

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

LASER-HYBRIDIHITSAUSPROSESSIEN KÄYTTÖ SÄILIÖNVALMISTUKSESSA
USING HYBRID LASER-ARC WELDING IN VESSEL MANUFACTURING

Sami Pesonen 26.9.2013

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	3
2	HYBRIDIHITSAUS	4
2.1	Hybridihitsauksen periaate	4
2.2	Laserhybridihitsauksen parametrit	6
2.2.1	Materiaaliparametrit	7
2.2.2	Hybridiparametrit	7
2.3	Hybridihitsatun hitsin ominaisuudet	10
3	HYBRIDIHITSAUSPROSESSIT	12
3.1	Laser-MIG/MAG-hybridihitsaus	13
3.2	Laser-TIG-hybridihitsaus	13
3.3	Laser-plasma-hybridihitsaus	14
4	HYBRIDIHITSAUSPROSESSIEN KÄYTTÖ	15
4.1	Edut ja haitat	15
4.2	Hybridihitsauksen sovelluskohteita	17
5	SÄILIÖNVALMISTUS	20
5.1	Säiliöiden rakenne	20
5.2	Säiliöiden materiaalit	22
5.3	Säiliön hitsaus	23
5.3.1	Hitsauslaitteisto	23
5.3.2	Kappaleenkäsittelylaitteisto	26
6	HYBRIDIHITSAUKSEN SOVELTUVUUS SÄILIÖNHITSAUKSEEN	29
7	YHTEENVETO	35
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Hitsausmarkkinoiden kylläisyydestä ja teollisuuden matalasuhdanteesta huolimatta hitsausmarkkinoille ennustetaan kasvua. Uusia hitsausprosesseja ei ole todennäköisesti syntymässä lähivuosina, joten nykypäivänä keskitytään perinteisten hitsausmenetelmien kehittämiseen sekä tuottavuuden ja laadun parantamiseen. Yksi uusimmista kehitellyistä prosesseista on hybridihitsaus. Hybridihitsauksessa yhdistetään kaksi eri hitsausprosessia hyödyntäen kummankin prosessin parhaat puolet ja samalla lieventäen yksittäisten prosessien rajoituksia.

Säiliönvalmistuksessa hitsaus on erittäin oleellisessa asemassa ja vie suuren osan säiliön valmistusajasta. Säiliöiden hitsit ovat suhteellisen yksinkertaisia, suurimmaksi osaksi kehä- ja pituushitsejä sekä säiliöön liitettävien yhteiden hitsejä. Säiliöt ovat usein paineenalaisia ja vaurioituessaan painesäiliö voi aiheuttaa hengenvaaran, joten hitsien hyvä laatu on todella tärkeää. Paineen lisäksi käyttöolosuhteet ovat säiliöillä usein todella vaativat, joten säiliöiden materiaalipaksuudet voivat nousta suuriksi. Suuret ainepaksuudet vaativat perinteisillä hitsausmenetelmillä suuret railot, jotka lisäävät esivalmisteluja sekä varsinkin hitsaustyötä. Hybridihitsaus voisi soveltua hyvin säiliöiden hitsaukseen hyvän laatunsa, hitsausnopeutensa ja yksinkertaisten railomuotojensa vuoksi.

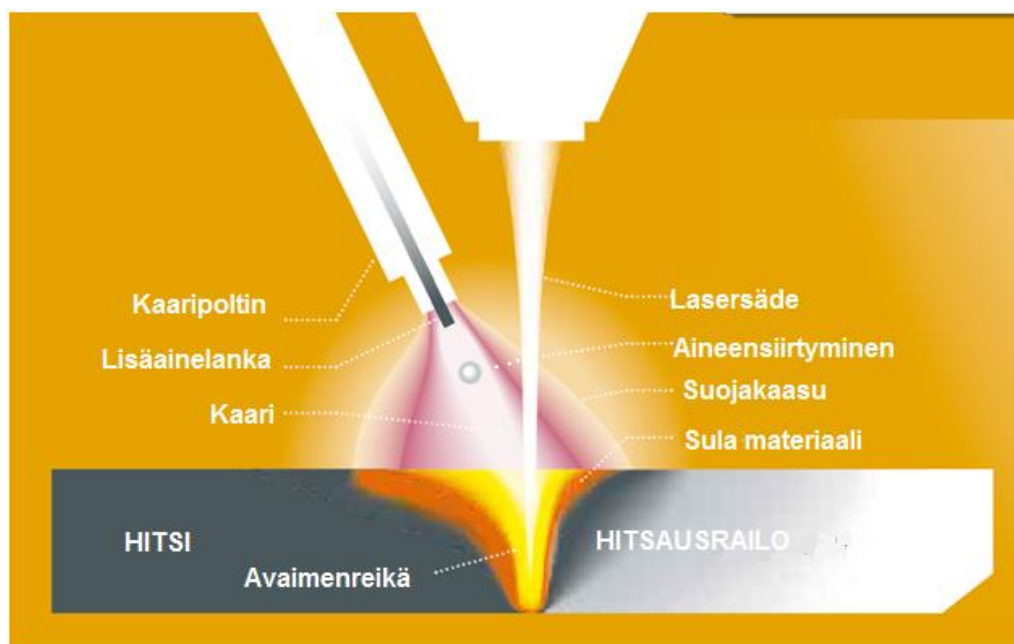
Tämän työn tavoitteena on esitellä hybridihitsausprosessien ja säiliönvalmistuksen perusteet kirjallisuusselvityksenä. Lisäksi tavoitteena on pohtimalla saada tuloksia siitä, miten hybridihitsaus soveltuu säiliönvalmistukseen, miten se vaikuttaisi säiliönvalmistuksen tuottavuuteen ja laatuun sekä esitellä vaadittava hybridihitsauslaitteisto. Työ on rajattu koskemaan teräksiä ja laser-kaari-hybridihitsausta. Kustannuslaskelmat on rajattu työstä pois. Aihealueita työssä ovat hybridihitsausprosessien perusteet, parametrit ja syntyvän hitsin ominaisuudet sekä hybridihitsauksen nykyiset käyttökohteet ja sen käytön tuomat edut. Työssä käydään myös läpi säiliöiden rakenteita, säiliöiden materiaaleja sekä perinteisesti säiliövalmistuksessa käytettyjä hitsauslaitteiston osia ja apulaitteita. Hybridihitsaus on aina automatisoitua, joten näitä apulaitteita tarvitaan myös hybridihitsauksen käytössä. Työn lopussa käsitellään hybridihitsauslaitteiston lisäksi hybridihitsauksen tuottavuutta ja etuja säiliönvalmistuksessa sekä sovelluskohteita.

