

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A4002 Kandidaatintyö

HITSAUS AVARUUDESSA

WELDING IN SPACE

Lappeenrannassa 3.11.2016

Riku Peltonen

Tarkastaja Prof. Jukka Martikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Riku Peltonen

Hitsaus avaruudessa

Kandidaatintyö

2016

68 sivua, 36 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

Hakusanat: avaruus, painottomuus, tyhjiö, hitsaus, simuloitu avaruusympäristö, avaruusasemat, avaruusalukset

Tässä kandidaatintyössä on kerrottu avaruudessa hitsaamisen historia lyhyesti ja selvitetty mihin hitsausta voidaan avaruudessa käyttää, minkälaisia erityispiirteitä avaruudessa hitsaamiseen liittyy ja mitä hitsausprosesseja avaruudessa voidaan soveltaa. Tutkimus on kokonaisuudessaan kirjallisuustutkimus. Tutkimusta oli tarkoitus täydentää haastatteluilla alasta tietäville eri tahoille, mutta vastauksia ei saatu riittävästi tutkimukseen hyödynnettäväksi.

Hitsausta avaruudessa ovat suorittaneet vain Neuvostoliitto, Venäjä ja Yhdysvallat. Viimeinen hitsauskoe on ollut 1990-luvulla. Hitsauksen tärkeimmät sovelluskohteet avaruudessa ovat korjaus ja kokoonpano. Vaurioituneita avaruusasemia tai -aluksia voidaan hitsauksen avulla korjata nykyistä kestävämmiin. Avaruusasemien tai erillisten rakenteiden kokoonpano avaruudessa hitsaamalla mahdollistaisi kestävämmät liitokset mekaanisiin liitoksiin verrattuna. Avaruudessa on kuitenkin suoritettu vain kokeita hitsaukseen liittyen, eikä korjausta tai kokoonpanoa hitsaamalla ole tehty. Painottomuus, tyhjiö ja lämpötilan suuri vaihtelu ovat tärkeimpiä erityispiirteitä avaruudessa. Erityispiirteet täytyy ottaa huomioon hitsauslaitteistoja suunniteltaessa ja koulutettaessa hitsaajia. Olosuhteet avaruudessa asettavat turvallisuuden ensisijaiseksi, jotta onnettomuuksilta vältytään. Hitsausmenetelmien kehitystä ja tutkimista suoritetaan painottomuuslennoilla lentävissä laboratorioissa, tyhjiökammioissa ja vesitankeissa.

Avaruudessa eri menetelmillä tehdyt hitsauskokeet ovat osoittaneet hitsauksen olevan mahdollista ja hitsien, sekä hitsauksen laadun olevan hyvää. Tutkimuksia hitsausprosessien soveltuvuudesta avaruuteen löytyi aina vuoteen 2015 asti. Tulevaisuudessa mahdolliset tutkimusmatkat avaruuteen ja eri planeetoille voisi luoda tarpeen hitsaukselle avaruudessa. Tällä hetkellä hitsaus ei ole avaruudessa käytössä oleva prosessi, eikä lähitulevaisuudessa ole suunniteltu kokeita avaruudessa hitsaukseen liittyen.

ABSTRACT

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

Riku Peltonen

Welding in space

Bachelor's thesis

2016

68 pages, 36 figures, 1 table and 2 appendices

Examiner: Professor Jukka Martikainen

Keywords: space, weightlessness, vacuum, welding, simulated space environment, space stations, spacecraft

In this bachelor's thesis history of welding in space is told briefly and reasons for welding in space, peculiarities associated with welding in space and what welding processes can be used in space are sorted out. Thesis is done as literature research. To back up literature research interviews were sent to several recipients' familiar to topic but not enough answers were received to use them in this thesis.

Only Soviet Union, Russia and United States has welded in space. Last welding experiment was done in 1990's. Most important application areas for welding in space are repair and construction. Damaged space stations or ships could be repaired more sustainably with welding. Assembling space stations or other structures in space by welding would allow more sustainable joints compared to mechanical joints. Only welding experiments have been made in space and repair or construction welding have not been carried out. Weightlessness, space vacuum and great changes in temperature are most significant peculiarities in space. These peculiarities must be taken account when designing welding equipment and training welders. Conditions in space puts safety in priority so that accident would not happen. Development and research on welding processes for space is made in flying laboratories to simulate weightlessness, in vacuum chambers and in water tanks.

Welding experiments made in space using different welding processes has shown that welding is possible in space and the welding quality is good. Studies on using different welding processes for use in space were found all the way to the year 2015. In future possible explorations to space and planets could create need for welding in space. Right now welding is not used process in space and there are no planned experiments related to welding in space.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Tutkimuksen tausta..... | 8 |
| 1.2 | Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset..... | 8 |
| 1.3 | Tutkimusmenetelmät ja rajaukset..... | 9 |
| 2 | TUTKIMUSMENETELMÄT | 10 |
| 2.1 | Kirjallisuustutkimus..... | 10 |
| 2.2 | Haastattelut..... | 11 |
| 3 | HITSAUKSEN TARVE AVARUUDESSA | 12 |
| 3.1 | Korjaushitsaus..... | 12 |
| 3.2 | Kokoonpanohitsaus..... | 14 |
| 4 | HITSAUKSEN ERITYISPIIRTEET | 16 |
| 4.1 | Olosuhteet..... | 16 |
| 4.2 | Laitteistot..... | 18 |
| 4.3 | Turvallisuus..... | 21 |
| 4.3.1 | Suojaus..... | 23 |
| 4.4 | Hitsaajien vaatimukset, koulutus ja pätevyudet..... | 24 |
| 4.5 | Hitsattavat materiaalit..... | 26 |
| 5 | HITSAUSMENETELMÄT | 28 |
| 5.1 | Kehitys..... | 28 |
| 5.2 | Kokeillut menetelmät..... | 30 |
| 5.2.1 | Elektronisuihkuhitsaus..... | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.2 | Plasmakaarihitsaus..... | 35 |
| 5.2.3 | Metallikaarihitsaus/ metallikaasukaarihitsaus (MIG/MAG-hitsaus)..... | 36 |
| 5.3 | Tutkittavat menetelmät | 38 |
| 5.3.1 | TIG-hitsaus | 39 |
| 5.3.2 | GHTA-hitsaus | 40 |
| 5.3.3 | Laserhitsaus | 42 |
| 5.3.4 | Tapitushitsaus | 44 |
| 5.4 | Hitsauksen ja hitsien laatu ja laadunvarmistus | 46 |
| 6 | CASET | 52 |
| 6.1 | Ensimmäinen avaruuskävelyn aikana suoritettu hitsauskoe..... | 52 |
| 6.2 | ISWE ja Flagman..... | 53 |
| 7 | POHDINTA | 56 |
| 7.1 | Vertailu aiempiin tutkimuksiin | 57 |
| 7.2 | Tutkimuksen objektiivisuus ja tulosten luotettavuus..... | 57 |
| 7.3 | Johtopäätökset..... | 58 |
| 7.4 | Jatkotutkimusaiheet | 59 |
| 8 | YHTEENVETO | 60 |
| | LÄHTEET | 62 |
| | LIITTEET | |
| | LIITE I: Haastattelukysymykset | |
| | LIITE II: Prosessilaitteiston rakenne | |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|-----------------|---|
| A | Virta [Ampeeri] |
| G | Kiihtyvyys [$1\text{ G} = 9,80665\text{ m/s}^2$] |
| K | Lämpötila [Kelvin] |
| Pa | Paine [Pascal] |
| V | Jännite [Voltti] |
| W | Teho [Watti] |
| | |
| AWS | American Welding Society, Amerikan hitsausyhdistys |
| CO ₂ | Hiilidioksidi |
| ESA | European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö |
| FSW | Friction stir welding, Kitkahitsaus |
| GHTA | Gas hollow tungsten arc, Volframikaasukaarihitsaus ontolla elektrodilla |
| ISS | International Space Station, Kansainvälinen avaruusasema |
| ISWE | International Space Welding Experiment, Kansainvälinen avaruushitsauskoe |
| MIG/MAG | Metal inert/active gas, Metallikaasukaarihitsaus inertillä/aktiivisella suojakaasulla |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto |
| Nd:YAG | Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet, Laserissa käytettävä kristalli |
| NTRS | NASA Technical reports server, Tietokanta NASAssa tuotetuille raporteille |
| PWI | Paton Welding Institute, Paton hitsausinstituutti |
| Roscosmos | Venäjän avaruusjärjestö |
| TIG | Tungsten inert gas, Volframi-inerttikaasukaarihitsaus |
| USD | Yhdysvaltain dollari |
| VHT | Versitale Handtool, Ukrainalaisten kehittämä elektronisuihkukäsityökalu käytettäväksi avaruudessa |
| YAG | Yttrium Aluminum Garnet, Synteettinen mineraali |

1 JOHDANTO

Ensimmäinen hitsausta avaruudessa kokeillut valtio oli vuonna 1969 Neuvostoliitto. Hitsauskoe tapahtui miehitetyssä Sojuz 6-avaruusaluksessa automatisoidulla Vulkan-hitsauslaitteella. Testatut hitsausmenetelmät Vulkanilla olivat metallikaarihitsaus ilman suojakaasua, plasmahitsaus ontolla elektrodilla ja elektronisuihkuhitsaus. Elektronisuihkuhitsaus osoittautui kolmesta edellä mainitusta menetelmästä parhaaksi hitsausmenetelmäksi jatkokehitystä varten. (Benfield & Landrum 1998, s. 26; Ohji 2006, s. 356.) Neuvostoliitossa kehitettiin Vulkanin jälkeen muitakin elektronisuihkulla toimivia automatisoituja hitsauslaitteita. Kehitettyjä laitteistoja, joilla voitiin suorittaa metallien pinnoitusta ja juottoa, rakennettiin ainakin neljä, ja niitä myös testattiin avaruusolosuhteissa avaruusaseman sisällä. Kahdella laitteistoista voitiin myös hitsata ja laitteistoja oli käytössä avaruusasemilla Saljut 6, Saljut 7 ja Mir. (Benfield & Landrum 1998, s. 26, 28.)

Myös Yhdysvallat on kokeillut elektronisuihkuhitsausta avaruudessa. Vuonna 1973 Skylab-avaruusasemalla toteutettiin M551 niminen koe, jossa testattiin metallien sulatusta, hitsausta ja leikkausta M512-elektronisuihkulaitteella. (Benfield & Landrum 1998, s. 28; Poorman 1975, s. 2–4, 10.) Kansainvälisellä avaruusasemalla (ISS) ei ole suoritettu kokeita hitsaukseen liittyen, joten M551 on löydetyn tiedon mukaan toistaiseksi ainut Yhdysvaltojen toteuttama hitsauskoe avaruudessa avaruusasemalla (Ohji 2006, s. 356; Experiment list 2016).

Ensimmäinen avaruuskävelyn aikana suoritettu hitsauskoe tapahtui vuonna 1984 Saljut 7-avaruusaseman ulkopinnalla. Hitsaukseen käytettiin VHT-elektronisuihkukäsityökalua (Versitale electron beam handtool), jolla tehtiin myös leikkaus- ja juottokokeita. VHT jäi osaksi Saljut 7-avaruusasemaa, ja sitä käytettiin seuraavan kerran 12-metrinen ristikkorakenteen eri osien hitsaukseen ja juottoon vuonna 1986. (Ohji 2006, s. 355–356; Paton 2009, s. 2, 5.) Vuosina 1984–1990 Neuvostoliitto suoritti yhteensä viisi hitsauskoetta avaruudessa avaruusaseman ulkopuolella (Ohji 2006, s. 355).

Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto (NASA) lähestyi ukrainalaista Paton hitsausinstituuttia (Paton Welding Institute, PWI) yhteisen hitsauskokeen järjestämiseksi

vuonna 1991 Neuvostoliiton hajottua. Projektin nimeksi tuli kansainvälinen avaruushitsauskoe (International space welding experiment, ISWE), jonka tarkoituksena oli testata ukrainalaisten kehittämää Universal-elektronisuihkuhitsauslaitteistoa avaruussukkulan kyydissä. (Benfield & Landrum 1998, s. 25, 28; Paton 2009, s. 5.) Avaruuslennon oli tarkoitus tapahtua vuonna 1997, mutta kuitenkin vuonna 1996 ISWE keskeytettiin, jonka jälkeen ukrainalaiset ja venäläiset aloittivat Flagman-projektin, jossa Universal oli tarkoitus kuljettaa Mir-avaruusasemalle ja suorittaa siellä hitsauskokeita. Vuonna 1998 Mir alkoi vajota kohti ilmakehää ja tutkimustyö asemalla jouduttiin lopettamaan, eikä koe lopulta koskaan toteutunut. (Paton et al. 1999a, s. 203–211; Paton 2009, s. 5.)

1.1 Tutkimuksen tausta

Hitsaus avaruudessa liittämisen- ja korjausprosessina on tarpeellinen, kun ihmiskunta pyrkii toteuttamaan tutkimusmatkoja avaruuteen. Avaruusalusten ja avaruusasemien rakentaminen ja korjaaminen avaruudessa hitsaamalla mahdollistaisi nykyisiä ja menneitä avaruusasemia suuremmat rakenteet, ja pidemmän yli 30 vuoden eliniän. (Bulatsev et al. 1991, s. 474–475.) ISWE syntyi Yhdysvaltojen ymmärrettyä hitsaamisen välttämättömyyden avaruudessa tulevaisuudessa, mutta kuitenkin 1990-luvun jälkeen avaruudessa suoritettavat kokeet näyttävät jääneen pois avaruushitsauksen tutkimuksesta (Benfield & Landrum 1998, s. 26; Experiment list 2016). Tietoa yhtä kattavista ISWE:n tapaisista maiden välisistä projekteista avaruushitsaukseen liittyen ei ole löytynyt. Vaikka viimeiset löytyneet dokumentit hitsauksesta avaruudessa ovat lähes 30 vuoden takaisia, on tutkimuksia avaruuteen soveltuvista ja kehitettävistä hitsausmenetelmistä löytynyt aina 2015-vuoteen asti. Paljon avaruushitsaukseen liittyvästä tutkimuksesta on tehty Ukrainassa sijaitsevassa Paton hitsausinstituutissa, jossa suurin osa käytetyistä laitteistoista on kehitetty, ja tutkimus avaruudessa hitsaamisesta jatkuu edelleen (Paton 2009, s. 5–6). Tutkimustyötä avaruushitsaukseen liittyen on tehty myös esimerkiksi Japanissa, vaikka tutkimusta ei ole pystytty tekemään kuin simuloidussa avaruusolosuhteissa (Ohji 2006, s. 356).

1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimusongelmana ovat hitsauksen soveltamismahdollisuudet, olosuhteiden asettamat haasteet ja niiden vaikutus hitsausmenetelmien sopivuuteen avaruudessa. Hitsauksesta

avaruudessa on saatavilla paljon tietoa, mutta julkista tai suomenkielistä työtä, jossa käsitellään yhdessä edellä mainittuja ongelmia, ei ole löytynyt.

Tavoitteena työssä on kertoa taustaa avaruudessa tapahtuvan hitsauksen tarpeellisuudesta, menetelmistä ja tutkimuksesta. Osa-alueista on tavoitteena koostaa jouheva ja tiivis kokonaisuus. Tavoitteena on, että työ toimii tietolähteenä niille, jotka haluavat tietää, mitä avaruushitsauksen saralla on tehty ja tutkittu.

Tutkimusongelmasta johdetut tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mihin hitsausta tarvitaan avaruudessa?
- Mitä erityispiirteitä avaruudessa hitsaamiseen liittyy?
- Millä menetelmillä avaruudessa on hitsattu?
- Mitä hitsausmenetelmiä tällä hetkellä tutkitaan?

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Työ on pääosin kirjallisuusselvitys. Aineisto koostuu aiheesta kirjoitetusta kirjallisuudesta, lehdissä julkaistuista artikkeleista ja eri avaruushallintojen julkaisemista raporteista ja aineistoista. Aineisto on hankittu hakemalla tietoa eri tietokannoista. Suuri osa aineistosta on yli kymmenen vuotta vanhaa tai neuvostoliittolaisten tutkijoiden kirjoittamaa, sillä hitsaus ei ole löydetyn tiedon mukaan tällä hetkellä käytössä oleva prosessi avaruudessa. Löydettyä aineistoa tukemaan valittiin sähköpostin avulla toteutetut haastattelut, joissa kysyttiin eri aiheesta mahdollisesti tietäviltä tahoilta kysymyksiä liittyen esimerkiksi tutkittaviin hitsausmenetelmiin, kokeisiin ja avaruudessa hitsaamisen tulevaisuuteen liittyen.

Työn rajauksena on kertoa käytössä olleista, kokeilluista ja tutkittavista hitsausmenetelmistä avaruudessa. Työ on rajattu käsittelemään avaruudessa tehtyä hitsausta ja yleisimpiä tutkittuja hitsausmenetelmiä. Usealla avaruuteen kehitetyllä hitsauslaitteistolla voidaan suorittaa muitakin prosesseja, kuten juottamista tai päällystämistä, mutta työssä ei käsitellä kuin hitsausta.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

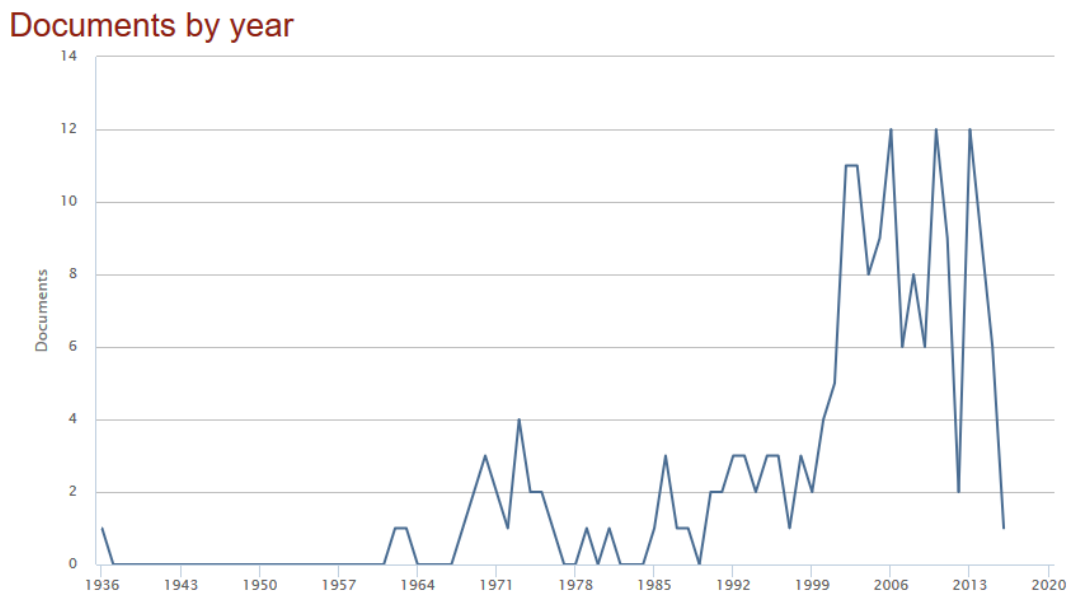
Tutkimus on luonteeltaan teoreettinen, eli tutkimus perustuu pääosin aiheesta löytyneeseen kirjallisuuteen, tieteellisiin teksteihin ja muuhun luotettavaksi arvioituun aineistoon. Tarkemmin kuvattuna tutkimus on kvalitatiivinen ja tutkimuksessa tavoitteena on kerätä tietoa avaruushitsauksesta ja esittää löytynyt luotettavaksi arvioitu tieto mahdollisimman selkeästi vastaten tutkimuskysymyksiin. Tutkimuksessa ei siis tuoteta uusia ideoita tai näkökulmia aiheeseen liittyen. Kirjallisuustutkimusta tuettiin kyselyllä, jossa on esitetty täsmentäviä kysymyksiä aiheesta eri avaruusjärjestöille, Amerikan hitsausyhdistykselle (AWS) ja PWI:lle.

2.1 Kirjallisuustutkimus

Aineiston etsimiseen käytettiin useita tietokantoja. Käytetyt tietokannat tutkimuksessa ovat ProQuest, Scopus, SpringerLink ja ScienceDirect. Lisäksi tietoa etsittiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston kirjastosta Wilma-hakukoneella, Google Scholar-hakukoneella sekä NASAn NTRS-palvelulla (NASA Technical reports server). Hakusanoina tietoa etsittäessä käytettiin englanninkielisiä sanoja welding (hitsaus), space (avaruus), vacuum (tyhjiö), weightlessness (painottomuus) ja hitsausprosesseja kuvaamaan käytettiin muun muassa sanoja electron beam (elektronisuihku), laser ja plasma. Boolean operaattoreita AND ja OR käytettiin siten, että tuloksissa haluttiin esiintyvän esimerkiksi sekä hitsaus että avaruus (welding AND space), joko otsikossa, tiivistelmässä tai hakusanoissa. Hakujen kohdentamiseksi haluttiin tuloksissa esiintyvän joku hitsausprosessia kuvaavista sanoista erottamalla sanat käyttäen operaattoria OR (electron beam OR plasma) yhdessä avaruuden ja hitsauksen kanssa.

Relevanssin mukaan lajiteltuna eri hakusanoista ja yhdistelmistä huolimatta tulokset olivat paljolti samoja ennen 2000-lukua ja 2000-luvun alkupuolella kirjoitettuja tekstejä. Tutkimalla aikaisempien tutkimusten lähteitä löytyi kaksi avaruudessa hitsaukseen liittyvää kirjaa PWI:n koostama *Space: Technologies, Materials, Structures* (2003), johon on koottu pääosin neuvostoliittolaisten tutkijoiden tekstejä vuosilta 1960–2001 ja AWS:n kokoama *Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding* (1991), joiden kaikkia

sisältämiä tekstejä ei löytynyt tietokannoista hakemalla. Kuvassa 1 on esitetty kuvaaja Scopus-tietokannasta löytyneistä dokumenteista.



Kuva 1. Hakuehdoilla (welding AND space AND vacuum OR weightlessness) löytyneet dokumentit (Scopus 2016).

2.2 Haastattelut

Haastattelut toteutettiin lähettämällä sähköpostiviesti NASAlle, Euroopan avaruusjärjestölle (ESA), Venäjän avaruusjärjestölle (Roscosmos), AWS:lle ja PWI:lle. Sähköpostin välityksellä tehty haastattelu oli luontevin valinta, sillä kaikki edellä mainitut sähköpostin vastaanottajat sijaitsevat ulkomailla, eikä muulla tavoin tehty haastattelu olisi ollut mahdollinen. Sähköposteissa olleet kysymykset ovat esitetty liitteessä I. Kysymykset lähetettiin jokaiselle vastaanottajalle erikseen näiden internetsivuilta löytyneisiin yhteystietoihin. Kaikilla muilla paitsi AWS:llä oli internetsivuillaan erillinen lomake, jonka avulla täytyi ottaa yhteyttä. Lähetetyissä viesteissä kysyttiin erikseen tietoa henkilöistä, jotka tietävät asiasta parhaiten tai jos mahdollista pyydettiin viestin ohjausta suoraan aiheesta tietäville henkilöille.

