



Työraportti POSIVA-97-06

EB-hitsausmenetelmän kehittäminen massiivisen kuparikapselin valmistamiseen

**EB-hitsausparametrien optimointi
vaaka- ja pystysäteellä (1995-96)**

Harri Aalto

Outokumpu Poricopper Oy

Heikki Raiko

VTT Energia

Ismo Meuronen

Finavitec Oy

Toukokuu 1997

POSIVA OY

Mikonkatu 15 A, FIN-00100 HELSINKI

Puhelin (09) 2280 30

Fax (09) 2280 3719

Työraportti POSIVA-97-06

EB-hitsausmenetelmän kehittäminen massiivisen kuparikapselin valmistamiseen

**EB-hitsausparametrien optimointi
vaaka- ja pystysäteellä (1995-96)**

Harri Aalto

Outokumpu Poricopper Oy

Heikki Raiko

VTT Energia

Ismo Meuronen

Finavitec Oy

Toukokuu 1997

Tilaaaja: Posiva Oy
Annankatu 42 D
00100 Helsinki

Tilaus: 9548/96/JPS

Yhdyshenkilöt: TkL Jukka Pekka Salo, Posiva Oy *Jukka - Pekka Salo*
TkL Harri Aalto, Outokumpu Poricopper Oy

**EB-HITSAUSMENETELMÄN KEHITTÄMINEN
MASSIIVISEN KUPARIKAPSELIN
VALMISTAMISEEN**

**EB-hitsausparametrien optimointi vaaka- ja
pystysäteellä (1995-96)**

Harri Aalto, Outokumpu Poricopper Oy

Heikki Raiko, VTT Energia

Ismo Meuronen, Finavitec Oy

Projektipäällikkö: *Harri Aalto*
Harri Aalto

Hyväksyntä: *Lenni Laakso*
Lenni Laakso
Tuotekehityspäällikkö

Tiivistelmä

'EB-hitsausmenetelmän kehittäminen massiivisen kuparikapselin valmistamiseen'-projektin toisessa vaiheessa jatkettiin EB-hitsauksen kehittämistä noin 50 mm paksuisille kuparilevyille. Työvaihe koostui pääasiassa kokeista, jossa levymäisiä ja ¼-sylinterimäisiä työkappaleita hitsattiin horisontaalisäteellä umpiaineeseen eli ilman todellista liitosta. Tavoitteena oli vaakahitsauksen optimoinnin ohella saada mahdollisimman virheetön hitsi myös hitsauksen lopetuksen osalta.

Työkappaleita hitsattiin IGM Robotersysteme AG:llä Puchheimissa Saksassa ja Finavitec Oy:ssä Suomessa. Kokeiden tuloksena saatiin uutta tietoa hitsausparametrien siirrosta toiselle laitteelle, hitsausasentojen eroista, paksun kuparin EB-hitsauksesta horisontaalisäteellä ja alustavaa tietoa myös hitsauksen lopettamisesta. Kokeiden perusteella löydettiin säde vaaka-asennossa sellainen hitsausparametrien yhdistelmä, jolla voidaan hitsata kuparikanisterin pituusliitokset valssaukseen ja taivutukseen perustuvassa valmistusreitissä. Paksun kuparin vaakahitsaus osoittautui pystyhitsausta hankalammaksi ja virheettömän optimoidun lopputuloksen aikaansaaminen vaatii vielä jatkokehitystyötä virheettömän hitsauksen lopettamisen osalta.

Abstract

In the second phase (during 1995-1996) of the three year project "Development of EB-welding method for massive copper canister manufacturing" the welding development work of 50 mm thick copper was carried on. The work mainly consisted of the welding experiments using vertical EB-welding into bulk material (without real joint). The test pieces were plates and ¼-cylinders. The aim was to find out optimal parameters for horizontal EB-welding and development of the proper fade-out procedure which is needed for the circular welds.

Test pieces were welded at IGM Robotersysteme AG in Puchheim, Germany and at Finavitec Oy in Linnavuori, Finland. The new information was obtained for transferability of the welding parameters from the one EB-welding machine to another, the differences of the welding positions, horizontal EB-welding of thick copper and preliminary information of parameters during fade out.

The horizontal EB-welding of thick copper proved to be more challenging than vertical EB-welding. As a result the optimal welding parameters were developed for horizontal welding which can be used for longitudinal seams of the copper cylinder, but the development of the proper fade-out still requires more work.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TAVOITTEET	3
3. KOEOHJELMA SUORIIN LEVYIHIN (PROJEKTIN VAIHE II/1)	4
3.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta	4
3.2. Materiaalin ja koekappaleiden valmistus	5
3.3. Käytetty laitteisto ja hitsauskokeet	7
3.4. Tarkastusohjelma ja tarkastuslaajuudet	10
3.5. Näytepalojen irroitussuunnitelma	11
3.6. Tarkastukset	11
3.6.1. Radiografia	11
3.6.2. Mikrorakennetarkastus	13
3.6.3. Makrorakennetarkastus	13
3.7. Tulosten arviointi	17
4. KOEOHJELMA KAAREVIIN LEVYIHIN (PROJEKTIN VAIHE II/2)	18
4.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta	18
4.2. Materiaalin ja koekappaleiden valmistus	21
4.3. Hitsauskokeet	22
4.4. Tarkastusohjelma ja tarkastuslaajuudet	23
4.5. Tarkastukset	24
4.5.1. Silmämääräinen tarkastus	24
4.5.2. Radiografia perushitsistä	25
4.5.3. Radiografia hitsauksen lopetuksesta (fade-out)	27
4.5.4. Makrorakennetarkastus	28
4.6. Tulosten arviointi	29
5. FINAVITEC IN LISÄKOKEET (PROJEKTIN VAIHE II/3)	30
5.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta	30
5.2. Materiaali ja koekappaleet	30
5.3. Hitsauskokeet	30
5.4. Hitsien tarkastukset ja tulosten vertailu	31
5.4.1. Jalko- ja vaakahitsaus	31
5.4.2. Umpiaine- ja liitoshitsaus	32
5.4.3. Hitsauslaitteisto	33
5.5. Tulosten arviointi	34
6. IGM LISÄKOKEET (PROJEKTIN VAIHE II/4)	35
6.1. Koeohjelman suunnittelu ja tavoitteet	35
6.1.1. Materiaali ja koekappaleet	35
6.1.2. Hitsausparametrien valinta	36
6.2. Hitsauskokeet	37
6.3. Radiografiatarkastukset perushitsistä	38
6.4. Radiografiatarkastukset hitsauksen lopetuksesta (fade-out)	39
6.5. Tulosten arviointi	41
7. HITSAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS HITSIN LAATUUN	42
8. YHTEENVETO KOEOHJELMAN TOISEN VAIHEEN TULOKSISTA	46
9. VIITTEET	47

1. JOHDANTO

Posiva Oy:n käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskapseli on massiivinen pallografiittivalua oleva säiliö, jonka ulkopinnalla on 50 mm paksuinen kuparivaippa. Kuparivaipan valmistaminen ja kannen sulkeminen on suunniteltu tehtäväksi elektronisuihkuhitsauksella (EB-hitsaus). Vuosina 1994-1997 toteutetaan Posiva Oy:n ja Outokumpu Poricopper Oy:n yhteistyönä menetelmäkehitysprojekti, joka kuuluu osana TEKESin hitsaus- ja levytekniikan teknologiaohjelmaan. Projektin tavoitteena on kehittää elektronisuihkuhitsausta hyödyntävä kuparikapselien valmistusmenetelmä.

Outokumpu Poricopper Oy valmistaa kuparin puolituotteita. Yhtenä tuoteryhmänä on koneistetut kuparituotteet, jossa päätuotteita ovat liekkisulaton uunieleментit, teräksen jatkuvavalun valukokillit sekä erilaiset sähkövoimatekniikassa käytettävät johdinelementit. Uutena potentiaalisena tuotealueena nähdään pitkällä tähtäyksellä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa käytettävät massiiviset kuparikapselit.

Tämän projektin jo aiemmin toteutetussa ensimmäisessä vaiheessa optimoitiin hitsausparametrit 50 mm paksuisten suorien kuparilevyjen liitoshitsaukseen Finavitec Oy / Moottoriyksikön (aiemmin Valmet Lentokoneteollisuus Oy) EB-hitsauslaitteella. Kokeiden lopputuloksena saavutettu hitsausparametrien yhdistelmä mahdollistaa 50 mm paksuun liitokseen hyvälaatuisen EB-hitsin /1/. Ensimmäisessä vaiheessa ei optimoitu hitsauksen aloitusta eikä lopetusta.

Projektin toisessa vaiheessa, jota tämä raportti käsittelee, tutkittiin virheettömän vaakahitsauksen (säde horisontaaliasennossa) kehittämistä paksulle kuparille. Hitsauskokeita jatkettiin projektin ensimmäisessä vaiheessa optimoitujen parametrien siirtämisellä toiseen EB-laitteeseen ja muutamalla EB-säteen asento jalkoasennosta vaaka-asentoon.

Varsinaiset hitsauskokeet tehtiin IGM Robotersysteme AG:llä Puchheimissa Saksassa, missä käytössä oli 60 kW EB-laite. Suuremman tehon ansiosta voitiin laajentaa aiemmin käytettyjä parametriyhdistelmiä. IGM:n laitteisto mahdollisti esimerkiksi suuremman hitsausnopeuden käytön.

EB-hitsauskokeita tehtiin sekä suoriin levymäisiin että kaareviin neljännessylinterimäisiin koekappaleisiin. Kokeissa tutkittiin hitsausparametrien siirrettävyyttä toiselle laitteelle, vertailtiin jalko- ja vaakahitsausta, optimoitiin hitsausparametreja horisontaalisäteelle ja perehdyttiin sylinterimäisten kappaleiden hitsaukseen. Merkittävin ero aiempaan koesarjaan oli laitteiston ja hitsausasennon ohella hitsaus umpiaineeseen ilman erillistä juuritukea.

Projektin lopullisena tavoitteena on selvittää EB-hitsauksen soveltuvuus kapselin valmistukseen sekä valssaukseen ja taivutukseen perustuvassa valmistusreitissä tehtävien pituusliitosten hitsauksessa että kannen sulkemisessa tarvittavassa kehäliitoksessa.

Projektin lopputuote on todellisen kapselin kannen sulkemista demostroiva EB-hitsauskoe, jossa täyden mittakaavan kansi liitetään sylinterimäiseen kappaleeseen. Kannen sulkeminen pyritään optimoimaan siten, että EB-hitsauksessa esiintyisi mahdollisimman vähän hitsausvirheitä.

EB-hitsauksen ohella projektissa selvitetään hitsin tarkastettavuutta ultraäänitekniikalla ja EB-hitsin virumiskestävyyttä tehtävillä materiaalikoikeilla. Näihin tarkasteluihin liittyvät koeohjelmat ovat käynnissä VTT Valmistustekniikassa Espoossa.

2. TAVOITTEET

Projektin päätavoite on saavuttaa paksun kuparin liittämiseen soveltuva EB-hitsausmenetelmä, joka mahdollistaa hyväksyttävät hitsit kuparikapselien runkojen valmistuksessa ja kapselien kansien sulkemisessa. Keskeisenä kehitystavoitteena on hyväksymiskriteerit täyttävän hitsin aikaansaaminen levyjen päittäisliitokselle sekä kannen ja vaipan muodostavalle pyörähdyssymmetriselle liitokselle. Liitosten ainevahvuus on noin 50 mm.

Projektin toisen vaiheen, jota tämä raportti käsittelee, tavoitteet olivat:

- 55-65mm tunkeuman omaavan keskiosaltaan virheettömän ja mahdollisimman vähäisen juurivian omaavan hitsin aikaansaaminen IGM:n laitteistolla
- hitsausparametrien siirrettävyyden arviointi eri laitteistoja käytettäessä (Finavitec \mapsto IGM)
- Finavitec´illa optimoitujen hitsausparametrien "sovitus" IGM:n laitteistoon
- vertailevat kokeet vertikaali- ja horisontaalisäteen kesken
- hitsauksen lopettamiseen liittyvästä esikoesarjasta lupaavimman tekniikan valinta jatkokokeisiin
- hankkia tietoa sylinterimäisen kuparikappaleen EB-hitsauksesta
- arvioida mahdolliset erot umpiaineeseen ja liitokseen hitsattaessa
- hitsata koemateriaalia NDT-tarkasteluja varten

3. KOEOHJELMA SUORIIN LEVYIHIN (PROJEKTIN VAIHE II/1)

3.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta

Koeohjelma oli jatkoa Finavitec Oy:llä tehdyille hitsauskokeille /1/. Kokeiden tavoitteena oli Finavitec Oy:llä hitsattujen optimaalisten hitsausparametrien siirto IGM:n laitteistoon siten, että IGM:llä saavutettaisiin 55-65 mm tunkeuman omaava juuriviaton hitsi. Tavoitteena oli lisäksi tehdä vertailevia kokeita vertikaali- ja horisontaalisäteellä, jotta voitaisiin arvioida aiheuttaako hitsaus vaaka-asennossa merkittäviä lisäongelmia pystyasentoon verrattuna.

Koeohjelmaa täydennettiin yhdessä IGM:n asiantuntijoiden (Koy, Dobmeier ja Leeb) kanssa käytyjen keskustelujen perusteella. Merikittävimpiä varioituja hitsausparametreja olivat:

Hitsausnopeus

Finavitec Oy:llä tehdyt konfirmaatiokokeet tehtiin alhaisella hitsausnopeudella (1 mm/s) vertikaalisädettä käyttäen. IGM:n EBW-laitteen suurempaa hitsaustehoa oli tarkoitus hyödyntää nimenomaan hitsausnopeutta kasvattamalla, koska koehitsauksissa pyrittiin välttämään kappaleiden kuumentamista yli 200 °C-asteiseksi, jolloin päädyttiin 4 mm/s hitsausnopeuteen. Hitsauskokeita tehtiin myöskin 1 mm/s hitsausnopeudella, koska haluttiin vertailla hitsaustuloksia Finavitec Oy:n ja IGM:n laitteiden välillä täsmälleen samoilla hitsausparametreilla.

Fokus

Kokeiden yhteydessä tehtiin fokuskokeita säteen fokuksipisteen paikan optimoimiseksi koelevyjen pintaan nähden. Paksujen kappaleiden EB-hitsauksessa etsitään ensin riittävä hitsausteho jännitteen ja virran avulla, jolloin varmistetaan riittävän tunkeuman saavuttaminen. Tämän jälkeen fokuskokeella etsitään materiaalille ja hitsausparametreille sellainen fokus, jolla saadaan aikaan mahdollisimman virheetön hitsi.

Oskillointikuvio

Finavitec Oy:llä tehdyn esiselvityksen perusteella parhaat tulokset saatiin vertikaalisäteellä kappaleen liikesuuntaan nähden pitkittäisellä oskilloinnilla. IGM:n kokeissa käytettiin vertikaalisäteen ohella myös horisontaaalisädettä. Lisäksi päätettiin kokeilla ympyräoskillointia pitkittäisen oskilloinin ohella, koska tavoitteena oli varmistaa hitsin virheettömyys myös vaaka-asennossa.

Hitsausasento

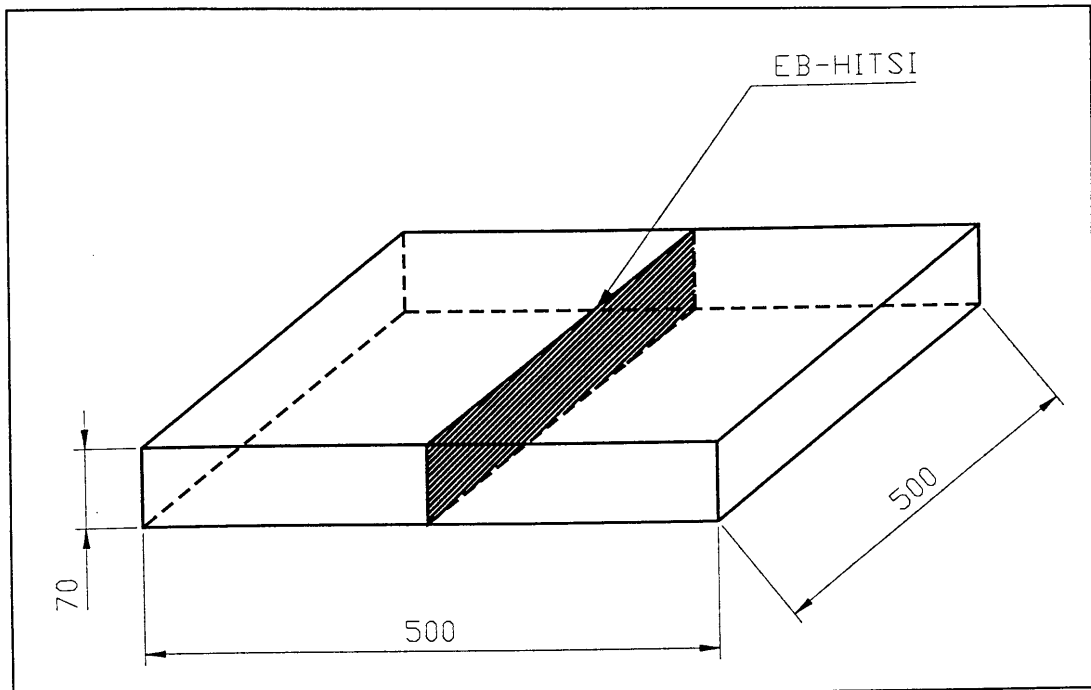
Tehtyjen kokeiden lähtökohtana oli oletus, että vaipan ja kannen välinen liitos EB-hitsataan horisontaaalisäteellä. Tämän vuoksi hitsauskokeet painottuivat koeohjelman tässä vaiheessa vaaka-asentoon. Hitsausasento vaikuttaa hitsisulan käyttäytymiseen ja syntyviin hitsausvirheisiin.

