussi Marttinen

Hyväksyjä