Vastauksia odotettiin neljä kuukautta, jonka aikana vain Roscosmokselta saatiin vastaus. Sähköpostissa oltiin vastattu kaikkiin kysymyksiin, mutta vastauksista ei saatu uutta tietoa. Haastatteluja ei voitu hyödyntää vastausten puutteen vuoksi tutkimuksessa ja painoarvo jäi kirjallisuustutkimukselle.

3 HITSUKSEN TARVE AVARUUDESSA

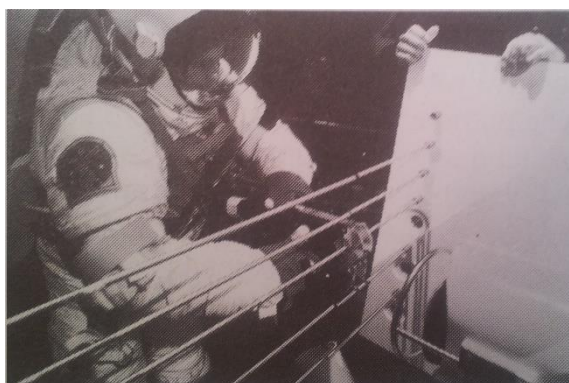
Kaikki edesmenneet avaruusasemat, sekä nykyinen ISS on kasattu avaruudessa mekaanisilla liitoksilla ilman hitsausta. ISS:n ja edesmenneiden avaruusasemien huolto on suoritettu muilla tavoin kuin hitsaamalla. Woodward kirjoittaa kuinka ISS koostuu moduuleista, jotka rakennetaan maassa ja kuljetetaan avaruuteen liittämistä varten. Moduulit rakennetaan maassa pääosin hitsaamalla, ja hitsien tulee olla laadultaan periaatteessa virheettömiä. Moduuleiden hitsaus on tapahtunut automatisoiduilla laitteilla ja jälkitarkastus on suoritettu käyttäen röntgeniä, laser-optista mittalaitetta sekä tunkeumanestettä. (Woodward 1996, s. 37.) Avaruusrakenteiden, kuten avaruusasemien ja satelliittien korjaus- ja kokoonpanohitsauksesta on kuitenkin kirjoitettu paljon. Esimerkiksi Tamir et al. (1993) arvioi, että tulevaisuuden mahdollisia planeettojen välisiä matkoja varten hitsaus korjaustoimenpiteenä tai kokoamisessa on välttämätön, mekaanisten liitosten ollessa kestävämpiä hitsattuihin liitoksiin verrattuna. Samankaltaisia arvioita esiintyy myös muiden tutkijoiden teksteissä, ennen kuin avaruudessa on edes hitsattu.

3.1 Korjaushitsaus

Avaruudessa korjaushitsausta voidaan tarvita esimerkiksi avaruussukkulan tai avaruusaseman ulkopinnan vaurioituessa mahdollisista törmäyksistä avaruusrumun kanssa tai törmäyksessä telakoitumisessa. Myös mahdolliset vuodot avaruusaseman putkistoissa voitaisiin paikata hitsaamalla. Mahdolliset räjähdykset tai metallin eroosio, korroosio ja vanheneminen ovat myös mahdollisia vaurioiden aiheuttajia. Satelliittien käyttöikä olisi mahdollista pidentää korjaamalla mahdolliset vauriot hitsaamalla paikan päällä. (Paton et al. 1976, s. 75.)

Varsinkin putkistojen hitsauksesta avaruudessa on kirjoitettu artikkeleita, sillä ne ovat yksi haavoittuvimpia osa-alueita avaruusasemilla. Putkistojen liitokset saataisiin kestävämpään paremmin ja korjaaminen olisi kestävämpää hitsaamalla. Tutkitut menetelmät ovat TIG-hitsauksen (Tungsten inert gas) lisäksi juottaminen. (Ternovoj et al. 2010, s. 10; Vasenin et al. 2001, s.18; Tamir et al. 1993.) Yhdysvaltalaisen avaruussukkuloihin on kehitetty mahdollisia putkistovaurioita varten korjaustapa, jossa kaksi c-muotoista kappaletta puristetaan kovalla paineella putken ympärille lisäten samalla tiivistemassaa. Kyseinen

menetelmä on kuitenkin väliaikainen, ja kestävämpi paikka tehdään maassa, eikä siten menetelmää voida soveltaa avaruusasemilla. Kuvassa 2 on esitetty testaaja avaruuspuvussa simuloitussa painottomuudessa kokeilemassa TIG-hitsauslaitetta korjaustoimenpiteenä avaruusasemien ja sukkuloiden putkistoille. Kokeessa ei kuitenkaan suoritettu hitsausta. (Anderson 1991, s. 146–148.) Avaruussukkula-ohjelma on ollut keskeytettynä Yhdysvalloissa vuodesta 2011 eteenpäin. Tietoa ei löytynyt siitä, että korjaushitsausta olisi suoritettu avaruussukkuloissa niiden ollessa käytössä.



Kuva 2. Testaaja simuloitussa painottomuudessa kokeilemassa TIG-hitsauslaitteiston käytettävyyttä putkistojen korjaamiseen (Anderson 1991, s. 148).

Suurin osa eri avaruusjärjestelmissä syntyneistä ongelmista johtuu vioista sähköjärjestelmissä eikä rikkoutuneista metallirakenteista. Avaruusaluksissa ei alun perin ollut minkäänlaisia tarpeita korjauksia varten, sillä niiden ei nähty olevan tarpeellisia lyhyillä 1–5-päivän lennoilla. Pidemmällä yli 10 päivää kestäville lennoille vietiin mukana yksinkertaisia korjausvälineitä, kuten teippiä. Avaruusasemilla Skylab ja Saljut oli käytössä kattavasti työkaluja ja varaosia tehtävien kestäessä yli 100 päivää. (Paton et al. 1976, s. 75.) Mir-avaruusasemalla noin puolet asemalla tehdystä työstä liittyi eri kohteiden korjaamiseen (Vasenin et al. 2001, s. 18). Paton et al. (1976) sekä Vasenin et al. (2001) antavat varsin havainnollistavan esimerkin sukellusveneiden, avaruusaluksien ja avaruusasemien samankaltaisuuksista liittyen korjaukseen ja huoltoon. Alun perin sukellusveneissä ei ollut mitään korjaustarpeita, kun nykyajan ydinsukellusveneissä on oma työpaja, joissa voi hitsata ja korjata aluksen osia, jopa sukelluksissa ollessa. Sama kehityssuunta näyttää olevan välttämätön myös avaruusasemilla, eli korjaushitsausta pitäisi olla mahdollista tehdä avaruusalukseen tai avaruusasemaan paikan päällä avaruudessa. (Paton et al. 1976, s. 75–76; Vasenin et al. 2001, s. 18.)

Avaruudessa ei ole vielä jouduttu tekemään varsinaista korjaushitsaamista, vaikka Saljut 7 ja Mir avaruusasemilla on ollut hitsaamisen mahdollistavat laitteet. VHT-laitteistoa on käytetty avaruudessa rikkinäisen antennin korjaamiseen leikkaamalla se irti, joka ei kuitenkaan vaatinut hitsaamista (Tamir et al. 1993). Mahdollisen hitsausta vaativan ongelman syntyminen avaruudessa avaruusaluksessa, sukkulassa tai asemalla ilman hitsauslaitetta tarkoittaisi sitä, että tehtävä jouduttaisiin mahdollisesti keskeyttämään ja miehistö evakuoimaan. Mahdollisuudella hitsata voisi välttää edellä mainitun tilanteen.

Ainakin Ukrainassa avaruudessa korjaushitsaamiseen soveltuvien menetelmien tutkimista on kuitenkin jatkettu. Kokeissa on tutkittu elektronisuihkupistoolin käyttämistä hitsaukseen tyhjiökammiossa digitaalisen ohjaimen avulla viisiakselisella manipulaattorilla. Tulosten perusteella elektronisuihkulaitteistolla voidaan tuottaa laadultaan hyviä hitsejä, ja teknologiaa voitaisiin soveltaa avaruusasemilla korjaukseen. (Ternovoj, Shulym & Lankin 2013, s. 101–102.) Tarkempaa kuvausta tutkimukseen käytetyistä laitteista ei löytynyt.

3.2 Kokoonpanohitsaus

Varsinkin avaruudessa kokoonpanossa hitsaus tarjoaa monia etuja. Kannatinrakenteiden ja muiden suurten rakenteiden kokoaminen hitsaamalla verrattuna mekaaniseen liittämiseen tarjoaa paremman kestävyuden ja jäykkyyden. Liitosten tekeminen hitsaamalla takaa pienemmän liitosmassan ja yksinkertaisemman liitos-suunnittelun. Hitsaamisella voidaan myös saavuttaa parempi luotettavuus, sekä kustannussäästöjä hitsattujen liitosten ollessa mekaanisia liitoksia kevyempiä. (Tamir et al. 1993.)

Tutkimus hitsauksesta kokoonpanomenetelmänä avaruudessa on paljolti keskittynyt pitkien kannatinrakenteiden kokoamisen tutkimiseen. Pitkiä rakenteita on mahdotonta tai kannattamatonta kuljettaa valmiiksi kasattuna avaruuteen. Kannatinrakenteiden täytyy täyttää monia kriteereitä, kuten mahdollisimman pieni paino, hyvä jäykkyys ja kuormankantokyky, helppo huollettavuus, pitkä kestoikä ja kustannustehokkuus. (Bulatsev et al. 1991, s. 474–475.) PWI:ssa on kehitetty itsestään ”avautuva” tai rakentuva kannatinrakenne, joka pakkautuu 1500 mm pitkään ja 700 mm leveään sylinteriin, josta rakenteen voi koota automattisesti, jonka jälkeen rakenteen saranat voidaan hitsata, mikä kuitenkin estää rakenteen kasaamisen takaisin lähtöpituuteen. Vuonna 1986 Neuvostoliitto kokeili kannatinrakenteen kokoamista avaruudessa. Koe suoritettiin kahden kosmonautin

toimesta kahden avaruuskävelyn aikana. Ensimmäisen avaruuskävelyn aikana suoritettujen valmistelujen jälkeen toisen avaruuskävelyn aikana kosmonautit kokosivat 13 metriä pitkän kannatinrakenteen. Rakenteen kestävyyttä testattiin aluksi altistamalla rakenne mekaanisille värähtelyille, jonka jälkeen rakenteen eri osia hitsattiin ja juotettiin käyttämällä VHT-laitetta. Hitsatut ja juotetut liitokset kuljetettiin takaisin maahan analysointia varten. Hitsit olivat laadultaan hyviä, vaikka sähkövirtaa oli rajoitetusti käytössä hitsauksen aikana. (Bulatsev et al. 1991, s. 477–479; Paton et al. 1989, s. 473.) Muita avaruudessa kokoonpanohitsaukseen liittyviä kokeita ei ole löytynyt. Yksinkertaisen kannatinrakenteen kokoaminen voidaan suorittaa myös käsin kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Atlantis-avaruussukkulan ulkopuolella suoritettu kannatinrakenteen kokoaminen manuaalisesti vuonna 1985 (Paton et al. 1991, s. 491).

Hitsauksen etuja ja käyttöä eri avaruusasemien osien kokoamista varten on pohdittu paljon. Hyödyistä huolimatta vaikuttaa siltä, että hitsauksen ei ole katsottu olevan vielä välttämätöntä tai tarpeeksi kehittynyttä rakenteiden kokoonpanoon avaruudessa. Esimerkiksi avaruusaseman moduuleiden hitsaus yhteen avaruudessa vaatii luultavasti samanlaisen maassa käytetyn automatisoidun hitsauslaitteen, joka on kallista ja katsotaan olevan kannattamatonta avaruusasemalla, joka on suunniteltu kestämään vain 15–20 vuotta.

4 HITSUKSEN ERITYISPIIRTEET

Avaruudessa vallitseva mikropainovoima ja tyhjiö ovat tärkeitä erityispiirteitä, jotka täytyy ottaa huomioon avaruudessa hitsattaessa. Ihmiseltä tyhjiöltä suojautuminen vaatii avaruuspuvun. Painottomuus ei ole ihmiselle ongelma kuin pitkällä aikavälillä, mutta hitsauksessa sekin täytyy ottaa huomioon. Maassa käytettäviä hitsausmenetelmiä ei voida soveltaa avaruudessa täysin suoraan, vaan hitsaukseen vaaditaan omat avaruuteen suunnitellut laitteistot. Hitsauksessa syntyvän sulan hallinnan täytyy olla täydellistä, ettei synny vaaratilanteita, joissa sula pääsee kosketuksiin avaruuspuvun. Tämän myötä hitsaajien koulutus on tärkeä osa valmistautumista avaruudessa tapahtuvaan hitsaukseen.

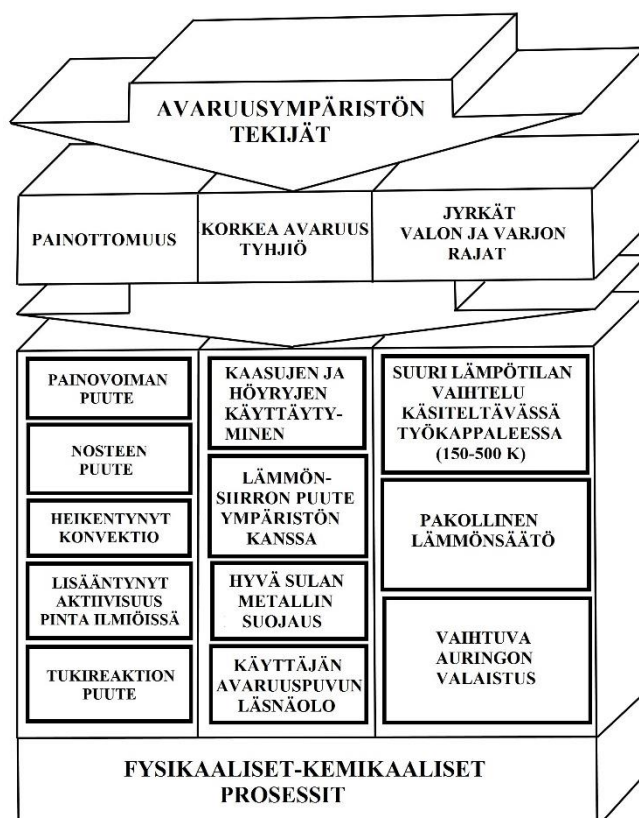
4.1 Olosuhteet

Avaruus asettaa hitsaukselle useita haasteita maanpinnalla tapahtuvaan hitsaukseen verrattuna. Tärkeimmät erityispiirteet ja poikkeavuudet olosuhteissa avaruudessa verrattuna maahan ovat painottomuus, tyhjiö, suuret lämpötilan vaihtelut ja ionisoiva ultraviolettisäteily. (Paton 1990, s. 35.) Taulukossa 1 on esitetty avaruuden olosuhteet eri korkeuksilla maanpinnasta.

Taulukko 1. Lämpötila ja paine päivä- ja yöaikaan eri korkeuksilla maanpinnasta (mukailten Ohji 2006, s. 356).

| Korkeus [km] | Lämpötila [K] | | Paine [Pa] | |
|--------------|---------------|------|---------------------|---------------------|
| | Päivä | Yö | Päivä | Yö |
| 260 | 1440 | 997 | $7,1 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ |
| 320 | 1553 | 1025 | $3,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-3}$ |
| 380 | 1599 | 1035 | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | $4,1 \cdot 10^{-4}$ |
| 440 | 1622 | 1039 | $7,7 \cdot 10^{-4}$ | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 500 | 1633 | 1041 | $4,0 \cdot 10^{-4}$ | $5,7 \cdot 10^{-5}$ |

Taulukossa 1 olevat korkeudet ovat yleisimpiä toimintakorkeuksia avaruusaluksille ja avaruusasemille. Alkuperäisessä taulukossa oli esitettynä myös typen, hapen ja vedyn partikkeleiden tiheys neliösenttimetrillä. Kuvassa 4 on esitelty tarkemmin avaruuden erityispiirteitä ja hitsaukseen vaikuttavia tekijöitä avaruudessa.



Kuva 4. Avaruuden olosuhteet ja erityspiirteet (Shulym et al. 1991, s.14).

Kuvassa 4 on esitetty mihin painottomuus, tyhjiö ja auringon valon ja siihen liittyvän lämpötilan vaihtelu vaikuttavat. Painottomuudesta huolimatta avaruudessa vallitsee mikrogravitaatio, joka vaihtelee yleensä välillä $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ G (Paton, Stesin & Zagrebelny 1999b, s. 88, 90). Painottomuudesta johtuen manuaalisessa hitsauksessa hitsaajan työ vaikeutuu, sillä avaruudessa ei pystytä hyödyntämään maassa tuttuja hitsausasentoja. Tyhjiössä työskentely vaatii myös avaruuspuvun käyttöä, joka voi haitata hitsaamista. Työkappaleen lämpötila vaihtelee kuvan 4 mukaan välillä 150–500 kelviniä (-120–+220 Celsius), joka voi aiheuttaa ongelmia parametrien valinnassa, jos lämpötila muuttuu kesken hitsausprosessin. Muuttuva valaistus vaikeuttaa myös hitsaamista avaruudessa. Hitsisula muodostuu avaruudessa suuremmaksi kuin maassa pintajännityksestä johtuen. Avaruusolosuhteet aiheuttavat myös sen, että hitsisula kertyy hitsattavan kappaleen taakse railon reunoille. Avaruudessa tehdyt hitsit eivät ole olosuhteiden poikkeavuudesta riippumatta maanpinnalla tapahtuvaan hitsaukseen verrattuna huonompilaatuisia. (Paton 1990, s. 35, 38.)

4.2 Laitteistot

Laitteistoja, joilla voidaan suorittaa hitsausta avaruudessa, on suunniteltu, testattu ja rakennettu pääasiassa Neuvostoliitossa, Ukrainassa ja Yhdysvalloissa. Dzhanibekov et al. (1991) listaa tärkeimpiä huomioon otettavia asioita avaruuteen tarkoitettujen hitsauslaitteiston suunnittelussa: ”

- mukautuminen toiminnallisiin tehtäviin;
- turvallinen käyttö avaruusaluksissa;
- korkea luotettavuus;
- minimaaliset mitat, massa, energian kulutus;
- mahdollisuus jatkuvaan parametrien hallintaan teknologisessa prosessissa ja määräaikainen tiedon saanti laitteiston kunnosta;
- yhteensopivuus avaruusaluksen järjestelmien ja miehistön kanssa;
- korjattavuus.”

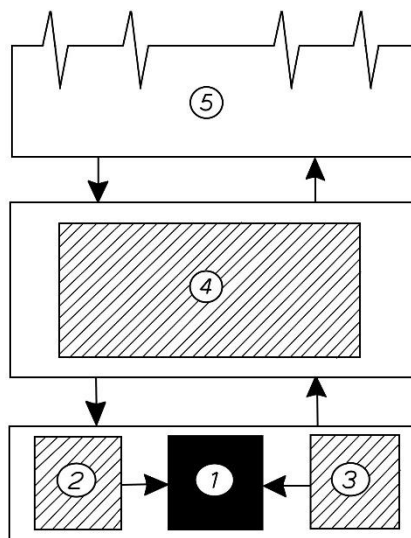
(Dzhanibekov et al. 1991, s. 184–185).

Olosuhteet avaruudessa vaikuttavat merkittävästi hitsauslaitteistojen suunnitteluun. Painottomuus on merkittävin tekijä avaruusolosuhteisiin suunniteltujen laitteiden suunnittelussa. Painottomuudesta johtuen hitsauslaitteen käyttäjä ei voi tukea itseään ilman erillisiä tukia, kuten kahvoja ja kaiteita, jotka täytyy ottaa huomioon laitteistoja suunnitellessa, jotta käyttäjän turvallisuus voidaan taata. Avaruudessa laitteistot ovat alttiina törmäyksille esimerkiksi avaruusromun kanssa, joten laitteiston suojaukseen täytyy panostaa ja osien tulee olla helposti vaihdettavissa. Laitteistolla on pystyttävä hallitsemaan syntynyttä sulaa, jottei sula pääse kosketuksiin käyttäjän avaruuspuvun kanssa. (Dudko et al. 1977, s. 85–86; Paton et al. 1999b, s. 90.)

Avaruustyhjiö vaikuttaa siihen mitkä prosessit soveltuvat avaruuteen parhaiten. Paine vaihtelee avaruusaseman pinnalla riippuen siitä missä kohtaa alusta ollaan, sillä avaruusaluksen moduulit vuotavat aina jonkin verran muodostaen kaasukehän aluksen ympärille, kuitenkin muodostamatta ongelmaa hitsaukselle. (Dudko et al. 1977, s. 86; Paton et al. 1999b, s. 88–89.) Avaruusaluksen sisällä ei saavuteta yhtä korkeata tyhjiötä, jos hitsausprosessi sen vaatii verrattuna avaruudessa vallitsevaan tyhjiöön paineen jäädessä yleensä välille $1 \cdot 10^{-1}$ – $0,5 \cdot 10^{-2}$ Pa verrattuna taulukossa 1 esitettyihin paineisiin. (Paton et al. 1999b, s. 89.)

Vaihtuva valaistus ja sitä johtuva suuri lämpötilan vaihtelu täytyy ottaa huomioon laitteiston suunnittelussa. Lämpötilan vaihtelu laitteiston pinnalla on yhtä suurta kuin käsiteltävän kappaleen kuvan 4 mukaisesti. Laitteistoa suojataan lämpöä tasoittavilla pinnoitteilla ja suojilla. Lämpöä tuottaa myös itse hitsauslaitteisto hitsattaessa. Laitteisto voidaan suunnitella siten, että se pystytään kytkemään avaruusaluksen lämmönsäätöjärjestelmään, joka takaa laitteistolle oikean ja tasaisen lämpötilan. Aina hitsauslaitteistoa ei voida kytkeä aluksen lämmönsäätöjärjestelmään, jos kyseessä on esimerkiksi korjauksiin tarkoitettu laitteisto, jolloin lämpötilaa voidaan säätää lämpöä tasaavilla pinnoitteilla, rajoittamalla käyttö jaksoihin ja rajoittamalla laitteiston tehoa. Edellä mainittuja keinoja on käytetty elektronisuihkuhitsauslaitteistoissa VHT sekä Universal lämmön rajoittamiseksi. (Paton et al. 1999b, s. 91.)

Avaruuteen suunniteltujen prosessilaitteiden yleinen rakenne on esitetty liitteessä II olevassa taulukossa, joka pätee myös avaruuteen tarkoitetuille hitsauslaitteistoille. Kuvassa 5 on esitetty avaruuteen suunniteltujen hitsauslaitteistojen yleinen rakenne kaaviokuvana.



Kuva 5. Dzhanibekov et al. (1991, s. 185) mukaan: ”Kaaviokuva avaruuteen tarkoitettuun hitsauslaitteistosta: 1. teknologinen laitteisto; 2. erityinen työasema; 3. apulaittevarustus; 4. virtalähde ja informaatioprosessointi-järjestelmä; 5. avaruusaluksen järjestelmät.”