2 HYBRIDIHITSAUS

Ensimmäisen kerran lasersäteen ja sähköisen kaaren yhdistävällä hybridihitsaussovellutuksella hitsattiin jo 1970-luvulla. Tällöin CO₂-laser yhdistettiin TIG-hitsaukseen. Sovellus teki mahdolliseksi suuremman määrän hitsausmahdollisuuksia kuin pelkkä laserhitsaus ja paransi syntyneen hitsin tunkeumaa, mutta hitsausnopeus oli silti yhä erittäin kilpailukykyinen. Keksimä patentoitiin, joten prosessin tutkimus lähes pysähtyi muutamaksi vuodeksi. 1990-luvulla prosessia alettiin jälleen tutkia ympäri maailmaa. Laser- ja kaarihitsauslaitteet olivat kehittyneet huomattavasti vuosikymmenien aikana, joten myös hybridiprosessin edut tulivat vielä selkeämmin esille. Hybridihitsaus oikein suoritettuna on aina tehokkaampi prosessi kuin sen yksittäisten hitsauskomponenttien yhteenlaskettu tehokkuus. (Fellman, 2008a, s. 35, Lappalainen, 2010, s. 25)

2.1 Hybridihitsauksen periaate

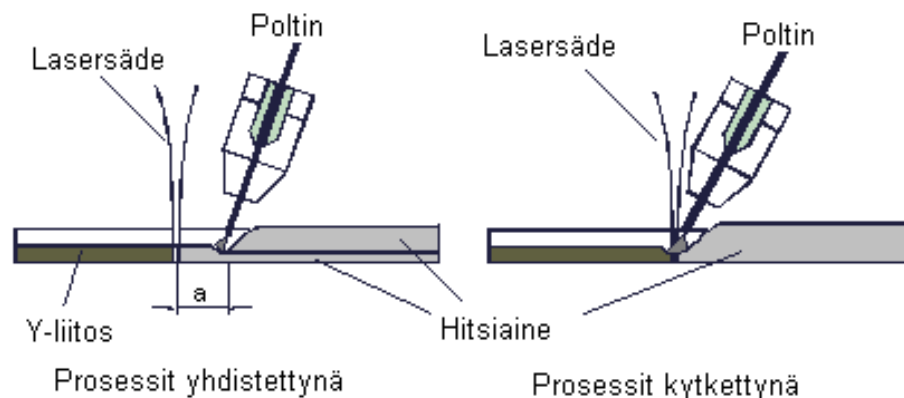
Hybridihitsaus on kahden eri hitsausprosessin yhdistelmä, jossa molemmista prosesseista hyödynnetään parhaat puolet ja vältetään yksittäisten prosessien rajoituksilta. Esimerkiksi laser-kaari-hybridihitsauksessa lasersäteellä saavutetaan syvä tunkeuma ja kaariprosessilla leveä hitsi. (Matilainen et al., 2011, s. 315) Kuvassa 1 on kaariavusteisen laserhybridiprosessin periaatekuva.



Kuva 1. Laser-kaari-hybridiprosessin periaatekuva (Riedel, 2008, s. 12, muokattu)

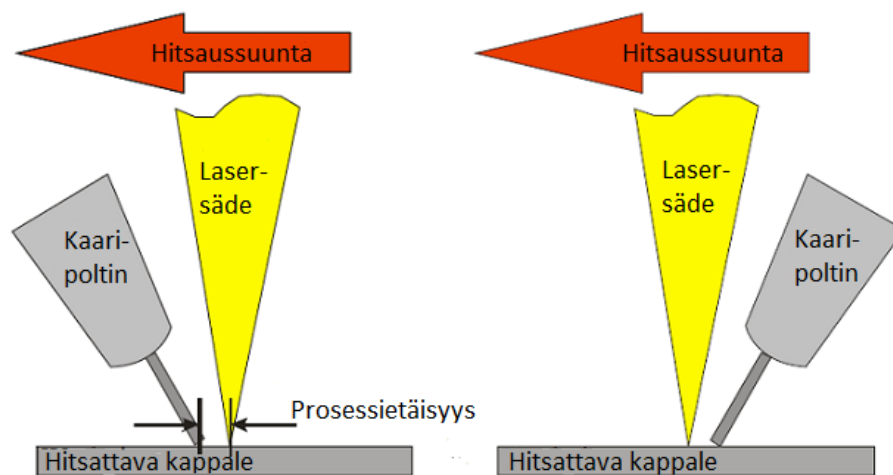
Yleisimmin hybridihitsauksessa yhdistetään laserhitsausprosessi ja jokin kaarihitsausprosessi, mutta esimerkiksi diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmää sekä laseria yhdistettynä kitkahitsaukseen pyörivällä työkalulla (FSW) on tutkittu (Lukkari & Pekkari, 2004, s. 39). Yleisesti hybridihitsauksella tarkoitetaan kuitenkin laserin ja kaariprosessin yhdistelmää ja tästä käytetään nimitystä ”hybrid laser-arc welding” (HLAW). Myös tässä työssä hybridihitsauksesta puhuttaessa tarkoitetaan kaariavusteista laserhitsausta. Hybridihitsaus luokitellaan enemmän energiaa tuovan prosessin mukaan eli hybridiprosessin merkintä aloitetaan prosessilla, josta tulee suurempi teho. Esimerkiksi laser-MAG-hybridihitsauksessa laserin teho on suurempi kuin MAG-kaaren teho, joten laser merkitään ensin. Tämä voidaan ilmaista myös sanoin käyttämällä muotoa kaariavusteinen laserhitsaus. (Fellman, 2008b, s. 12)

Kahden prosessin yhtäaikaiseen käyttöön on kaksi käyttötapaa, yhdistetty ja kytketty prosessi. Yhdistetyssä prosessissa lasersäde ja valoakaari toimivat ilman suoranaista keskinäistä yhteyttä. Prosessien välinen etäisyys on niin suuri, että ensimmäisen prosessin tuottama hitsi ehtii jähmettyä ennen kuin toinen prosessi ehtii sulattaa materiaalin uudelleen. Yhdistettyä prosessia kutsutaan myös tandemprosessiksi. Kytkettyä prosessia voidaan kutsua varsinaiseksi hybridihitsaukseksi. Kytketyssä prosessissa lasersäde ja valoakaari toimivat samassa sulassa, jolloin eri hitsausprosessit avustavat toisiaan kattavammin kuin yhdistetyssä prosessissa. Kytketyssä prosessissa prosessien välimatka on normaalisti 2–4 mm. (Matilainen et al., 2011, s. 316) Kuvassa 2 on esitetty yhdistetty ja kytketty prosessi.



Kuva 2. Yhdistetty ja kytketty prosessi (Fellman, 2002, s. 7)

Hybridihitsauksessa lasersäde kohdistetaan yleensä kohtisuoraan hitsattavaan kappaleeseen ja kaarienergia tuodaan tiettyssä kulmassa lähes samaan pisteeseen säteen kanssa. Säde tuodaan kohtisuorassa, koska kohtisuoruus vaikuttaa säteen tunkeumaan. Säteen tunkeuma huononee sitä mukaa, mitä enemmän säteen kulma kappaleeseen nähden poikkeaa kohtisuorasta. Kaaripolttimen kulman valintaan vaikuttavat muun muassa hitsattava materiaali, haluttu tunkeuma sekä laserpään ja hitsauspolttimen geometriat. (Jernström & Kujanpää, 2001, s. 5) Kaarienergia voidaan tuoda lasersäteeseen nähden joko säteen eteen tai taakse. Säde edellä hitsatessa polttin on työntävässä asennossa ja säde polttimen takana tarkoittaa vetävää poltinkulmaa kuvan 3 mukaisesti. Vetävää tai työntävää poltinkulmaa käytetään hitsattavan materiaalin mukaan. Yleensä terästen hitsauksessa käytetään vetävää poltinkulmaa ja alumiiniseoksilla työntävää poltinkulmaa. (Matilainen et al., 2011, s. 316)



Kuva 3. Vetävä (vas.) ja työntävä (oik.) poltinkulma (Fellman, 2008b, s. 56, muokattu)