EB-hitsaus umpiaineeseen

Finavitec Oy:llä hitsattujen kuparilevyjen liitoskokeiden sijaan päädyttiin hitsaukseen umpiaineeseen ilman liitosta, koska tulosten arvioitiin olevan samansuuntaisia sekä umpiaineelle että liitoshitsille. Lisäksi liitoskokeet olisivat vaatineet lisäjärjestelyjä ja -kustannuksia. Samalla erillisestä juurituesta luovuttiin kokeiden helpottamiseksi ja käyttämällä paksumpaa perusainetta. Umpiaineeseen hitsaamisen ei katsottu aiheuttavan merkittävää lisähaittaa hitsauskokeiden analysoinin ja koetulosten vertailujen välillä. Koemenettelynä umpiaineeseen hitsaus on yleinen EB-hitsausparametrejä etsittäessä.

3.2. Materiaalin ja koekappaleiden valmistus

Jatkokokeiden materiaaliksi valittiin pelkästään fosforimikroseostettu hapeton kupari, Cu-OFP. Materiaalien EB-hitsattavuutta käsittelevissä tutkimuksissa on havaittu, että fosforimikroseostettu laatu on hitsattavuudeltaan lähes hapettoman kuparin (Cu-OF) veroinen /1/. Lisäksi Cu-OFP kuparilaadulle optimoidut hitsausparametrit soveltuvat myös puhtaalle hapettomalle kuparille (Cu-OF). Kuvassa 1 on esitetty esimerkki hitsauskokeissa käytetyistä koekappaleista.



Kuva 1: Hitsauskokeissa käytetty hitsauskoekappale.

3.3. Käytetty laitteisto ja hitsauskokeet

Varsinaiset koehitsaukset tehtiin IGM Robotersysteme AG:llä Puchheimissa Saksassa. Käytetty EB-laitteisto on perusratkaisuiltaan samankaltainen kuin Finavitec Oy:n laitteisto. Merkittävimmät erot ovat suurempitehoinen EB-tykki (60 kW), pienempi tyhjäkammio ja kaksoisfokuslinssin käyttö.

Elektronisuihkun kehittämiseen käytettävä hehkulanka (filamentti) on sama molemmissa laitteissa, mutta säteen kehittämisessä ja sen muotoilussa käytettävä ohjaushila on erilainen. Ero vaikuttaa hivenen elektronisuihkun halkaisijaan ja siten säteen energiajakaumaan.

Kaksoisfokusointilinssillä voidaan sädettä muotoilla vapaammin. Esimerkiksi säteen kartiomaisuus vaikuttaa hitsin tasakylkisyyteen. Nämä tekijät vaikuttavat myös hitsin juuriosaan, sen muotoiluun ja hitsissä esiintyviin virheisiin. IGM:n kokeissa kaksoisfokusointilinssin virta-arvot pidettiin vakioina.

Pienemmän tyhjäkammion vuoksi jouduttiin työskentelyetäisyyttä pienentämään. EB-tykin fokusointikelan ja työkappaleen välinen etäisyys oli Finavitec Oy:n kokeissa 653 mm ja IGM:n kokeissa 530 mm. Käytännössä lyhyempi työskentelyetäisyys kasvattaa hieman tunkeumaa sekä todennäköisyys tykin kaaripurkauksiin lisääntyy.

Seuraavassa IGM:n EB-hitsauslaitteen teknillisiä tietoja:

- Tyyppi: EBOCAM 50 - G600
- Valmistaja: Messer Griesheim GmbH / Steigerwald Strahltechnik
(nykyinen IGM Robotersysteme AG)
- Elektronitykki: max. teho 60 kW; 150 kV x 400 mA
- Tyhjökammio: 1,6x1,2x1,2 m
- Tyhjöpumput: diffuusio- ja mekaaniset pumput
- Manipulaattorit: XY-pöytä, pyöritysyksikkö
- Ohjaus- ja säätö: CNC ja PLC
- Lisävarusteet: kaksoisfokusointilinssi

Hitsauskokeet ja käytetyt parametrit löytyvät taulukosta I. Taulukkoon on yhdistettynä jokaisen kokeen tarkoitus ja kokeen tuloksena välittömästi IGM:llä saatu tulos.



Kuva 2. IGM:n laitteistolla tehtyjä levyhitsauskokeita.

Taulukko I: Hitsauskokeiden parametrit, kokeiden tarkoitus ja välittömät tulokset (IGM I)

Hitsi	Hitsausasento/ Hitsaustapa	Hitsausparametrit	Kokeen tarkoitus	Kokeen välitön tulos
I/1	Jalko/Umpiaine	150 kV, 200 mA, 1 mm/s	Hitsata Finavitec Oy:n konfirmaatiokokeen parametreilla ja arvioida hitsausparametrien siirrettävyyttä. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	Pinnassa kraatereita ja valumaa.
I/2	Jalko/Umpiaine	150 kV, 350 mA, 4 mm/s	Varmistua 50 mm tunkeuman saavuttamisesta hitsaamalla täysi tunkeuma. Hitsattu levyvahvuus t=50 mm.	Säde tuli levyn läpi. Virtaa pienennettiin 350 mA → 300 mA (hitsi 3).
I/3	Jalko/Umpiaine	150 kV, 300 mA, 5 mm/s	Varmistua 50 mm tunkeuman saavuttamisesta hitsaamalla täysi tunkeuma. Hitsattu levyvahvuus t=50 mm.	Säde tuli levyn läpi. Virtaa pienennettiin 300 mA → 250 mA (hitsi 4).
I/4	Jalko/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	Varmistua 50 mm tunkeuman saavuttamisesta hitsaamalla täysi tunkeuma. Hitsattu levyvahvuus t=50 mm.	Säde tuli juuri ja juuri levyn läpi. 70 mm paksuisiin levyihin päätettiin käyttää 300 mA virtaa.
I/5	Jalko/Umpiaine	150 kV, 300 mA, 4 mm/s	Optimifokuksen selvittäminen jalkoasennolle. Kokeessa käytettiin muuttuvaa fokusta 2650 - 2500 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	Säde tuli läpi koko hitsin matkalta. Virtaa pienennettiin 300 mA → 250 mA (hitsi 6).
I/6	Jalko/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	Optimifokuksen selvittäminen jalkoasennolle. Kokeessa käytettiin muuttuvaa fokusta 2650 - 2500 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	Säde ei tullut läpi.
I/7	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 200 mA, 4 mm/s	Optimifokuksen selvittäminen säde horisontaaliasennossa. Hitsattu levyvahvuus t=50 mm.	Fokusta säädettiin käsin optimifokus silmämääräisesti 2550 mA.
I/8	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	Optimifokuksen selvittäminen vaaka-asennolle. Kokeessa käytettiin muuttuvaa fokusta 2680 - 2530 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	
I/9	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 200 mA, 1 mm/s	Hitsata Finavitec Oy:n konfirmaatiokokeen parametreilla säde vaaka-asennossa ja arvioida hitsausparametrien siirrettävyyttä. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	Pinnassa kraatereita ja valumaa.
I/10	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	Optimifokuksen selvittäminen vaaka-asennolle. Kokeessa käytettiin muuttuvaa fokusta 2680 - 2530 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	
I/11	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	NDT-koekappale, jossa hitsi keskellä levyä. Ajettiin kiinteällä fokuksella 2600 mA. Oskillointikuviota muutettiin ympyrä-oskilloinnista poikkittaiseksi, koska eri oskillointikuvioiden vaikutus hitsin laatuun haluttiin selvittää. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	Oskillointikuvion muutoksen jälkeen kaaripurkaus noin 230 mm hitsauksen jälkeen.
I/12	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	NDT-koekappale, jossa hitsi keskellä levyä. Ajettiin kiinteällä fokuksella 2600 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	
I/13	Vaaka/Umpiaine	150 kV, 250 mA, 4 mm/s	Demostroida lopettamisessa (fade out) esiintyviä virheitä. Perushitsi kiinteällä fokuksella 2600 mA. Päätäminen 100 mm matkalla fokus 2600 mA → 2680 mA. Hitsattu levyvahvuus t=70 mm.	

3.4. Tarkastusohjelma ja tarkastuslaajuudet

Hitsatuille koekappaleille laadittiin tarkastusohjelma, jonka tarkoituksena oli selvittää hitsausvirheet ja tunkeuma. Metallografiset tarkastukset ja mittaukset tehtiin pääasiassa Outokumpu Poricopper Oy:ssä Porissa ja radiografiatutkimukset Huber Testing Oy:llä Tampereella. Koekappaleille eri vaiheissa tehdyt tarkastukset koottiin tarkastussuunnitelmaksi, joka on esitetty taulukossa II.

Taulukko II: *Kuparin EB-hitsauskokeiden tarkastussuunnitelma*

T = Tarkastus suoritetaan ja raportoidaan

	Identifiointi	Kemiallinen analyysi	Mittatarkastus	UÄ-tarkastus	Radiografiatarkastus	Mikrorakennetutkimus	Makrorakennetutkimus	Visuaalinen tarkastus	Hitsaus työn dokum.	Menetelmäkuvaus
Materiaalin valmistus	T	T								T
Koekappaleiden valmistus	T		T	T						T
Hitsaustyö	T								T	T
Näytekappaleiden irroitus	T		T							
Hitsien arvostelu	T				T	T	T	T		

3.5. Näytepalojen irroitussuunnitelma

Valituista näytteistä valmistettiin lattamaiset 15 mm vahvuiset ja koko hitsin mittaiset koekappaleet radiografiakuvauksia varten. Kuvausten jälkeen valmistettiin taulukon III mukaiset hieet, joista määritettiin tarkastussuunnitelman mukaiset osat alueet.

Taulukko III: *Hitseistä valmistetut hieet irroituskohdan mukaan jaoteltuna.*

Hitsi nro	Poikittaishieet hitsauksen aloituksesta[mm]	Pitkittäishieet hitsauksen aloituksesta [mm]
I/1	30, 150, 300	45-150
I/6	60, 235, 380	
I/8	50, 195, 315	
I/9	50, 195, 315	
I/10		
I/13		50-190

3.6. Tarkastukset

3.6.1. Radiografia

Radiografiaa varten valmistetuista näytteistä otettiin koko hitsin pituinen ja 15 mm levyinen näytepala koko hitsatun levyn paksuudelta (70 mm). Radiografiatarkastus tehtiin hitsisaumaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kuvista määritettiin niissä esiintyneet viat, jotka ovat taulukoituna taulukossa IV. Radiografiatarkasteluiden perusteella arvioitiin hitsausparametrien vaikutusta hitsiin ja sen laatuun.

Taulukko IV: *Hitsien radiografiatarkastusten tulokset*

Hitsausnäytteen tunnus (hitsin pituus)	RADIOGRAFIATULOKSET		
	Pinta-alue (0-20 % maksimitunkeumasta)	Keskialue (20-80 % maksimitunkeumasta)	Juurialue (80-100 % maksimitunkeumasta)
I/1 (460 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Keskialue virheetön.	Juurialueella noin 10 mm syvyistä epäyhtenäistä juurivikaa.
I/6 (460 mm)	0-3 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita keskittyneenä hitsin alkupäähän 0-250 mm. Loppuosa hitsistä 250-460 mm virheetöntä.	Yksittäisiä vikoja hitsin alkupäässä 0-250 mm. Loppuosa hitsistä 250-460 mm virheetöntä.	Juurivikaa, jonka syvyys on noin 10-15 mm. Loppuosassa hitsistä 300-400 mm virheettömintä.
I/8 (385 mm)	Pinta-alue virheetön.	Yksittäisiä huokosia koko hitsin alueella. Huokosten pääasiallinen esiintyminen keskittynyt kuitenkin hitsin alkupäähän.	Juurivikaa, jonka syvyys 10-15 mm. Loppuosassa hitsistä 200-300 mm virheettömintä.
I/9 (385 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Keskialue virheetön.	Juurialueella 10-15 mm syvyistä juurivikaa koko hitsin matkalla.
I/10 (385 mm)	Pinta-alue virheetön.	Yksittäisiä huokosia koko hitsin alueella. Huokosten pääasiallinen esiintyminen keskittynyt kuitenkin hitsin alkupäähän.	Juurivikaa, jonka syvyys 10-15 mm. Loppuosassa hitsistä 200-300 mm virheettömintä.
I/13	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita .	Yksittäisiä huokosia koko hitsin matkalla.	Juurivikaa, jonka syvyys on noin 10 mm. Päättämisessä (fade out) juurivikaa lukuunottamatta tunkeuma-aluetta 0-15 mm.

Fokuksen vaikutus hitsausvirheisiin

Radiografiatuloksista havaittiin, että hitsausvirheet ovat voimakkaasti riippuvaisia fokuksen asemasta. Röntgenkuvista havaittiin tämä riippuvuus etenkin hitsin keski- ja juurialueella. Näissä tapauksissa optimaalisin fokus löytyi sekä pitkittäisen että ympyräoskilloinnin yhteydessä tehdyssä fokuskokeessa fokusvirralla 2575 mA, jolloin fokustason asema on hitsattavan materiaalin sisällä. Kyseinen fokusvirta osoittautui hyväksi sekä jalko- että vaaka-asennossa tehdyissä hitsauskokeissa. Vertailun vuoksi todettakoon, että työkappaleen pinnalla fokusvirta oli 2695 mA (suihkuvirralla 50 mA tarkasteltuna).

Hitsausasennon vaikutus hitsausvirheisiin

Tutkituilla parametriyhdistelmillä tehdyissä vertailuissa vaakahitsauksessa esiintyi enemmän hitsausvirheitä jalkoasentoon verrattuna sekä 1 mm/s että 4 mm/s hitsausnopeuksilla. Hitsausvirheiden lisääntyminen näkyi röntgenkuvissa hitsin sisäosissa eli keski- ja juurialueella. Pintavirheiden osalta vaaka-asento johti hieman parempaan lopputulokseen.

Hitsausnopeuden vaikutus hitsausvirheisiin

Tehdyissä vertailuissa hitsin pinta-alueella nopeampi hitsausnopeus osoittautui paremmaksi. Erittäin hitaan (1 mm/s) hitsausnopeuden käyttö aiheutti 0-5 mm syvyisten pintakraaterien muodostumisen koko hitsin matkalle. Hitsin tunkeuman keskialueella 1 mm/s hitsausnopeus osoittautui sensijaan 4 mm/s nopeutta paremmaksi. Sekä jalko- että vaakahitsauksessa ei 1 mm/s nopeudella esiintynyt virheitä tunkeuman keskialueella. Hitsin juuren alueella 1 mm/s nopeudella hitsausvirheet esiintyvät epäyhtenäisesti, mutta yksittäinen vikakoko on 4 mm/s nopeudella hitsattua materiaalia suurempi. Nopeudella 4 mm/s hitsatulla materiaalilla taas yksittäinen vikakoko voi olla hyvinkin pieni, mutta juurivika esiintyy yhtenäisenä.