Dzhanibekovin et al. (1991) laatimassa kuvassa 5 esitetyllä teknologisella laitteistolla tarkoitetaan hitsausyksikköä, mutta siihen voi sisältyä yksiköt myös leikkaus- ja juottamisprosesseja varten. Työasema on joko liikkuva tai paikallaan oleva ja apulaitteilla

helpotetaan käyttäjän työtä. Apulaitteilla voidaan myös mekanisoida työ kokonaan tai osittain. (Dzhanibekov et al. 1991, s. 184.) Liitteessä II Paton et al. (1999b) kuvaa avaruushitsauslaitteiston rakennetta taulukon muodossa hieman eri tavalla kuvaan 5 verrattuna. Liitteessä II esitettynä hitsauslaitteistot koostuvat yleisesti työyksiköstä, johon sisältyy lämmitin, apu- ja kiinnityslaitteet ja mekaaninen laitteisto. Lämmittimenä toimii elektronisuihku, apulaitteina kohdistuslaite ja ohjauslaite, sekä mekaanisina laitteistoina esimerkiksi mahdollinen lisääaineensyöttölaite. Laitteisto kattaa työyksikön lisäksi myös ohjausjärjestelmän ja sovitustlaitteet. Ohjausjärjestelmään lukeutuu ohjausyksikkö ja -paneeli, sekä telemetriyksikkö, jolla lähetetään tietoa prosessin kulusta maahan ja erillinen käyttäjänpaneeli, josta käyttäjä voi hallita prosessia. Sovitustlaitteina toimivat liikuteltava työpaikka ja taso ankkurointia varten. Laitteistoja on tutkimukseen tarkoitettuja, jolloin prosessi suoritetaan automaattisesti suljetussa kammiossa avaruusaluksen sisällä. Korjaukseen ja kokoonpanoon suunnitelluilla laitteistoilla hitsaus tapahtuu manuaalisesti, joko ulkona avaruudessa tai vapaasti avaruusaluksen tai aseman sisätiloissa. (Paton et al. 1999b, s. 92–93.)

Hitsaukseen tarkoitettu prosessilaitteisto on riippuvainen avaruusaluksesta tai asemasta ja laitteisto voidaan käsittää yhdeksi kokonaisuudeksi aluksen tai aseman kanssa kuvan 5 mukaisesti, sillä hitsauslaitteisto on täysin riippuvainen aseman tarjoamasta virrasta ja sen järjestelmästä. Liitteessä II esitettynä hitsauslaitteisto on riippuvainen avaruusaluksen tai - aseman tarjoaman virran lisäksi lämmönsäätöjärjestelmästä, jolla laitteisto pidetään oikeassa lämpötilassa. Myös avaruuspuvussa olevaa laitteiston käyttäjää voidaan pitää osana hitsauslaitteiston ja avaruusaluksen muodostamaa kokonaisuutta, sillä avaruuspuvussa oleva laitteiston käyttäjä on yhtä riippuvainen avaruusaluksesta, kuin laitteistokin, ja laitteisto on täysin riippuvainen laitteiston käyttäjästä. Hitsausprosessia suoritettaessa avaruusalus tulee vakauttaa, sillä mikrogravitaation voimakkuuteen vaikuttaa myös avaruusaluksen tekemät liikkeet. Yhteen paikkaan tai moduuliin sidotut laitteistot vaativat ohjausjärjestelmän, joka on ohjelmoitavissa prosessin mukaan. Käyttäjän on myös saatava jatkuvaa tietoa prosessin kulusta monitoreiden avulla, jos prosessi suoritetaan suljetussa tilassa. Paton et al. (1999b) pitää myös maassa sijaitsevia harjoitteluun ja prosessien kokeiluun tarkoitettuja laitteistoja osana avaruusolosuhteisiin tarkoitettujen prosessilaitteistojen kokonaisuutta, sillä analysoimalla maassa saatuja tuloksia helpottuvat avaruudessa tehtävät kokeet huomattavasti. Maassa sijaitsevia laitteistoja voidaan käyttää simuloitavissa

avaruusolosuhteissa ja laitteistot ovat kopioita avaruudessa käytettävistä laitteistoista. (Paton et al. 1999b, s. 90, 92.)

Laitteistoa tai hitsaukseen tarkoitettua työkalua voidaan liikutella myös robotilla tai erillisellä tarkkuustyökalulla. PWI:ssä on tällä hetkellä kehitteillä uuden sukupolven elektronisuihkutyökalu, josta on kaksi mallia suunnitteilla. Työkalu on tarkoitettu avaruudessa korjaus- ja kokoonpanotyöhön käytettäväksi, joko manuaalisesti tai robotin avulla. (Zubchenko & Ternovoj 2015, s. 34.) Tarkempaa kuvausta kehitetystä laitteistosta ja siihen suunnitelluista roboteista tai kuljettimista ei ole löytynyt. Masubuchi et al. (1983) ovat tutkimuksessaan ehdottaneet, että avaruudessa hitsaamista varten tulee löytää tulevaisuudessa tapoja, joilla hitsausta voidaan toteuttaa avaruudessa täysin automaattisesti ja itsenäisesti ilman hitsaajan läsnäoloa ja systeemejä, joilla hitsausta voisi suorittaa hitsausta osaamaton henkilö, sekä tapoja suorittaa hitsausta kauko-ohjauksella etänä, jopa maasta käsin. Tutkimuksessa on myös arveltu robottien käytön ja osittaisen robotisoinnin olevan suuremmassa osassa hitsauksessa ihmisiin verrattuna, sillä astronauttien kouluttaminen hitsaajaksi on kannattamatonta. (Masubuchi et al. 1983, s. 3, 84.) Tietoa mahdollisesti kehitetyistä roboteista tai tutkimuksesta robottien tai osittaisen robotisoinnin käyttämiseksi avaruudessa hitsaukseen ei kuitenkaan löytynyt lukuun ottamatta Zubchenkon ja Ternovoj:n (2015) tutkimusta.

4.3 Turvallisuus

Avaruudessa hitsatessa turvallisuus on erittäin tärkeää hitsauslaitteiston käyttäjän kannalta. Toimittaessa laitteistojen kanssa, jotka kuumenevat ja sulattavat metallia, todellinen vaara on aina läsnä. Laitteistojen ja laitteiston käyttäjien turvallisuuteen on suhtauduttu vakavasti ja aiheesta on kirjoitettu jo 1960-luvulta lähtien. Tuoreimmat löytyneet lähteet (Lankin & Gavrish 2001; Bulatsev & Bulatsev 2001; Tochin et al. 2001) ovat 2000-luvun alusta.

Suuri vaaran aiheuttaja on lämmön lähde, joka on useimmiten ollut elektronisuihku. Suihkun täytyy olla osoitettuna työstettävään kappaleeseen pois päin aluksesta, asemasta tai avaruuskävelijöistä hitsauksen tapahtuessa avaruudessa manuaalisesti. Hitsauksessa syntyvä metallisula ja mahdolliset roiskeet voi aiheuttaa vaaraa laitteiston käyttäjälle. Oikeiden hitsausparametrien valinta on tärkeässä asemassa turvallisuuteen liittyen ja sillä voidaan

välttää mahdolliset vaaratilanteet. (Dudko et al. 1977, s. 86.) Kaikki edellä mainitut seikat täytyy ottaa huomioon hitsatessa automatisoidulla laitteella tai manuaalisesti.

Ensimmäisen avaruudessa tehdyn hitsauskokeen kerrotaan yleensä lähteestä riippuen sujuneen hyvin tai kerrottu menetelmät, joita testattiin ja näytteistä, jotka kokeesta saatiin. Hall ja Shayler (2003) kuitenkin kertovat teoksessaan, jossa käsitellään Sojuz-avaruusalusohjelmaa, kuinka hitsauskoe oli lähellä koitua miehistön kohtaloksi. Vulkanlaitteistolla testatun plasmakaarihitsauksen aikana plasmasuihku oli kääntynyt osoittamaan testitilan lattiaan polttaen melkein reiän lattiasta läpi. Miehistö ohjasi koetta toisesta moduulista ja huomasi tapahtuneen vasta paineistettuaan moduulin, jossa koe suoritettiin palatessaan hakemaan näytteitä. Näytteet saatiin kuitenkin kuljetettua maahan tutkimuksia varten. (Hall & Shayler 2003, s. 165.) Vaikkei tapahtumasta löytynyt tietoa Neuvostoliiton tai Venäjän julkaisemissa teksteissä, voidaan olettaa, että tapahtuma on otettu vakavasti ja turvallisuuteen on jatkossa panostettu enemmän.

Manuaalisesti hitsattaessa on olemassa mahdollisuus siihen, että esimerkiksi elektronisuihku osuu käyttäjään, avaruusalukseen tai asemaan tai muualle, josta voi aiheutua vaaraa. Avaruudessa manuaalisesti tapahtuvaa elektronisuihkuhitausta varten on kehitelty erilaisia turvalaitteistoja ja systeemejä. Lankin ja Gavrish (2001) ovat kehittäneet ratkaisun, jolla pystytään hajauttamaan kohdistettu säde, jos säteen etäisyys työstettävästä kappaleesta on yli 150 mm. Algoritmi mittaa kohdistetun säteen etäisyyden 0,5 sekunnin välein työstettävästä kappaleesta. Hajautettu säde ei aiheuta vaaraa verrattuna kohdistettuun säteeseen. Säde kohdistuu jälleen, kun hitsauspistooli tuodaan oikealle etäisyydelle kappaleesta. (Lankin & Gavrish 2001, s. 142.) Bulatsevin ja Bulatsevin (2001) ratkaisussa on erilliset sensorit, jotka mittaavat laitteen asemaa ja suuntaa, joiden avulla määritetään laitteiston asema työstettävään kappaleeseen. Käyttäjä määrittelee joko työstöalueen itse tai algoritmi laskee sensoreiden avulla, onko elektronisuihkupistooli työstettävällä alueella. Jos väline ei ole sallitulla alueella tietokoneohjelmisto pysäyttää prosessin. (Bulatsev & Bulatsev 2001, s. 147.) Tochin et al. (2001) käyttävät ratkaisussaan hitsauspistooliin asennettavaa videokameraa, joka tunnistaa työkappaleeseen tehdyt merkit, milloin tietokoneeseen kehitetty ohjelmisto tietää laitteiston olevan osoitettuna työstettävään alueeseen. Prosessi pysäytetään, jos kamera ei tunnista tai löydä määriteltyjä merkkejä alueelta, johon pistooli on kohdistettu. (Tochin et al. 2001, s. 152.) Siitä ei löytynyt

kuitenkaan tietoa onko kyseisiä turvamenetelmiä kokeiltu. Mitä luultavimmin turvallisuuden tutkimista on jatkettu ja menetelmiä on jatkokehitetty.

4.3.1 Suojaus

Ensimmäisen avaruudessa manuaalisesti suoritettun elektronisuihkuhitsauskokeen aikana kosmonauteilla ei ollut varsinaisesti suojavarusteita avaruuspuvun lisäksi. Laitteisto oli kiinnitettynä kaiteeseen Saljut 7 avaruusaseman ulkopinnalla ja laitetta käyttäneet kosmonautit olivat vuorollaan tekemässä kokeita kiinnitettynä jaloistaan laitteiston taakse, jolloin kosmonauttien alavartalo oli suojassa. Työpiste oli sijoitettu siten, ettei elektronisuihku voinut osua avaruusaluksen ulkopintaan. Turvamekanismi kytki laitteiston pois päältä, jos pistooli olisi vahingossa irronnut kosmonautin kädestä. Elektronisuihkuhitsauksessa syntyvä röntgensäteily oli saatu sallitulle tasolle kohdistamalla säde lyhyeksi ja rajoittamalla virtaa 10 kilovolttiin, jolloin ylimääräistä suojausta ei tarvittu. (Paton, Dzhanibekov & Savitskaya 1986a, s. 14, 16–17.) Ennen koetta ei siis koettu sulan metallin olevan suuri riski kosmonauteille, eikä tietoa erillisen suojauksen käyttämisestä löytynyt.

Sulan metallin aiheuttamaa vaaraa avaruudessa tapahtuvassa elektronisuihkuhitsauksessa avaruuspuvussa olevan käyttäjän kannalta on tutkinut ainakin Nunes et al. (1998). Suurikokoisten sulametallipisaroiden irtoaminen on epätodennäköistä, sillä avaruudessa sulametalli ei irtoa kappaleesta yhtä helposti kuin maassa painovoiman ollessa lähes olematon. Hitsattaessa todennäköisin tilanne, jossa sulametalli pisara voisi päästä kosketuksiin laitteiston käyttäjän avaruuspuvun kanssa, tapahtuu jos lisäainelangan syöttö jää vian takia päälle, jolloin suuri pisara voi muodostua langan päähän. Langan päässä oleva sulametallipisara ei kuitenkaan irtoa itsestään, vaan jos käyttäjä kiskaisee laitetta itsensä suuntaan, voi pisara irrota langan päästä ja joutua kosketuksiin avaruuspuvun kanssa. Edellä kuvattu tilanne on kuitenkin erittäin epätodennäköinen, joka tapahtuakseen vaatisi käyttäjän tekemän virheen sekä virheen laitteistossa. Mahdollisuus, että noin 6 mm halkaisijaltaan oleva sulametallipisara pääsisi kosketuksiin avaruuspuvun kanssa on kuitenkin olemassa, mutta pisara ei todennäköisesti läpäisisi avaruuspuvun teflon-päällysteistä ulkopintaa. (Nunes et al. 1998, s. 1, 14.)

Hitsauslaitteistojen käyttäjät ovat jo varsin hyvin suojattuja pelkässä avaruuspuvussa eikä varsinaisia erillisiä suojapukuja välttämättä vaadita. Vahinkotilanteet voidaan minimoida turvalaitteilla, parametrien hallinnalla ja kouluttamalla laitteistojen käyttäjät mahdollisia vaaratilanteita varten. ISWE:tä varten suunniteltiin kuitenkin avaruuspuvun päälle puettava erillinen suojapuku, joka voitiin pukea helposti päälle ennen hitsaamista (Paton et al 1999a, s. 205). Tarkempaa kuvausta suojapuvusta ja sen käytöstä ei löytynyt.

4.4 Hitsaajien vaatimukset, koulutus ja pätevyudet

Manuaalisesti hitsattaessa hitsaajan täytyy opetella ennen avaruudessa suoritettua hitsausta työkalun käyttö täydellisesti. Maassa suoritettavissa ja avaruusolosuhteita simuloivissa kokeissa hitsaajan on pystyttävä tuottamaan laadultaan vähintään hyvänlaatuisia, mieluummin erinomaisia hitsejä. (Paton et al. 1986a, s. 15.) Hitsaajan täytyy hallita hitsausprosessi siten, että elektronisuihku ei polta kappaleesta läpi ja vajaa tunkeumat olisivat vähäisiä (Nikitsky et al. 1985, s. 183). Vaatimusten voidaan olettaa koskevan kaikkia hitsausmenetelmiä.

Hitsaajien koulutuksesta avaruudessa tapahtuvaan hitsaukseen on kirjoitettu jo vuosia ennen ensimmäistä avaruuskävelyn aikana suoritettua hitsauskoetta, esimerkiksi Shonin et al. (1978) on kirjoittanut vuonna 1978 kosmonauttien koulutuksesta eri prosessien käyttäjiksi. Ongelmana on se, että kosmonautteja tai muitakaan avaruudessa työskenteleviä ei voida kouluttaa vain yhteen työhön, vaan heidän on hallittava useita kokonaisuuksia. Prosessit voidaankin jakaa vaikeuden mukaan pääpiirteittäin neljään kategoriaan, josta ensimmäisessä käyttäjän tarvitsee vain käynnistää prosessi ja neljännessä vaaditaan käyttäjältä esimerkiksi työskentelypaikan valinta, prosessilaitteiston kuljetus, valmistelu ja tarkistus, prosessin manuaalinen hallinta ja laadunvarmistus. (Shonin et al. 1978, s. 113–115.)

Ensimmäistä avaruuskävelyn aikana suoritettua hitsauskoetta varten koulutus suoritettiin käyttäen erilaisia koulutustiloja. Koulutus ja harjoittelu suoritettiin avaruusolosuhteita jäljittelevässä testikammiossa, vesitankissa ja lentävässä laboratoriossa, jossa saavutetaan lyhyitä noin 25–30 sekunnin painottomia jaksoja. (Nikitsky et al. 1985, s. 181; Paton et al. 1986a, s. 16.) Testikammio oli rakennettu muistuttamaan osaa Saljut 7-avaruusaseman ulkopinnasta, jossa voitiin harjoitella VHT-laitteistolla suoritettavaa hitsauskoetta varten hitsaustekniikoita. Käyttäjän työkalu ja puku on kytketty laitteeseen, jolla työkalu saadaan

tuntumaan painottomalta hitsauslaitteiston käyttäjän kädessä ja puku käyttäjän yllä. Kuvassa 6 on esitetty testikammiossa oleva hitsaaja valmistautumassa kokeeseen, hitsauspistoolin ollessa kiinnitettynä vastapainoon.



Kuva 6. Hitsaaja avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa (Paton et al. 1999a, s. 209).

Kokeita testikammiossa suoritti aluksi testajat, joilla oli kokemusta kaasukaarihitsausprosesseista ja avaruuspuvussa työskentelystä. Kun toimintatavat ja tekniikat oli optimoitu, harjoittelivat avaruudessa kokeen suorittavat kosmonautit hitsausta. Vesitankissa harjoiteltiin VHT-laitteiston kuljettamista ja asentamista ulos avaruusaluksen ulkopinnalle. Lentävässä laboratorioissa tehtiin lopulliset optimoinnit avaruudessa suoritettavaa koetta varten käyttäen VHT-laitteiston täyskokoista mallia sekä osamallia Saljut 7-avaruusasemasta. (Nikitsky et al. 1985, s. 181–182.)

Ukrainalaisten ja yhdysvaltalaisen suorittamaa ISWE:tä varten koulutustoimet olivat varsin samanlaiset verrattuna ensimmäiseen avaruuskävelyn aikana suoritettuun hitsauskokeeseen. ISWE:ssä käytettyä Universal-hitsauslaitteistoa testattiin Yhdysvalloissa vesitankissa ja lentävässä laboratorioissa, mutta miehistön koulutusta ei keretty aloittamaan ennen kokeen valmistelujen keskeyttämistä. Universal vietiin takaisin Ukrainaan ja miehistöä koulutettiin Venäjällä Flagman-projektia varten avaruusolosuhteita jäljittelevässä testikammiossa ja vesitankissa, johon oli rakennettu kopio Mir-avaruusasemasta. (Paton et al. 1999a, s. 203–204, 208–209.) Avaruusolosuhteita jäljittelevässä 50 m³ tilavuudeltaan olevassa kammiossa pystyttiin saavuttamaan $1,07 \cdot 10^{-1}$ Pa alipaine. Harjoitteluun käytetty avaruusolosuhteita simuloiva kammio on esitetty kuvassa 7. Kohdassa, jossa hitsaus suoritettiin, paine oli

luultavasti suurempi, sillä avaruuspuku vuotaa aina hieman. (Mikhajlovskaya, Shulym & Zagrebelny 2002, s. 312.)



Kuva 7. TBK–50-niminen avaruusolosuhteita simuloiva kammio (Russell, Malone & Cato 2004, s. 2).

Aikaisempaa kokemusta ei vaadita avaruudessa hitsaajilta, vaan hitsauslaitteiston käyttö ja hitsauksen perusteet opetetaan maassa ennen avaruuteen siirtymistä. Ensimmäisen avaruuskävelyn aikana suoritetun hitsauskokeen suorittaneella miehistöllä ei ollut ollenkaan aiempaa hitsauskokemusta millään hitsausmenetelmällä. Laitteiston käyttö ja hitsausprosessin hallinta koulutettiin edellä mainituissa harjoitustiloissa. Ennen koetta suoritettiin kuukauden aikana yhteensä 18 harjoitusta avaruusolosuhteita jäljittelevässä kammiossa, 20 lentävässä laboratorioissa ja 8 vesitankissa. (Paton et al. 1999a, s. 197–198.)

4.5 Hitsattavat materiaalit

Avaruusasemien ja -alusten metallimateriaalien valintaan vaikuttaa avaruudessa vallitsevat olosuhteet. Metalleihin vaikuttavat suuret lämpötilan vaihtelut (-120–+220 Celsius). Lämpötila voi vaihdella jyrkästi yksittäisenkin kappaleen eri kohdissa. Säteily, kuten ionisoiva ultraviolettisäteily heikentää materiaalien ja metallien, sekä hitsien ominaisuuksia. (Paton 1990, s. 35.)

Metalleja tarvitaan avaruusalusten ja avaruusasemien eri osien, kuten runko-osien, putkistojen ja säiliöiden rakentamiseen. Yleisimpiä käytettyjä metalleja ovat alumiini, titaani ja magnesium seokset, sekä teräkset. (Paton et al. 1976, s. 76.) Materiaaleina käytetään myös eri komposiitteja, joilla saadaan esimerkiksi kannatinrakenteissa parempi kestävyys suhteessa painoon. Uusien materiaalien käyttö lisääntyy tulevaisuudessa, mutta eri metalleista valmistettuja osia tullaan tarvitsemaan jatkossakin. (Paton et al. 1991, s. 485.) ISS-avaruusaseman moduulit ovat pääosin rakennettu alumiiniseoksesta, jossa on noin 6 % kuparia (alumiini 2219). Yhdysvallat on käyttänyt kyseistä alumiinilaatua myös kantorakettien rakentamiseen. Alumiini sopii hyvin käyttöön avaruuteen, sillä se ei ole yhtä altis eroosiolle avaruudessa kuin muut metallit. (Woodward 1996, s. 35–36.) Alumiini ei ole altis haurasmurtumille matalissa lämpötiloissa, joka on tyypillistä avaruudessa. Alla on eritelty luetteloihin eri valtioiden hitsauksessa käyttämiä metalleja avaruudessa ja/tai avaruusolosuhteita simuloivissa kokeissa. Kaikista materiaaleista ei löytynyt tarkkaa nimitystä. Maiden välillä on myös omat nimitykset eri metallien laaduille. Luettelot eivät ole täydellisiä ja sisältävät vain osan tutkituista metalleista.

Neuvostoliitto/ Venäjä:

- Ruostumaton teräs (1X18H9T/ AISI 321) (Masubuchi et al. 1983, s. 10).
- Ruostumaton teräs (12Kh18N10T/ 304SS) (Paton et al. 1986b, s. 285).
- Alumiiniseos AM-6 (Alumiini-kupariseos) (Masubuchi et al. 1983, s. 10).
- Titaaniseos (BT-1/ A-55) (Masubuchi et al. 1983, s. 10).
- Titaaniseos (VT1-00) (Paton et al. 1986b, s. 288).

Yhdysvallat (Poorman 1975, s. 10):

- Ruostumaton teräs (304)
- Alumiiniseos (2219-T87)
- Tantaali

Japani: Ruostumaton teräs (SUS 304) (Suita et al. 2001, s. 102).

Hitsatut metallit ovat olleet pääasiassa alumiineja, titaaneja ja ruostumattomia teräksiä. Tantaalin käytöstä avaruusalusten tai -asemien rakennusmateriaalina ei löytynyt tietoa. Tantaalin hitsaus- ja sulatuskoe on luultavasti liittynyt muihin sovelluskohteisiin.