2.2 Laserhybridihitsauksen parametrit

Hybridihitsauksessa on useita parametrejä, jotka on valittava oikein, jotta hitsaus onnistuu suoritusteknisesti sekä täyttää laadullisesti sille asetetut vaatimukset (Jernström et al., 2002, s. 35). Hybridihitsauksen parametrit voidaan jakaa hybridiparametreihin ja materiaaliparametreihin. Materiaaliparametreja ovat muun muassa materiaalin koostumus, aineenpaksuus, ilmarako, railo- ja liitosmuoto. Hybridiparametreja ovat kaariparametrit, laserparametrit ja yhdistelmäparametrit. (Fellman, 2002, s. 19)

2.2.1 Materiaaliparametrit

Laserhybridihitsauksessa hitsattavan kappaleen ominaisuuksilla on huomattava vaikutus hitsin lopputulokseen. Suuri vaikutus on esimerkiksi hitsattavien kappaleiden välisellä ilma-araolla. Valmiissa hitsissä ilma-araon muutokset huomaa lähinnä hitsin kuvun korkeuden vaihteluna. Juuren puolella ilma-araon muutokset näkyvät juuren leveyden vaihteluna, mutta juuren korkeuteen ilma-arako ei juuri vaikuta. Liian pieni langansyöttönopeus railon ilma-arakoon nähden voi aiheuttaa hitsiin reunahaavaa ja vajaata kupua. Ilma-araon kasvaessa railoon joudutaan syöttämään enemmän lisäainelankaa, joka voi myös aiheuttaa virheitä hitsiin. Hitsiluokkaan B hyväksyttävä hitsi on hitsattu CO₂-laser-MAG-hybridiprosessilla 8 mm:n ainepaksuiseen hiili-mangaani-teräkseen alle 0,9 mm:n ilma-araolla. Hitsi voidaan saada syntymään jopa 2 mm:n ilma-araolla ilman, että hitsi vajoaa täysin. Suuremmilla ainepaksuuksilla ilma-arakoa voidaan kasvattaa muuttamalla railomuoto I-railosta osaviistetyksi Y-railoksi. (Lappalainen, 2010, s. 39)

Hitsattavien levyjen keskinäistä asetusvirhettä hybridihitsaus ei juuri salli. Hitsattaessa ainepaksuudeltaan 16 mm olevaa terästä saa levyjen välinen asetusvirhe olla noin yhden millimetrin ja jo 2 mm:n asetusvirhe aiheuttaa juuren puolelle hitsin vajoamista. Lisäksi hitsattavien kappaleiden pinnalle leikkauksesta mahdollisesti syntynyt oksidikerros vaikuttaa hitsauksen onnistumiseen. Poistamaton oksidikerros aiheuttaa vajaata ja epäsäännöllistä hitsin muotoa, hitsausnopeuden laskemista ja huokoisuuden lisääntymistä. (Lappalainen, 2010, s. 39–40)

2.2.2 Hybridiparametrit

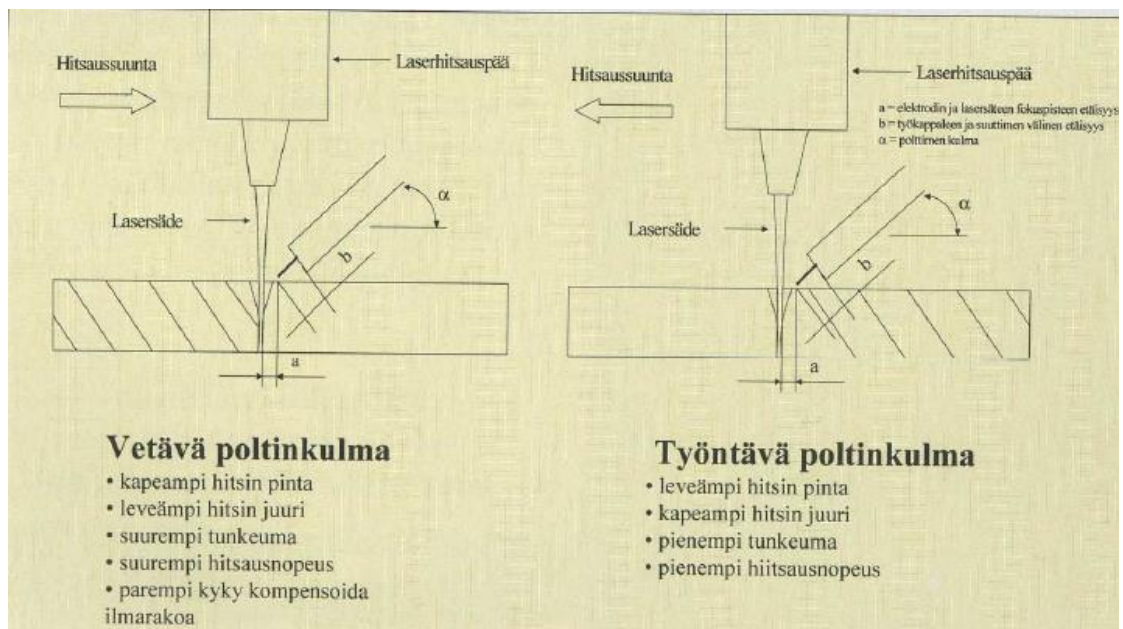
Hybridiparametrit voidaan jakaa laserparametreihin, kaariparametreihin ja yhdistelmäparametreihin. Tärkeimpiä hybridiparametreja ovat hitsausnopeus, laserteho työkappaleen pinnalla, langansyöttönopeus, kaarihitsauselektrodin ja lasersäteen fokuksipisteen välinen etäisyys, hitsauspolttimen asetuskulmat sekä suojakaasun koostumus. (Jernström et al., 2002, s. 35) Hitsin lopputulokseen vaikuttavia kaari- ja laserparametreja on taulukossa 1 ja yhdistelmäparametreja taulukon 1 jälkeen esitetyssä luettelossa.

Taulukko 1. Laser- ja kaariparametrit hybridihitsauksessa (Kah, 2011, s. 18)

Laserparametrit hybridihitsauksessa	Kaariparametrit laserhybridihitsauksessa
Laserteho	Hitsausvirta ja langansyöttönopeus
Hitsausnopeus	Kaarijännite
Aallonpituus	Hitsausnopeus
Säteen laatu	Suojakaasu ja sen virtausmäärä
Polttoväli	Suutinetäisyys ja vapaalangan pituus
Polttopisteen asema ja tulokulma	Lisäainelangan koostumus ja halkaisija
Säteen fokuointi ja fokuspisteen halkaisija	Kallistus- ja kiertymiskulmat
Pulssiparametrit	Pulssiparametrit

Yhdistelmäparametreja hybridihitsauksessa ovat:

- prosessien järjestys – Yksi keskeisimmistä parametreista hybridihitsauksessa on prosessijärjestys. Hitsaus kaari edellä tarkoittaa vetävää poltinkulmaa ja laser edellä työntävää. (Lappalainen, 2010, s. 35) Kuvassa 4 on tiettyjä etuja, joita saavutetaan eri prosessijärjestyksillä.