Oskillointikuvion vaikutus hitsausvirheisiin

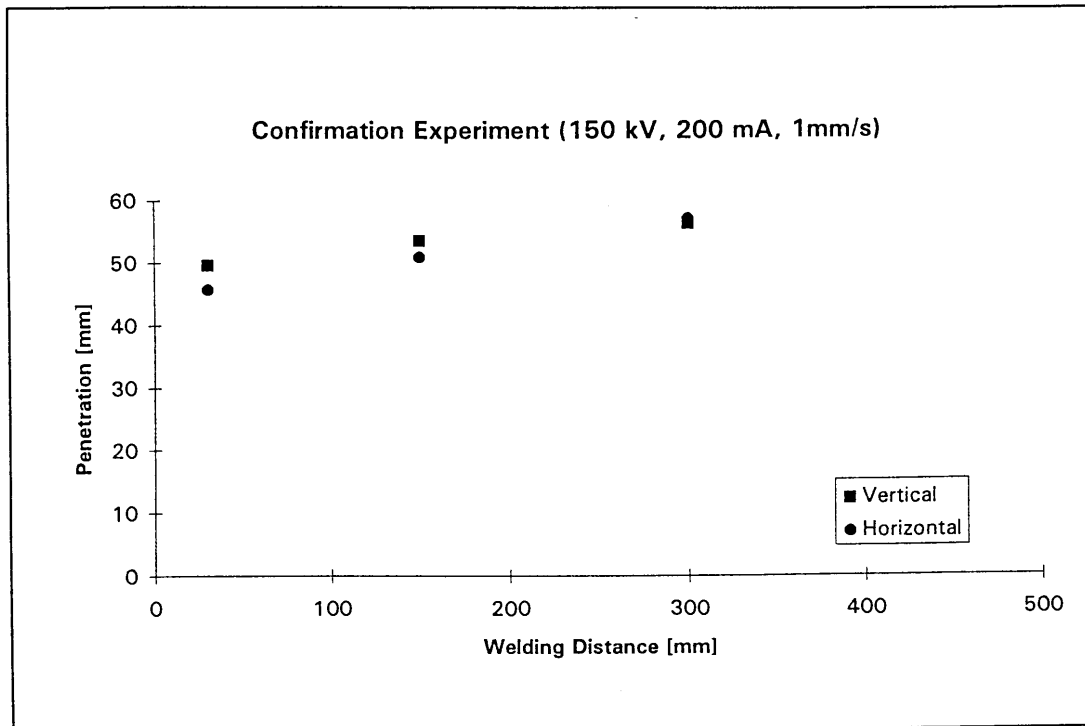
Vaaka-asennossa vertailtiin pitkittäisen ja ympyräoskilloinnin välisiä eroja hitsausvirheiden osalta. Varioidulla parametrialueella ei havaittu eroja hitsausvirheiden määrässä hitsin alueella.

3.6.2. Mikrorakennetarkastus

Raekoko oli hitsien alueella luokkaa 0.15-0.40 mm. Mikrorakennetarkasteluissa kiinnitettiin erityistä huomiota juuren alueella esiintyvien särömaisten virheiden eroavaisuuksiin. Tarkasteluissa havaittiin, että juuren alueella esiintyvät kylmäjuoksut ovat 4 mm/s hitsausnopeudella hieman pitempiä kuin hitaammalla 1 mm/s hitsausnopeudella.

3.6.3. Makrorakennetarkastus**Hitsausasennon vaikutus tunkeumaan**

Hitsausasennon vaikutusta tunkeumaan tutkittiin kahdella eri parametriyhdistelmällä (koehitsit I/1 ja I/9). Tulokset ovat kuvassa 3. Kuvista havaitaan, että hitsausasennolla ei näissä tapauksissa ole havaittavaa vaikutusta hitsien tunkeumaan.

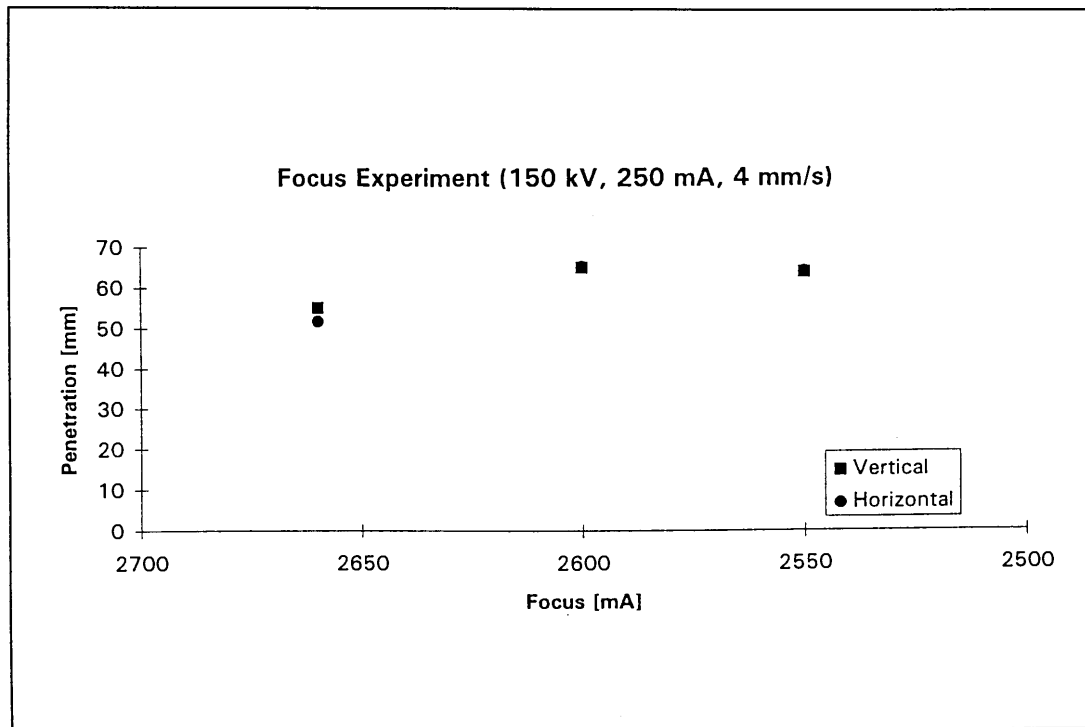


Kuva 3: Hitsausasennon vaikutus tunkeumaan.

Fokuksen aseman vaikutus tunkeumaan

Fokuksen vaikutusta on tarkasteltu kuvassa 4 sekä jalko- että vaaka-asennosta hitsatulla koekappaleella (koehitsit I/6 ja I/8). Kuvasta havaitaan tunkeuman kasvavan, kun fokusvirtaa muutetaan 2650 mA:ta 2600 mA:iin, jolloin fokuspiste 'painuu' syvemmälle materiaaliin. Tunkeuma ei kasva 2600 mA:n jälkeen, vaan saturoituu noin 60 mm tunkeuman tasolle.

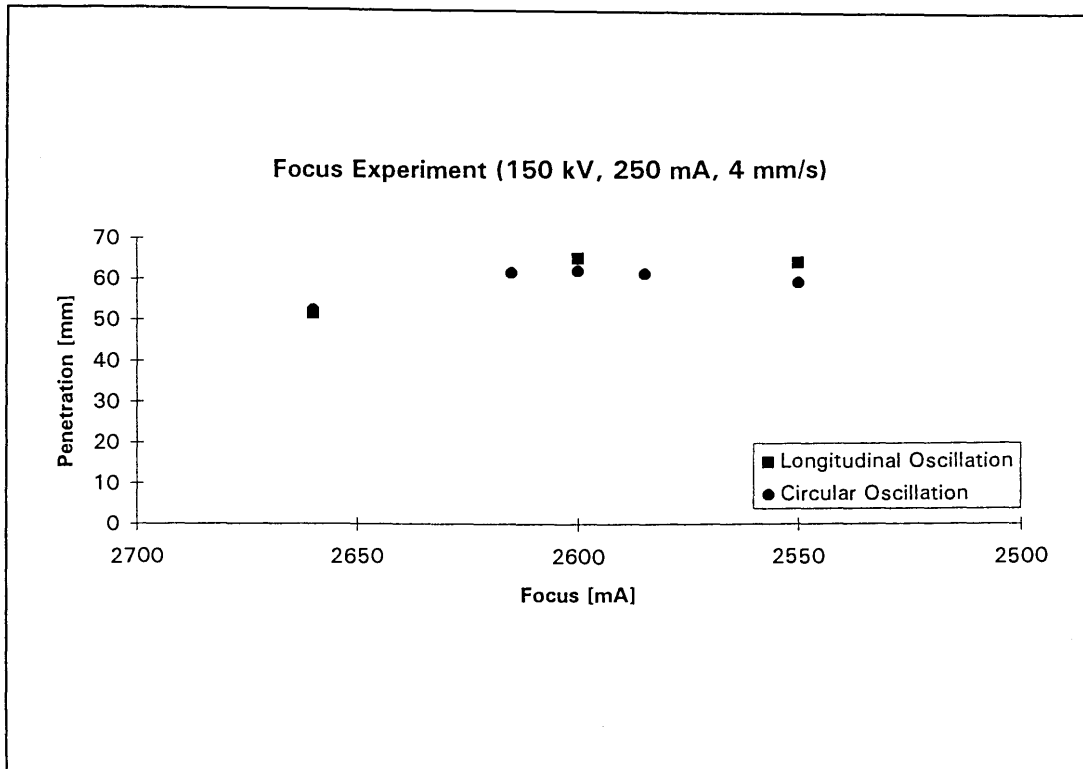
IGM:n laitteella käytetyt absoluuttiset fokusvirran arvot olivat erilaisia Finavitec Oy:n laitteeseen verrattuna, koska IGM:n laitteisto on hieman erilainen ja kokeissa käytettiin pienempää työskentelyetäisyyttä kuin Finavitecin kokeissa. Näinollen Finavitec Oy:llä ja IGM:llä käytetyt fokusvirran arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia toisiinsa nähden.



Kuva 4: Fokuksen vaikutus tunkeumaan.

Oskilloitukuvion vaikutus tunkeumaan

Vaaka-asennossa vertailtiin pitkittäisen ja ympyräoskilloinin vaikutusta tunkeumaan. Tulokset on esitetty kuvassa 5 Mitatuista tunkeumista havaittiin, että pitkittäisellä oskilloinnilla saavutettiin hieman parempi tunkeuma.



Kuva 5: Oskillointikuvion vaikutus tunkeumaan.

Hitsausnopeuden vaikutus tunkeumaan

Kokeissa käytettiin kahta eri hitsausnopeutta, jotka vastasivat hitsausenergioita 30 kJ/mm (1 mm/s) ja 9,4 kJ/mm (4 mm/s). Näistä 4 mm/s antoi kuitenkin hieman suuremman tunkeuman, kun käytettiin kiihdytysjännitettä 150 kV ja hitsausvirtoja 200 mA (1 mm/s) ja 250 mA (4 mm/s). Aikaisempien hitsauskokeiden tulosten ohella tämä tukee havaintoja, jonka mukaan hitsausnopeus ei juurikaan vaikuta saavutettavaan tunkeumaan. Tunkeuma määräytyy pääasiassa käytetyn kiihdytysjännitteen sekä hitsausvirran mukaan.

3.7. Tulosten arviointi

Vaakahitsaus osoittautui hitsausnopeuksilla 1 mm/s ja 4 mm/s jalkoasennossa tapahtuvaa hitsausta virhealttiimmaksi. Hitsin laadun suhteen ei kyetty jalkoasennossa toistamaan Finavitec Oy:llä saavutettua hitsin virheettömyyttä. Yksi mahdollinen syy tähän on hitsaus umpiaineeseen, kun taas Finavitec Oy:n kokeet hitsattiin liitoshitsauksena. Muita mahdollisia syitä olivat erilaiset ohjaushilat ja erilaiset työskentelyetäisyydet. Molemmat tekijät vaikuttavat säteen energiajakaumaan.

Hitsausnopeudella on keskeinen vaikutus syntyvään hitsiprofiiliin kuparissa. Hitsausnopeudella 4 mm/s saatu hitsiprofiili on syvä ja kapea 1 mm/s hitsausnopeuteen verrattuna, jolloin juuren alue muodostuu pyöreämmäksi.

Hitsausnopeuden nostaminen vaikutti hitsiä kaventavasti ja juurivirheiden määrää lisäävästi tarkastelluissa tapauksissa. Hitaalla hitsausnopeudella (1 mm/s) käytettiin tosin Finavitec Oy:llä optimoituja parametreja, kun taas nopeudelle 4 mm/s ei ollut käytettävissä optimifokuksen arvoa.

Radiografiatarkasteluista selvisi, että fokuksen asemalla on keskeinen merkitys hitsin laatuun. Optimifokus löytyi juurivian osalta sekä jalko- että vaakahitsauksessa 2575 mA fokusvirralla 4 mm/s hitsausnopeudella. Samoin vaaka-asennosta tehtyjen oskillointikuviovertailujen tapauksessa optimifokus oli samalla alueella.

4. KOEOHJELMA KAAREVIIN LEVYIHIN (PROJEKTIN VAIHE II/2)

4.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta

Koeohjelma perustui aiemmin tehtyjen kokeiden pohjalta eri parametrien välisen merkittävyyden arviointiin. Ohessa on käsitelty lyhyesti kuparin EB-hitsauksessa varioitavia parametreja IGM:n laitteistolla ja niiden vaikutusta hitsauksen lopputulokseen.

Hitsausjännite

Finavitec Oy:n EB-hitsauskokeissa havaittiin, että hitsausjännitteen laskeminen pienentään tunkeumaa merkittävästi. Tämän vuoksi seuraavissa kokeissa pidettiin perusteltuna pitää kiihdytysjännite 150 kV:na eli niin suurena kuin mahdollista.

Hitsausvirta

Kiihdytysjännitteen valitsemisen jälkeen tunkeumaan vaikutetaan voimakkaimmin hitsausvirralla. Hitsausvirtaa ei yleensä käytetä hitsin laatua parantavana parametrina, vaan sillä varmistetaan riittävän tunkeuman aikaansaaminen.

Hitsausnopeus

Finavitec Oy:n kokeissa optimaalinen hitsi saatiin 1 mm/s hitsausnopeudelle. Vaakahitsauksessa ja IGM:n kokeissa alustavat kokeet tehtiin 4 mm/s hitsausnopeudella, koska riittävän tunkeuman mahdollistava lisäteho (60 kW) oli käytettävissä.

Fokus

Tehdyissä selvityksissä fokuksen sijainnilla on havaittu olevan keskeinen merkitys hitsin laatuun. IGM:n kokeissa optimaalinen tulos 4 mm/s hitsausnopeudella saavutettiin 2575 mA fokusvirralla sekä jalko- että vaaka-asennossa (pintafokus oli tällöin 2695 mA).

Oskillointikuvio

Finavitec Oy:n hitsauskokeissa parhaaksi kuvioksi osoittautui pitkittäinen oskillointikuvio. IGM:n kokeissa hitsattiin säde horisontaaliasennossa ja ensimmäissä kokeissa ei havaittu eroa pitkittäisen- ja ympyräoskilloinin välillä.

Oskillointiampplitudi

Parhaat tulokset Finavitec Oy:n kokeissa saatiin, kun käytettiin suurinta 1 mm oskillointiampplitudia (muut kokeissa käytetyt amplitudit: 0.1 mm ja 0.5 mm). Vaaka-asennossa amplitudin merkitystä ei ole selvitetty tässä koeohjelmassa aiemmin.

Oskillointitaajuus

Parhaat tulokset Finavitec Oy:n kokeissa saatiin, kun käytettiin 20 Hz oskillointitaajuutta (muut kokeissa käytetyt amplitudit: 10 Hz ja 50 Hz). Vaaka-asennossa taajuuden merkitystä ei ole selvitetty tässä koeohjelmassa aiemmin.

Työskentelyetäisyys

Työskentelyetäisyys vaikuttaa hitsin tunkeumaan, koska työskentelyetäisyys vaikuttaa säteen energijakaumaan. Lyhyellä työskentelyetäisyydellä saadaan intensiivisempi energijakauma kuin pitkällä työskentelyetäisyydellä. Lyhyellä työskentelyetäisyydellä tapahtuu lisäksi vähemmän elektronisäteen siroamista tyhjäkammion jäännöskaasujen molekyyleistä. Hitsin laatuun työskentelyetäisyydellä ei ole tunnettua vaikutusta. Lyhyt työskentelyetäisyys lisää tykin kaaripurkausten todennäköisyyttä.

Materiaali

Parhaimmat tulokset Finavitec Oy:n kokeissa saatiin hapettomalla kuparilla Cu-OF ja hyviä tuloksia saatiin myös fosforimikroseostetulla hapettomalla kuparilla Cu-OFP. Jatkokokeissa päätettiin käyttää Cu-OFP:tä, koska tällä materiaalilla saavutetut tulokset ovat konservatiivisia verrattuna Cu-OF:n tuloksiin nähden.

Hitsausasento

Koeohjelman tässä vaiheessa hitsausasennoksi valittiin vaakahitsaus eli säde horisontaaliasennossa, koska kapselin kansi joudutaan todennäköisesti hitsamaan vaaka-asennossa.

Lisämateriaali

Työkappaleen pinnalle asetetulla lisämateriaalilla todettiin Finavitec Oy:n kokeissa olevan edullinen vaikutus pintavirheisiin. Tässä koesarjassa pyrittiin kuitenkin optimoimaan vain hitsin sisäinen virheettömyys. Tämän vuoksi lisämateriaalia ei käytetty.