5 HITSAUSMENETELMÄT

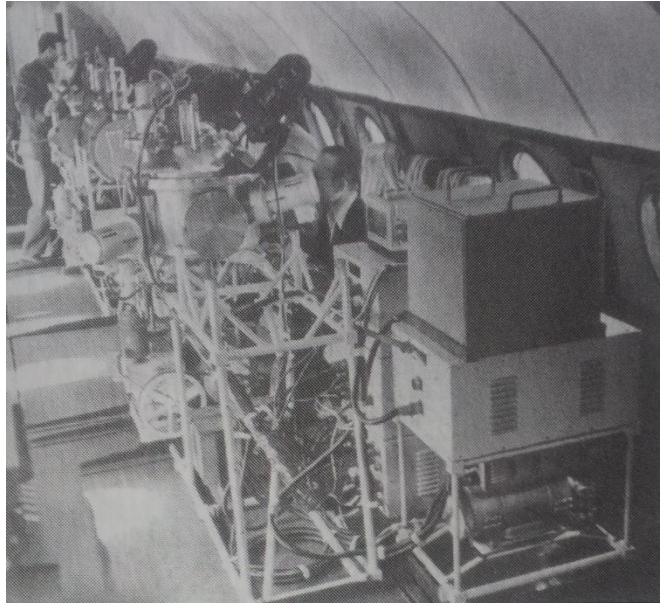
Eri hitsausmenetelmien kehittäminen ja kokeilu avaruusolosuhteisiin aloitettiin 1960-luvulla (Nishikawa et al. 2001, s. 12). Siitä lähtien tutkimuksesta avaruushitsaukseen liittyen on löytynyt dokumentteja aina vuoteen 2015 asti. Käytetyt ja kokeillut menetelmät ovat osoittaneet, että hitsaaminen avaruusolosuhteissa on mahdollista ja täytyy vain löytää varmin ja tehokkain menetelmä. Tutkittavia menetelmiä onkin laajalti, ja mahdollisesti jonain päivänä jotakin tai joitakin prosesseista päästään käyttämään hitsausprojekteissa avaruudessa.

5.1 Kehitys

Avaruudessa hitsaamista varten ei löytynyt dokumentteja uusista kehitetyistä hitsausmenetelmistä, vaan käytetyt menetelmät, kehitettävät ja tutkittavat menetelmät ovat muunnoksia olemassa olevista hitsausmenetelmistä. Avaruudessa hitsaamista varten tulisi pyrkiä löytämään yksi tai muutama hitsausprosessi, jolla tai joilla voidaan suorittaa kaikki hitsausta vaativat tehtävät, sillä useamman eri hitsausmenetelmän kehittäminen avaruuskäyttöön ei ole kannattavaa (Workman & Kaukler 1989, s. 3).

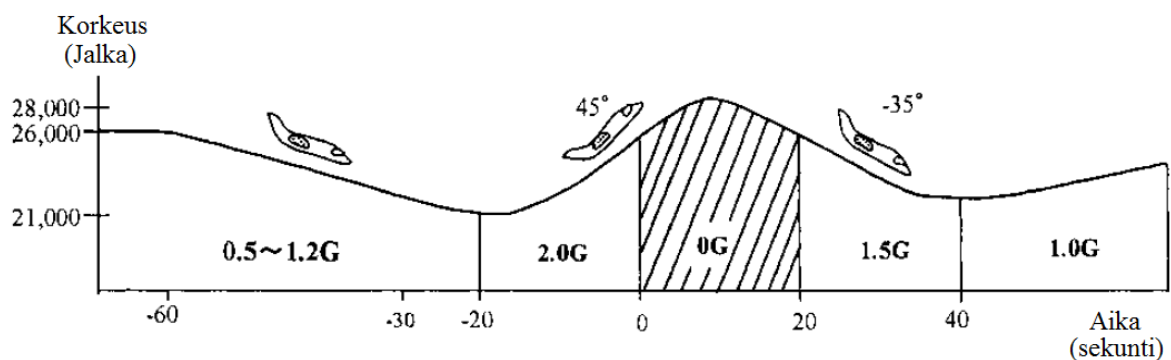
Kehitys kohti ensimmäistä avaruudessa käytettyä hitsauslaitetta Vulkania ja siihen valittuja hitsausmenetelmiä alkoi tutkimalla hitsausmenetelmiä, joita oli jo aiemmin testattu tai käytetty tyhjiössä, tyhjiön ollessa yksi avaruuden erityispiirteistä. Elektronisuihkuhitsaus oli ilmeinen valinta, sillä menetelmää käytetään maanpäällä tyhjiössä, mutta tutkimus avaruuteen soveltuvista hitsausmenetelmistä johti matalapaineisen plasmakaarihitsauksen ja metallikaarihitsauksen kokeiluun ja kehitykseen avaruusolosuhteita varten. Menetelmien kokeilua ja kehitystä varten tarvittiin erilaisia pumppuja, tyhjiökammioita, ohjaimia, sekä instrumentteja prosessien parametrien tallentamiseen ja prosessin kuvaamiseen. Järjestelyt täytyi toteuttaa lentokoneen sisällä, jolloin lentojen aikana voitiin simuloida samanaikaisesti painottomuutta. (Paton & Kubasov 1970, s. 154–155.) Kuva 8 on lentävän laboratorion sisältä, jossa on useita hitsausmenetelmien testaukseen tarkoitettuja laitteistokokonaisuuksia.

Neuvostoliitossa ja Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen Ukrainassa hitsausmenetelmien ja laitteistojen kehitys jatkui pääasiassa elektronisuihkuhitsauksen osalta, myös Yhdysvalloissa kehityksen pääpaino on ollut elektronisuihkussa (Paton et al. 1999a, s. 191). Kuitenkin kaikki kehitetyt ja kehitteillä olevat hitsausmenetelmät vaativat samanlaiset tai samankaltaiset järjestelyt testausta ja kehitystä varten.



Kuva 8. Lentävä laboratorio TY-104 (Shulym et al. 1991, s. 15).

Väliaikainen painottomuus luodaan lentokoneessa lentämällä paraabelin tapaisesti kuvan 9 mukaan (Nishikawa et al. 2001, s. 13.)



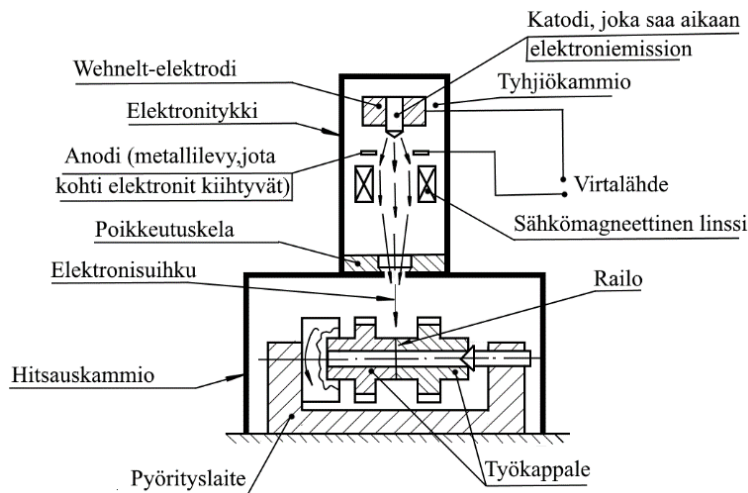
Kuva 9. Painottomuuden mahdollistava lentokuvio. Painottomuus saavutetaan alueella 0G. (mukaillen Nishikawa et al. 2001, s. 13.)

5.2 Kokeillut menetelmät

Avaruudessa kokeiltuja hitsausmenetelmiä ovat jo johdannossa mainitut elektronisuihku-, plasma- ja metallikaarihitsaus. Neuvostoliitto on kokeillut avaruudessa kolmea eri hitsausmenetelmää. Vuonna 1969 Neuvostoliitto kokeili ensimmäisenä maailmassa avaruudessa metallikaari-, plasma- ja elektronisuihkuhitsausta. Koe suoritettiin Vulkan-hitsauslaitteistolla, jolla kaikkien menetelmien testaus suoritettiin automatisoidusti. Seuraavaksi Neuvostoliitossa kehitelty ja avaruudessa käytetty laitteisto oli VHT-elektronisuihkuhitsauslaitteisto, joka oli manuaalisesti operoitava. (Benfield & Landrum 1998, s. 26, 28.) Neuvostoliitto tai nykyinen Venäjä ei ole kokeillut hitsausta muilla menetelmillä tai laitteilla avaruudessa, eikä lähitulevaisuudessa ole aikomusta uusille avaruudessa suoritettaville kokeille (Moiseev 2016). Yhdysvallat ovat löydetyt tiedon perusteella kokeilleet toistaiseksi avaruudessa vain elektronisuihkuhitsausta (Ohji 2006, s.356). ISS-avaruusasemalla ei ole kokeiltu, eikä asemalle ole suunnitteilla hitsauskokeita (Experiment list 2016; Moiseev 2016).

5.2.1 Elektronisuihkuhitsaus

Elektronisuihkuhitsauksessa hitsauslämpö syntyy elektroneista, jotka synnytetään elektronitykissä, jonka jälkeen elektronit kiihdytetään ja fokusoidaan hitsattavan kappaleen pinnalle, jolloin elektronien liike-energia muuttuu kappaleeseen törmätessä lämmöksi. Syntyvällä lämmöllä voidaan sulattaa metallia, jolloin metallien liittäminen toisiinsa hitsaamalla onnistuu. Elektronisuihkuilla voi suorittaa myös esimerkiksi leikkausta. (Lukkari 2002, s. 18.) Kuvassa 10 on esitetty periaate elektronisuihkuhitsauksesta.



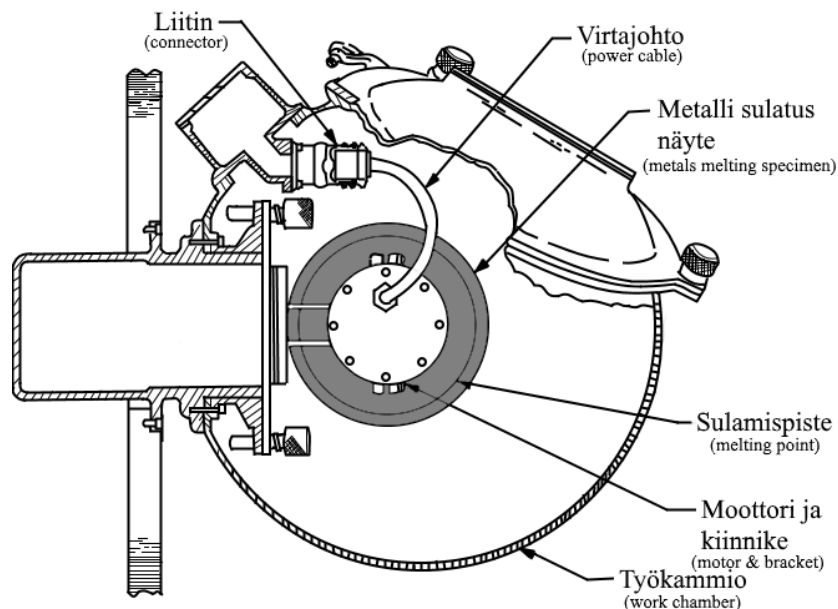
Kuva 10. Elektronisuihkuhitsaus (mukaillen Lukkari 2002, s. 18).

Vulkan-laitteella avaruudessa suoritettu elektronisuihkuhitsaus osoittautui toimivan laboratoriotesteissä havaitulla tavalla. Lentävässä laboratoriossa suoritettiin ennen varsinaista avaruudessa suoritettua koetta metallin hitsausta sekä leikkausta elektronisuihkulla 1 kW teholla, 70 mA virralla ja 50 cm/min hitsausnopeudella. Painottomuudessa suoritetuissa elektronisuihkuhitsauskokeissa ei huomattu eroavaisuuksia hitseissä verrattuna maanpäällä tehtyihin hitseihin. (Paton & Kubasov 1970, s. 155.) Vulkan-laitteessa käytettiin 26–28 V syöttövirtaa, tehonkulutus oli 800 W, kiihdytysjännite 10 kV ja elektronisuihkun virta 60 mA (Paton et al. 1999a, s. 210). Elektronisuihkulla hitsatut materiaalit olivat alumiini, titaani ja ruostumaton teräs. Tulokset avaruudessa suoritetusta kokeesta olivat samat, kuin lentävässä laboratoriossa saadut tulokset, eli hitseissä ei ollut juurikaan eroavaisuutta maassa hitsaamiseen verrattuna. Vulkan-laitteisto koostui kahdesta osasta, jossa ensimmäisessä osassa olivat hitsaukseen tarkoitetut laitteistot mukaan lukien elektronisuihkulaite, sekä hitsattavat näytteet ja järjestelmät näytteiden ja hitsausmenetelmien vaihtamista varten. Toisessa osassa oli muun muassa virtalähde, ohjausjärjestelmät ja kommunikaatiojärjestelmät. Laitteiston ohjauspaneeli on laitteesta erillään, sillä hitsaus tapahtui alipaineistetussa moduulissa, jolloin koetta suorittava miehistö käynnisti kokeen toisesta moduulista. Kuvassa 11 on Vulkan-hitsauslaitteisto ohjauspaneelieineen. Vulkan-laitteen massa on noin 50 kg. (Paton & Kubasov 1970, s. 155, 158–159.)



Kuva 11. Vulkan-hitsauslaitteisto (Paton & Kubasov 1970, s. 159).

Yhdysvallat toteutti vuonna 1973 Skylab-avaruusasemalla elektronisuihkulla tehdyn hitsauskokeen. Elektronisuihkulaitteisto oli 40 cm halkaisijaltaan olevan pallon muotoisen tyhjiökammion sisällä. Kammio oli integroituna avaruusaseman telakointisovittimeen. Kammiosta oli yhteys aseman ulkopuolelle kahdella automaattiventtiilillä varustetulla metrin pitkällä ja 102 mm paksuisella putkilinjalla, jolloin kammion sisälle saatiin aikaan tyhjiö. Käytettyä laitteistoa ei voitu siis siirtää muualle asemalla. Kammiota voitiin käyttää myös muihin kokeisiin. Kuvassa 12 on esitetty osaleikattu kuva käytetystä työkammioista. Erillisestä ohjauspaneelista voitiin tarkkailla elektronisuihkun käyttämää virtaa ja jännitettä, sekä lämpötilaa. Kokeessa hitsattiin 80 mA virralla ja 20 kV jännitteellä ruostumatonta terästä ja alumiinia. Kokeessa hitsattiin myös tantaalia muista poiketen 70 mA virralla. Hitsatut metallinäytteet olivat halkaisijaltaan 165 mm kiekkoja, joiden pyörimisnopeus 120 mm kohdalla kiekon keskipisteestä oli 890 mm/min, mihin hitsaus suoritettiin. Kiekkojen paksuus vaihtui pyörimisen aikana siten, että ensimmäisen 45 asteen pyörähdysen aikana elektronisuihku leikkasi näytteestä läpi. Välillä 45–90 astetta kiekkojen paksuus kasvoi siten, että leikkaus elektronisuihkulla muuttui hitsaukseksi. Eroavaisuudet hitseissä maassa tehtyihin hitseihin olivat mitättömät. (Poorman 1975, s. 2–4, 7, 12.)

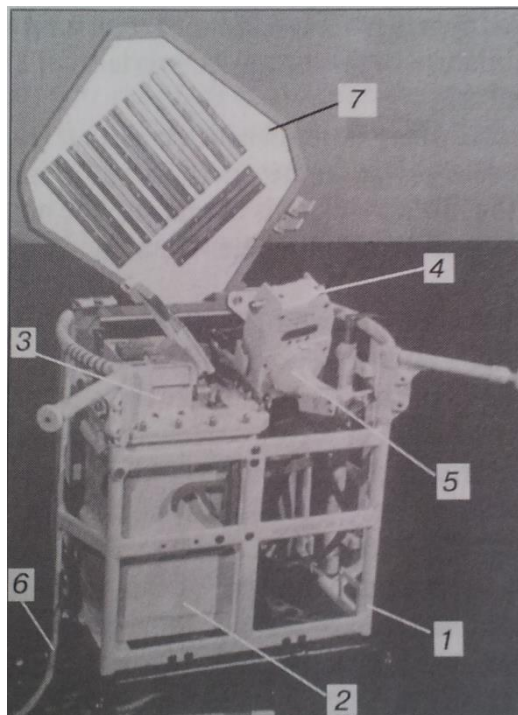


Kuva 12. Hitsaukseen käytetty työkammio ja sen osia (mukailten Poorman 1975, s. 6).

Kuvassa 12 ei näy elektronisuihkulaitetta, joka jää hitsattavan näytteen taakse piiloon. Sähkömoottorilla pyöritettiin hitsattavia näytteitä. Työkammiossa oli myös valaistus sekä peilisysteemi, jonka avulla työtapahtumaa voitiin seurata työkammiossa olevasta ikkunasta.

Työkammion ulkopuolella oli kamera prosessin kuvausta varten, johon myös kuva heijastettiin peilien avulla. (Poorman 1975, s. 5–6.)

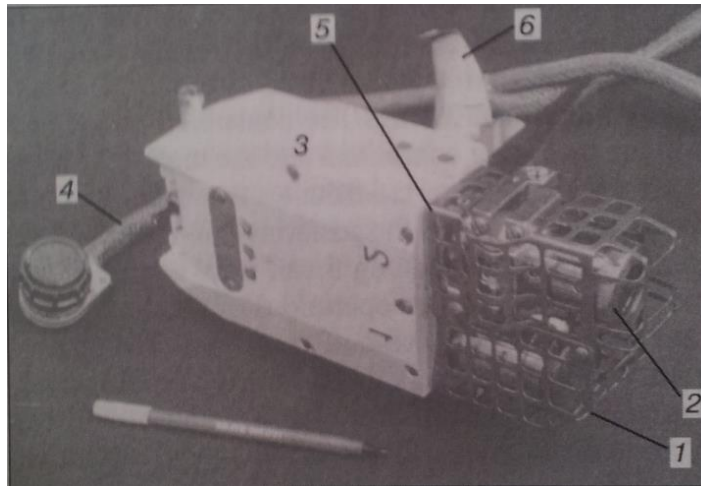
Automatisoidun Vulkan-hitsauslaitteiston jälkeen Neuvostoliitto alkoi kehittämään manuaalisesti operoitavaa elektronisuihkuhitsauslaitteistoa, jolla kosmonautit voisivat suorittaa hitsausta ja muita elektronisuihkun mahdollistamia toimenpiteitä, kuten leikkausta ja juottoa. Neuvostoliitto päättyi manuaalisesti operoitavaan hitsauslaitteistoon robotisoidun tai automatisoidun laitteiston sijaan. Automatisoidut ja robotisoidut laitteet ovat yleensä sidottuina yhteen paikkaan tai tarkasti määriteltyihin kohteisiin, mikä tekee niiden käytöstä hankalaa yllättävissä tilanteissa. Kehitely laitteisto sai nimen VHT (kuvassa 13) sen monipuolisuuden takia, sillä laitteistolla pystyi hitsaamisen lisäksi suorittamaan leikkausta, juottoa ja päällystämistä. Laitteistoa käytettiin ensimmäisen kerran vuonna 1984 Saljut 7-avaruusasemalla. (Paton et al. 1986a, s. 11–12.)



Kuva 13. Paton et al. (1986a, s. 16) mukaan: ”VHT: 1. laatikko; 2. toissijainen teholähde; 3. ohjauspaneeli; 4. työväline; 5. kahva liipaisimella; 6. johto; 7. kuuden näytteen taulu.”

Kuvassa 13 oleva laatikko sisältää kaikki laitteiston komponentit ja hitsaukseen, leikkaamiseen, juottoon, sekä pinnoittamiseen tarkoitetun työvälineen (työväline tarkemmin kuvassa 14). Laatikko on mitoiltaan 400 x 450 x 500 mm (Paton et al. 1986a, s. 16). Laatikko

oli suunniteltu siten, että sitä on helppo liikutella ja kuljettaa, sekä kiinnittää työpaikalle. Näytteiden hitsausta varten laatikossa on neljä erillistä näytetaulua, joihin jokaiseen mahtuu 6 näytettä. Näytetaulut voi nostaa esille halutussa järjestyksessä. Laitteessa olevat johdot ovat suojattu monikerroksisella lämpöeristeellä. (Nikitsky et al. 1985, s. 180–181.)



Kuva 14. Paton et al. (1986a, s. 16) mukaan: ”VHT-laitteen työväline: 1. elektronitykki hitsaukseen, leikkaamiseen ja juottamiseen; 2. elektronitykki (ja upokas) päällystämiseen; 3. korkeajännitemuuntaja; 4. syöttöjohto; 5. suoja kädelle metallin käsittelyn tuottamalta lämmöltä; 6. kahva.”

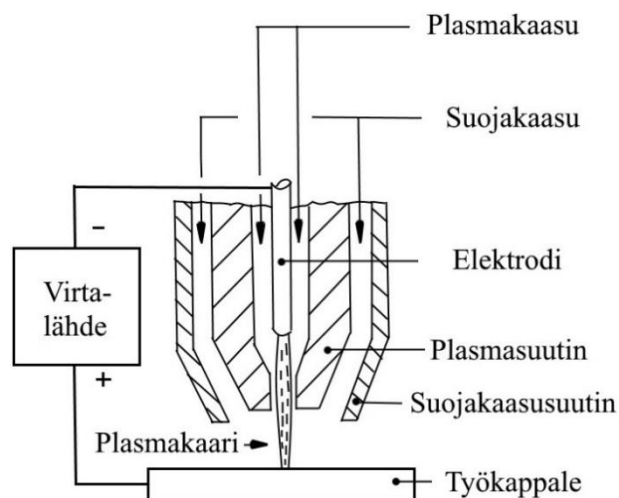
Kuvan 14 mukaisesti työväline on laatikon mallinen ja pitää sisällään kaksi elektronitykkiä. Sisällä työvälineessä on yhtenäiseksi epoksiin sulautettuna muun muassa korkeajännitevirtalähde kummallekin tykille sisältäen korkeajänniteanodimuuntajan ja anoditasasuuntaajan. Työvälineen kahva on suunniteltu avaruuspuvun hanskaan sopivaksi. Työvälineen massa on 3,5 kg ja muun laitteiston 30 kg. Näytetaulut näytteineen lisäsivät laitteen kokonaismassaa 10 kg. (Nikitsky et al. 1985, s. 181.) VHT:n syöttöjännite on 23–34 V, tehonkulutus 500 W asti, kiihdytysjännite on 5 kV ja elektronisuihkun virta 70 mA asti (Paton et al. 1999a, s. 210). VHT:llä on hitsattu 0,8 ja 1,0 mm paksuja näytteitä titaania ja ruostumatonta terästä (Nikitsky et al. 1985, s. 182).

Tutkimusta elektronisuihkuhitsauksesta on jatkettu Ukrainassa ja VHT:n jälkeen kehitettiin Universal-hitsauslaitteisto (Paton et al. 1999a, s. 201). Universal esitellään tarkemmin kappaleessa 6.2. Tuorein Ukrainassa tehty tutkimus elektronisuihkuhitsauksen käyttämisestä avaruudessa löytyi vuodelta 2015 (Zubchenko & Ternovoj 2015, s. 34). Myös japanilaiset

ovat tehneet kokeita elektronisuihkuhitsaukseen liittyen lentävässä laboratoriossa 90-luvulta lähtien (Suita et al. 2001, s. 100). Yhdysvallat ovat myös jatkaneet elektronisuihkuhitsauksen kehittämistä Skylab-kokeiden jälkeen (Paton et al. 1999a, s. 201). Dokumentteja, joissa olisi kuvattu Universal-hitsauslaitteistoa uudempia elektronisuihkuhitsauslaitteistoja, ei kuitenkaan löytynyt.