Kuva 4. Prosessien järjestyksen vaikutus hitsin syntyyn (Jernström et al., 2002, s. 35)

- hitsausnopeus – Tunkeuman syvyys kasvaa hitsausnopeuden laskiessa. Myös hitsin leveyttä kasvatettaessa on hitsausnopeutta laskettava. (Lappalainen, 2010, s. 35)

- asetuskulmat – Hitsauspäiden asetuskulmilla on suuri vaikutus syntyvän hitsin geometriaan ja hitsauksen tehokkuuteen. Perusaineen koostumus vaikuttaa suuresti kulmien valintaan. Hitsattavan kappaleen ja kaaripolttimen välinen kulma on yleensä 60–70°. Kallistuskulma vaikuttaa hitsin tunkeumaan niin, että suuremmalla kulmalla syntyy syvempi tunkeuma. (Jernström et al., 2002, s. 35–36)
- laserhybridihitsauksen kokonaisenergia – Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että suuremmalla kokonaisenergialla saadaan suurempi lämmöntuonti ja tuottavuus. Kokonaisenergian kasvaessa voidaan kasvattaa tunkeumaa tai hitsausnopeutta, mutta lämmöntuonnille voi olla myös materiaaliikohtaisia rajoituksia. Kokonaisenergiaa voidaan arvioida laskukaavalla:

$$E_{laserhybridi} = E_{kaari} + E_{laser} = \frac{U \times I \times 60}{v} + \frac{P_L \times 60}{v} \quad [\text{J/mm}], \quad (1)$$

jossa $E_{laserhybridi}$ on kokonaisenergia, E_{kaari} on kaarihitsauksen energia, E_{laser} on laserhitsauksen energia, U on kaarijännite, I on hitsausvirta, v on hitsausnopeus ja P_L on laserteho (Lappalainen, 2010, s. 36)

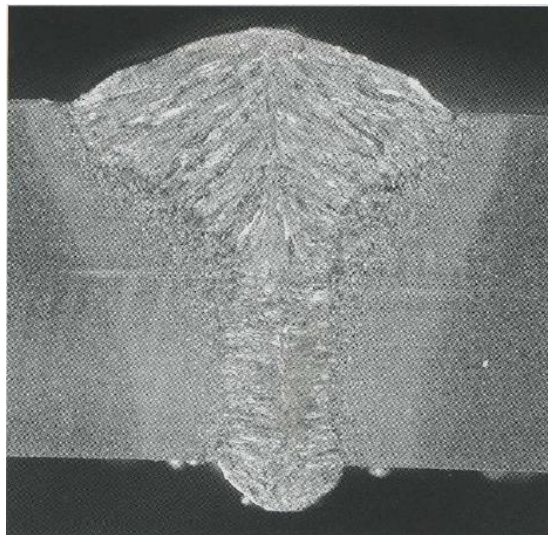
- prosessietäisyys – Lisäainelangan etäisyys lasersäteeseen voidaan valita materiaaliominaisuuksien perusteella ja niin, ettei lisäainelanka osu lasersäteeseen. Elektroodin optimaalinen etäisyys polttopisteeseen on terästä hitsatessa 2–4 mm ja alumiinia hitsatessa 1–2 mm. (Lappalainen, 2010, s. 37)
- suojakaasu – CO₂-laserhitsauksessa käytetään ns. plasmakontrollikaasua estämään hitsauksessa syntyvän haitallisen, lasersädettä absorboivan, plasmapilven muodostuminen. Plasmakontrollikaasu on tavallisesti Heliumia. Plasmakontrollikaasun käyttö ei kuitenkaan ole välttämätöntä, koska heliumia voidaan lisätä kaarihitsauksen suojakaasuun, jolloin kaasuntuonti on helpommin toteutettavissa. Heliumin optimimäärä suojakaasussa on 40–50 %, loppu suojakaasuseoksesta on argonia ja 1–2 % hiilidioksidia. Hiilidioksidin tehtävänä on stabiloida valokaarta ja pienentää hitsisulan pintajännityksiä. (Jernström et al., 2002, s. 36)

Hybridihitsauksen tutkimuksessa ja kehityksessä saavutetusta edistyksestä huolimatta kaikkia perusperiaatteita hybridihitsauksesta ei täysin vielä ymmärretä. Muun muassa lasersäteen ja hitsauskaaren vuorovaikutusta ja sen vaikutus hitsisulan muotoon ei ole täysin selvillä. Vajavaisen tiedon vuoksi on vaikeaa määrittää yksiselitteisiä ohjeita prosessiparametrien valintaan. (Lappalainen, 2010, s. 29–30)

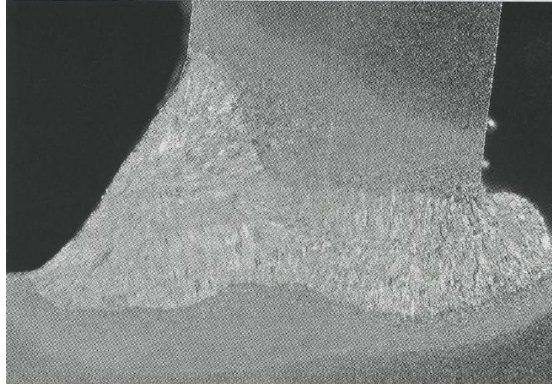
2.3 Hybridihitsatun hitsin ominaisuudet

Päittäisliitoksen hitsin muoto on tyypillisesti maljamainen, sillä kaariprosessi vaikuttaa hitsin yläosaan leventäen tunkeumaa. Laserprosessi saa aikaan tunkeuman syvyyden, joten hitsin alaosa on syvä ja kapea. Tunkeumaprofiili on pienaliitoksessa hyvin samankaltainen kuin päittäisliitoksessa. Pienaliitoksen hybridihitsaus on kuitenkin haastavampaa kuin päittäisliitoksen hitsaus. Perinteisillä hitsausmenetelmillä tietyn paksuusrajan jälkeen joudutaan hitsaamaan kappaleen molemmilta puolilta läpätunkeuman aikaansaamiseksi, mutta hybridihitsauksella saadaan läpätunkeuma yhdellä palolla suurillakin ainepaksuuksilla niin päittäis- kuin pienaliitoksissakin. (Jernström et al., 2002, s. 38)

Kuvissa 5 ja 6 on makrokuvat hybridihitsatuista päittäis- sekä pienaliitoksista.



Kuva 5. 6 mm paksun RAEX 275 teräksen päittäisliitos (Jernström et al., 2002, s. 37)



Kuva 6. 6 mm RAEX 275 teräksen pienaliitos yhdellä palolla (Jernström et al., 2002, s.37)