Pulssitettu säde

Pulssitettua sädettä käytetään haluttaessa minimoida lämmöntuontia ja välttää esimerkiksi voimakkaasti höyrystyvistä materiaalista aiheutuvia ongelmia. Kuparin tapauksessa pulssituksen käyttö lisäisi suurella todennäköisyydellä hitsin sisäisiä virheitä. Pulssitusta ei suunniteltu kokeiltavaksi.

Kaksoislinssin säätö

Kaksoisfokუსlinssissä käytettiin IGM:n kiinteitä arvoja, koska linssin säädöt katsottiin hitsauksen kannalta optimaalisiksi. IGM:n laitteen kaksoisfokusoointilinssin virta (423 mA) pidettiin kokeissa vakiona EB-tykin sen hetkisen himmentimen takia; himmentimen aukon kohdalla olleen fokuksen suurentaminen olisi edellyttänyt vastaavasti toisenlaista himmennintä.

Taulukkoon V on kerätty tiivistetysti kaikki kokeissa varioidut parametrit perusteluineen.

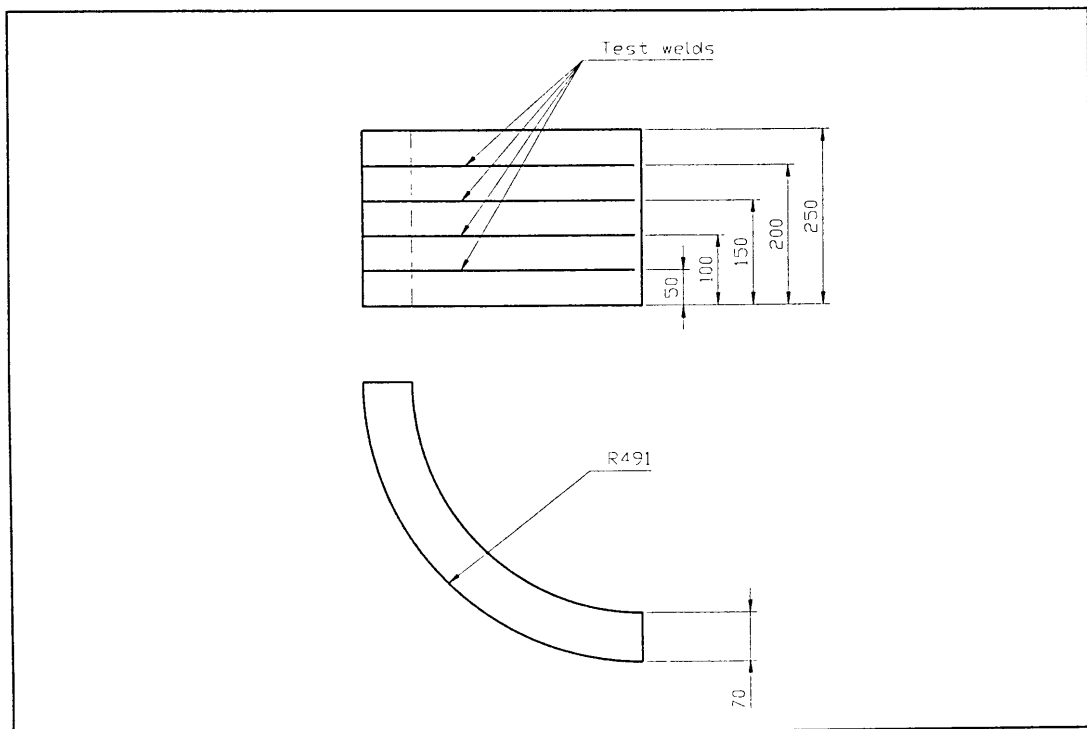
Taulukko V: *Vaakahitsauskokeissa käytetyt parametrit ja niiden valintaperusteet*

Parametri	Vaikutus	Variointiehdotus	Perustelu
Fokus	Pinnan yläpuolella olevalla fokuksella ja pintafokuksella sisäisiä vikoja.	Kiinteä 2575 mA.	Optimifokus minimoi hitsin sisäisiä virheitä.
Oskillointikuvio	Finavitec Oy:n jalkohitsauskokeissa paras tulos pitkittäisellä liitoksensuuntaisella oskilloinnilla. IGM:n alustavissa kokeissa ei havaittu eroa pitkittäisen- ja ympyräoskilloinnin välillä, kun hitsattiin horisontaalisäteellä.	1. Ympyrä 2. Ellipsi 3. Pitkittäinen	Vaaka-asennossa oskillointikuvion vaikutus tehtyjen kokeiden perusteella vielä selvittämättä. Lisäksi oskilloinnin käyttö on hitsausvirheiden osalta keskeinen parannuskeino.
Oskillointitaajuus	Finavitec Oy:llä optimitaajuus 20 Hz (10 Hz, 20 Hz, 40 Hz). IGM:llä ei havaittavaa vaikutusta, kun käytettiin 20Hz ja 50 Hz taajuuksia.	1. 10 Hz 2. 50 Hz 3. 100 Hz	Vaikutusta ei korkeilla taajuuksilla vielä tunneta.
Oskillointiampplitudi	Finavitec Oy:n kokeet 0.1 mm → 1.0 mm paransivat hitsin sisäistä laatua.	1. 1 mm 2. 2 mm 3. 3 mm	Vaikutusta ei tunneta suurilla amplitudeilla.
Nopeus	IGM:llä hitsausnopeus lisäsi etenkin juurivikojen määrää. Samoin kuin Finavitec Oy:llä. IGM:llä fokuksen optimointi tehtiin vain 4 mm/s hitsausnopeudelle.	1. 2 mm/s 2. 3 mm/s 3. 4 mm/s	Hitsausnopeuden vaikutusta ei ole optimoitu vaaka-asennossa.
Virta	Hitsausvirran vaikutusta ei ole tutkittu, mutta hitsausvirralla varmistetaan riittävän tunkeuman saavuttaminen ja sitä ei normaalisti muunnella.	Kiinteä 200 mA.	Riittävä hitsausvirta 50 mm tunkeuman saavuttamiseksi.
Jännite	Jännite vaikuttaa voimakkaasti tunkeumaan, mutta vaikutti myös laatuun; pienemmillä jännitteillä parempi tulos.	Kiinteä 150 kV.	Riittävä kiihdytysjännite 50 mm tunkeuman saavuttamiseksi.
Työskentelyetäisyys	Vaikutus tunkeumaan; lyhyempi etäisyys merkitsee parempaa tunkeumaa. Vaikutusta hitsin laatuun ei kuparilla tunneta.	Kiinteä 330 mm työskentelyetäisyys.	Aikaisemmin tehdyssä koesarjassa fokus optimoitiin tälle työskentelyetäisyydelle.
Materiaali	Parhaat tulokset on saatu hapettomalla kuparilla ja hyvät tulokset myös fosforilla mikroseostetulla kuparilla.	Materiaali Cu-OFP.	Materiaali kiinnitetty Cu-OFP:ksi tässä vaiheessa.
Hitsausasento	Vaaka-asennossa hitsaus lisäsi hitsausvirheitä.	Vaakahitsaus	Hitsausasento kiinnitetty tässä vaiheessa, koska se soveltuu paremmin kapselin sulkemiseen.
Lisäaine	Finavitec Oy:n kokeissa parhaat tulokset saatiin pinnan laadun osalta lisäainetta käyttämällä.	Ei lisäainetta.	Kokeiden tarkoitus lähinnä hitsin sisäisten virheiden eliminointi tässä vaiheessa.
Pulssitus	Pulssitusta käytetään helposti höyrystyvissä aineissa sulan hallitsemiseksi.	Ei pulssitusta.	Kaventaa hitsiprofiilia entisestään ja siten mahdollisesti lisää hitsausvirhettä.
Kaksoislinssin säätö	Kaksoislinssissä optimoitu säteen muoto.	Ei varioida.	Muutos kaksoislinssin virta-arvoissa muuttaa välittömästi säteen muotoa ja siten mm. optimifokuksen arvoa ja paikkaa.

4.2. Materiaalin ja koekappaleiden valmistus

Kokeissa haluttiin demonstroida todellisen kapselin mittoja ja muotoa. Tämän takia hitsauskokeissa käytettiin 1/4-sylinterimäisiä kappaleita, jotka valmistettiin todellisen kapselin kaarevuussäteellä (kuva 6). Koekappaleiden paksuus oli noin 70 mm, mikä johtui materiaalivahvuuteen integroidusta juurituesta. Todellisen juurituen käyttöä vältettiin, koska sen koneistus ja hitsauskoejärjestelyt olisivat hankaloituneet merkittävästi.

Neljännessylinterikokeissa käytetty materiaali oli fosforimikroseostettua hapetonta kuparia (Cu-OFP) kuten levykokeissakin.



Kuva 6. Neljännessylintereihin tehdyt hitsauskokeet.

4.3. Hitsauskokeet

Varsinaiset hitsauskokeet tehtiin säde horisontaaliasennossa. Hitsauskokeissa varioidut hitsausparametrit ja hitsauskokeet on esitetty taulukossa VI.

Taulukko VI: Neljännessylinterien hitsausparametrien optimoinnissa käytetty

Taguchi-matriisi. Kokeissa käytetyt muut hitsausparametrit:

kiihdytysjännite 150 kV, hitsausvirta 200 mA ja fokusvirta 2575 mA.

Hitsi	Oskillointi-kuvio	Hitsausnopeus [mm/s]	Oskillointi-taajuus [Hz]	Oskillointi-amplitudi [mm]
II/2	Ympyrä	2	10	1
II/3	Ympyrä	3	50	2
II/4	Ympyrä	4	100	3
II/5	Ellipsi	2	50	3
II/6	Ellipsi	3	100	1
II/7	Ellipsi	4	10	2
II/8	Pitkittäinen	2	100	2
II/9	Pitkittäinen	3	10	3
II/10	Pitkittäinen	4	50	1

Taulukon VI kokeisiin yhdistettiin hitsauksen lopetuksen (fade out) kokeita taulukon VII mukaisesti.

Taulukko VII: Hitsauskokeisiin II/2-II/10 yhdistetyt lopetuskokeet.

Hitsi	Lopetuspituus [mm]	Fokus
II/2	75	kiinteä
II/3	100	kiinteä
II/4	150	kiinteä
II/5	75	+ 20 mA
II/6	100	+ 20 mA
II/7	150	+ 20 mA
II/8	75	+ 40 mA
II/9	100	+ 40 mA
II/10	150	+ 40 mA

Varsinaisten hitsauskokeiden jälkeen tehtiin joitakin lisäkokeita, joiden perusteena käytettiin taulukon VI perusteella saatuja tuloksia hitsien pinnalaadun osalta. Näiden hitsauskokeiden parametrit on esitetty taulukossa VIII. Kokeissa tarkistettiin myös optimifokuksen paikka.

Taulukko VIII: Neljännessylinterien lisäkokeissa varioidut hitsausparametrit.

Hitsi	Oskillointikuvio	Hitsausnopeus [mm/s]	Oskillointitaajuus [Hz]	Oskillointi-amplitudi [mm]	Fokusvirta [mA]
II/11	Ympyrä	3	50	2	2565-2615 ^{*)}
II/12	Pitkittäinen	3	50	2	2565-2615 ^{*)}
II/13	Pitkittäinen	4	100	3	2565-2615 ^{*)}
II/14	Pitkittäinen	4	100	1	2575 ^{**)}

^{*)} Fokusvirta muuttuu lineaarisesti koko hitsauspituudella.

^{**)} Kiinteä fokusvirta koko hitsauksen ajan.

4.4. Tarkastusohjelma ja tarkastuslaajuudet

Hitsatuille koekappaleille laadittiin tarkastusohjelma, jonka tarkoituksena oli selvittää koehitsissä esiintyneet hitsausvirheet ja tunkeuma. Metallografiset tarkastukset ja mittaukset tehtiin pääasiassa Outokumpu Poricopper Oy:ssä Porissa ja radiografiatutkimukset tehtiin Huber Testing Oy:llä Porissa. Koekappaleille eri vaiheissa tehtävät tarkastukset koottiin tarkastussuunnitelmaksi, joka on esitetty taulukossa IX.

Taulukko IX: *Kuparin EB-hitsauskokeiden tarkastussuunnitelma*

T = Tarkastus suoritetaan ja raportoidaan

	Identifiointi	Kemiallinen analyysi	Mittatarkastus	UÄ-tarkastus	RTG-tarkastus	Mikrorakennetutkimus	Makrorakennetutkimus	Visuaalinen tarkastus	Hitsaus työn dokum.	Menetelmäkuvaus
Materiaalin valmistus	T	T								T
Koekappaleiden valmistus	T		T	T						T
Hitsaustyö	T								T	T
Näytekappaleiden irroitus	T		T							
Hitsien arvostelu	T				T	T	T	T		

4.5. Tarkastukset

4.5.1. Silmämääräinen tarkastus

Visuaalisessa tarkastuksessa etsittiin erilaisia pintavirheitä, joista määriteltiin seuraavat tekijät:

Pintakraaterit

Pintakraaterien syvyys/esiintymistaajuus. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Valuma

Valuman määrä/valumatippojen suuruus. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Valuman määrä

Valuman kokonaismäärä hitsatun materiaalin pinnalla. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Yhtenäisyys

Hitsin yhtenäisyys eli sen homogeeninen ulkonäkö. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Tulokset käsiteltiin Taguchi-menetelmällä ja tulokset ovat esitettyinä liitteissä 1-4.

Kuvien perusteella eri hitsausparametrien vaikutusta voidaan luonnehtia seuraavasti:

Oskillointikuvio

Oskillointikuvio ei vaikuta paljoakaan hitsin pintaan. Valuman osalta parhaat tulokset saatiin pitkittäisellä oskilloinnilla. Ympyrä- ja ellipsioskilloinnilla valumaa oli enemmän, mutta roiskumista ei tapahtunut siinä määrin kuin pitkittäisen oskilloinin tapauksessa.

Hitsausnopeus

Valuman ja hitsin yhtenäisyyden osalta suurempi hitsausnopeus antaa paremman lopputuloksen. Pintakraaterien osalta hitsausnopeudella ei ole suurtakaan merkitystä.

Oskillointitaajuus

Kaikkien pintavirheiden esiintyminen vähenee, kun oskillointitaajuutta lisätään. Lisäksi oskillointitaajuus oli tutkituilla parametreilla ja varioidulla parametrialueella merkittävin pintavirheisiin vaikuttava yksittäinen tekijä.

Oskillointiampplitudi

Oskillointiampplitudilla ei ole suurtakaan vaikutusta pintavirheisiin. Valuman määrä oli ainoa tekijä, johon amplitudilla oli havaittavaa vaikutusta. Tällöin amplitudin suurentaminen aiheutti huonomman tuloksen, koska suuri amplitudi lisää pintasulan määrää.

4.5.2. Radiografia perushitsistä

Radiografiaa varten hitseistä valmistettiin lattamainen, koko hitsin pituinen ja 15 mm levyinen koko hitsatun levyyn paksuudelta (70 mm) näytepala. Radiografiatarkastus tehtiin hitsausliitosta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kuvista määritettiin niissä esiintyneet viat, jotka on taulukoituna taulukossa X.

Hitseistä erotettiin seuraavat alueet:

Pinta-alue

Pinta-alueeksi määritettiin hitsin yläosa (0-20 % maksimitunkeumasta) ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Keskialue

Keskialueeksi määritettiin hitsin keskioasa (20-80 % maksimitunkeumasta) ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Juurialue

Juurialueeksi määritettiin hitsin alaosa (80-100 % maksimitunkeumasta) ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Tulokset käsiteltiin Taguchi-menetelmällä ja tulokset on esitetty liitteissä 5-7. Kuvien perusteella eri hitsausparametrien vaikutusta tunkeumaan voidaan kuvata seuraavasti:

Oskillointikuvio

Pinta-alueella oskilloitikuviolla ei ole vaikutusta hitsausvirheisiin. Keskialueella ympyräoskillointi on hieman pitkittäistä ja ellipsinmuotoista oskillointia parempi. Juurialueella sen sijaan pitkittäinen ja ellipsinmuotoinen oskillointi osoittautuivat hieman ympyräoskillointia paremmiksi.

Hitsausnopeus

Hitsin keski- ja juurialueella suurempi hitsausnopeus parantaa hieman hitsauksen lopputulosta. Toisaalta hitsausnopeuden kasvamisen myötä hitsi tulee kapeammaksi, jolloin hitsausvirheet muodostuvat myöskin hyvin kapealle alueelle. Tällöin radiografia-tarkastelussa hitsausvirheiden havaitseminen vaikeutuu.

Oskillointitaajuus

Oskillointitaajuus on merkittävin yksittäinen tekijä hitsin laadun suhteen. Havaittavien hitsausvirheiden osalta tämä näkyy kaikilla tutkituilla alueilla hitsissä. Röntgenkuvien perusteella parhaan lopputuloksen antoi korkean (100 Hz) oskillointitaajuuden käyttö. Makrorakennetarkastelut hitsin suuntaisesta hieestä osoittivat, että taajuuden kasvaessa hitsiin muodostuu pientä huokoisuutta, jonka havaitseminen röntgenkuvasta on vaikeaa tai mahdotonta.