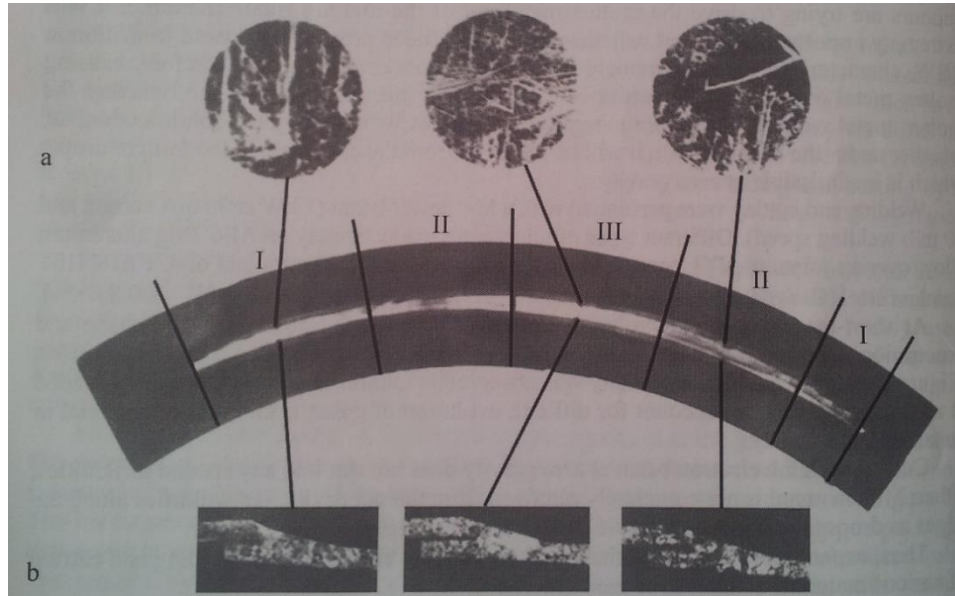
5.2.2 Plasmakaarihitsaus

Plasmahitsaus on volframikaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari muodostaa plasmaa, kun valokaari palaa volframielektrodin ja hitsattavan kappaleen välillä ja kulkee plasmakaasuna toimivan yleensä argonin tai argonvetyseoksen läpi. Syntyvän plasman ympärillä on vielä erillinen inertti tai aktiivi suojakaasu, joka suojaa hitsiä altistumasta ilmalle. Plasmahitsausta kutsutaan plasmakaarihitsaukseksi, kun valokaari palaa volframielektrodin ja työkappaleen välillä, kuten yllä on kuvattu. (Lukkari 2002, s. 272–273.) Kuvassa 15 on esitetty periaate plasmakaarihitsauksesta.



Kuva 15. Plasmakaarihitsaus (mukaiillen Lukkari 2002, s. 273).

Ennen Vulkan-laitteella suoritettua plasmakaarihitsausta suoritettiin hitsauskokeita lentävässä laboratoriossa. Testeissä huomattiin, että plasmakaasu diffundoituu ympäröivään tyhjiöön nopeasti, mikä aiheuttaa ongelmia plasmakaaren vakauteen. Huomattavia poikkeavuuksia hitseissä verrattuna maassa suoritettuihin hitseihin ei löytynyt (kuva 16). Testeissä hitsattiin ruostumatonta terästä sekä titaania. (Paton & Kubasov 1970, s. 155–156.) Käytetty virta kokeissa oli 43–50 A ja jännite 26–27 V. Plasmasuutin oli jäähdyttämätön ja plasmakaaren pituus 5 mm. (Masubuchi et al. 1983, s. 11.)



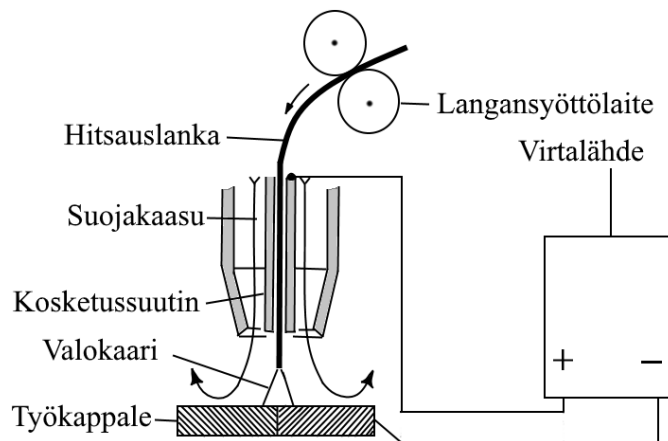
Kuva 16. Plasmakaarella hitsatun titaaninäytteen makro- (a) ja mikrorakenne (b) lentävässä laboratoriossa tehdyssä kokeessa (x20): I–vaakasuora lento; II–ylikuormitus; III–painottomuus (Paton & Kubasov 1970, s. 156).

Avaruudessa Vulkan-laitteella suoritettu plasmakaarihitsauskoe ei osoittautunut toimivan laboratoriokokeissa saatujen tulosten tavoin. Plasmakaasun diffundoituminen moduulissa vallitsevaan tyhjiöön oli luultavasti odotettua nopeampaa. (Paton & Kubasov 1970, s. 159.) Tarkempaa kuvausta eroavaisuuksista avaruudessa plasmakaarella tehtyyn hitsiin verrattuna laboratoriotesteihin ei löytynyt kokeen aikakauteen sijoittuvista teksteistä. Hall ja Shayler (2003, s. 165) kirjoittavat kuinka kokeessa plasmakaari oli vahingossa siirtynyt osoittamaan moduulin seinää, jossa koe suoritettiin ja koe oli päätyä katastrofiin, kun plasmakaari oli polttanut moduulista läpi. Tarkempaa vertailua näytteiden välillä ei siis luultavasti ole, koska avaruudesta ei saatu vertailukelpoisia näytteitä.

5.2.3 Metallikaarihitsaus/ metallikaasukaarihitsaus (MIG/MAG-hitsaus)

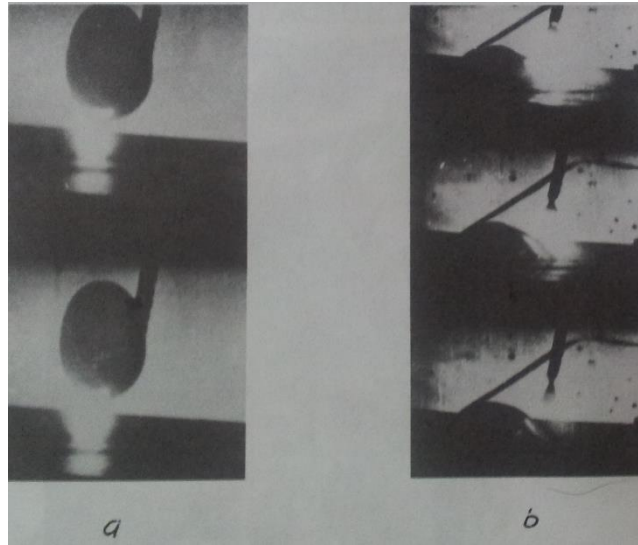
Vulkan-laitteella suoritettiin kahden edellä kuvatun menetelmän lisäksi vielä kaarihitsausta sulavalla elektrodilla (Paton & Kubasov 1970, s. 154). Lukkarin (2002, s. 16) mukaan ”Kaarihitsauksessa muutetaan sähköenergia elektrodin ja työkappaleen välissä palavan valokaaren avulla hitsauksessa tarvittavaksi lämmöksi, joka sulattaa liitettävät aineet ja lisääineen. Elektrodi voi olla sulava lisäainelanka.” Käytettyä menetelmää voi tarkemmin kuvata MIG/MAG–hitsauksella (metal-arc active/inert gas welding), jota Lukkari (2002, s.

159) kuvaa seuraavasti: ”MIG/MAG–hitsaus eli metallikaasukaarihitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä hitsauslangan ja työkappaleen välillä. Sula metalli siirtyy pisaroina langan kärjestä hitsisulaan. -- Suojakaasu suojaa kaaritilaa ja hitsisulaa ympäröivältä ilmalta. -- Suojakaasu voi olla joko aktiivinen tai inertti kaasu.” Kuvassa 17 on esitetty MIG/MAG–hitsauksen toimintaperiaate. Lentävässä laboratoriossa suoritetuissa kokeissa suoritettiin hitsausta tyhjiössä ja käyttäen argonia suojakaasuna (Paton & Kubasov 1970, s. 156–157). Argonkaasuympäristössä suoritettu hitsaus olisi käytännössä MIG-hitsausta, mutta kumpikaan MIG tai MAG ei ole varsinaisesti oikea termi kuvaamaan avaruudessa tyhjiössä kokeiltua menetelmää suojakaasun puuttuessa, vaikka hitsausprosessi on muuten lähes verrattavissa MIG/MAG–hitsaukseen.



Kuva 17. MIG/MAG–hitsaus (mukaillen Lukkari 2002, s. 159).

Lentävässä laboratoriossa simuloitussa painottomudessa kokeiltiin kaarihitsausta sulavalla elektrodilla käyttäen pitkää ja lyhyttä kaarta, sekä pulssikaarta kaaren ollessa lyhyt ja pitkä. Hitsattaessa valokaaren ollessa pitkä, syntyi elektrodina toimivan sulavan lisäainelangan päähän maassa tapahtuvaan hitsaukseen verrattuna suurikokoinen pisara (kuva 18). Pitkän kaaren epävakauudesta johtuen testeissä kokeiltiin pulssikaarta. Valokaaren ollessa pitkä pystyttiin virran pulssituksella saamaan aikaa sulan metallin siirtyminen lisäainelangasta pieninä pisaroina hitsisulaan, tuottaen korkean hitsin laadun. Lyhyellä pulssitetulla kaarella hitsattaessa sula metalli siirtyy myös hienoina pisaroina hitsisulaan ja hitsin laatu on myös hyvä. (Paton & Kubasov 1970, s. 156–157.)



Kuva 18. Kaarihitsaus sulavalla elektrodilla (MIG) painottomuudessa lentävässä laboratoriossa (suojakaasu argon, virta 50 A, kaaren jännite 15 V, lisäainelangan syöttönopeus 180 m/h ja langan paksuus 0.8 mm): a–epävakaa; b–vakaa. (Shulym et al. 1991, s. 16.)

Avaruusasemalla suoritetussa kokeessa saaduista näytteistä havaittiin, että hitsin laatu vastasi lentävässä laboratoriossa ja maassa saatuja näytteitä eroavaisuuksien ollessa mitättömiä (Paton & Kubasov 1970, s. 159). Hitsattu näyte oli todennäköisesti sama kuin Vulkan-laitteella testatuissa elektronisuihkuhitsauksessa ja plasmakaarihitsauksessa käytetty ruostumaton teräs.

Automatisoitua MIG-hitsausta painottomuuslennoilla ovat tutkineet myös ainakin yhdysvaltalaiset opiskelijat vuosina 2003 ja 2005. Hitsattu materiaali oli alumiinia. Koetta ei suoritettu kuitenkaan tyhjiökammiossa, joten menetelmän sovelluskohteet avaruudessa rajoittuisivat avaruusasemien tai -alusten sisälle. Vuonna 2003 kokeissa tehdyt hitsit olivat heikompia maassa tehtyihin hitseihin verrattuna. Painottomuuslennoilla tehdyissä hitseissä oli myös heikko tunkeuma, ja hitsit olivat täynnä huokosia. Vuoden 2005 kokeista ei ollut vielä tuloksia, mutta hitsauksen kanssa oli useita ongelmia virran saannin ja hitsauslangan syötön kanssa. (Cambell 2005, s. 81–84.)

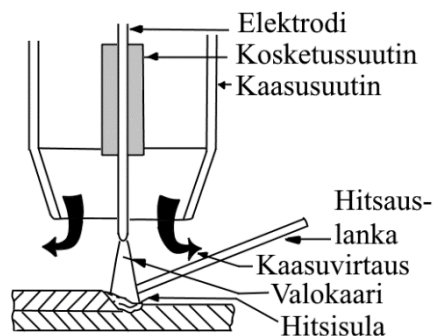
5.3 Tutkittavat menetelmät

Tutkittuja menetelmiä avaruuskäyttöön on enemmän kuin esiteltävät GHHTA-hitsaus, TIG-hitsaus, laserhitsaus ja tapitushitsaus. Edellä mainitut menetelmät ovat valittu tarkemmin

esitettäviksi, koska kyseisistä menetelmistä löytyi tiedonkeräysvaiheessa eniten dokumentteja. Muita menetelmiä, joita on tutkittu tai pohdittu avaruuskäyttöön on muun muassa kylmähitsaus, jossa metalleja voidaan liittää toisiinsa puristamalla yhteen tyhjiössä ilman lämpöä tai metallin sulattamista, räjäytyshitsaus, hitsaus käyttäen kohdistettuja auringonsäteitä, diffuusiohitsaus ja ionisuihkuhitsaus (Masubuchi et al. 1983, s. 17–18). Tutkittaessa avaruuteen soveltuvia hitsausmenetelmiä tarvitaan samanlaisia välineitä ja koejärjestelyjä kuin kappaleessa 5.1 on kuvailtu. Avaruusolosuhteita jäljitellään lentävässä laboratoriossa painottomuuslennoilla ja tyhjiöpumpuilla. Käytössä voi olla myös korkeita torneja tai syviä kuiluja, joissa saavutetaan painottomuus putoamisen aikana (Ohji 2006, s. 356).

5.3.1 TIG-hitsaus

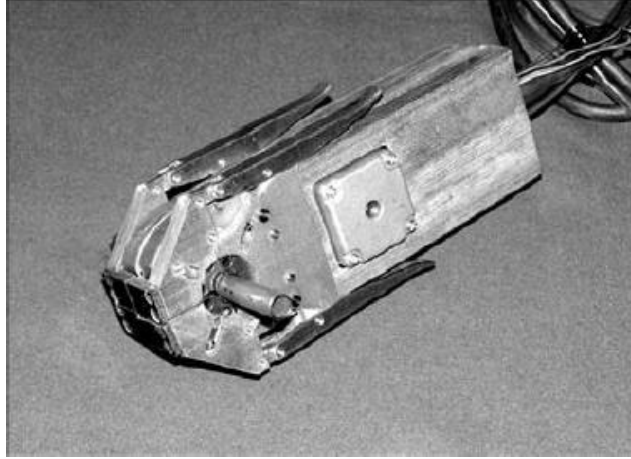
Lukkari (2002, s. 249) kuvaa TIG-hitsausta seuraavasti: ”Volframi-inerttikaasukaarihitsaus eli TIG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välillä suojakaasun ympäröimänä. Hitsaustapahtumaa suojaa inertti suojakaasu, jona käytetään argonia tai heliumia”. Kuvassa 19 on esitetty TIG-hitsauksen periaate.



Kuva 19. TIG-hitsaus (mukaiillen Lukkari 2002, s. 249).

Yksi sovelluskohde TIG-hitsaukselle avaruudessa on avaruusasemien putket (Ternovoj et al. 2010, s. 10). Tekstejä TIG-hitsauksen käyttämisestä putkistojen korjaamiseen on kirjoittanut ainakin ukrainalaiset ja yhdysvaltalaiset. Ternovoj et al. (2010) ovat tutkineet putkien päittäishitsaukseen avaruudessa soveltuvaa orbitaalihitsausta (kuva 20). Hitsattavat putket olivat halkaisijaltaan 10 mm ja paksuudeltaan 1 mm. Materiaali oli 12Kh18N12T teräs. Testeissä hitsattiin pystyssä paikoillaan olevaa putkea, sekä vaakasuorasti asetettua pyörivää putkea. Testeissä tutkittiin putken ympärihitsausta pyörähtämällä putken ympäri useammin

kuin kerran vähentäen hitsausvirtaa aina uuden kierroksen aikana. Hitsauskaasuna käytettiin argonia, eikä käytössä ollut lisäainetta. (Ternovoj et al. 2010, s. 10.)



Kuva 20. Mikrokammio putkien TIG-orbitaalihitsausta varten painottomuudessa (Ternovoj et al. 2010, s. 10).

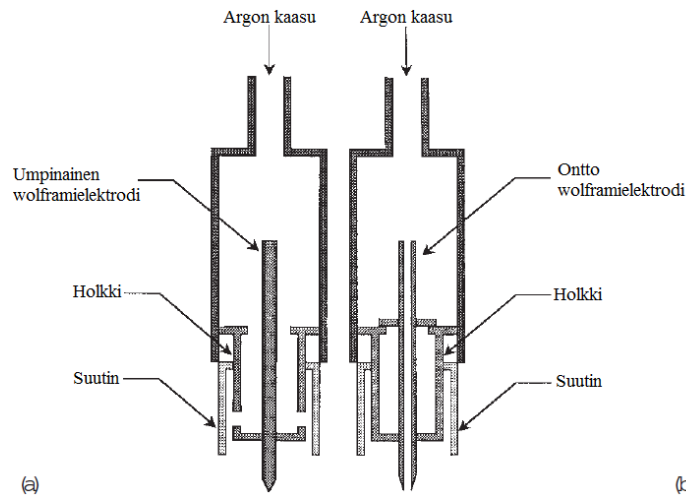
Tasainen hitsausnopeus taattiin askelmootorilla. Liitosten kestävyys määritettiin vetokokeella ja hitsien laatua tarkasteltiin makro- ja mikrokuvista. Testien tuloksena TIG-hitsaus soveltuu putkien korjaamiseen ja liittämiseen mikrogravitaatio-olosuhteissa (Ternovoj et al. 2010, s. 12–13.) Kuvausta hitsien eroavaisuuksista maanpäällisiin olosuhteisiin verrattuna ei ollut. TIG-hitsaus ei sovellu kuitenkaan hyvin tyhjiössä käytettäväksi, sillä valokaari ei säily vakaana tyhjiöolosuhteissa (Ohji 2006, s. 357). Hitsaus rajoittuu tällöin avaruusasemien tai -alusten sisätiloihin.

TIG-hitsauksen soveltuvuutta putkistojen korjaukseen on tutkittu myös Yhdysvalloissa, jossa on myös toteutettu ainakin alustavia kokeita TIG-hitsauksen käytettävyyteen liittyen (Anderson 1991, s. 148.) Tietoa suoritetusta tutkimuksesta ja kokeista avaruuteen soveltuvaan TIG-hitsaukseen liittyen ei löytynyt tarkemmin.

5.3.2 GHTA-hitsaus

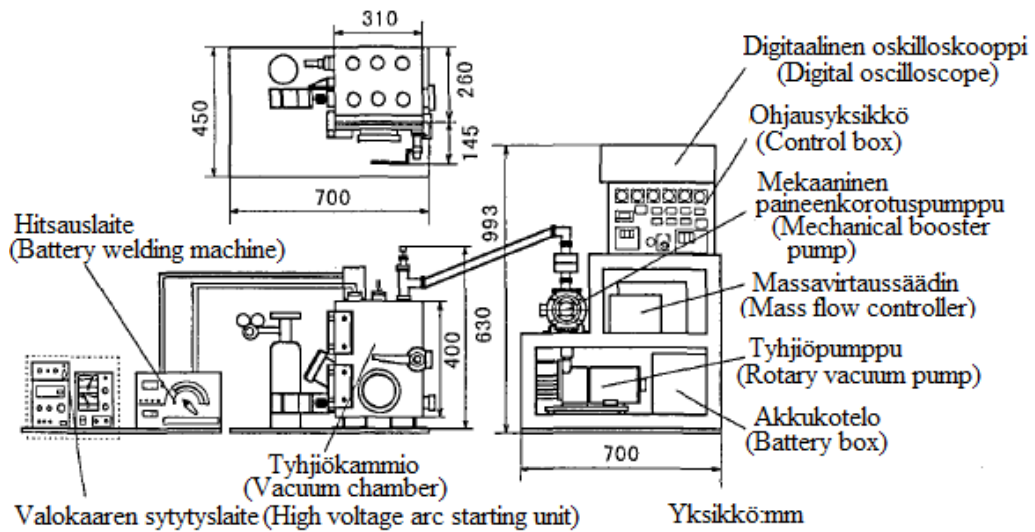
GHTA-hitsaus (Gas hollow tungsten arc) muistuttaa laitteistoltaan ja polttimeltaan TIG-hitsausta (kuva 21). Eroavaisuutena verrattuna TIG-hitsaukseen GHTA-hitsauksessa käytetään onttoa elektroodia, jonka läpi hitsauskaasu virtaa. GHTA-hitsauksessa syntyy plasmakaari poiketen TIG-hitsauksen valokaaresta. GHTA-hitsausta avaruuteen

suunnitellessa ei hitsauksessa tarvita erillistä suojakaasua hitsauksen tapahtuessa tyhjiössä. (Ohji 2006, s. 357.) GHTA onkin lähempänä plasmakaarihitsausta kuin TIG-hitsausta.



Kuva 21. GHTA (b) ja TIG (a) polttimet (mukaillen Nishikawa et al. 2001, s. 13.)

Nishikawa et al. (2001) ja Suita et al. (2001) ovat suorittaneet kokeita GHTA-hitsaukseen liittyen simuloituissa avaruusolosuhteissa. Nishikawa et al. (2001) ovat suorittaneet GHTA-hitsausta lentävässä laboratoriossa. Simuloidussa avaruusolosuhteissa tehtiin pistehitsejä ruostumattomaan teräkseen. Kokeessa vertailtiin tehtyjä hitsejä TIG-hitsauksella maanpäällä samoja parametreja käyttäen tehtyihin hitseihin. 12 mm paksua ruostumatonta terästä hitsattiin 110 A virralla kaaren ollessa 2 mm pitkä. GHTA-hitsauksessa TIG-hitsaukseen verrattuna muodostuneen plasman tiheys on pienempi ja hitsillä on vähemmän tunkeumaa, sekä hitsi on leveämpi. (Nishikawa et al. 2001, s. 12–14.) Suita et al. (2001) ovat suorittaneet samankaltaisen kokeen lentävässä laboratoriossa. Kokeissa suoritettiin pistehitsausta ja putken ympärihitsausta ruostumattomasta teräksestä valmistettuihin kappaleisiin. Koelaitteisto on esitetty kuvassa 22. Hitsattavat putket olivat ulkohalkaisijaltaan 30 mm, pituudeltaan 100–50 mm ja paksuudeltaan 2–3 mm, joista 50 mm pitkät putket päittäishitsattiin yhteen ja 100 mm pitkät putket hitsattiin keskeltä ympäri. GHTA-poltin oli paikoillaan ja putkia pyöritti servomoottori. Pistehitsattavat levyt olivat mitoiltaan 50 x 70 x 2 mm. (Suita et al. 2001, s. 100–101.)