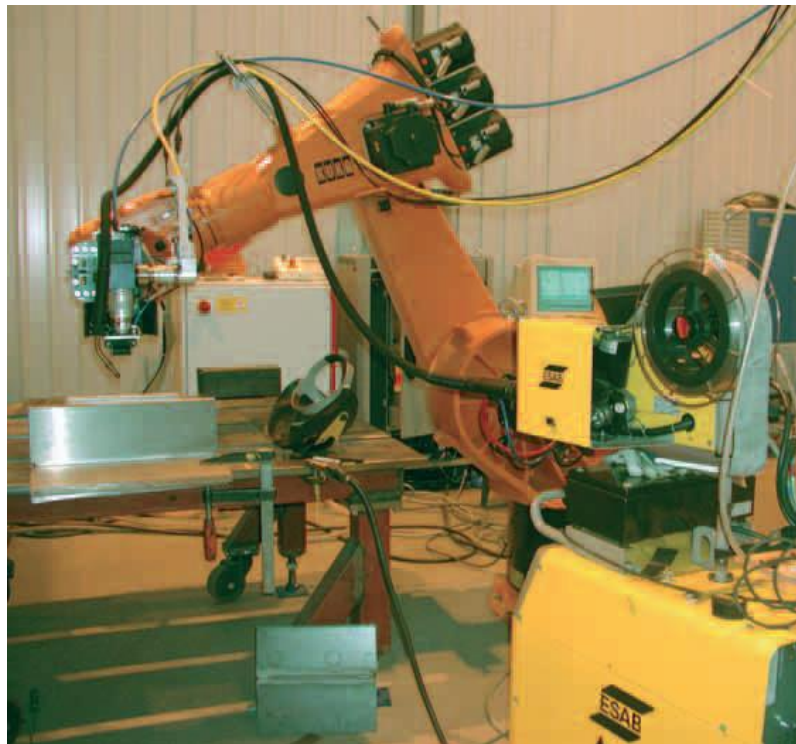
Tiettyjen materiaalien, kuten lujien terästen laserhitsauksessa on haasteena muutosvyöhykkeen karkeneminen nopeasta jäähtymisestä johtuen. Karkeneminen voi aiheuttaa standardien sallimien rajojen ylittymisen hitsien kovuudessa. Hybridihitsauksessa lämmöntuonti on laserhitsausta suurempi, joten myös jäähtymisaika on pidempi. Pidemmän jäähtymisajan vuoksi karkeneminen ei ole niin suuri ongelma hybridihitsauksessa. (Jernström et al., 2002, s. 38) Karkenemiseen ja kovuuteen voidaan vaikuttaa myös parametreja varioimalla ja valitsemalla sopiva lisäainelanka. Lisäksi hybridihitsatun hitsin iskutkeys on laserhittiin verrattuna korkeampi, joten hitsit ovat todella hyvälaatuisia. (Lappalainen, 2010, s. 41)

Useiden eri parametrien vuoksi parametreja voidaan yhdistellä monella tapaa. Useilla eri parametreilla pystytään vaikuttamaan syntyvän hitsin muotoon ja ulkonäköön, joten muodot voivat vaihdella huomattavasti. Tämä monimutkaistaa parametrien säätöä. (Matilainen et al., 2011, s. 316). Parametrien väärä valinta voi aiheuttaa hitsausvirheitä. Tyypillisiä hitsausvirheitä ovat vajaa hitsin pinta, reunahaava, roiskeisuus ja huokoisuus. Hybridihitsauksessa huokosia ei kuitenkaan synny yhtä herkästi kuin laserhitsauksessa, sillä epäpuhtaudet ehtivät pois sulasta pidemmän jäähtymisaikan aikana. Lisäksi hitsausvirheen voi aiheuttaa hitsauspään väärä kohdistus, joka aiheuttaa liitosvirheen. (Jernström et al., 2002, s. 39)

Hybridihitsaukselle on julkaistu kaksi ISO-standardia: ISO 15609-6:2013 “Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Part 6: Laser-arc hybrid welding” ja ISO 12932:2013 “Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys. Quality levels for imperfections”. Standardit helpottavat mm. hybridihitsatun hitsin laadun arvioimista ja hitsausohjeiden tekoa.

3 HYBRIDIHITSAUSPROSESSIT

Hybridihitsaus on usein automatisoitu robotin avulla ja railon seurannan käyttö on suositeltavaa. Kuvassa 7 on osa laser-MIG/MAG-hybridihitsauslaitteistosta ja hitsaukseen käytetty hitsausrobotti.



Kuva 7. Laser-MIG/MAG-hybridihitsauslaitteistoa (Lukkari & Pekkari, 2004, s. 38)

Hybridihitsauksessa yleisimmin käytetyt laserit ovat CO₂-, Nd:YAG-, kiekko-, diodi- ja kuitulasereita. Hybridihitsauksessa käytettyjen lasereiden kehitys on ollut samansuuntaista yksittäisen laserhitsauksen kehityksen kanssa. Kuten laserhitsauksessakin, myös hybridihitsauksessa CO₂-laserit olivat aluksi käytetyimpiä. Nd:YAG-lasereiden tehojen kasvaessa sen käyttö alkoi kuitenkin lisääntyä mm. kuituoptiikan joustavuuden vuoksi. Uusimpina käyttölaitteina ja tutkimuskohteina ovat olleet kiekko-, diodi- ja kuitulasarit hyvän hyötysuhteensa vuoksi. Erityisesti kuitulasarit ovat vakiinnuttaneet paikkansa ja niitä käytetään nykyään paljon. (Fellman, 2008a, s. 41; Olsen, 2009, s.70)

3.1 Laser-MIG/MAG-hybridihitsaus

Laser-MIG/MAG-hitsauksessa on lievät railotoleranssivaatimukset, mikä helpottaa railonvalmistusta. Lisäainelanka tuodaan sulaan hallitusti kaarihitsausprossin kautta, jolloin lasersäde ei pääse menemään hitsattavien kappaleiden välistä. Lisäaineenkäytöllä on vaikutusta myös syntyvän hitsin mikrorakenteeseen. Hybridihitsauksella on MIG/MAG-hitsaukseen verrattuna pienempi lämmöntuonti. Lisäksi lasersäteen tuoman suuremman tehotiheyden ansiosta hitsin tunkeuma kasvaa ja hitsausnopeutta pystytään nostamaan. MIG/MAG-hitsauksen parametrit valitaan yleensä niin, että toimitaan kuumakaarialueella. Kuumakaarialueella lisäaineen siirtyminen tapahtuu suihkumaisesti, jolloin roiskeita ei juuri synny. (Matilainen et al., 2011, s. 316)

Hiilidioksidilaserin ja MIG/MAG-hitsauksen hybridihitsauksessa hiilidioksidilaserin aikaansaama plasmopilvi helpottaa valokaaren syttymistä ja kuristaa valokaarta. Plasmopilven kuristavasta vaikutuksesta johtuen valokaaresta tulee stabiilimpi, kuristus keskittää valokaarta ja energiatiheys kasvaa. Plasmopilven vuoksi valokaaren tunkeuma ja prosessin hitsausnopeus kasvavat, mutta laserin tunkeuma heikkenee, koska CO₂-laserin säde absorboituu plasmaan. Lasertyyppin valinnalla voidaan vaikuttaa plasmopilven läpäisykykyyn. (Matilainen et al., 2011, s. 316; Fellman, 2002, s. 7)

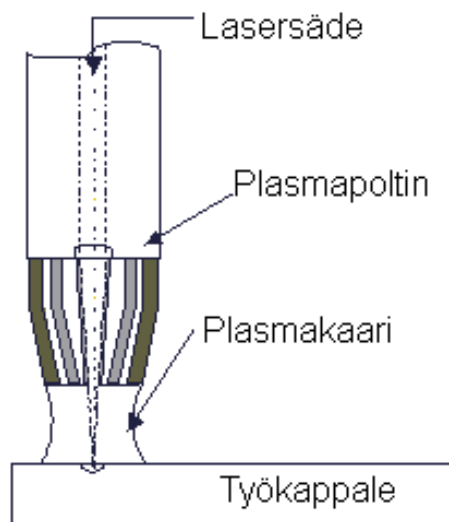
3.2 Laser-TIG-hybridihitsaus

Laser-TIG-hybridihitsauksessa TIG-poltin asennetaan joko lasersäteen eteen tai taakse kuten laser-MIG/MAG-hybridihitsauksessa. Lisäainetta laser-TIG-hybridihitsauksessa ei tavallisesti tuoda, mutta lisäaineen tuonti on mahdollista. (Matilainen et al., 2011, s. 316)