Hitsissä 14 tutkittiin oskillointitaajuuden vaikutusta hitsin laatuun alueella 10-200 Hz. Radiografiakuvasta havaittiin, että virheet vähenevät noin 100 Hz saakka, mutta alkavat jälleen lisääntyä tämän jälkeen. Optimaalinen oskillointitaajuus vaaka-asennolle on kokeiden perusteella 20-50 Hz.

Oskillointiampplitudi

Oskillointiampplitudin tapauksessa parhaat tulokset saatiin tässä tarkastelussa pienimmällä tutkitulla amplitudilla 1 mm. Suurempien (2 mm ja 3 mm) amplitudien käyttö aiheutti enemmän virheitä kaikilla hitsin osa-alueilla.

Taulukko X: *Hitsien radiografiatarkastusten tulokset*

RADIOGRAFIA			
Hitsi (tunkeuma)	Pinta-alue (0-20 % maksimitunkeumasta)	Keskialue (20-80 % maksimitunkeumasta)	Juurialue (80-100 % maksimitunkeumasta)
II/2 (65 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä koko keskialueella.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 15 mm.
II/3 (50 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 10 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 5 mm.
II/4 (45 mm)	0-1 mm kokoisia yksittäisiä huokosia koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä pinnanpuolella ja juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 10 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 5 mm..
II/5 (65 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä pinnanpuolella ja juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 15 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 5 mm.
II/6 (60 mm)	0-3 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä koko keskialueella.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 5 mm.
II/7 (50 mm)	0-5 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä pinnanpuolella ja juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 20 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 10 mm.
II/8 (70 mm))	0-1 mm kokoisia yksittäisiä pintahuokosia koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä pinnanpuolella ja juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 20 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 10 mm.
II/9 (65 mm)	0-7 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosmaisia virheitä pinnanpuolella ja juurenpuolella harsomaista vikaa, jonka pituus 20 mm.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 5 mm.
II/10 (55 mm)	0-2 mm syvyisiä yksittäisiä pintakraatereita koko hitsin matkalla.	Yksittäisiä huokosia koko hitsin keskialueella.	Epäyhtenäistä juurivikaa, jonka pituus 10 mm.

4.5.3. Radiografia hitsauksen lopetuksesta (fade-out)

Hitsin lopetuksesta arvioitiin ja arvosteltiin seuraavat osa-alueet:

Lopetuksen pinta-alue

Lopetuksen pinta-alueeksi määritettiin hitsin yläosa (0-20 % maksimitunkeumasta) hitsauksen lopetuksen alueella ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Sisäiset viat

Sisäisiksi vioiksi määritettiin hitsin keskiosa (20-80 % maksimitunkeumasta) hitsauksen lopetuksen alueella ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Lopetuksen juurialue

Lopetuksen juurialueeksi määritettiin hitsin alaosa (80-100 % maksimitunkeumasta) hitsauksen lopetuksen alueella ja arvioitiin kyseisellä alueella esiintyneet hitsausvirheet. Arvosanat 1-5 (1=huonoin ja 5=paras).

Tulokset käsiteltiin Taguchi-menetelmällä ja tulokset on esitetty liitteissä 8-10. Kuvien perusteella eri hitsausparametrien vaikutusta tunkeumaan voidaan kuvata seuraavasti:

Oskillointikuvio

Lopetuspinnan osalta ellipsi ja pitkittäinen oskillointi olivat jonkinverran ympyräoskillointia parempi ja sisävikojen osalta parhaat ovat ympyrä ja pitkittäinen oskillointi. Pinta- ja sisäisten vikojen tapauksissa oskillointikuviolla ei ole kuitenkaan suurtakaan merkitystä lopputulokseen. Lopetusjuuren tarkastelussa havaitaan, että ellipsi ja pitkittäinen oskillointi antavat parhaat tulokset. Ero saattaa olla korostunut, koska fokusta nostettiin näissä tapauksissa taulukon VII mukaisesti.

Fokusen nosto

Fokuksen noston kokeet yhdistettiin oskillointikuviotarkasteluihin. Etenkin hitsin juuren puolella pitkittäisellä oskilloinnilla saadut hyvät tulokset selittyvä fokuksen noston edullisella vaikutuksella lopetuksessa.

Nopeus

Hitsausnopeuden kohdalla kaikilla tarkastelluilla hitsin osa-alueilla alhainen hitsausnopeus osoittautui parhaaksi hitsin lopetuksen aikana. Ero saattaa olla korostunut, koska lopetuspituutta muutettiin taulukon VI mukaisesti.

Oskillointitaajuus

Perushitsin laatuun merkittävimmin vaikuttava oskillointitaajuus vaikutti myös hitsin lopetukseen voimakkaasti. Radiografiatarkasteluiden perusteella suurin käytetty oskillointitaajuus osoittautui parhaimmaksi.

Oskillointiampplitudi

Pieni oskillointiampplitudi osoittautui parhaaksi hitsin lopetuksen kannalta. Suurempi oskillointiampplitudi aiheutti enemmän virheitä kaikilla hitsin osa-alueilla.

4.5.4. Makrorakennetarkastus

Hitseistä 12 ja 14 valmistettiin makrorakennehieet, jotta röntgenkuvissa ja itse hitsissä esiintyviä virheitä voitaisiin vertailla. Syövytyksessä osoittautui, että hitsissä esiintyi pientä huokosmaista virhettä koko hitsin alueella, jota oli röntgenkuvasta lähes mahdotonta havaita.

4.6. Tulosten arviointi

Koeohjelmassa keskityttiin kiihdytysjännitteellä 150 kV tehtyihin hitsauskokeisiin. Muita varioitavia parametrejä olivat hitsausnopeus, oskillointikuvio, oskillointitaajuus, oskillointiampplitudi ja fokusvirta. Kokeiden yhteydessä tarkasteltiin lisäksi alustavalla koesarjalla fokuksen noston ja lopetuspituuden vaikutusta hitsauksen lopetusalueen virheettömyyteen.

Kokeiden tuloksena havaittiin, että hitsausnopeuden kasvaessa hitsausvirheiden määrä hitsin juuri- ja keskialueella pysyy lähes samana. Toisaalta hitsiprofiili tulee kapeammaksi ja hitsausvirheiden havaitseminen vaikeutuu.

Oskillointitaajuuden kasvattaminen vähentää virheitä hitsin juuren alueelle, mutta toisaalta lisää hitsausvirheitä laajemmalle alueelle. Koetulosten perusteella korkeiden (> 50 Hz) oskillointitaajuuksien käyttö ei johda hitsin laadun kannalta toivottavaan lopputulokseen.

Oskillointiampplitudin kasvattaminen > 1 mm lisää hitsausvirheiden määrää kaikilla hitsin osa-alueilla (pinta-, keski- ja juurialue). Jatkossa onkin perusteltua käyttää 1 mm oskillointiampplitudia.

Oskillointikuvioista pitkittäinen saumansuuntainen oskillointi osoittautui hitsin laadun kannalta parhaimmaksi vaihtoehdoksi. Finavitec Oy:llä jo aiemmin tehdyt vaakahitsauskokeet tukevat tätä tulosta.

Hitsauksen lopetuksen yhteydessä tutkitulla fokuksen nostolla havaittiin olevan edullinen vaikutus lopetuksen alueella esiintyviin hitsausvirheisiin. Lopetuksen yhteydessä hidas hitsausnopeus antaa tarkasteluiden perusteella parhaan lopputuloksen.

Kaikissa hitseissä esiintyi juurivikaa, jonka määrä etenkin hitsauksen lopetuksen alueella ylittää hyväksyttävän virheiden määrän.

5. FINAVITEC'IN LISÄKOKEET (PROJEKTIN VAIHE II/3)

5.1. Koeohjelman suunnittelu ja parametrien valinta

Koeohjelma oli jatkoa Finavitec Oy:llä ja IGM Robotersysteme AG:llä tehdyille hitsauskokeille. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää onko umpiaine- ja liitoshitsauksella eroa kuparin EB-hitsauksessa. Lisäksi tarkoituksena oli vertailla Finavitec Oy:n ja IGM:n laitteistoilla sekä pysty- että vaakasäteellä hitsejä ja niiden välisiä eroja.

5.2. Materiaali ja koekappaleet

Koemateriaalina käytettiin fosforimikroseostettua hapetonta kuparia Cu-OFP. Hitsauskokeissa käytettiin umpiaineeseen hitsattaessa 70 mm paksuisista kuparilevyistä, joissa juurituki oli integroituna materiaalivahvuuteen. Liitoshitsauksissa materiaalivahvuus oli 50 mm ja kokeissa käytettiin irrallisia juuritukia.

5.3. Hitsauskokeet

Hitsauskokeissa varioidut parametrit on esitetty taulukossa XI. Kokeissa käytettiin laajemmassa koeohjelmassa optimoituja konfirmaatikokeen parametrejä /1/.

Taulukko XI: Hitsauskokeissa varioidut hitsausparametrit. Pääparametrit olivat kokeissa 1-6: kiihdytysjännite 150 kV, hitsausvirta 200 mA, hitsausnopeus 1 mm/s ja fokusvirta 2140 mA. Kokeissa 7-8 vastaavat parametrit olivat: kiihdytysjännite 150 kV, hitsausvirta 170 mA, hitsausnopeus 2 mm/s ja fokusvirta 2140 mA.

Hitsi	Hitsausasento/ Hitsaustapa	Kokeen tarkoitus
V/1	Jalko/Umpiaine	Referenssinäyte, johon muita verrattiin.
V/2	Jalko/Liitos	Umpiaine/liitoshitsauksen välisen eron tarkastelu jalkoasennossa.
V/3	Jalko/Umpiaine	Referenssinäyte, jota hitsattaessa käytettiin lisäjähdytystä kappaleen lämpenemisen vähentämiseksi.
V/4	Vaaka/Umpiaine	Jalko/vaakahitsauksen välisen eron tarkastelu.
V/5	Vaaka/Liitos	Umpiaine/liitoshitsauksen välisen eron tarkastelu vaakasennossa.
V/6	Vaaka/Umpiaine	Korjata ylimääräisellä kosmeettisella hitsillä syntyneet pintavirheet.
V/7	Vaaka/Umpiaine	Saumansuuntaan kohtisuorasti poikittaisen oskilloinnin vaikutuksen tarkastelu hitsin laatuun.
V/8	Vaaka/Umpiaine	Saumansuuntaan kohtisuorasti poikittaisen oskilloinnin vaikutuksen tarkastelu hitsin laatuun.

5.4. Hitsien tarkastukset ja tulosten vertailu

5.4.1. Jalko- ja vaakahitsaus

Jalko- ja vaakahitsausta on vertailtu taulukossa XII.

Taulukko XII: Jalko- ja vaakahitsauksen vertailu.

Hitsi	Parametrit	Hitsausvirheet
V1	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (jalko + umpiaine)	Pintakraatereita 0-5 mm, keskialue virheetön, juurialueella epäyhtenäistä juurivikaa.
V4	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (vaaka + umpiaine)	Pintakraatereita 0-2 mm, keskialueella yksittäisiä huokosmaisia virheitä, juurialueella yhtenäistä juurivikaa.

Radiografiakuvien perusteella tehdyistä vertailuista havaitaan, että pinta-alueella jalkohitsauksessa esiintyvät kraaterit ovat hieman syvempiä kuin vaakahitsauksessa. Hitsin keskialue on taas jalkohitsauksessa virheetön, mutta vaaka-asennossa hitsattaessa esiintyy yksittäisiä huokosmaisia virheitä. Hitsin juurialueella vaaka-asennossa hitsattu materiaali sisältää enemmän virheitä kuin jalkoasennossa hitsattu materiaali.

Kokonaisuutena vaakahitsauksessa esiintyy enemmän hitsausvirheitä kuin jalkohitsauksessa etenkin hitsin juuren alueella. Lisäksi hitsin lopetuksen alueella esiintyvä juurivika on pahempaa kuin jalkoasennossa. Tunkeuma on vaaka-asennossa noin 10 % jalkoasentoa suurempi.

5.4.2. Umpiaine- ja liitoshitsaus

Umpiaineeseen ja liitokseen hitsattuja näytteitä on tarkasteltu taulukossa XIII.

Taulukko XIII: *Umpiaine- ja liitoshitsauksen vertailu.*

Hitsi	Parametrit	Hitsausvirheet
V1	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (jalko + umpiaine)	Pintakraatereita 0-5 mm, keskialue virheetön, juurialueella epäyhtenäistä juurivikaa.
V2	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (jalko + liitoshitsaus)	Pintakraatereita 0-5 mm, keskialue virheetön, juurialueella juurivikaa.
V4	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (vaaka + umpiaine)	Pintakraatereita 0-2 mm, keskialueella yksittäisiä huokosmaisia virheitä ($\varnothing < 1$ mm), juurialueella yhtenäistä juurivikaa.
V5	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (vaaka + liitoshitsaus)	Pintakraatereita 0-3 mm, keskialueella yksittäisiä huokosmaisia virheitä ($\varnothing 1-3$ mm), juurialueella yhtenäistä juurivikaa.

Radiografiatarkasteluiden perusteella tarkastelluista näytteistä voidaan havaita, että pinta-alueella esiintyy sekä umpiaine- että liitoshitsauksessa pintavikaa. Hitsin keskialueella ei esiinny jalkohitsauksessa kummassakaan tapauksessa hitsausvirheitä. Hitsin juuren alueella jalkohitsauksessa liitokseen esiintyy vähemmän hitsausvirheitä

kuin umpiainehitsauksessa. Vaakahitsauksessa liitos- ja umpiainehitsauksessa ei ole hitsin juuren alueen virheillä havaittavia eroja.

Merkittävimmät eroavaisuudet umpi- ja liitoshitsejä vertailtaessa löytyvät jalkohitsien juurialueella, jossa liitoshitseissä esiintyy juurivikaa merkittävästi vähemmän. Vaakahitseissä ei liitos- ja umpiainehitseillä ollut suurta eroa.

Hitsin lopetuksen alueella esiintyvässä juuriviassa ei sensijaan ole juurikaan eroa hitsaustapojen välillä. Sekä jalko- että vaakahitsausessa esiintyy umpiaine- ja liitoshitsauksessa lopetuksen alueella yhtenäistä juurivikaa.

5.4.3. Hitsauslaitteisto

IGM:llä ja Finavitec Oy:llä samoilla parametreillä hitsattuja näytteitä on tarkasteltu taulukossa XIV.

Taulukko XIV: Hitsauslaitteistojen vertailu.

Hitsi	Parametrit	Hitsausvirheet
V1	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (jalko + umpiaine)	Pintakraatereita 0-5 mm, keskialue virheetön, juurialueella epäyhtenäistä juurivikaa.
I1	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (jalko + umpiaine)	Pintakraatereita 0-5 mm, keskialue virheetön, juurialueella epäyhtenäistä juurivikaa.
V1	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (vaaka + umpiaine)	Pintakraatereita 0-2 mm, keskialueella yksittäisiä huokosmaisia virheitä ($\varnothing < 1$ mm), juurialueella yhtenäistä juurivikaa.
I9	150 kV, 200 mA, 1 mm/s (vaaka + umpiaine)	Pintakraatereita 0-3 mm, keskialueella yksittäisiä huokosmaisia virheitä ($\varnothing 1-2$ mm), juurialueella yhtenäistä juurivikaa.

Radiografiatulosten perusteella eri laitteistolla valmistetut hitsit ovat sisäiseltä laadultaan hyvin samanlaisia. Pinta-alueella on hitaasta hitsausnopeudesta johtuen 0-5 mm syvyinen alue, jossa esiintyy kraatereita. Hitsin keskialue on kummallakin laitteella jalkoasennossa virheetön. Vaaka-asennossa esiintyy sensijaan yksittäisiä

huokosmaisista vikoja. Juurialueella esiintyy kaikissa tapauksissa juurivikaa, joita vaaka-asennossa hitsattaessa on selvästi enemmän kuin jalkoasennossa hitsattaessa.

Yhteenvedon voidaan todeta, että samoilla parametreilla hitsattaessa Finavitec Oy:n ja IGM:n hitsit ovat laadultaan samanlaisia verrattaessa samassa asennossa hitsattuja näytteitä toisiinsa (sekä jalko- että vaaka-asennossa).

5.5. Tulosten arviointi

Umpi- ja liitoshitsauksen eroja tarkastellessa havaittiin, että jalkoasentohitsauksessa esiintyy hitsausvirheitä enemmän umpiaineeseen kuin liitokseen hitsattaessa. Vaakahitsauksen tapauksessa kyseinen ero ei ole merkittävä, vaan tulokset ovat lähes identtiset.