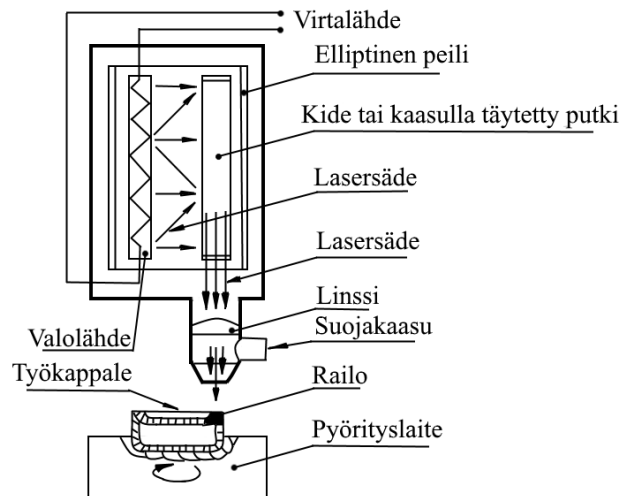


Kuva 22. Lentokoneessa GHTA-hitsauskokeessa käytetty laitteisto (mukaillen Suita et al. 2001, s. 101).

Hitsaus suoritettiin kuvassa 22 esitetystä tyhjiökammiossa, jonka tilavuus on $3,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. Hitsausvirta oli noin 95 A ja hitsauskaasuna käytetyn argonin virtausnopeus 1,67 ml/s, elektrodin kärjen ollessa 3 mm etäisyydellä hitsattavista kappaleista. Kokeessa saadut tulokset osoittivat, että GHTA-hitsaus soveltuu avaruusolosuhteisiin. Pistehitsauksissa näkyy kuinka hitsi ei kaareudu alaspäin, kuten maan päällä painovoiman vaikutuksesta, vaan hitseistä muodostuu tasaisia. Päittäishitsattujen putkien vetokokeessa ei havaittu eroavaisuuksia kestävyudessa maan päällä hitsattuihin putkiin verrattuna, eikä vikoja havaittu missään simuloitussa avaruusolosuhteissa tehdyistä hitseistä. (Suita et al. 2001, s. 102–107.)

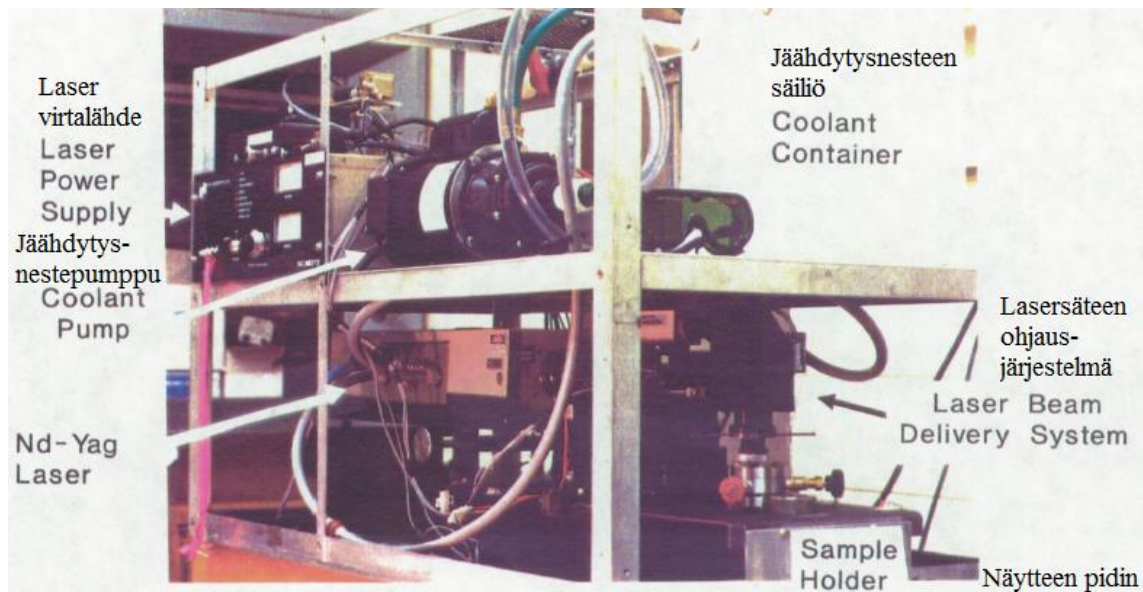
5.3.3 Laserhitsaus

Lukkari (2002, s. 18) kuvaa laserhitsausta seuraavasti: ”Laserhitsauksessa hitsauslämpö synnytetään lasersäteen avulla. Laservalonsäde on sähkömagneettista säteilyä, jolle on ominaista kaikkien siinä olevien valonsäteiden sama aallonpituus ja yhdensuuntaisuus. Laseri muuntaa ulkopuolisen energian, sähköinen purkaus tai vilkkulampun säteily, valonsäteeksi eli lasersäteeksi. Lasereita on hitsausta varten sekä kaasulasereita, jossa laservalo synnytetään CO_2 -kaasussa (hiilidioksidi), että kidelasereita, jossa laservalo synnytetään YAG-kiteessä (Yttrium-Aluminium-Garnet).” Kuvassa 23 on havainnointi laserhitsauksesta.



Kuva 23. Laserhitsauksen periaate (mukaiillen Lukkari 2002, s.18).

Laserhitsausta sovellettavaksi avaruuskäyttöön ovat tutkineet ainakin yhdysvaltalaiset tutkijat Workman & Kaukler (1989). Workmanin ja Kauklerin (1989) tutkimuksessa käytettiin Nd-YAG-laseria (Neodymium-doped yttrium aluminium garnet), jolla hitsattiin näytteitä 301 ja 304 ruostumattomasta teräksestä. Avaruusolosuhteita simuloitiin NASA:n KC-135 lentokoneen kyydissä. Laser oli teholtaan 18 W ja käytettyyn laitteistoon kuului laserin lisäksi jäähdytyslaitteisto ja laitteistot, kuten videokamera datan keräystä varten. Mitoiltaan 60x70x120 cm oleva laitteistokokonaisuus on esitelty kuvassa 24. (Workman & Kaukler 1989, s. 38, 42–45.)



Kuva 24. Lentävässä laboratoriossa käytetty laserhitsauslaitteisto (mukaiillen Workman & Kaukler 1989, s. 44).

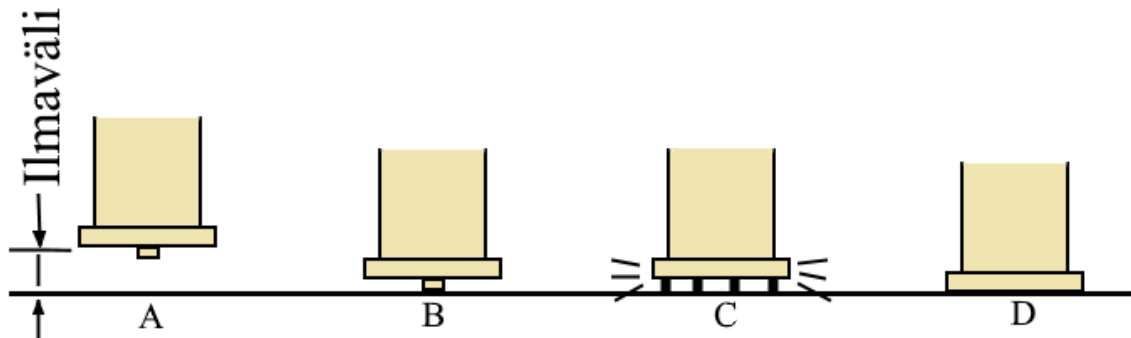
Hitsattavat näytteet olivat erillisessä hieman näytteitä isommassa tyhjiökammiossa ja lasersäde ohjattiin kammiossa olevan lasin läpi hitsattavan kappaleen pinnalle, hitsausnopeuden ollessa $1,5 \times 10^{-2}$ m/min. Kammio vuoti kuitenkin hieman ja paine vaihteli hitsauskokeiden aikana. Kokeissa tehdyissä hitseissä oli parempi tunkeuma maassa tyhjiökammiossa tehtyihin hitseihin verrattuna. Avaruusolosuhteita simuloivassa ympäristössä tehdyt hitsit olivat laadultaan hyviä, eikä hitseistä löydetty virheitä, kuten halkeilua. Tutkimuksessa ehdotettiin hitsauskokeen suorittamista avaruudessa avaruussukkulan kyydissä ja suunnitelmien mukaan kokeen suorittamiseksi olisi vaadittu 13,6 miestyövuotta ja arvioitu kustannus oli 914900 USD (Yhdysvaltain dollari). (Workman & Kaukler 1989, s. 38, 45, 49, 54–55.) Dokumentteja kokeen suorittamisesta avaruussukkulassa ei kuitenkaan löytenyt. Koe on mahdollisesti syrjäytetty ISWE-kokeella, johon oli jo valmis ukrainalaisten kehittämä ja rakentama elektronisuihkuhitsauslaitteisto.

Laserteknologia kehittyi nopeasti ja Workman ja Kaukler (1989, s. 81–84) ovat pohtineet myös kuitulaserin käyttämistä tulevaisuudessa avaruudessa hitsaamiseen, sekä auringon säteiden käyttämistä valonlähteenä laserille. Myös Paton (2009) on myöhemmin todennut kuitulaserien olevan hyvä vaihtoehto avaruushitsauskäyttöön, sillä hitsaaminen eri kohteissa onnistuu helpommin hitsauspäällä, jota voidaan liikutella useita metrejä kuitujen pituuden mukaan (Paton 2009, s. 6). Neuvostoliitto ja myöhemmin Ukraina ovat kuitenkin pohtineet laserhitsausta avaruuskäyttöön samoihin aikoihin yhdysvaltalaisien kanssa. Ukrainalaiset päätyivät vertailussa laserhitsauksen ja elektronisuihkuhitsauksen välillä kehittämään elektronisuihkuhitsausta, sillä ainakin tutkimuksen aikana laserilla oli huonompi alumiinin hitsattavuus, hitsausvyvyys, laitteiston paino, sekä lasersäteen liikuteltavuus elektronisuihkuun verrattuna. (Lapchinsky et al. 1993, s. 302–304.)

5.3.4 Tapitushitsaus

Tapitushitsauksessa tappi sulatetaan työkappaleeseen kiinni valokaaren avulla, joka palaa tapin ja työkappaleen välillä. Tapin ja työkappaleen välinen valokaari sulattaa työkappaleen pintaa, jolloin tappi työnnetään nopeasti syntyneeseen sulaan ja hitsi muodostuu. Prosessi on erittäin nopea valokaaren palaessa vain millisekunteja. Menetelmällä voidaan liittää tappien lisäksi pultteja ja muita pyöreän tai pyöreähkön muotoisia kappaleita tasaisiin metallipintoihin. (Masubuchi, Imakita & Miyake 1988, s. 26.) Tapitushitsauksen soveltamisesta avaruuteen löytyi kaksi artikkelia. Aihetta ovat tutkineet Masubuchi et al.

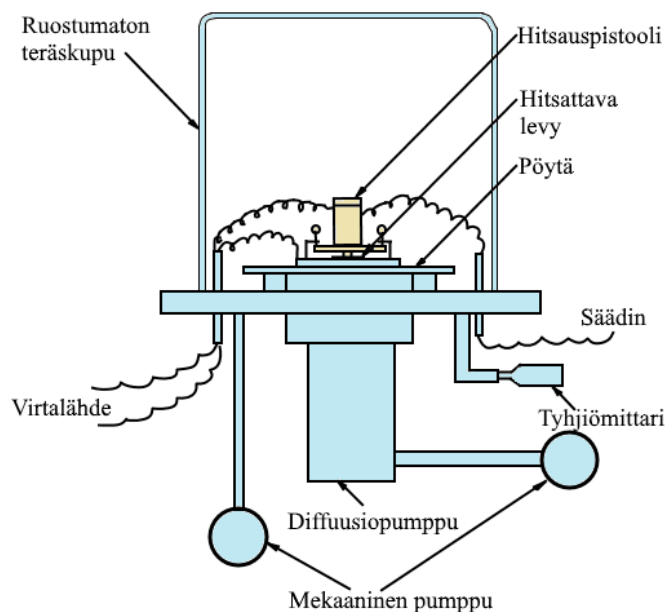
(1988) ja Paton et al. (2012), molemmat ovat tutkineet tapitushitsausta kondensaattoripurkausmenetelmällä (kuva 25) tyhjiössä. Yksinkertaiset korjaustyöt ja kiinnityselementtien ja tappien hitsaus voitaisiin suorittaa avaruudessa tapitushitsauksella, jonka käyttö on helppoa kokemattomalle hitsaajalle, sekä prosessi on mahdollista robotisoida. (Masubuchi et al. 1988, s. 25; Paton et al. 2012, s. 37.)



Kuva 25. Tapitushitsaus kondensaattoripurkausmenetelmällä käyttäen kärkisytytystä ilmavälillä. A. Tapin alkuasento; B. Tapin kärki koskettaa levyn pintaa ja virta purkautuu kärjen kautta levyyn; C. Kärki häviää virran ja lämmön vaikutuksesta. Valokaari sulattaa levyn ja tapin kosketuspinnat; D. Tappi on hitsautunut levyyn. (mukaillen Masubuchi et al. 1988, s. 28.)

Ilmaväli määritetään hitsattaville kappaleille erikseen. Kondensaattorissa oleva virta purkautuu tapissa olevan kärjen kautta työkappaleeseen, jolloin molemmat pinnat sulavat. (Masubuchi et al. 1988, s. 28.) Paton et al. (2012) ovat myös kokeilleet tapitushitsausta kärkisytytyksellä kontaktilla, jolloin tappi on alkutilanteessa kosketuksissa työkappaleen kanssa kuvan 25 kohdan B tapaan. Alumiinien hitsaamiseen vaaditaan ilmaväli, mutta ruostumattomia teräksiä hitsattaessa väli ei ole välttämätön. Kontaktilla hitsatut tapit eivät olleet liitoksiltaan kuitenkaan yhtä kestäviä, kuin ilmavälillä hitsatut tapit. (Paton et al. 2012, s.38.) Sekä Paton et al. (2012, s. 37) ja Masubuchi et al. (1988, s. 29) suorittivat tapitushitsauskokeet tyhjiökammiossa (kuva 26), jolloin hitsausta kontrolloitiin kauko-ohjauksella ulkopuolelta. Koetta ei kuitenkaan suoritettu lentävässä laboratoriossa, sillä painottomuuden vaikutuksen hitsiin arvioitiin olevan mitätön, sillä prosessi on erittäin nopea ja tapitushitsausta voidaan suorittaa maassa missä asennossa tahansa ilman vaikutusta hitsin laatuun. (Masubuchi et al. 1988, s. 28.)

Masubuchi et al. (1988) käyttivät kokeessaan M5 kokoisia tappeja, jotka olivat valmistettu alumiineista Al5000 ja Al2319, sekä ruostumattomasta teräksestä SUS304. Virtalähde oli 220 V, jolla voitiin varata kondensaattori 48600 mikrofaradiin. Kaikkien tappien hitsaus onnistui hyvin ja ainut havaittu ero tyhjiössä suoritettussa tapitushitsauksessa oli suurempi roiskeiden määrä. (Masubuchi et al. 1988, s. 29–33.) Paton et al. (2012, s. 37) tapitushitsasivat tyhjiössä M4 ja M6 tappeja. Materiaalina käytettiin AlMg3-alumiiniseosta ja 10Kh18N9T-terästä.



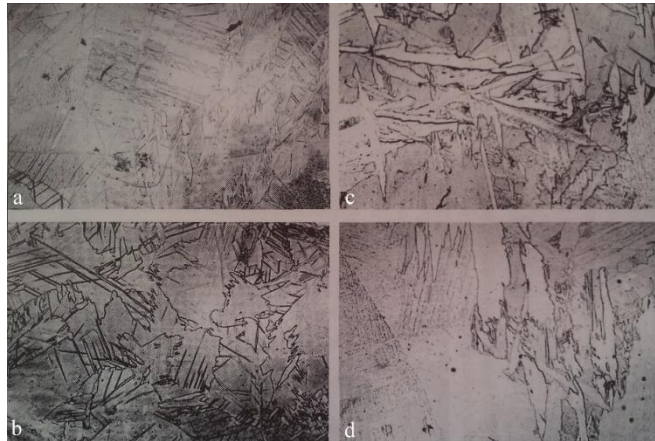
Kuva 26. Tapitushitsauksessa käytetty laitteisto (mukailen Masubuchi et al. 1988, s. 28).

Kaikki tehdyt hitsit vastasivat vaatimuksiltaan, kestävyydeltään ja laadultaan voimassa olevia standardeja. Kuten Masubuchin et al. (1988) tutkimuksessa syntyi tyhjiössä tehdyssä tapitushitsauksessa enemmän roiskeita tappia ympäröivään levyyn verrattuna normaaliin tapitushitsaukseen, eikä muita eroja havaittu. (Paton et al. 2012, s. 37, 41.)

5.4 Hitsauksen ja hitsien laatu ja laadunvarmistus

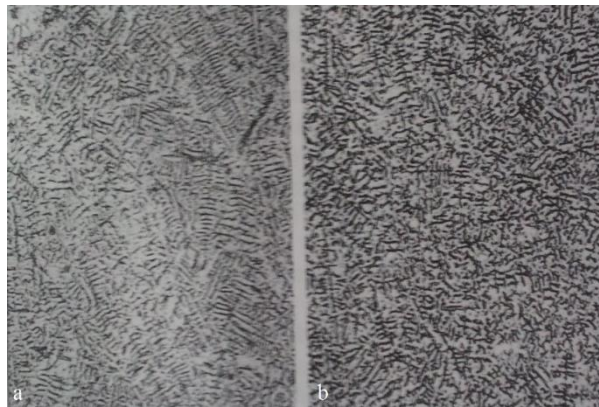
Avaruudessa tehtyjä hitsejä ollaan tutkittu maassa makro- ja mikrokuvien perusteella. Dokumentteja siitä, että hitsien laatua ja muita ominaisuuksia oltaisiin tutkittu jo suoraan avaruudessa ei löytynyt. Voidaan kuitenkin olettaa, että tulevaisuudessa mahdollisissa avaruudessa tapahtuvissa hitsausprojekteissa täytyy suorittaa laadunvarmistusta paikan päällä.

VHT-hitsauslaitteella avaruudessa ja maan päällä tehdyissä hitseissä olevat erot ovat vähäisiä. Kuvassa 27 on mikrokuvat titaaninäytteistä ja kuvassa 28 mikrokuvat ruostumattomasta teräksestä. Avaruudessa titaaniin syntynyt neulasmainen rakenne poikkeaa neulojen ollessa ohuempia maassa hitsattuun näytteeseen verrattuna. Rakenteen syntyyn vaikuttaa nopea sulan metallin jäähtyminen. Mikrokovuus avaruudessa hitsatulla titaanilla oli maassa hitsattua näytettä vastaava. (Paton et al. 1986b, s. 284–286.)



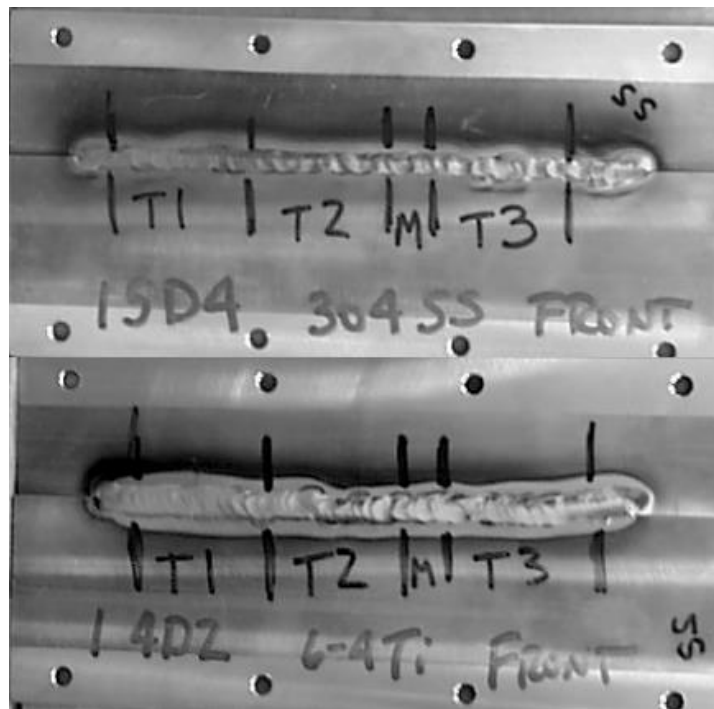
Kuva 27. Hitsatun titaanin mikrorakenne avaruudessa (a,b) ja maassa (c,d). Suurennos x200 (a,b,d) ja x400 (c). (mukaiillen Paton et al. 1986b, s. 285.)

Myös hitsatuissa teräsnäytteissä erot ovat vähäisiä. Teräsnäytteissä havaittiin karkeampi rakenne maassa hitsatuissa näytteissä avaruudessa hitsattuihin verrattuna. Ferriittiä oli avaruudessa hitsatuissa näytteissä 2,1–2,2 % verrattuna maassa hitsattuihin näytteisiin 1,8–2,0 % ja mikrokovuus oli sama kummassakin näytteessä. (Paton et al. 1986b, s. 285–286.)



Kuva 28. Hitsatun ruostumattoman teräksen mikrorakenne avaruudessa (a) ja maassa (b). Suurennos x200. (mukaiillen Paton et al. 1986b, s. 286.)

Sekä titaani- ja teräshitsausnäytteissä havaittiin vähän eroavaisuuksia avaruuden ja maan välillä. Suurin osa eroista johtuu avaruudessa vallitsevasta lämpötilasta, jossa sulametalli jäähtyy nopeammin. Hitisulaan voi jäädä kaasukuplia, jos hitsauspistoolia pidetään paikoillaan, sillä kaasu ei pääse pakenemaan sulasta nosteen puutteen vuoksi. Huokosia ei kuitenkaan havaittu kuin ainoastaan hitsin aloituskohdissa. Molemmissa metallinäytteissä α -faasi oli hajaantuneempi ja dislokaatioita esiintyi tiheämmin maa-näytteisiin verrattuna. Tulokset osoittivat, että VHT:n kaltaisella laitteistolla voidaan hitsata luotettavasti kestäviä hitsejä avaruusolosuhteissa. (Paton et al. 1986b, s. 288.) Hitsauksen laatu oli tyydyttävää avaruudessa VHT-hitsauslaitteella tehdyissä hitseissä. Kosmonautit eivät polttaneet läpi kertaakaan hitsausnäytteistä, kuten harjoitteluvaiheessa, mutta vajaata tunkeumaa esiintyi enemmän kuin harjoittelussa. (Nikitsky et al. 1985, s. 183.) Kuvia avaruudessa tehtyjen hitsien ulkonäöstä ei kuitenkaan löytynyt. Kuvassa 29 on esitetty VHT-hitsauslaitteen seuraajalla Universalilla tehtyjä hitsejä avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa.