Prosessin energiatiheys on huomattavasti suurempi kuin pelkässä TIG-hitsauksessa, minkä vuoksi hitsin tunkeuma kasvaa ja hitsausnopeutta pystytään nostamaan, mutta lämmöntuonti on merkittävästi perinteistä TIG-hitsausta pienempi. Laser-TIG-hybridimenetelmällä on laser-MIG/MAG-hybridimenetelmää pienempi lämmöntuonti, joten se soveltuu hyvin ohuiden aineenpaksuuksien hitsaamiseen. Erityisesti putkien pituus- ja jatkohitsejä valmistavat yritykset ovat kehittäneet laserin ja TIG-hitsauksen yhdistelmiä. (Matilainen et al., 2011, s. 316; Fellman, 2002, s. 10)

3.3 Laser-plasma-hybridihitsaus

Laser-plasma-hybridihitsauksessa plasmapoltin voidaan asettaa kolmella eri tavalla. Poltin voi olla lasersäteen edessä, takana tai lasersäde voidaan kohdistaa plasmakaaren keskeltä, kuten kuvassa 7. Prosessiin ei tuoda lisäainetta. Plasmakaaren tarkoituksena on tuoda lisäenergiaa, mutta lämmöntuontia ei oikeastaan pyritä nostamaan. Plasmakaari lämmittää kappaletta lasersäteen edellä ja takana pidentäen liitoksen jäähtymisaikaa, jolloin hitsiin ei pääse syntymään kovia rakenteita eikä jäännösjännityksiä. Laser-plasma-hybridihitsausprosessi on herättänyt kiinnostusta varsinkin autoteollisuudessa. (Matilainen et al., 2011, s. 316–317; Fellman, 2002, s. 10)



Kuva 8. Laser-plasma-hybridiprosessi, jossa lasersäde kohdistetaan plasmakaaren keskeltä (Fellman, 2002, s. 11)

4 HYBRIDIHITSAUSPROSESSIEN KÄYTTÖ

Laserhybridihitsausta on tutkittu usean vuoden ajan eri tutkimuslaitoksissa, mutta prosessissa on edelleen useita asioita, joita ei ymmärretä tai pystytä selittämään. Ongelmana on ollut se, että prosessia ei nähdä kirkkaan valokaaren ja plasman läpi eikä kaikkia prosessissa tapahtuvia fysikaalisia asioita ole mitattu. Prosessin perusymmärrys on vähäistä, koska tutkimus on pääasiassa painottunut sovelluspuolelle. Perusymmärrys on kuitenkin tärkeää, jotta prosessin tuomat edut voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti ja helpottaa parametrisointia. Laserhybridihitsauksessa on omat ongelmansa, mutta prosessia ei kuitenkaan ole mahdoton ottaa käyttöön. Sitä onkin käytetty tuotannossa menestyksekkäästi jo yli 10 vuoden ajan. (Fellman, 2008a, s. 36–40)

4.1 Edut ja haitat

Laserhybridihitsauksella saavutetaan monia etuja verrattuna kaari- ja laserhitsaukseen, mutta myös haittoja ja rajoituksia on huomattavasti. Valittujen hitsausprosessien yhdistelmä vaikuttaa menetelmän luonteeseen ja saavutettaviin etuihin. (Matilainen et al., 2011, s. 317) Hybridihitsauksen etuja verrattuna perinteisiin laser- ja kaarihitsausmenetelmiin on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Rajoituksia ja haittoja hybridihitsauksessa ovat (Lappalainen, 2010, s. 29; Fellman, 2002, s. 18):

- investointikustannukset ovat kaarihitsauslaitteita huomattavasti suuremmat
- ilma- ja tila- toleranssit ovat hybridihitsauksessa kaarihitsausta tiukemmat
- hitsattavaa on oltava riittävästi, jotta prosessi on taloudellisesti kannattava
- hitsauskokemukset laboratorioiden ulkopuolelta ovat vähäiset
- hitsausparametrien suuri määrä vaikeuttaa käyttöä
- laserhitsauksen käyttöönotto vaatii enemmän turvatoimia ja laaja-alaisemman operaattoreiden koulutuksen
- hitsauspäässä on kahden eri prosessin hitsauspää, joten sen koko kasvaa ja luoksepäästävyys heikkenee

Taulukko 2. Laser-kaari – hybridihitsauksen etuja verrattuna laserhitsaukseen (Matilainen et al., 2011, s. 317)

Hybridihitsauksen edut verrattuna laserhitsaukseen	Ominaisuudet
Suurempi hitsausnopeus	– Suurempi energiatiheys ja lämmöntuonti mahdollistavat hitsausnopeuden nostamisen
Suurempi tunkeuma ja leveämpi juuri	– Lasersäteen aikaansaama plasmapiilvi kuristaa valokaarta, jolloin tehotiheys kasvaa
Stabiilimpi hitsausprosessi	– Lasersäteen aikaansaama plasmapiilven kuristus myös vakauttaa valokaarta
Paremmat hitsin mekaaniset ominaisuudet	– Hitaampi jäähtyminen aiheuttaa hitsin vähäisemmän karkenemisen ja kovuuden – Hallitulla lisäaineentuonnilla voidaan vaikuttaa hitsin mikrorakenteeseen
Väljemmät railotoleranssit	– Kaarihitsausprosessi aikaansaa laajemman sulan, johon lasersäde absorboituu
Lisäaineen käyttö	– Hybridihitsauksessa lisäaineen käyttö on suoritusteknisesti helpompaa kuin lisäaineellisessa laserhitsauksessa
Eripaksuisten materiaalien liittäminen on helpompaa	– Vajaan hitsin ja jyrkän liittymän vaara on pienempi
Mahdollisuus hitsata pienemmällä laserteholla	– Laserin tehontarve hybridihitsauksessa on pelkkää laserhitsausta pienempi samalla hitsausnopeudella ja tunkeumalla

Taulukko 3. Kaariavusteisen laserhitsauksen etuja verrattuna kaarihitsaukseen (Matilainen et al., 2011, s. 317)

Hybridihitsauksen edut verrattuna kaarihitsaukseen	Ominaisuudet
Suurempi hitsausnopeus	– Suurempi energiatiheys
Suurempi tunkeuma	– Laserhitsaus mahdollistaa kaarihitsausmenetelmiä suuremman tunkeuman
Hyvin paksujen levyjen hitsaus on mahdollista yhdellä palolla	– Mahdollisuus käyttää kapeaa railoa
Lisäaineen tarve vähenee	– Täytettävä railo on pienempi ja kapeampi
Pienemmät muodonmuutokset ja jäännösjäännitykset	– Pienempi lämmötuoni
Paremmat hitsin mekaaniset ominaisuudet	– Hitaampi jäähtyminen aiheuttaa hitsin vähäisemmän karkenemisen ja kovuuden – Hallitulla lisäaineentuonnilla voidaan vaikuttaa hitsin mikrorakenteeseen
Hitsaus voidaan suorittaa ilman juuritukea	– Syntyvä juuri on juoheva ja hyvin perusaineeseen liittyvä

4.2 Hybridihitsauksen sovelluskohteita

Laserhybridihitsausta on käytetty tuotannossa jo yli 10 vuoden ajan. Se on yksi harvoista prosesseista, joiden käytölle on ennustettu kasvua lähivuosien aikana (Lukkari & Pekkari, 2004, s. 39). Tunnetuin soveltaja on telakkateollisuus, jossa Meyer Werftillä Saksassa prosessi on ollut käytössä jo vuodesta 2001. STX Finlandilla (silloinen Aker Yards) Turussa hybridihitsaus otettiin käyttöön vuonna 2006. (Fellman, 2008a, s. 40–41)