Vaaka- ja jalkohitsausta vertailtaessa havaittiin, että vaakahitsauksessa esiintyy enemmän hitsausvirheitä kuin jalkohitsauksessa. Tämä koskee erityisesti hitsin keski- ja juurialueella olevia hitsausvirheitä.

IGM:n ja Finavitec Oy:n laitteiden vertailuissa havaittiin, että samassa hitsausasennossa ja samoilla parametreilla hitsatut näytteet ovat lähes identtisiä syntyviä hitsausvirheitä tarkastellessa.

6. IGM LISÄKOKEET (PROJEKTIN VAIHE II/4)

6.1. Koeohjelman suunnittelu ja tavoitteet

Koeohjelma on jatkaa Finavitec Oy:llä ja IGM:llä tehdyille hitsauskokelle.

Kokeiden tarkoituksena oli täyttää seuraavat tavoitteet:

- hitsata vaaka-asennossa keskialueeltaan (20 - 80 % maksimitunkeumasta) mahdollisimman hyvälaatuisia hitsejä, jossa noin 50 mm virheetön alue
- minimoida juurialueella olevat virheet ja jatkaa hitsauksen virheettömään lopettamiseen tähtäävää ohjelmaa
- hitsata noin 100 kV jännitettä kiihdytysjännitettä käyttäen lisäkokeita, joiden tavoitteena on virheetön hitsin keskialue ja pyöreä hitsin juuren muoto
- saada testimateriaalia ultraäänitarkastusohjelmaa varten

6.1.1. Materiaali ja koekappaleet

Koemateriaalina oli fosforimikroseostettu hapeton kupari (Cu-OFP). Hitsauskokeissa käytettiin umpiainehitsausta sekä 70 mm paksuisiin että 50 mm paksuisiin kuparilevyihin. Ohuemmissa 50 mm levyissä käytettiin irrallista juuritukea.

6.1.2. Hitsausparametrien valinta

Hitsauskokeissa varioidut parametrit on perusteltu seuraavasti:

Hitsausjännite

Hitsausparametrianalyysin perusteella hitsausjännite oli ainoa hitsin laatuun keskeisesti vaikuttava parametri, jota ei oltu varioitu IGM:n laitteistolla.

Finavitec Oy:llä ja IGM:llä tehdyt hitsauskokeet olivat riittävän tunkeuman aikaansaamiseksi perustuneet 150 kV kiihdytysjännitteen käyttöön. Koska 150 kV kiihdytysjännitteellä tehdyt laajat koesarjat eivät olleet johtaneet haluttuun lopputulokseen, päätettiin koeohjelmaa laajentaa 100 kV jännitteellä tehtäviin lisäkokeisiin.

Hitsausvirta

Hitsausvirralla säädetään haluttu tunkeuma, kun hitsausjännite ja -nopeus on valittu.

Fokusvirta

Hitsausjännitteelle 150 kV hitsausvirta fokusvirta oli optimoitu jo aikaisemmilla koekerroilla käyttäen 1 mm/s ja 4 mm/s hitsausnopeuksia. Kokeissa päädyttiin käyttämään 2 mm/s hitsausnopeutta ja optimifokusvirran arvo päätettiin määrittää tälle nopeudelle erikseen.

Hitsausnopeus

Hitsausnopeus 4 mm/s aiheutti syvän ja kapean hitsiprofiilin, joka on altis juurialueen virheille. Jalkoasentohitsauksen konfirmaatiokokeissa käytettiin hitsausnopeutta 1 mm/s, jolloin päädyttiin ehjään keski- ja juurialueeseen. Tällöin hitsin pintaan muodostui kuitenkin noin 5 mm syvyinen runsaasti virheitä sisältävä alue. Hitsausnopeudeksi valittiin 2 mm/s edellä esitettyjen perusteluiden vuoksi.

Oskillointikuvio

Parhaita tuloksia hitsausnopeudesta ja kiihdytysjännitteestä riippumatta oli ennen tätä koesarjaa saatu sauman suuntaisella pitkittäisellä oskilloinnilla, jota päätettiin käyttää myös tässä koesarjassa.

Oskillointiampplitudi

Sekä IGM:n että Finavitecin kokeissa 1 mm oskillointiampplitudi oli osoittautunut optimaaliseksi ja tätä amplitudia päätettiin käyttää myös tässä koesarjassa.

Oskillointitaajuus

Oskillointitaajuuksista parhaat tulokset saatiin pienillä taajuuksilla 10-20 Hz. Korkeiden taajuuksien >50 Hz aiheuttaa hitsausvirheiden leviämisen juurialueen lisäksi hitsin keskialueelle.

6.2. Hitsauskokeet

Tehdyt hitsauskokeet parametreineen, kokeen tarkoituksineen ja tärkeimpine tuloksineen ovat taulukossa XV.

Taulukko XV: Hitsauskokeissa käytetyt parametrit.

Hitsi	Jännite/Virta/ Hitsausnopeus	Fokus	Amplitudi/ Taajuus/ Kuvio	Kokeen tarkoitus	Kokeen tulos
I/15	150 kV/ 200 mA/2 mm/s	2635-2555 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko.	Optimifokus radiografialla 2603 mA
I/16	150 kV/200 mA/ 2 mm/s, 1 mm/s, 1,5 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko.	Optiminopeus 2 mm/s. Lämpötila 300 °C hitsauksen jälkeen.
I/17	150 kV/ 200 mA/2 mm/s	2635-2555 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	100 °C:n esilämmön vaikutus optimifokukseen.	Optimifokus samalla alueella kuin kokeessa I/15.
I/18'	100 kV/ 300 mA/2 mm/s	2040-2100 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko ja varmistaa tunkeuma.	Saavutettiin 50 mm tunkeuma.
I/18	100 kV/ 300 mA/2 mm/s	2092-2028 mA	1 mm/20 Hz/Pit	Fokusko.	Optimifokus radiografialla 2065 mA.
I/19	100 kV/ 300 mA/2 mm/s	2065 mA	1 mm/20 Hz/Pit	Konfirmaatiokoe.	Hitsin keskialueella virheitä, fokus ei optimialueella ?
I/20	150 kV/200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Konfirmaatiokoe liitokseen NDT-tutkimuksia varten.	
I/21	150 kV/ 200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Referenssinäyte.	Näyte tuhoutui näytteenvalmistuksessa.
Slope	100 mm	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/22	150 kV/ 200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokuksen muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Juurialueen virhe ulottuu juuresta pintaan asti.
Slope	100 mm	2603-2643 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/23	150 kV/ 200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokuksen muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Juurialueen virhe ulottuu juuresta pintaan asti, mutta loppuosan juurivirheen korkeus on madaltunut.
Slope	100 mm	2603-2663 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/24	150 kV/200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Oskillointitaajuuden muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Virhealue leventynyt.
Slope	150 kV/200 mA/2 mm/s	2603-2643 mA	1 mm/20-100Hz/Pit.		
I/25	150 kV/200 mA/2 mm/s	2603 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Oskillointiampitudin muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Ei vaikutusta
Slope	150 kV/200 mA/2 mm/s	2603-2643 mA	1-0 mm/20 Hz/Pit.		

Taulukko XV: Hitsauskokeissa käytetyt parametrit.

Hitsi	Jännite/Virta/ Hitsausnopeus (Lopetuksen pituus)	Fokus	Amplitudi/ Taajuus/ Kuvio	Kokeen tarkoitus	Kokeen tulos
I/26	100 kV/350 mA/2 mm/s	2092-2028 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko.	
I/27	110 kV/350 mA/2 mm/s	2220-2150 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko.	
I/28	110 kV/320 mA/2 mm/s	2220-2150 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokusko.	Optimifokus 2169 mA
I/29	110 kV/320 mA/2 mm/s	2169 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Konfirmaatiokoe.	Yksittäisiä pintavalumia. Juurivirhe harvaa ja yksittäistä.
I/30	110 kV/320 mA/2 mm/s	2160 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Konfirmaatiokoe.	Pinta hyvä. Juurivirhe matalaa ja harvaa.
I/31	110 kV/320 mA/2 mm/s	2152/2177 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Konfirmaatiokoe.	Fokus 2052 mA parempi kuin 2060 mA.
I/32	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Konfirmaatiokoe liitokseen NDT-tutkimuksia varten.	
I/33	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Referenssinäyte.	Virheet lopetuksessa tasaisesti ylös asti.
Slope	100 mm	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/34	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Fokuksen muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Ei merkittävää eroa kiinteään fokukseen verrattuna.
Slope	100 mm	2162-2226 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/35	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Oskillointiampitudin muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Ei merkittävää eroa kiinteään fokukseen verrattuna.
Slope	100 mm	2162-2226 mA	1 mm/20 Hz/Pit.		
I/36	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Oskillointitaajuuden muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Virhealue leventynyt.
Slope	100 mm	2162-2194 mA	1 mm/20-100Hz/Pit.		
I/37	110 kV/320 mA/2 mm/s	2162 mA	1 mm/20 Hz/Pit.	Oskillointiampitudin muutoksen vaikutus hitsauksen lopetukseen.	Ei vaikutusta.
Slope	100 mm	2162-2194 mA	1-0 mm/20 Hz/Pit.		

6.3. Radiografiatarkastukset perushitsistä

Fokuksen vaikutus

Fokuskoee 150 kV:n jännitteellä ja fokusalueella 2635-2555 mA (I15). Fokuksen painuessa pinnan alapuolelle juuri terävöityy. Satunnaiset pintakraaterit ovat tarkastelun perusteella aiheituneet sulan pisaroinnista johtuneesta valumasta. Radiografiakuvan perusteella optimifokus saatiin fokusvirralla 2603 mA.

Fokuskoee 100 kV:n jännitteellä ja fokusalueella 2092-2028 mA (I18). Kiihdytysjännitteellä 150 kV tehtyyn fokuskokeeseen (I15) verrattuna hitsin tunkeuma n. 10 mm pienempi ja hitsi on leveämpi. Kappaleen kuumentessa esiintyneet pintavaluma on runsasta johtuen pintasulan määrästä. Optimifokusvirta on radiografian perusteella 2065 mA.

Fokuskoee 110 kV:n jännitteellä ja fokusalueella 2220-2150 mA (I28). Kiihdytysjännitteellä 100 kV tehtyyn fokuskokeeseen (I18) verrattuna tunkeuma oli hieman suurempi, juurivirheet korkeudeltaan hieman suurentuneet ja keskiosa virheettömyydeltään parempi. Kokeen mukainen optimifokus oli 2169 mA.

Esilämmön vaikutus

Fokuskoee 150 kV:n jännitteellä (I17) eli samat parametrit kuin kokeessa I15, mutta kappaleessa 100-120 °C:n esilämpö ennen hitsausta. Esilämmön vaikutuksesta juurivirhe on hieman leventynyt, muuten hitsit ovat samanlaisia.

Hitsausnopeuden vaikutus

Nopeuskoe 150 kV:n jännitteellä hitsausnopeudet (1 mm/s, 1.5 mm/s, ja 2 mm/s). Hitsausnopeuden laskiessa pintakraaterien koko kasvaa, mutta hitsin keskialue pysyy kaikilla hitsausnopeuksilla melko virheettömänä. Hitsausnopeuden laskiessa juurivirheen leveys ja korkeus kasvaa, joten optiminopeus kokeen perusteella 2 mm/s.

Konfirmaatiokokeet

Kiihdytysjännitteellä 100 kV tehtiin konfirmaatiokoe (I19) fokuskokeen (I18) mukaan määritetyllä optimifokuksella. Hitsin keskialueella havaitaan yksittäisiä isoja virheitä hitsin valumasta johtuen. Keskialueen virheetömyys olisi edellyttänyt valumatuen käyttöä.

Kiihdytysjännitteellä 110 kV tehtiin konfirmaatiokokeet (I29, I30 ja I31) fokuskokeen (I28) mukaan määritetyllä optimifokuksilla 2152 mA, 2160 mA, 2169 mA ja 2177 mA.

Optimifokusalueella parhaat fokukset saatiin virralla 2152 mA ja 2160 mA. Näissä tapauksissa hitsin pinta on hyvä, keskialue virheetöntä ja juurivirhe matalaa ja harvaa.

6.4. Radiografiatarkastukset hitsauksen lopetuksesta (fade-out)

Kiihtytysjännite

Verrattaessa 150 kV:n kiihtytysjänniteellä ja 110 kV:n kiihtytysjänniteellä tehtyjä lopetuskokeita (I22 ja I34) havaitaan, että 110 kV:n kiihtytysjänniteellä juurivirhe on matalampaa. Muuten kummassakin tapauksessa tunkeuman pienetessä syntyi juurivirhettä.

Fokuksen nosto

Kiihtytysjännitteellä 150 kV tehty lopetuskoe (I22) käyttäen perushitsin alueella fokuskokeessa optimoitua fokusvirtaa 2603 mA ja hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2603 mA → 2643 mA). Hitsin juuressa esiintyneet virheet jatkuvat yhtenäisenä koko tunkeuma-alueella.

Lopetuskokeessa (I23) käytettiin 150 kV:n jännitettä ja perushitsissä fokusvirtaa 2603 mA ja hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2603 mA → 2663 mA). Hitsauksen lopetuksessa esiintynyt juurivika ulottuu täydestä tunkeumasta lähtien lähes pintaan asti, mutta on hieman vähäisempää kuin pienemmällä fokuksen nostolla (I22).

Vastaavanlaiset fokuksen nostot tehtiin myös 100 kV:n jännitteelle (I34 ja I35). Kiihtytysjännitteellä 100 kV ei kuitenkaan havaittu parannusta hitsauksen lopetuksessa fokuksen noston vaikutuksesta.

Taajuuden nosto

Kiihtytysjännitteellä 150 kV tehty lopetuskoee (I24) käyttäen perushitsin alueella fokuskokeessa optimoitua fokusvirtaa 2603 mA, hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2603 mA → 2643 mA) ja oskillointitaajuuden nostoa lopetuksen aikana (20 Hz → 100 Hz). Lisäksi vastaava koee kiihtytysjännitteellä 100 kV(I36) käyttäen perushitsin alueella fokuskokeista optimoitua fokusvirtaa 2162 mA, hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2162 mA → 2194 mA) ja oskillointitaajuuden nostoa lopetuksen aikana (20 Hz → 100 Hz).

Kiihtytysjännitteellä 150 kV pelkkään fokuksen nostoon (kokeet I22 ja I23) verrattuna hitsausvirheet ovat laajemmalla alueella. Kiihtytysjännitteellä 100 kV lopetuksen alussa on suuria juurionkaloita, kun taajuutta on nostettu. Kummallakin kiihtytysjännitteellä taajuuden nosto on aiheuttanut hitsausvirheiden leviämisen laajemmalle alueella ja yksittäisen virheet ovat kapeita ja harsomaisia.

Oskillointiampplitudin pienennys

Kiihtytysjännitteellä 150 kV tehty lopetuskoee (I25) käyttäen perushitsin alueella fokuskokeessa optimoitua fokusvirtaa 2603 mA, hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2603 mA → 2643 mA) ja oskillointiampplitudin piennennystä lopetuksen aikana (1 mm → 0 mm). Lisäksi vastaava koee kiihtytysjännitteellä 100 kV(I37) käyttäen perushitsin alueella fokuskokeista optimoitua fokusvirtaa 2162 mA, hitsauksen lopetuksessa fokuksen nostoa (2162 mA → 2194 mA) ja oskillointiampplitudin piennennystä lopetuksen aikana (1 mm → 0 mm).

Pelkkään fokuksen nostoon (koee I22 ja I34) verrattuna hitsausvirheissä ei havaita eroa lopetuksen aikana, joten ampplitudin muutoksella ei ole lopetuksen aikana merkitystä.

6.5. Tulosten arviointi

Koeohjelman tuloksena saatiin vaaka-asennossa hitsattua keskialueeltaan (20-80 % maksimitunkeumasta) hyvälaatuinen hitsi. Hitsin juuren alueella ei kyetty parametrien optimoinnista huolimatta saamaan aikaan virheetöntä lopputulosta.

Koeohjelmassa parhaat tulokset saatiin käyttämällä alemmaa 110 kV:n kiihdytysjännitettä aikaisempaan 150 kV:n verrattuna. Hitsin profiili on matalampaa kiihdytysjännitettä käytettäessä hieman leveämpi ja hitsin juuri pyöreämpi.

Hitsauksen lopetuksessa ainoa hitsin kokonaislaatua hieman parantava tekijä oli fokuksen nosto. Hitsauksen lopetuksen osalta ei kuitenkaan vielä päästy tyydyttävään lopputulokseen.

7. HITAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS HITSIN LAATUUN

Ohessa on käsitelty niitä hitsausparametreja, joita hitsausohjelmassa on varioitu IGM:llä ja niiden vaikutusta hitsauksen lopputulokseen. Tuloksia arvioitaessa on käytetty apuna myös Finavitec Oy:n hitsauskokeissa käytettyä tulosmateriaalia.