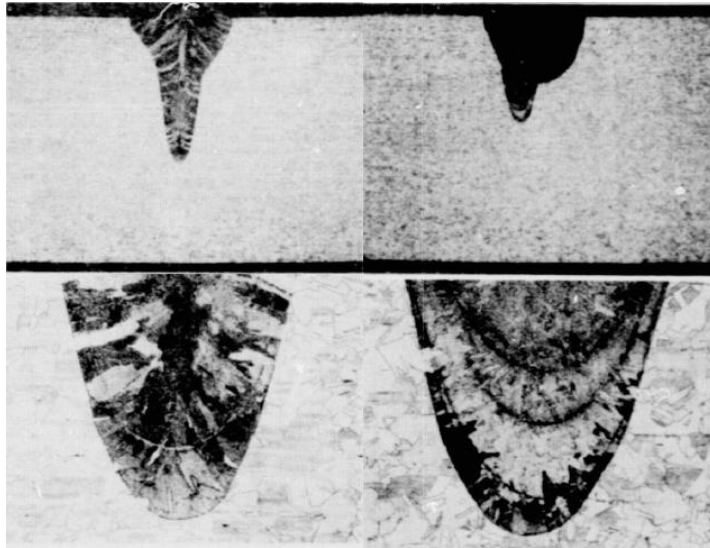


Kuva 29. Universal-hitsauslaitteella hitsatut teräs- (ylhäällä) ja titaaninäytteet (Russell et al. 2004, s. 6).

Avaruudessa tuotetut hitsit ovat luultavasti ulkonäöltään samankaltaisia kuvan 29 hitsien kanssa. Russell et al. (2004, s. 37) kertovat, että avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa

tehdyt hitsit olivat laadultaan hyväksyttäviä, mutta astronauteilta ja kosmonauteilta vaaditaan lisää harjoittelua hitsin laadun parantamiseksi.

Skylab-avaruusasemalla suoritetuissa hitsauskokeissa hitseihin syntynyt raerakenne oli hienompaa maassa hitsattuihin näytteisiin verrattuna. Eroavaisuudet hitsien rakenteessa maa- ja avaruusnäytteiden välillä selittyy lämpötilaerolla, missä hitsit tehtiin. Avaruudessa hitsit jäätyivät maassa tehtyjä hitsejä nopeammin. (Poorman 1975, s. 13.) Kuvassa 30 on esitetty maassa ja Skylab-avaruusasemalla tehdyt hitsit makrokuvattuna.

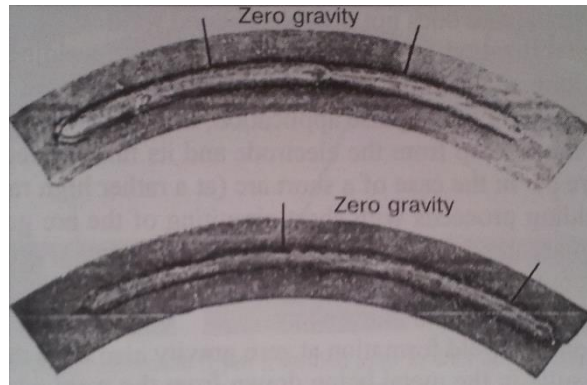


Kuva 30. Maassa (vasemmalla) ja avaruudessa elektronisuihkulla hitsatut näytteet. Suurennos x10 ylhäällä ja x100 alhaalla. (mukaiillen Poorman 1975, s. 18.)

Kuvassa 30 hitsien muotoon on vaikuttanut käytetty teho ja suihkun kohdistus. Kuvista nähdään maassa olevaan hitsiin muodostuneet pitkät rakeet, jotka kasvavat kohti hitsin keskustaa. Avaruudessa hitsatussa näytteessä rakeet ovat hienompia, eikä samankaltaista rakeenkasvua ole havaittavissa. (Poorman 1975, s. 16.)

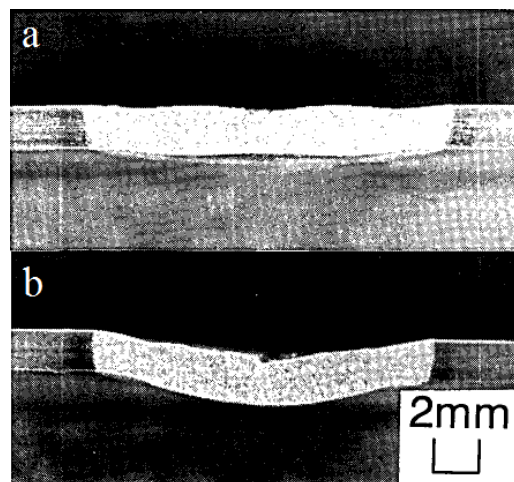
Ensimmäisistä avaruudesta Vulkan-hitsauslaitteella tehdyistä hitseistä ei löytynyt tarkkaa kuvausta tai kuvia hitsauksen ja hitsien laadusta, eikä eroavaisuuksista maassa ja avaruudessa tehtyjen näytteiden välillä. Kuvassa 31 on esitetty hitsien laatua lentävässä laboratoriossa tehdyissä kokeissa ennen avaruudessa suoritettua koetta (Paton & Kubasov 1970, s. 158). MIG-hitsauksella tehdyissä hitseissä oli käytännössä sama rakenne maassa, lentävässä laboratoriossa ja avaruudessa tehtynä. Perusaineen ja hitsin rakenteessa ei ollut

merkittävää poikkeavuutta ja kaasun poistuminen sulasta hitsistä jäähtymisen aikana oli tyydyttävää. Elektronisuihkuhitsaus osoittautui toimivan samoin, kuin lentävässä laboratoriossa. Hitsin laatu vastasi maassa hitsattuja näytteitä. (Paton & Kubasov 1970, s.155, 159.)



Kuva 31. MIG-hitsauksella lentävässä laboratoriossa tehdyt hitsit (Paton & Kubasov 1970, s. 158). Alue ”zero gravity” tarkoittaa painottomuutta.

Suitan et al. (2001) tutkimuksessa GHTA-hitsauksen sovellettavuudesta avaruusolosuhteisiin on tutkittu tyhjiön ja painottomuuden vaikutusta hitsaukseen tutkimatta tarkemmin hitsien laatua. Tutkimuksessa pistehitsattiin ruostumatonta terästä ja kuvasta 32 on huomattavissa gravitaation vaikutus hitsiin.



Kuva 32. Gravitaation vaikutus pistehitseihin (a) simuloidussa avaruusympäristössä ja (b) maassa tyhjiössä (mukaillen Suita et al. 2001, s. 104).

Gravitaatio saa ohutlevyyn tehdyn hitsin roikkumaan, kun puolestaan mikrogravitaatiossa hitsit ovat tasaisempia. Tutkimuksessa todettiin, että avaruusolosuhteita simuloivassa ympäristössä voidaan tuottaa kestäviä hitsejä ilman vikoja. (Suita et al. 2001, s. 107.) Tutkittaessa hitsausta lentävässä laboratoriossa tai avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa lämpötilan vaikutus on usein jäänyt pois tutkimuksista, jolla on kuitenkin suuri vaikutus hitsiin, kuten avaruudessa tehdyt kokeet ovat osoittaneet. Gravitaation puuttuminen tai tyhjiö ei ole kuitenkaan vaikuttanut merkittävästi hitsauksen ja hitsien laatuun.

6 CASET

Kappaleessa käsitellään kaksi avaruushitsaukseen liittyvää case-tapausta. Aiemmissa kappaleissa on kerrottu jo erityispiirteet, käytetyt menetelmät ja laitteet tarkemmin. Ensimmäisenä käsitellään Neuvostoliiton suorittamaa avaruuskävelyn aikana tehtyä hitsauskoetta. Toisena tapauksena on avaruudessa hitsauksen kannalta lupaavalta vaikuttanut Ukrainan ja Yhdysvaltain välinen yhteistyö hitsauskokeen järjestämiseksi avaruudessa.

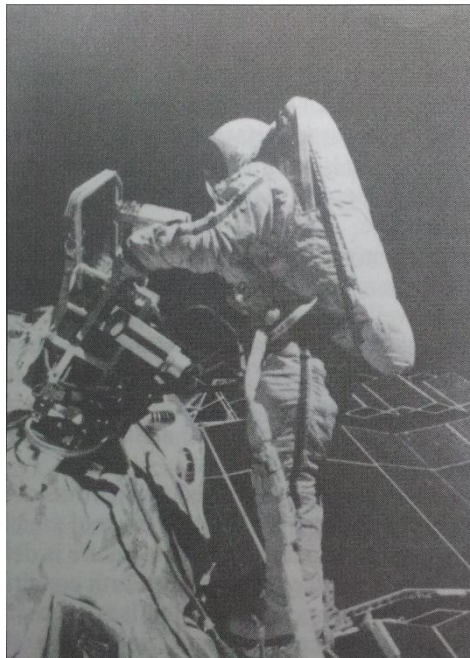
6.1 Ensimmäinen avaruuskävelyn aikana suoritettu hitsauskoe

Heinäkuussa 25. päivä vuonna 1984 kosmonautit Svetlana Savitskaya ja Vladimir Dzhanibekov suorittivat ensimmäisenä maailmassa hitsausta avaruuskävelyn aikana Saljut 7-avaruusasemalla VHT-hitsauslaitteella. Samalla Svetlana Savitskayasta tuli ensimmäinen avaruuskävelyn suorittanut nainen. (Paton et al. 1986a, s. 11–12.)

Avaruusteknologian aikakausi alkoi 16. lokakuuta vuonna 1969 Neuvostoliiton suorittua ensimmäisenä maailmassa hitsauskokeen avaruudessa automatisoidulla Vulkan-hitsauslaitteella. Kokeen jälkeen kehitettiin uusi hitsauslaite nimeltään VHT, jota käytettiin Vulkan-hitsauslaitteesta poiketen manuaalisesti. Manuaalisesti operoitavaan hitsauslaitteistoon päädyttiin automaattisen tai robotisoidun laitteiston sijaan, sillä korjausta vaativia kohteita ei voida tietää etukäteen, jolloin manuaalisesti operoidun laitteiston käyttäminen on nopeampaa. VHT-hitsauslaitteella voitiin suorittaa hitsauksen lisäksi leikkausta, juottoa ja päällystämistä. (Paton et al. 1986a, s. 12.) Laitteiston rakenne on kuvattu tarkemmin aiemmissa kappaleissa.

VHT-laitteiston suunnittelu oli haastavaa, sillä vastaavaa laitetta ei ollut rakennettu koskaan aiemmin. Avaruuden olosuhteet vaikuttivat laitteiston suunnitteluun merkittävästi. Kaikkia ehdotuksia laitteiston turvallisuuteen ja rakenteeseen ei voitu ottaa huomioon aikataulun puitteissa, vaan VHT-laitteisto eteni viimeistelyvaiheeseen, kun laitteen oli todettu olevan melko turvallinen käyttää. Kosmonautit harjoittelivat laitteiston käyttöä avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa, lentävässä laboratoriossa ja vesitankissa. (Paton et al. 1986a, s. 14–16.)

Dzhanibekov kiinnitti VHT-laitteiston avaruusaseman ulkopinnalle ja valmisteli laitteiston prosessien suorittamista varten. Savitskaya otti Dzhanibekovin paikan ja suoritti laitteistolla ensin leikkausta, jonka jälkeen oli hitsauskokeen vuoro (kuva 33). Kokeen aikana kosmonauttien jalat olivat kiinnitettynä erilliseen alustaan vakauden säilyttämiseksi. Dzhanibekov suoritti Savitskayan jälkeen samat operaatiot, jonka jälkeen laitteisto ja näytteet kuljetettiin takaisin aseman sisälle. Kokeen aikana kosmonautit olivat yhteydessä jatkuvasti maassa sijaitsevaan valvontakeskukseen ja kuvailivat prosessien kulkua. Avaruuskävely kesti kokonaisuudessaan kolme tuntia. Sekä kosmonautit, että laitteiston kehittäjät olivat tyytyväisiä laitteistoon.



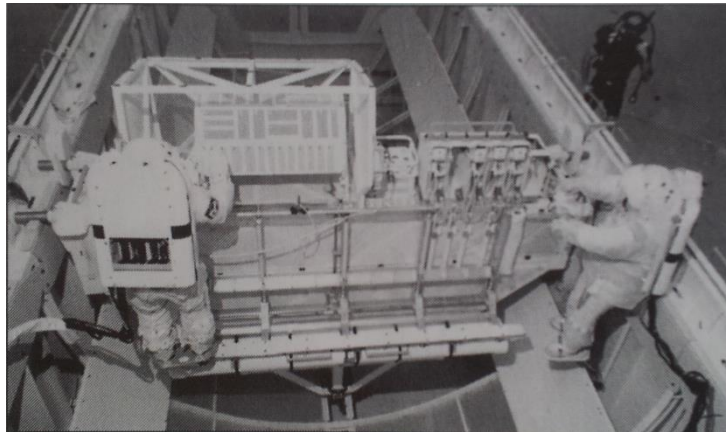
Kuva 33. Svetlana Savitskaya suorittamassa koetta VHT-laitteistolla (Paton et al. 1986a, s. 13).

6.2 ISWE ja Flagman

ISWE:n järjestely alkoi vuonna 1991 NASA:n aloitteesta ukrainalaiselle PWI:lle. Kokeen tarkoituksena oli selvittää PWI:n kehittämän Universal-laitteiston soveltuvuus huolto- ja korjaustoimenpiteisiin ISS-avaruusasemalla. (Benfield & Landrum 1998, s. 25.) ISWE oli tarkoitus toteuttaa Columbia-avaruussukkulan kyydissä (Paton et al. 1999a, s. 203).

Valmistautuminen ISWE:tä varten alkoi testeillä lentävässä laboratorioissa ja vesitankissa, joissa yhdysvaltalaiset saivat ensikosketuksen Universal-laitteistoon. Harjoittelu suoritettiin

Universal-laitteiston mukaan tehdyillä malleilla. Universal-laitteiston sovittamiseksi avaruussukkulaan jouduttiin kehittelemään ja rakentamaan työ- ja kuljetusalusta. (Paton et al. 1999a, s. 203–204.) Muutosten jälkeen Universal-laitteistoa kuvataan nimellä ISWE-laitteisto. Kuvassa 34 suoritetaan testausta ISWE-laitteiston mallilla vesitankissa.



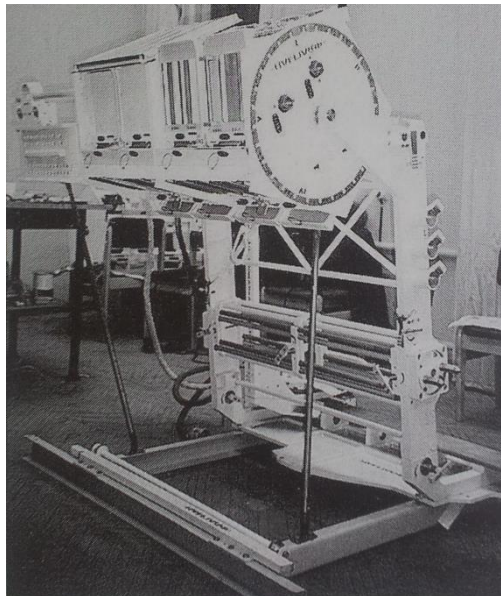
Kuva 34. Astronautit harjoittelevat työskentelyä Columbia-avaruussukkulan tavaratilan osamallissa vesitankissa (Paton et al. 1999a, s. 205).

Itse ISWE-laitteiston testaukset ja vaatimusten tarkastukset ajoittuivat vuodelle 1995. Havaitut puutteet ja viat korjattiin ja muiden laitteistoon liittyvien kokonaisuuksien, kuten työalustan ja näytepidikkeen tarkastukset aloitettiin vuonna 1996. Joulukuussa 1996 kaikki oli lähes valmista ja viimeisiä kokeita ja testauksia suoritettiin avaruusolosuhteita simuloivassa kammiossa. (Paton et al. 1999a, s. 205–207.) ISWE:n järjestely keskeytettiin kuitenkin 6. joulukuuta 1996. Keskeytykseen johti rajoitettu avaruuskävelyjen mahdollisuus, joita ei voitu suorittaa kokeen puitteissa. (Benfield & Landrum 1998, s. 25.) Keskeytyksen syyksi kerrotaan myös avaruussukkulassa havaitut toimintahäiriöt (Paton 2009, s. 5).

Ukraina ja Yhdysvallat eivät olleet aiemmin tehneet yhteistyötä avaruusteknologian saralla, joka nousi esiin ISWE:n edetessä. Yhteisten standardien puuttuminen aiheutti ongelmia jo alkuvaiheessa, kun laitteistoa käytiin sovittamaan avaruussukkulaan. Työskentelyä hidasti myös yhteisen kielen puuttuminen ja molemmat osapuolet tarvitsivat tulkin voidakseen keskustella. Sovitut asiat kirjoitettiin ylös, jolloin välttyttiin väärinymmärryksiltä. Molempien osapuolten välillä esiintyi myös puutteita luottamuksessa. Ukraina oli kuitenkin ollut osa Neuvostoliittoa, joka puolestaan oli ollut Yhdysvallan kanssa kilpaileva suurvalta.

Vaikka ISWE:tä ei päästy toteuttamaan, opittiin tehdyn yhteistyön perusteella yhteisten standardien, sekä yhteisten työskentely- ja toimintatapojen tärkeys mahdollisia uusia yhteistyöprojekteja varten. (Benfield & Landrum 1998, s. 25, 29–30, 36–37.)

ISWE:n peruuntumisen jälkeen laitteisto tuotiin takaisin Ukrainaan. Laitteistoa oltiin muokattu viimeiset vuodet yhteensopivaksi Columbia-sukkulan kanssa, joten laitteistoa jouduttiin suunnittelemaan uudestaan Mir-avaruusasemalle sopivaksi (kuva 35). Vuosi 1997 kului laitteiston muutosten suunnitteluun ja rakentamiseen. Vuonna 1998 aloitettiin miehistön koulutus Flagman-koetta varten ja laitteisto sekä miehistö olivat valmiina kokeeseen heinäkuussa, kuitenkin samana kuukautena Mir-avaruusasema alkoi vajota äkillisesti kohti ilmakehää. Osa Universal-laitteistosta lennätettiin Mir-avaruusasemalle jo toukokuussa 1998. Loput laitteistosta oli tarkoitus toimittaa asemalle lokakuussa ja hitsauskokeet oli suunniteltu marraskuulle. Kaikki työ elokuusta lähtien jouduttiin kuitenkin keskittämään aseman toiminnan ylläpitämiseksi. (Paton et al. 1999a, s. 207–210.) Mir-avaruusasema joutui selvitystilaan, eikä koetta päästy toteuttamaan (Paton 2009, s. 5).



Kuva 35. Flagman-koetta varten suunniteltu työalusta Universal-laitteistolle (Paton et al. 1999a, s. 208).

7 POHDINTA

Hitsaus avaruudessa osoittautui vähäisemmäksi mitä ennen tutkimuksen aloittamista arveltiin. Oletus tutkimuksen alussa oli, että hitsaus on ollut käytössä laajalti ja käytössä jossain muodossa ISS-avaruusasemalla. Kuitenkaan 90-luvun jälkeen ei ole suoritettu hitsausta avaruudessa, mihin mahdollisesti on vaikuttanut taloudelliset tekijät, Neuvostoliiton hajoaminen, sekä tuoreimpana Yhdysvalloissa sukulaohjelman lakkauttaminen. Tutkimusta on kuitenkin jatkettu avaruudessa hitsaamiseen liittyen ja hitsausmenetelmiä kehitetään jatkuvasti, joista tässä työssä on käsitelty vain osa.

NASA tähtää suunnitelmissaan kohti Mars-planeettaa ja on julkaissut kuvitteellisia julisteita innoittamaan nuoria. Julisteissa kuvataan erilaisia työtehtäviä, joita tarvitaan mahdollisesti Marsissa tai Marsia kiertävissä kuissa työskennellessä. (NASA 2016.) Kuvassa 36 on esitetty suojapuvussa oleva astronautti, joka tekee kokoonpanotyötä futuristisen näköisellä laitteella, josta lähtee kipinöitä. Kuvassa ei kerrota mitä kyseisellä laitteella tehdään, mutta kyseessä voi olla mahdollisesti jokin hitsausprosessi.



Kuva 36. Kokoonpanotöihin vaaditaan jonkin verran laitteenkäyttäjiä (NASA 2016).

Kuvan 36 perusteella voi olettaa, että tutkimusmatkat avaruuteen tai eri planeetoille tietäisi myös mahdollisesti jonkin hitsausprosessin kehittämistä kokoonpano- ja korjaustöihin avaruudessa.

Lähteitä löytyi aiheen erikoisuudesta huolimatta hyvin ja tähän tutkimukseen käytettiin yli 40 lähettä. Vaikka lähteet ovat Neuvostoliitto painotteisia, saatiin luotua kokonaiskuva avaruudessa hitsauksesta. Työn kannalta kiinnostavaa olisi ollut päästä käsiksi vielä enemmän yhdysvaltalaisen tutkimuksiin vertailujen mahdollistamiseksi eri hitsausprosessien tutkimuksista ja kehityksestä.

7.1 Vertailu aiempiin tutkimuksiin

Useasta tutkimuksesta löytyi katsaus avaruudessa hitsauksen historiaan, mutta muuten tutkimuksissa ei käsitelty aihetta kokonaisvaltaisesti. Yleensä tutkimukset keskittyivät avaruuteen soveltuvien hitsausprosessien tutkimiseen.

Tutkimuksia, joissa on tehty tiivistelmän mukaan yleiskatsaus avaruudessa hitsaukseen liittyen tämän kandidaatintyön tapaan, löytyi kaksi kappaletta. Prater (2013) käsittelee työssään pääasiassa eri hitsausprosessien soveltuvuutta käyttöön avaruudessa. Feng et al. (2015) työ on luonteeltaan yleiskatsaus avaruushitsaukseen liittyen. Kummastakin työstä oli saatavilla vain tiivistelmä, joten tarkkaa vertailua ei voitu tehdä. Tiivistelmien lisäksi olivat nähtävissä lähteet, jotka olivat osittain samoja tämän tutkimuksen kanssa. Feng et al. (2015) tutkimuksessa noin 15 avaruushitsaukseen liittyvästä lähteestä 10 oli ennen 2000-lukua kirjoitettua ja 5 samoja kuin tässä tutkimuksessa.

Johdantokappaleessa on lyhyesti käyty avaruushitsauksen historia, joka on yhteneväinen Praterin (2013) tiivistelmässä esitettyyn historiakatsaukseen. Myös Roscosmokselta saatu vastaus osoittaa historiatiedot oikeiksi (Moiseev 2016). Muilta osin tutkimusta on vaikea vertailla muiden tutkimusten kanssa.

7.2 Tutkimuksen objektiivisuus ja tulosten luotettavuus

Tutkimus on tehty yliopistolle, eikä tutkimukseen ole vaikuttaneet mitkään avaruusjärjestöt tai yritykset. Löydetty tieto on pyritty hakemaan useammasta lähteestä. Tutkimuksessa

käytetyt lähteet ovat pääosin yli 10 vuotta vanhoja tai Neuvostoliitossa tuotettua. Vanhoja lähteitä tukemaan on kuitenkin löytynyt 2000-luvun puolelta olevia lähteitä.

Tuloksia ei ole kuvailtu kaikissa tutkimuksissa tarkasti ja yhdessä tapauksessa eri lähteistä löydettiin ristiriita tiedon suhteen. Työssä jo aiemmin esitetty tapaus, jossa Hall ja Shayler (2003, s. 165) kertovat lähes onnettomuuteen johtaneesta kokeesta Sojuz 6-avaruusaluksella. Paton ja Kubasov (2003) eivät kuitenkaan mainitse kyseistä tapahtumaa aihetta käsittelevässä artikkelissaan. Tapaus asettaa Neuvostoliitossa tuotetut tekstit kyseenalaisiksi ja mahdollisuus vastaavanlaisiin tiedon kertomatta jättämiseen on siis olemassa muissakin lähteissä. Vastaavia ristiriitoja ei kuitenkaan löytynyt enempää.