Laivanrakennuksessa hybridihitsausta käytetään levyjakanoiden päittäisliitosten hitsaukseen ja jäykkääjien pienahitsaukseen (Lukkari & Pekkari, 2004, s.40). Laivanrakennuksessa hitsauksen aikana syntyvien muodonmuutosten oikomiset ja muodonmuutosten aiheuttamat sovitusongelmat kokoonpanovaiheessa aiheuttavat huomattavan määrän korjaustöitä ja -kuluja. Perinteisten kaarihitsausmenetelmien suuri lämmötuonti aiheuttaa juuri kyseisiä muodonmuutoksia kappaleille. Pienempi

lämmöntuonti laser-kaari-hybridihitsauksessa vähentää selkeästi näiden muodonmuutosten syntymistä ja täten oikaisutöitä. (Fellman, 2008a, s. 40; Jernström et al., 2002, s. 40) Kuvassa 8 on kaksi kansirakennetta, joista toinen on hitsattu perinteisin menetelmin ja toinen laser-MAG-hybridihitsaamalla. Erot muodonmuutoksissa on selvästi havaittavissa. Hybridihitsauksen hyötyjä ovat myös suurempi hitsausnopeus ja helposti saavutettava syvä tunkeuma, jotka lyhentävät hitsausaikaa. Meyer Werfillä hybridihitsauksen käyttöönotto on puolittanut rungon valmistusajan. (Fellman, 2008a, s. 40–41)



Kuva 9. Vasemmalla hybridihitsattu laivan kansirakenne ja oikealla kaarihitsattu kansirakenne (Jernström et al., 2002, s. 40)

Autoteollisuudessa laserhybridihitsausta käytetään erityisesti korin sekä räätälöityjen levyjen hitsauksessa. Auton korin ja eri osien valmistuksessa on usean vuoden ajan käytetty laserhitsausta. Hybridihitsaukseen siirtymisen suurimpana syynä on ollut helpompi lisäaineen tuonti perinteiseen laserhitsaukseen verrattuna. Lisäaineen tuonnilla kompensoidaan sinkittyjen levyjen hitsauksessa sinkin höyrystymisestä johtuvien roiskeiden aiheuttamat vajaukset hitsissä. Lisäaineen käytöllä saadaan auton korin eri materiaalien liittämässä vaikutettua seostukseen ja mikrorakenteeseen. Eripaksuisten levyjen hitsauksessa lisäaineella pystytään juohentamaan hitsin ja levyjen välistä liittymistä. (Fellman, 2008a, s. 40) Esimerkiksi Volkswagenin Phaeton-mallin ovesa on 7 MAG-hitsiä, 11 laserhitsiä ja 48 hybridihitsiä. Hybridihitsausta ei käytetä kaikissa hitseissä, koska joihinkin osiin soveltuu paremmin MAG- tai laserhitsaus. Muita hybridihitsausta käyttäviä autonvalmistajia ovat Audi ja GM. (Olsen, 2009, s. 195)

Muita sovelluskohteita ovat putkien ja säiliöiden pituus- ja jatkohitsaus sekä kuorma-autolavojen ja vaihtolavojen hitsaus. Lavojen vaatimat lujuus- ja kestävyysvaatimukset saavutetaan, kun yhdistetään eri teräslajeja ja eri materiaalipaksuuksia. Erilaiset materiaaliyhdistelmät mahdollistavat uudet tehokkaammat rakenneratkaisut, jolloin kulutusta kestävien ja erikoislujien terästen ominaisuudet ovat samanaikaisesti hyödynnettävissä. Eri materiaalien ominaisuuksien ansiosta lavat kestävät paremmin kulutusta, ovat pitkäikäisempiä ja ne voidaan suunnitella uudella tavalla. (Ruukki, 2008, s. 7)

5 SÄILIÖNVALMISTUS

Säiliöissä säilytetään ulkomaailmasta erillään mitä tahansa nestemäistä, kaasumaista tai kiinteää ainetta. Säiliön muoto, tilavuus, materiaali, sisäinen paine ja käytännössä kaikki ominaisuudet riippuvat käyttökohteesta. Säiliöt muodostuvat normaalisti erimuotoisista vaipoista ja säiliönpäädystä sekä säiliöihin liitettävistä erilaisista yhteistä. Säiliöt voidaan valmistaa konepajoilla ja kuljettaa valmiina käyttöpaikalle tai kuljettaa lohkoina ja hitsata asennuspaikalla. Kuvassa 9 on esitetty erilaisia säiliöitä.



Kuva 10. Kuljetussäiliö ja sen sisustaa (vas. ylh.), painesäiliö (vas. alh.) ja asennuspaikalla valmistettava massatorni. (Fabri-tek engineers, 2013; Admorcomposites, 2013; Terästorni, 2013)

5.1 Säiliöiden rakenne

Säiliön rakenne ja muodot riippuvat säiliön käyttökohteesta. Säiliöitä on muun muassa pyöreitä, lieriömäisiä ja kuutiomaisia, joista lieriömäiset ovat yleisimpiä. Säiliöitä voidaan säilyttää vaaka- tai pystyasennossa, sisä- tai ulkotiloissa ja maan pinnalla tai maan alla.

Lieriömäiset säiliöt koostuvat vaipasta ja lievästi muovatuista päädystä sekä varusteluosista. Lieriömäisissä säiliöissä pituuden suhde halkaisijaan on suuri. Säiliön vaippa valmistetaan taivutetuista/mankeloiduista levyistä ja päädyt valmistetaan esimerkiksi syvävetämällä, painosorvaamalla tai kalottipuristamalla (Ketola, 2001, s. 5). Säiliön

vaippa koostuu yhdestä tai useammasta pyöristetystä levystä, joiden päädyt hitsataan yhteen päittäisliitoksina. Näitä hitsejä kutsutaan pituushitseiksi. Säiliö koostuu usein useista vaippasegmenteistä, jotka hitsataan yhteen kehähitsein/jatkohitsein. Myös säiliön päädyt hitsataan vaippaan kehähitsein/jatkohitsein. Säiliön sisällä voi olla erillisiä kammioita, jotka voivat sisältää eri aineita. Kammioiden väliseinät ja kuljetussäiliöissä olevat loiskelevyt hitsataan pienaliitoksina säiliöiden sisälle. Lisäksi säiliöihin kuuluu varusteluhitsejä, joilla tarkoitetaan erilaisten yhteiden, kiinnittimien, luukkujen ym. hitsaamista. Säiliöiden materiaalipaksuudet riippuvat käyttökohteen aiheuttamista käyttöolosuhteista, kuten paineesta, lämpötilasta ja korroosio-olosuhteista. Materiaalipaksuudet ovat yleensä vaativimpia painelaitteita, kuten reaktoreita lukuun ottamatta muutamista millimetreistä muutamaan kymmeneen millimetriin. Näille materiaalipaksuuksille soveltuvat useat hitsausprosessit hybridihitsaus mukaan lukien.