Hitsausasento

Tehdyissä vertailuissa jalko- ja vaaka-asennossa tehdyille hitseille havaittiin, että hitsausvirheitä esiintyy vaaka-asennossa enemmän kuin jalkoasennossa. Erityisesti tämä koskee hitsin juuren alueella olevaa juurivikaa ja sisäisiä huokos- tai ontelomaisia hitsausvirheitä. Lisäksi vaaka-asennossa esiintyy sulan pisaroinnista aiheutunutta valumaa, joka aiheuttaa hitsiin myös sisäisiä virheitä.

Hitsin juurialueen laadun suhteen vaakahitsauksessa IGM:llä ei pystytty toistamaan Finavitec Oy:llä jalkoasennossa saavutettua hitsin virheettömyyttä.

Hitsaustapa

Hitsaustavalla tarkoitetaan tässä liitos- tai umpiainehitsausta. Finavitec Oy:n hitsauskokeissa EB-hitsattiin liitokseen, kun taas IGM:n hitsauskokeet tehtiin umpiaineeseen ilman liitosta. Tehdyissä lisäkokeissa havaittiin, että jalkoasennossa liitoshitsaus tuottaa paremman lopputuloksen juurivian osalta kuin umpiainehitsaus. Vaaka-asennossa tapahtuvalla hitsauksella hitsaustapojen välillä ei ole havaittavaa eroa.

Hitsausnopeus

Hitsausnopeus vaikuttaa syntyvään hitsiprofiiliin. Paksun kuparin hitsauksessa hitsiprofiililla on suuri ero, jos tarkastellaan esimerkiksi 1 mm/s ja 4 mm/s hitsausnopeuksilla hitsattuja näytteitä. Hitsausnopeudella 4 mm/s aikaansaadaan syvä ja kapea hitsiprofiili. Hitaalla 1 mm/s hitsausnopeudella saadaan jalkoasennossa ehjä keski- ja juurialue. Tällöin pintaan muodostuu kuitenkin noin 5

Hitsiprofiilin kapeus vaikuttaa myös vaadittavaan liitostoleranssiin todellisen kapselin tapauksessa ja mahdollisesti esiintyviin liitosvirheisiin. Lisäksi hitsausnopeudella ei tutkitulla alueella ole havaittu olevan keskeistä merkitystä tunkeumaan, joten jatkossa leveämmän hitsin aikaansaamiseksi voidaan käyttää niin pientä hitsausnopeutta kuin mahdollista.

Hitsausjännite

Hitsausjännitteen havaittiin Finavitec Oy:n kokeissa vaikuttavan oleellisesti hitsin tunkeumaan, joten kokeissa on keskitytty käyttämään mahdollisimman korkeaa kiihdytysjännitettä. Korkean hitsausjännitteen käyttö aiheuttaa myös syvän ja kapean hitsiprofiilin, joka on puolestaan herkkä hitsin juurivian kannalta.

Vaakahitsauskokeissa IGM:llä tehtiin kokeita myös 110 kV:n kiihdytysjännitteellä, koska 150 kV:n käyttö ei johtanut tyydyttävään lopputulokseen. Perushitsin osalta saatiin tällöin parempi lopputulos, mutta hitsauksen virheetöntä lopetusta ei kyetty aikaansaamaan.

Hitsausvirta

Hitsausvirralla varmistetaan riittävän tunkeuman aikaansaaminen, kun hitsausjännite on vakio. Siten sen variointia ei ole käytetty hitsin laadun optimoimiseen. Matalamman kiihdytysjännitteen käyttö voidaan kompensoida suuremman hitsausvirran avulla.

Fokusvirta

Fokusvirralla ja fokuksen asemalla havaittiin olevan keskeinen merkitys hitsauksen lopputulokseen etenkin syntyvän juurivian kannalta. Tämän vuoksi varsinaisen perushitsin aikana fokusvirta pidettiin vakiona.

Hitsauksen lopetukseen liittyvissä alustavissa kiihdytysjänniteellä 150 kV:n kokeissa selvisi, että fokuksen nostolla yhtäaikaisesti hitsausvirran pienentämisen kanssa on edullinen vaikutus lopetuksen kannalta. Fokusvirran nostolla ei kuitenkaan ollut ratkaisevaa parantavaa merkitystä lopetuksen aikana syntyviin hitsausvirheisiin. Lisäksi 110 kV:n kokeissa fokuksen nostolla ei kyetty hitsauksen lopetuksen laatua parantamaan.

Oskillointikuvio

Vaakahitsauskokeissa havaittiin, että oskillointikuviolla ei ole keskeistä merkitystä hitsauksen laatuun. Parhaat tulokset saatiin edelleen hitsinsuuntaisella pitkittäisellä oskillointikuviolla.

Oskillointitaajuus

Vaakahitsauskokeita ajatellen optimoitiin myös oskillointitaajuutta. Radiografia-tarkasteluissa havaittiin, että korkea oskillointitaajuus vähentää juuren alueella olevaa juurivikaa. Samalla se kuitenkin nostaa virhevyöhykettä hitsin keskialueella ja aiheuttaa siellä pientä huokosmaista virhettä, jonka määrä lisääntyy oskillointitaajuuden kasvaessa.

Hitsin lopetuksen yhteydessä havaittiin, että oskillointitaajuuden kasvattaminen vähentää juuren alueella olevaa virhettä, mutta toisaalta lisää ja levittää virhealuetta myös hitsin keskialueelle.

Oskillointiampplitudi

Jalkohitsauskokeissa Finavitec Oy:llä suurin käytetty oskillointiampplitudi osoittautui hitsin laadun kannalta parhaimmaksi. IGM:n kokeissa taas pienin käytetty amplitudi oli tarkastelun mukaan paras. Ero tuloksissa johtuu todennäköisesti tutkittavista amplitudialueista (Finavitec 0.1 - 1.0 mm ja IGM 1.0 - 3.0 mm) ja hitsausasennoista.

Oskillointiampplitudin muutosta pyrittiin käyttämään hitsauksen lopetuksen optimoinnissa, mutta sillä ei havaittu olevan hitsauksen lopetukseen kannalta parantavaa vaikutusta.

8. YHTEENVETO KOEOHJELMAN TOISEN VAIHEEN TULOKSISTA

Tehdyissä hitsauskokeissa vaakahitsaus osoittautui jalkohitsausta selvästi hankalammaksi. Vaakahitsauksessa hitsausvirheet ovat keskittyneet hitsin juuren alueelle ja jalkohitsaukseen verrattuna virheitä esiintyy enemmän myös hitsin keskialueella.

Vaakahitsauskokeissa pystyttiin aikaansaamaan sellainen lopputulos, jossa hitsin pinta- ja keskialue olivat lähes virheettömiä. Hitsin juurialueella sensijaan esiintyi hitsausvirheitä, jotka sijainniltaan olivat 50 mm:n tunkeumaa syvemmällä. Menetelmää voidaan tulosten perusteella hyödyntää valssaukseen ja taivutukseen perustuvassa valmistusreitissä sylinterimäisten osien yhteenliittämisessä käytettävässä jatkuvassa hitsauksessa, jossa hitsauksen aloitus ja lopetus ovat varsinaisen hitsin ulkopuolella ja jossa juurivika syntyy juuritukeen, joka poistetaan myöhemmissä valmistusvaiheissa.

Kannen sulkemisessa käytettävän päättymättömän hitsauksen tapauksessa hitsin lopetusalueella esiintyi optimaalisista parametreista huolimatta juurivikaa. Hitsauksen lopetuksen optimointi vaati näiltä osin jatkokehitystyötä.

Koeohjelmaa tullaan jatkamaan suunnitelmien mukaan ja vuoden 1997 aikana tullaan tekemään halkaisijaltaan täyden mittakaavan kansien demonstraatiohitsaukset sekä jalko- että vaakahitsausta optimoiduilla parametreilla. Lisäksi tullaan jatkamaan tutkimuksia kuparissa olevan hitsin virumisominaisuuksien ja ainettarikkomattomien tarkastusmenetelmien kehittämiseksi.

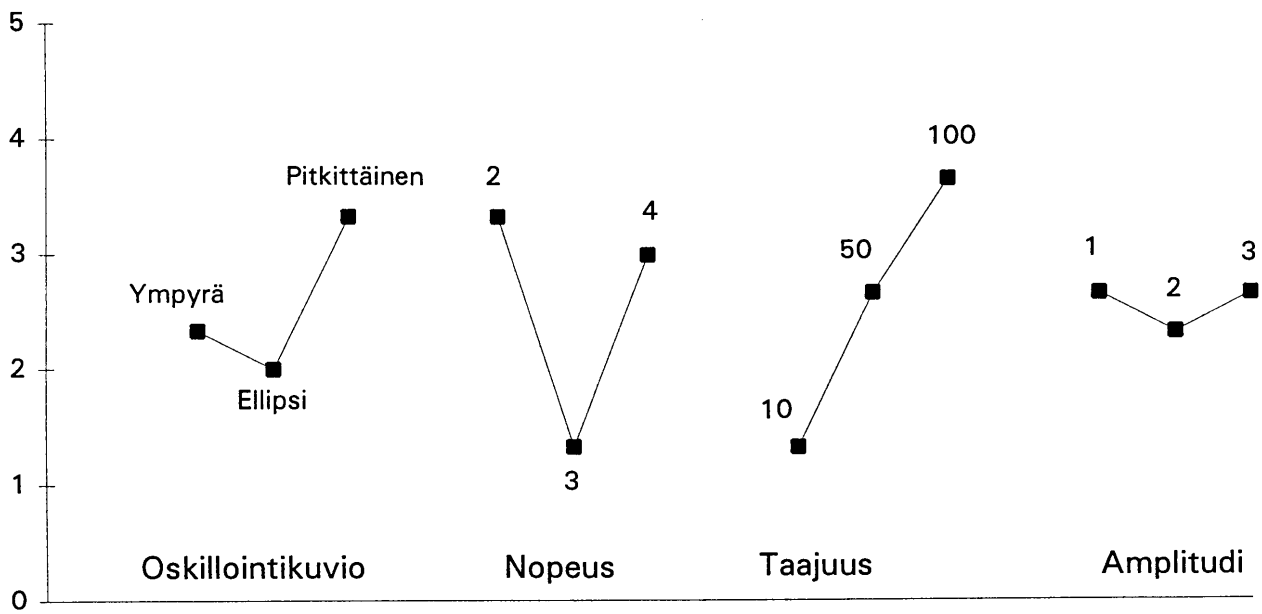
9. VIITTEET

/1/ EB-hitsausmenetelmän kehittäminen massiivisen kuparikapselin valmistamiseen. Perushitsin hitsausparametrien optimointi. Hannu Rajainmäki, Harri Aalto, Jarmo Raiskio, Jorma Pohjavirta, Lenni Laakso, Heikki Raiko. TEKA-95-08 Työraportti, TVO, 1995.

/2/ Creep of Copper. International Seminar on Copper Canisters for Nuclear Waste, Solletuna 1994.