7.3 Johtopäätökset

Hitsauksen tarve avaruudessa liittyy pääasiassa eri kohteiden korjaamiseen ja kokoamiseen avaruusasemilla ja -aluksilla. Vaikka hitsauksen tarpeellisuudesta avaruudessa on kirjoitettu, avaruudessa hitsaaminen ei ole edennyt kokeista käytäntöön. Saadut tulokset hitsauskokeista avaruudessa ovat olleet kuitenkin lupaavia ja on todennäköistä, että käytännön kokeita tullaan tulevaisuudessa vielä tekemään. Tutkijoiden täytyisi pyrkiä vakuuttamaan rahoittajia ja yrityksiä hitsauksen mahdollisuuksista avaruudessa, jotta uusi avaruushitsauskokeiden aikakausi alkaisi ja siitä käytännön kokeisiin siirtyminen onnistuisi.

Avaruuden erityispiirteet tyhjiö, painottomuus ja suuri lämpötilan vaihtelu on asettanut haasteita avaruushitsaukselle. Tutkijat ovat kuitenkin onnistuneet kehittämään automatisoidut ja manuaalisesti operoitavat hitsauslaitteet olosuhteisiin sopiviksi, eikä mikään erityispiirteistä ole ollut esteenä avaruudessa hitsaamiselle. Vain kolme eri hitsausmenetelmää elektronisuihku-, plasmakaari- ja MIG-hitsausta on kokeiltu avaruudessa. Edellä mainittujen hitsausmenetelmien kokeista on jo kuitenkin kauan, joten uusien kokeiden järjestäminen ja uusien hitsausmenetelmien testaus avaruudessa olisi ajankohtaista.

Avaruuteen soveltuvia hitsausmenetelmiä tutkitaan simuloituissa avaruusolosuhteissa ja tässä tutkimuksessa on kerrottu tarkemmin TIG-, GHTA-, laser- ja tapitushitsauksesta. Tutkimuksen alla olevia menetelmiä on kuitenkin enemmän, joka on lupaavaa avaruudessa hitsaamisen tulevaisuuden kannalta. Maassa tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan

avaruudessa suoritettaviin kokeisiin siirtää parhaimmaksi koetut hitsausmenetelmät, jolloin riski hitsausmenetelmien soveltumattomuudesta avaruuteen on pieni.

7.4 Jatkotutkimusaiheet

Tämä tutkimus on vain yleiskatsaus avaruudessa hitsaukseen ja kaikkia tutkimuksen kohtia voi täydentää erillisillä tutkimuksilla. Avaruuteen soveltuvia hitsausmenetelmiä on enemmän kuin tässä tutkimuksessa käsitellyt neljä eri menetelmää. Mahdollisia kirjallisuustutkimukseen perustuvia jatkotutkimusaiheita olisi selvittää kaikki hitsausmenetelmät, joita on tutkittu käyttöön avaruudessa. FSW-hitsauksesta (Friction stir welding) ei löytynyt tutkimuksia, joissa kyseistä menetelmää oltaisiin tutkittu käytettäväksi avaruudessa. Yhtenä Jatkotutkimus aiheena voisi siis olla hitsausmenetelmien tutkiminen avaruuskäyttöön, joista sellaista tutkimusta ei olla vielä tehty.

Tutkimus eri hitsausmenetelmien soveltuvuudesta avaruuskäyttöön on kallista, sillä painottomuuden simulointi vaatii lentävällä laboratorionlailla tehtäviä painottomuuslentoja. Edullisimpien tutkimustapojen kehittäminen voisi edistää eri hitsausmenetelmien siirtämistä testaukseen avaruudessa. Tutkittavaa löytyy myös luultavasti hitsausmenetelmien robotisoinnista tai automatisoinnista.

8 YHTEENVETO

Hitsaus avaruudessa on jäänyt varsin vähäiseksi. Löydetyin tiedon mukaan valtioista Yhdysvallat on suorittanut yhden hitsauskokeen avaruudessa ja Neuvostoliiton avaruudessa suorittamista hitsauskokeista kolmesta löytyi kuvaus. Molemmista valtioissa on kuitenkin todettu hitsauksen tarve avaruudessa, varsinkin korjaus- ja kokoonpanomenetelmänä. Korjauksen kohteina toimisivat vaurioituneet putket ja avaruusasemien tai alusten törmäyksistä tai muista syistä vaurioituneet alueet. Hitsausta voitaisiin hyödyntää avaruusasemien ja sen eri osien, kuten kannatinrakenteiden kokoamisessa, jolloin saavutettaisiin kestävämmät ja kevyemmät liitokset.

Avaruuden olosuhteet asettavat useita haasteita avaruudessa hitsaukselle. Painottomuudessa hitsausasennolla ei ole väliä, mutta hitsaajan täytyy olla kiinnitettynä työpisteeseen. Lämpötila voi vaihdella hitsattavassa kappaleessa sadoilla celsiusasteilla, joka vaikuttaa hitsaukseen. Avaruusasemien ja alusten ulkopuolella tyhjiössä hitsatessa hitsaajaa suojaava avaruuspuku asettaa rajoituksia liikkuvuudelle ja siten myös hitsaukselle. Turvallisuuden parantamiseksi hitsaaja voi tarvita avaruuspuvun lisäksi erillisen suojaavun suojaamaan mahdolliselta kosketukselta sulan metallin kanssa. Käytettävät hitsauslaitteistot suunnitellaan olosuhteisiin sopiviksi. Manuaalisesti tapahtuvaa hitsausta varten koulutusta hitsausprosessin hallintaa varten suoritetaan painottomuuslennoilla, vesitankeissa ja tyhjiökammioissa.

Hitsausprosessien kehitystä ja tutkimusta varten tarvitaan lentäviä laboratorioita, joissa hitsausta voidaan suorittaa noin 20 sekuntia kestävässä painottomudessa. Tyhjiön saavuttamiseksi tarvitaan tyhjiöpumppuja ja kammioita. Avaruudessa on hitsattu vain kolmella menetelmällä. Neuvostoliiton automatisoidulla Vulkan-hitsauslaitteella on suoritettu plasma-, metallikaari- ja elektronisuihkuhitsausta. Yhdysvallat on kokeillut automatisoidulla hitsauslaitteella vain elektronisuihkuhitsausta. Neuvostoliitto on suorittanut elektronisuihkuhitsausta myös manuaalisesti operoitavalla VHT-laitteistolla.

Tutkittavista menetelmistä käsiteltiin TIG-, GHTA-, laser- ja tapitushitsaus. GHTA-hitsaus on laitteistoltaan ja polttimeltaan TIG-hitsauksen kaltainen käytetyn volframielektrodin

ollessa ontto kiinteän sijaan. TIG-hitsauksen sovelluskohteet rajoittuvat avaruudessa alusten ja asemien sisätiloihin käytettäväksi.

Avaruudessa tehdyn hitsauksen laatu on manuaalisesti hitsattaessa ollut tyydyttävää. Automatisoiduilla laitteilla tehdyn hitsauksen laatu on vastannut maassa tehtyjä näytteitä. Mikrokuvista on havaittu avaruudessa tehdyistä hitseistä hienompi raerakenne maassa tehtyihin näytteisiin verrattuna. Avaruudessa suoritettut hitsauskokeet ja maassa suoritettut tutkimukset ovat osoittaneet, että avaruudessa voidaan tuottaa laadullisesti hyviä ja kestäviä hitsejä.

Tulevaisuudessa hitsausmenetelmien kokeilu avaruudessa todennäköisesti jatkuu, vaikka tietoa varsinaisista suunnitelmista ei vielä ole.

LÄHTEET

Anderson, R. H. 1991. EVA/Telerobotic Fluid Line Repair Tool Development. Teoksessa: Proceedings from the conference: Welding in Space and the Construction of Space vehicles by Welding, pidetty New Carrollton, Maryland, USA 24-26 Syyskuu, 1991. Miami, Florida, USA: American Welding Society. S. 144–150.

Benfield, M. C. J. & Landrum, D. B. 1998. International Joint Ventures in Space: The International Space Welding Experiment. *Journal of Technology Transfer*, 23: 3. S. 25–38.

Cambell, K. 2005. Students Explore Welding in Space. *Welding Journal*, 84: 10. S. 80–84.

Bulatsev, K. A. & Bulatsev, A. A. 2001. System of Monitoring the Position of an Electron Beam Hand Tool. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja). *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 146–151.

Bulatsev, A. R., Morejnis, M. I., Skorobogatov, S. A., Motrij, V. I., Samilov, V. N. & Beletsky, D. V. 1991. Assembly and Welding of Large-Size Structures in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja). *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 474–484.

Dudko, D. A., Zagrebelny, A. A., Paton, V. E. & Stesin, V. V. 1977. Peculiarities of Equipment for Technological Works in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja). *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 85–87.

Dzhanibekov, V. A., Zagrebelny, A. A., Gavrish, S. S., Stesin, V. V., Shelyagin, V. D., Yurchenko, N. N. & Markov, A. V. 1991. Welding Equipment for Space Applications. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja). *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 184–190.

Experiment list. 2016. [NASAn www-sivuilla]. Päivitetty Maaliskuu 30, 2016. [viitattu 6.4.2016]. Saatavissa: http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/experiments_by_name.html#W

Feng, J., Wang, H., Zhang, B. & Wang, T. 2015. Research status and prospect of space welding technology. *Hanjie Xuebao/ Transactions of the China welding Institution*, 36: 6. S. 107–112.

Hall, R. D. & Shayler, D. J. 2003. *Soyuz: A Universal Spacecraft*. Chichester: Praxis Publishing. 460 s.

Lankin, Yu. N. & Gavrish, G. G. 2001. Device for Provision of Safe Operation of Manual Electron Beam Tool in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 142–146.

Lapchinsky, V. F., Rieck, U., Sobisch, G. & Keitel, S. 1993. Bases of Orbital Joining Technologies. Requirements for Equipment for Welding in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja). *SPACE: Technologies, Materials, Structures*. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 297–304.

Lukkari, J. 2002. *Hitsaustekniikka – perusteet ja kaarihitsaus, Opetushallitus*. 290 s.

Masubuchi, K., Agapakis, J. E., DeBiccari, A. & von Alt, C. 1983. Feasibility of remotely manipulated welding in space. A step in the development of novel joining technologies [verkkodokumentti]. USA: syyskuu 1983. [viitattu 22.6.2016] Tekninen muistio. Massachusettsin teknillinen korkeakoulu, Dept. of Ocean Engineering. 261 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840012789.pdf>

Masubuchi, K., Imakita, A. & Miyake M. 1988. An Initial Study of Remotely Manipulated Stud Welding for Space Applications. *Welding Journal*, 67: 4. S. 25–34.

Mikhajlovskaya, E. S., Shulym, V. F. & Zagrebelny, A. A. 2002. Results of Experiments on Manual EBW in a Manned Space Simulation Test Chamber. Teoksessa: Paton, B. E.

(toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 311–318.

Moiseev, N. F. 2016. Ответ на обращение [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Riku Peltonen. Lähetetty 19.5.2016 klo 11:14 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”Пелтонен.pdf”.

NASA. Mars Exploration. 2016. [NASAn www-sivuilla]. [Viitattu 5.9.2016]. Saatavissa: <http://mars.nasa.gov/multimedia/resources/mars-posters-explorers-wanted/>

Nikitsky, V. P., Lapchinsky, V. F., Zagrebelny, A. A., Stesin, V. V. & Shelyagin, V. D. 1985. Testing of Manual Electron Beam Welding Tool in Open Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 178–184.

Nishikawa, H., Yoshida, K., Maruyama, T., Ohji, T., Suita, Y. & Masubuchi, K. 2001. Gas hollow tungsten arc characteristics under simulated space environment. Science and Technology of Welding and Joining, 6: 1. S. 12–16

Nunes, A. C., Jr., Russell, C., Bhat, B. & Fragomeni, J. M. 1998. An Assessment of Molten Metal Detachment Hazards for Electron Beam Welding in the Space Environment: Analysis and Test Results [verkkodokumentti]. Alabama, USA: toukokuu 1998 [viitattu 30.3.2016]. Tekninen muistio. NASA Marshall Space Flight Center. 26 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19980119852.pdf>

Ohji, T. 2006. Characteristics of hollow cathode arc as welding heat source. Study on welding in space. Welding International, 20: 5. S. 355–360.

Paton, B. E. 2009. 25 years of welding in open space. The Paton Welding Journal, 2009: 7. S. 2–6.

Paton, B. E. 1990. Technological Aspects of Space Welding. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 35–40.

Paton, B. E., Bulatsev, A. R., Mikhajlovskaya, E. S., Zagrebelny, A. A., Nikitsky, V. P., Markov, A. V. & Churilo, I. V. 1991. Truss Structures in Orbital Complexes. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S.484–495.

Paton, B. E., Dudko, D. A., Bernadsky, V. N., Paton, V. E., Stesin, V. V., Lapchinsky, V. F. & Zagrebelny, A. A. 1976. Application of Welding for Repair of Space Objects. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 75–77.

Paton, B. E., Dzhanibekov, V. A. & Savitskaya, S. E. 1986a. Tested in Orbit. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 11–18.

Paton, B. E., Gavrish, S. S., Shulym, V. F., Bulatsev, A. R., Demianenko, V. V., Kryukov, V. A., Perepechenko, B. I., Lyubomudrov, I. G., Strelnikov, M. A., Kharkovskaya, T. N., Zagrebelny, A. A., Nikitsky, V. P., Markov, A. V. & Churilo I. V. 1999a. Work on Manual Electron Beam Technology in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 190–212.

Paton, B. E., Kaleko, D. M., Bulatsev, A. R. & Shulym, V. F. 2012. Capacitor-discharge stud welding in vacuum. The Paton Welding Journal, 2012: 4. S. 37–41.

Paton, B. E., Kubasov, V. N. 1970. Experiment on Metal Welding in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 154–160.

Paton, B. E., Lapchinsky, V. F., Bulatsev, A. R., Balitsky, V. M. & Samilov, V. N. 1989. Peculiarities of Using Welding Processes for Fabrication and Repair of Large-Sized Structures in Space. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 468–473.

Paton, B. E., Lapchinsky, V. F., Zagrebelny, A. A., Gavrish, S. S., Grigorenko, G. M., Malevsky, Yu. B., Grabin, V. F. & Dzykovich, I. Ya. 1986b. Analysis of the Results of Space Experiments, Conducted Using VHT. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 283–288.

Paton, B. E., Stesin, V. V. & Zagrebelny, A. A. 1999b. Experience of Design of Process Equipment for Performance of Work in Space Vehicles. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 88–100.

Poorman, R. M. 1975. Skylab M551 Metals Melting Experiment [verkkodokumentti]. Alabama, USA: toukokuu 1975 [viitattu 4.12.2015]. Tekninen muistio. George C. Marshall Space Flight Center Marshall Space Flight Center. 20 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19760003076.pdf>

Prater, T. 2013. Welding in space: A comparative evaluation and candidate welding technologies and lessons learned from on-orbit experiments. Teoksessa: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 64th International Astronautical Congress, pidetty Pekingissä, Kiinassa 23-27 syyskuuta, 2013. S. 8992–9011.

Russell, C. K., Malone, T. W. & Cato, S. N. 2004. Evaluation of Training Samples Manually Welded with the Universal Handtool in a Space Simulation Chamber [verkkodokumentti]. Alabama, USA: toukokuu 2004 [viitattu 24.4.2016]. Tekninen muistio. Marshall Space Flight Center. 48 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040084597.pdf>

SCOPUS. 2016. [SCOPUS www-sivuilla]. Päivitetty 24.4.2016. [Viitattu 24.4.2016]. Saatavissa: <http://www.scopus.com.ezproxy.cc.lut.fi/term/analyzer.uri?sid=C2E084211E32A52A0681ECB96A333F26.euC1gMODexYIPkQec4u1Q%3a480&origin=resultslis t&src=s&s=%28TITLE-ABS-KEY%28welding%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28space %29+AND+ALL%28vacuum%29+OR+ALL%28weightlessness%29%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=88&count=184&analyzeResults=Analyze+results&txGid=0#spreadsheet>

Shonin, G. S., Kiselyov, S. A., Lapchinsky, V. F. & Zagrebelny, A. A. 1978. Special Features of Training Cosmonaut-Operators to Perform Processing Operations. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 113–118.

Shulym, V. F., Lapchinsky, V. F., Nikitsky, V. P., Demidov, D. L. & Neznamova, L. O. 1991. Peculiarities and future development of space welding. Teoksessa: Proceedings from the conference: Welding in Space and the Construction of Space vehicles by Welding, pidetty New Carrollton, Maryland, USA 24-26 Syyskuu, 1991. Miami, Florida, USA: American Welding Society. S. 12–24.

Suita, Y., Tsukuda, Y., Terajima, N., Hatta, T., Kono, T., Inokuma, R., Kawata, K., Oji, T., Nishikawa, H., Yoshida, K & Masubuchi, K. 2001. Gas hollow tungsten arc welding experiments in aircraft-borne simulated space environment. *Welding International*, 15: 2. S. 100–107.

Tamir, D., Siewert, T. A., Matsubuchi, K., Flanigan, L., Su, R. & Eagar, T. W. 1993. In-space welding – Visions & Realities [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.2.2016]. Thirtieth Space Congress – “Yesterday’s Vision is Tomorrow’s Reality”. 8 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://eagar.mit.edu/Publications/Eagar136.pdf>

Ternovoj, E. G., Bulatsev, A. R., Solomijchuk, T. G. & Shulym, V. F. 2010. Repair of pipelines using orbital TIG welding inside inhabited space objects. *The Paton Welding Journal*, 2010: 4. S. 10–13.

Ternovoj, E. G., Shulym, V. F. & Lankin, Yu. N. 2013. Repair of fragments of the case of international space station with application of electron beam welding. Teoksessa: *Welding and Related Technologies–Present and Future* [verkkodokumentti]. Program and Abstracts of Poster Papers for the Conference, pidetty Kiova, Ukraina 25–26 Marraskuu, 2013. S. 101–102. [viitattu 16.4.2016]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/welding2013.pdf>

Tochin, V. V., Yushchenko, B. I., Rusinov, P. P., Demianenko, V. V. & Palamarchuk, T. E. 2001. Safety System of Electron Beam Tool. Teoksessa: Paton, B. E. (toimittaja) SPACE: Technologies, Materials, Structures. London, UK: Taylor & Francis, 2003. S. 152–154.

Vasenin, Yu. L., Zagrebelny, A. A., Zelnichenko, A. T., Krivtsun, I. V. & Shulym, V. F. 2001. Modelling of Thermal Process in Piping Repair in Space. The Paton Welding Journal, 2001: 4. S. 18–23.

Woodward, H. 1996. International Space Station Welding Will Be Out of This World. Welding Journal, 75: 3. S. 34–40.

Workman, G. L. & Kaukler, W. F. 1989. Laser Welding in Space [verkkodokumentti]. Texas, USA: lokakuu 1989 [viitattu 10.8.2016]. Tekninen muistio. Johnson Space Center. 94 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19910018227.pdf>

Zubchenko, Yu. V. & Ternovoj, E. G. 2015. Development of new emission systems of electron beam guns for process operations under space conditions. The Paton Welding Journal, 2015: 12. S. 34–3

Kysymykset lähetettiin jokaiselle vastaanottajalle englanniksi kirjoitettuna. Osa kysymyksistä kohdistettiin jokaiselle vastaanottajalle erikseen, kuten alla on esitetty.

1. Onko Yhdysvallat toteuttanut hitsauskokeita avaruudessa vuoden 1973 jälkeen?
(NASA ja AWS)

Onko (ESA/Roscosmos) tehnyt tutkimusta avaruudessa hitsaamiseen liittyen?

Onko Ukraina ollut mukana toteuttamassa hitsauskokeita avaruudessa 90-luvun jälkeen (yhteistyössä muiden maiden kanssa)? (PWI)

2. Onko (NASA/ESA/Roscosmos) suunnittelemassa hitsauskokeita avaruuteen tulevaisuudessa (onko tietoa muiden avaruusjärjestöjen tai yritysten aikeista)?
3. Kehittääkö (NASA/ESA/Roscosmos/Yhdysvallat/PWI) hitsausprosesseja avaruus käyttöön (onko tietoa muiden avaruusjärjestöjen tai yritysten aikeista)?
4. Onko (NASA/PWI) tehnyt yhteistyötä muiden maiden kanssa avaruudessa hitsaamiseen liittyen ISWE:n jälkeen?

Onko (ESA/Roscosmos) tehnyt yhteistyötä muiden maiden kanssa avaruudessa hitsaamiseen liittyen?

PROSESSILAITTEISTON RAKENNE

| Laitteiston rakenne, laitteiston käyttö | Prosessi laitteisto | | | | Avaruus- aluksen lento- järjestelmät | Maassa sijaitsevat laitteistot | |
|--|--|--|--|--|---|---|---|
| | Työyksikkö | | | Ohjaus- järjestelmä | | | |
| | Lämmitin | Apulaitteet ja kiinnitys | Mekaaninen laitteisto | | | | |
| Metallurgiset prosessit metalliseosten tuottamiseen ja yksittäisten kiteiden kasvattamiseen | Sähköinen vastus lämmitin. Elektronitykki. Keinotekoinen valonlähde. Laservalo lähde | Näytteen taltiointisäiliö. Pidike näytteelle tai taltiointisäiliölle | Paineistettu työkammio. Lämmittimen tai näytteen ohjauslaite. Näytteen vaihtolaite | Toissijainen tehonlähde (tehonmuunnin). Ohjausyksikön ohjelmointi. Prosessi parametrisanturit. Telemetry yksikkö. Ohjauspaneelin ohjelmointi | Värähtelyn- suojaus- alusta. Tyhjiösuoja. Vapaasti kelluva taso | Virransyöttö- järjestelmä. Lämmönsäätö- järjestelmä. Telemetry järjestelmä. Vakautus- järjestelmä. Työkammion tyhjiöimujärjestelmä | Vara prosessi- laitteisto. Ohjaus koe laitteisto. Harjoittelu mallit |
| Metallirakenteiden korjaus ja kokoonpano käyttäen hitsausta, leikkausta, juottamista ja päällystämistä höyrystämällä tyhjiössä | Elektronitykki | Kohdistuslaite. Upokas höyrystyneelle materiaalille. Ohjauslaite | Laite välineistön ja kaapeleiden korjaamiseen. Lisäaineen syöttölaite. Laite lämmittimen paikaltaan siirtämiseksi mekaanisesti | Toissijainen tehonlähde (tehonmuunnin). Ohjausyksikkö. Telemetry yksikkö. Käyttäjän paneeli. Ohjauspaneeli | Ankkurointi taso. Siirrettävä työpaikka | Sähköteho järjestelmä. Telemetry järjestelmä. Kosmonautin puku. Lennon ohjaaja. Ylimääräiset sähköliitännät aluksen pinnalla eri kohdissa | Vara prosessi- laitteisto. Prosessi- laitteiston nosteeton tila. Harjoittelu mallit |

(mukaillen Paton et al. 1999b, s. 93)