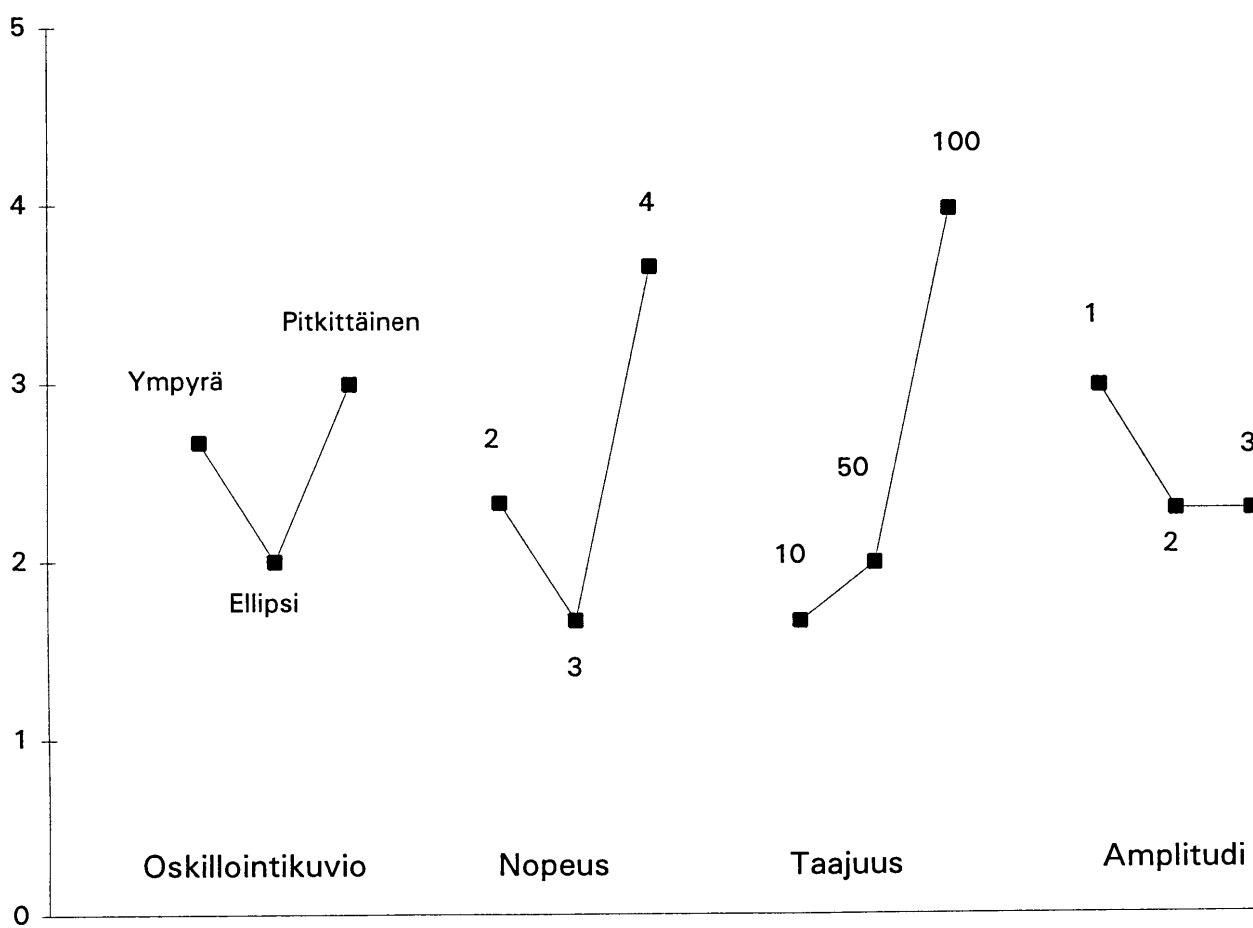
Liite 1

Kraaterit



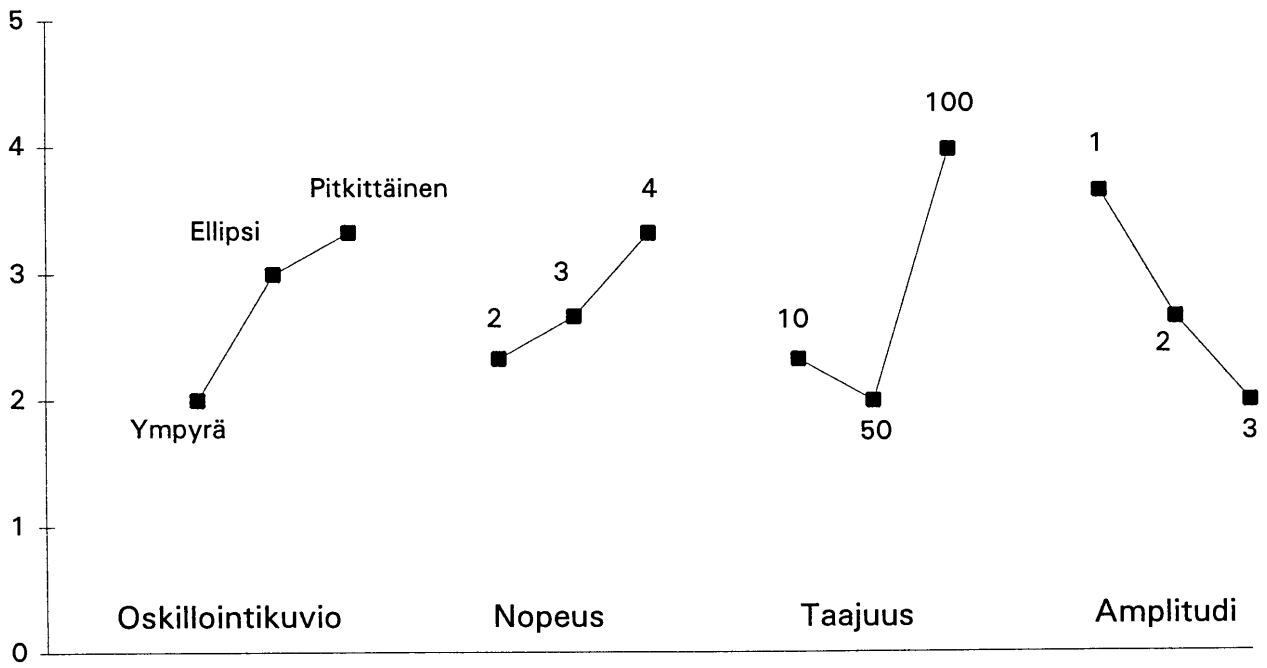
Liite 2

Valuma

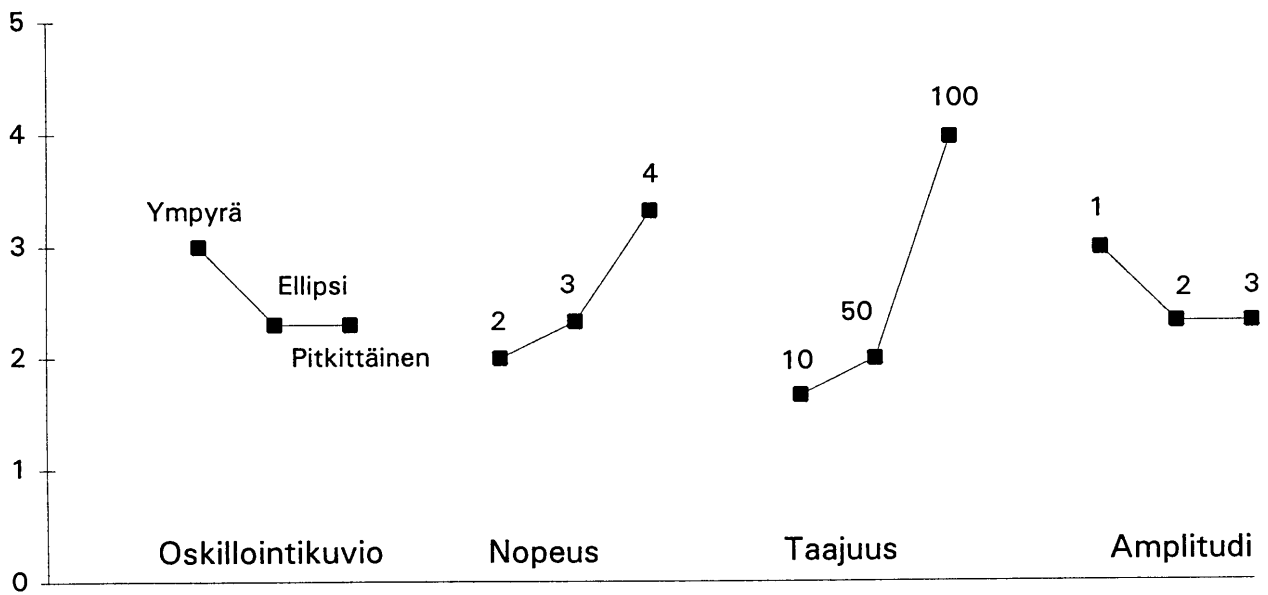


Liite 3

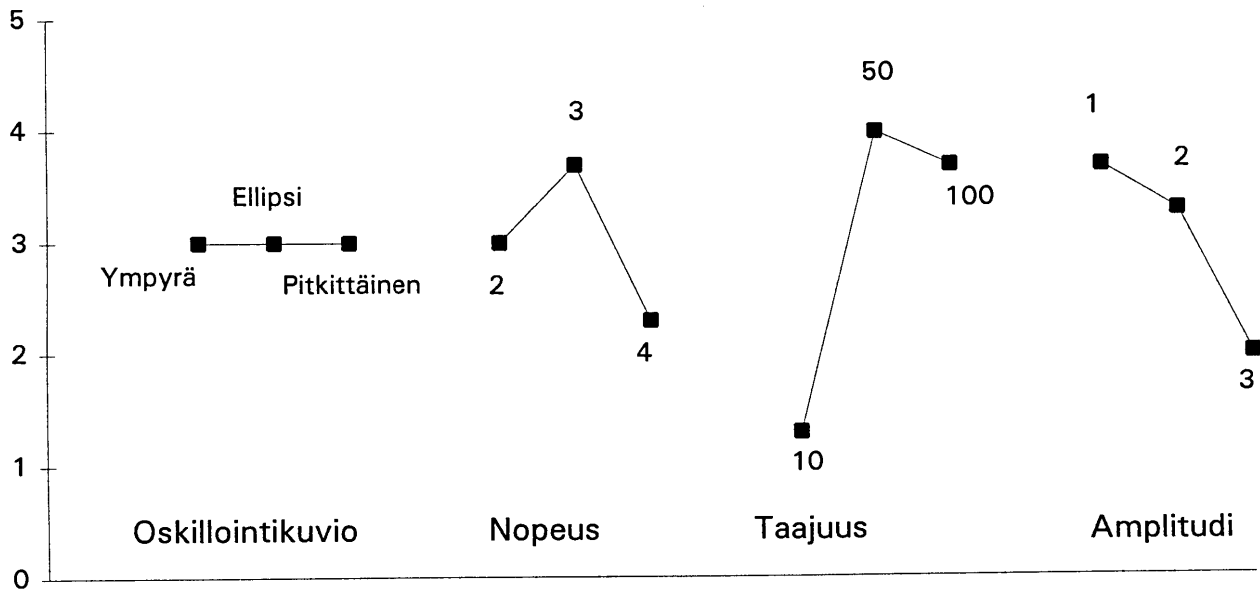
Valuman määrä



Yhtenäisyys

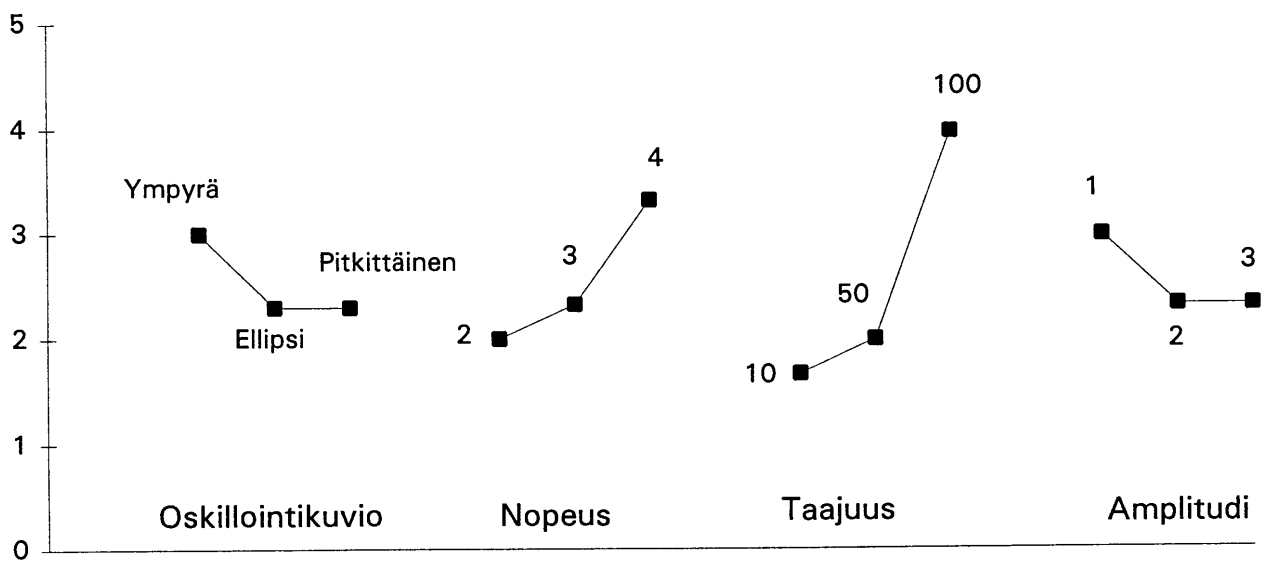


Pinta-alue



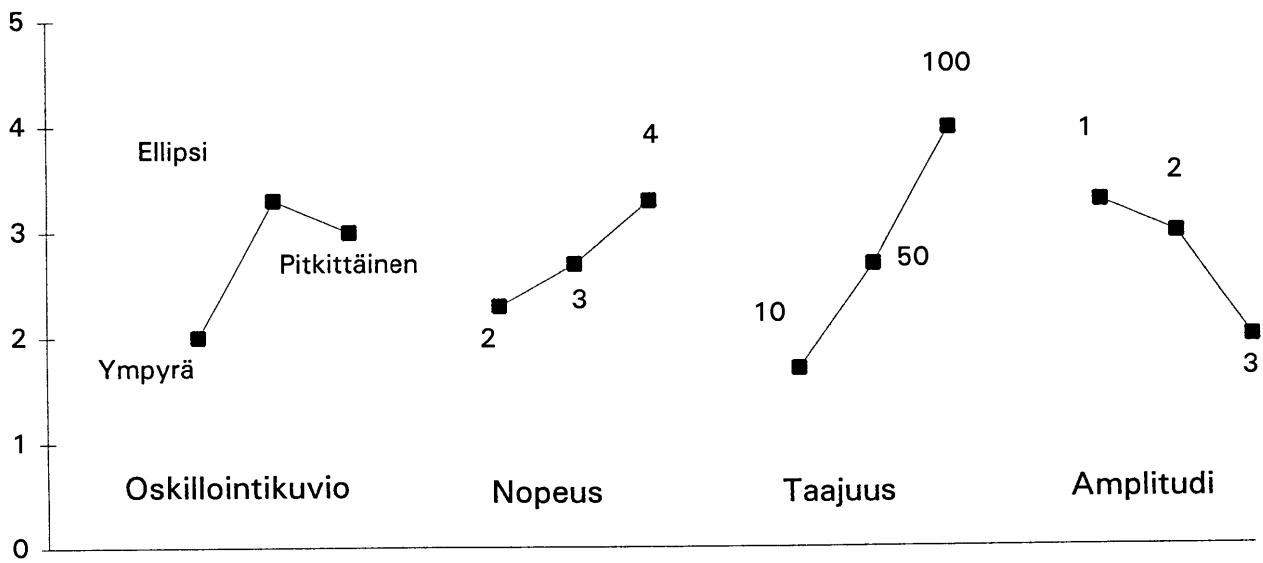
Liite 6

Keskialue

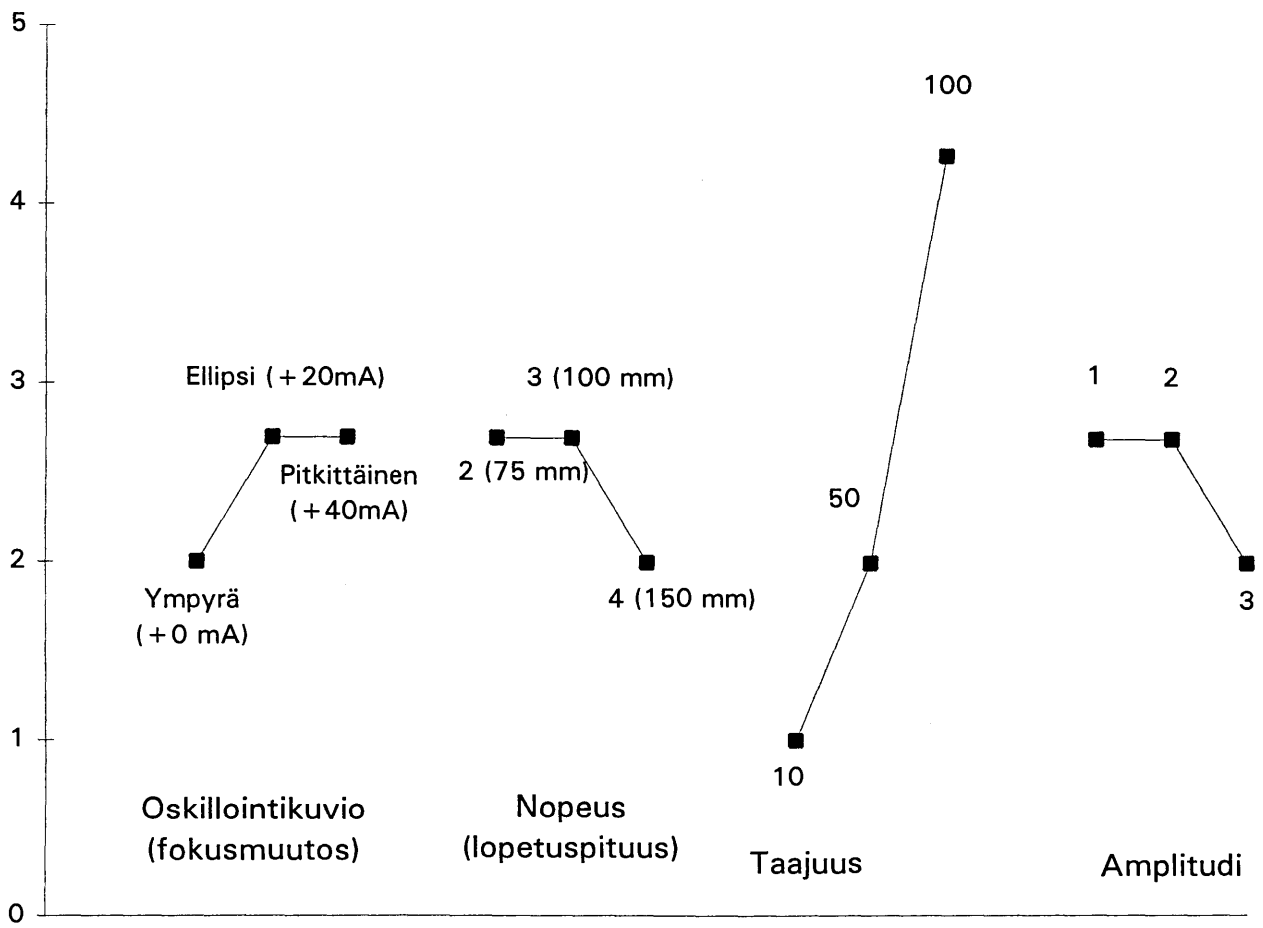


Liite 7

Juurialue

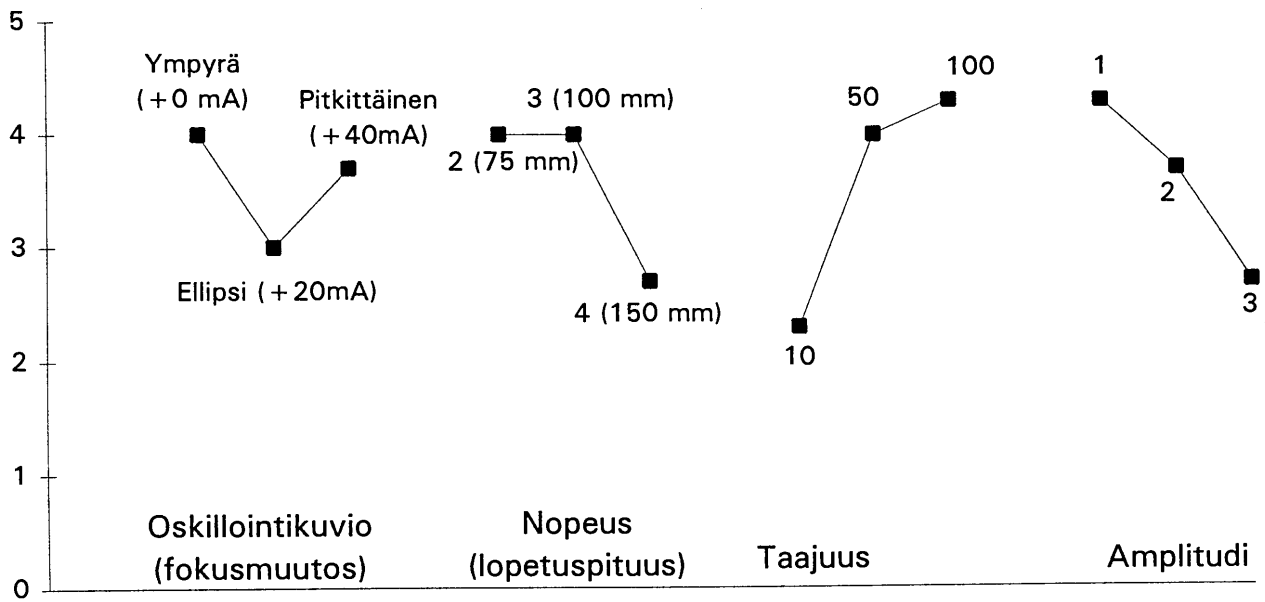


Loppupinta



Liite 9

Sisäviat



Loppujuuri