Käytännössä säiliöt ovat usein paineenalaisia, jolloin niitä kutsutaan painesäiliöiksi ja ne kuuluvat painelaitteisiin. Painesäiliössä säilytetään nesteitä tai kaasuja suuremmassa paineessa kuin ympäristön paine. Painesäiliöitä käytetään erilaisissa sovelluksissa teollisuudessa ja yksityisellä sektorilla. Painesäiliöitä ovat muun muassa kaasupullot ja -säiliöt, oluttynnyrit, painevesisäiliöt ja ydinvoimalaitosten painesäiliöt. Painesäiliöiden valmistukseen ja käyttöön liittyviä säädöksiä, asetuksia ja lakeja on useita. Tällaisia ovat muun muassa painelaitedirektiivi (97/23/EY), painelaitelaki (869/1999), kauppa- ja teollisuusministeriön päätös yksinkertaisista painesäiliöistä (917/1999), useat muut KTM:n päätökset sekä erilaiset turvatekniikan keskuksen (TUKES) ohjeet ja oppaat. Lisäksi eri standardit, kuten SFS-EN 286 "Sarjavalmistetut säiliöt" ja SFS-EN 13345 "Lämmittämättömät painesäiliöt" auttavat helpottamaan suunnittelijoita, valmistajia, haltijoita ja käyttäjiä työssään. (Heikkilä & Huhdankoski, 1997, s. 7)

Painelaitteita saa valmistaa yritys, joka asiantuntevalla henkilöstöllä, asianmukaisissa tiloissa ja asianmukaisilla välineillä valmistaa painelaitteita ja jotka myös tarkastuslaitos on todennut riittäviksi (Heikkilä & Huhdankoski, 1997, s. 10) Näin ollen hybridihitsauksen käyttöönottan painelaittevalmistajan on tarkastuslaitoksen kanssa todettava tuotantonsa painelaitteiden valmistukseen soveltuvaksi. Lisäksi hybridihitsauksen avulla painelaitteita valmistavan yrityksen on suoritettava menetelmäkokeet tuotantonsa edellyttämille käyttöalueille, jotta painesäiliöitä ja sen osien liitoksia saadaan hitsata (SFS-EN 13445-4. s. 30).

Myös perinteisiä hitsausmenetelmiä käyttävien painelaittevalmistajien on suoritettava menetelmäkokeet. Menetelmäkokeiden avulla painelaitteiden hitsaukselle saadaan tuotettua hitsausohjeet. Olemassa olevat hitsausohjeet eivät ole voimassa, jos tuotantoon otetaan uusia materiaaleja, ainepaksuuksia tai hitsausprosesseja. Tällöin suoritetaan menetelmäkoe pWPS:n mukaan ja hitsatulle koelevylle suoritetaan silmämääräinen tarkastus, radiografinen- /ultraäänitarkastus, vetokokeet, taivutuskokeet, makrohietutkimus sekä isku- ja kovuuskokeet. Jos tulokset täyttävät vaatimukset ja ne hyväksytään, niin kokeen pohjalta laaditaan lopullinen WPS. (Lukkari, 2002, s. 58)

5.2 Säiliöiden materiaalit

Kuten säiliön rakenne, niin myös materiaalinvalinta riippuu täysin käyttökohteesta. Materiaalinvalinta on säiliöiden suunnittelun tärkeimpiä ja keskeisimpiä vaiheita. Säiliöt altistuvat suurille kuormille sisäisen, ulkoisen ja staattisen paineen vuoksi. Lisäksi säiliöitä käytetään usein erisuuruisissa lämpötiloissa ja ne voivat sisältää syövyttäviä tai muita korrodoivia aineita. Näistä aiheutuu tarkkoja vaatimuksia niin materiaalille kuin materiaalipaksuuksillekin. Painelaitedirektiivin 97/23/EY mukaan materiaalien on oltava soveltuvia ennakoitavissa oleviin käyttöolosuhteisiin. Materiaalien on erityisesti sovelluttava lujuuden ja sitkeyden osalta käyttökohteeseen. Direktiivin mukaan rakenneaineet on lisäksi valittava huolella haurasmurtuman estämiseksi, kemiallisesti riittävän kestäviksi, suunniteltuihin valmistusmenetelmiin soveltuviksi ja ne eivät saa olla erityisen herkkiä vanhenemiselle. (Heikkilä & Huhdankoski, 1997, s. 23–26; Painelaitedirektiivi, 1997, s. 20–21)

Materiaalinvalinta perustuu usein kokemukseen. Käyttöolosuhteiden salliessa valitaan edullisimmat sopivat materiaalit, joka yleensä tarkoittaa hiiliteräksen käyttöä. Usein kuitenkin vaaditaan suurta lujuutta, syöpymiskestävyyttä, viranomais määräyksistä saattaa tulla rajoituksia esimerkiksi seinämäpaksuuden suhteen ja valmistuskustannuksetkin on otettava huomioon. Tämän vuoksi materiaalinvalinta voikin muodostua hankalaksi ja eri materiaalien ominaisuudet on tunnettava käyttöolosuhteissa parhaimman ja turvallisimman päätöksen tekemiseksi. Säiliön materiaalina voi olla rauta, teräs tai ei-rautametallit, kuten alumiini, kupari, titaani tai muovi. Käytetyimpiä rakennusaineita ovat seostamattomat, niukkaseosteiset ja ruostumattomat teräkset. (Heikkilä & Huhdankoski, 1997, s. 23) Säiliöt voidaan myös pinnoittaa niihin kohdistuvien kemiallisten olosuhteiden kestämiseksi.

Materiaalin tärkeyttä kuvaa se, että painesäiliöön valittu materiaali dokumentoidaan aineostodistuksilla ja sulatusnumeroilla mahdollista myöhempää todentamista ja jäljittämistä varten. Standardissa SFS-EN 13345-4 sanotaan: ”Säiliön valmistajalla on oltava ja hänen tulee ylläpitää valmistuksessa käytettävien materiaalien tunnistusjärjestelmä niin, että painekuormituksen alaisten ja niihin pysyvästi hitsattujen materiaalien alkuperä voidaan valmiissa työssä tunnistaa. Tämä koskee myös hitsauslisäaineita.”

5.3 Säiliön hitsaus

Säiliöiden valmistuksessa on käytössä erilaisia hitsausmenetelmiä perinteisistä puikko- ja MIG/MAG-hitsauksista uusiin menetelmiin kuten laserhybridihitsaukseen. Tyypillisimpiä käytössä olevia hitsausprosesseja ovat puikko-, TIG-, MIG/MAG- ja jauhekaarihitsaus. Säiliöiden ja erityisesti paineenalaisten säiliöiden hitseillä on kovat laatuvaatimukset ja esimerkiksi painesäiliöiden on oltava läpihitsattuja ja pätevoitettyjen hitsaajien hitsaamia. Nykypäivänä laadun lisäksi myös tuottavuudella ja taloudellisuudella on suuri merkitys. Mekanisointi/automatisointi oikein toteutettuna lisää tuottavuutta ja taloudellisuutta sekä helpottaa vaadittujen laatuvaatimusten ja hyvän tasalaadun tuottamista. Mekanisointi/automatisointi saadaan toteutettua kappaleenkäsittelyllä ja hitsauslaitteiston mekanisoinnilla/automatisoinnilla.

5.3.1 Hitsauslaitteisto

Käsinhitsaus ja mekanisoitu hitsaus ovat yleisesti käytössä säiliöiden valmistuksessa, mutta automatisointi on myös yleistynyt säiliövalmistajien keskuudessa. Hitsauslaitteisto koostuu aina peruskomponenteista, joita kaikilla prosesseilla on hitsausvirtalähde, kaapelit, kuten maadoitus- ja hitsausvirtakaapelit sekä hitsauspää, hitsauspistooli, puikonpidin tai vastaava. Usein laitteistoon kuuluu myös hitsausaineiden tuontiin liittyviä laitteita, kuten langansyöttö- ja oikaisulaite, suojakaasun syöttöletkut ja kaasupullot tai jauheen käsittely- ja ohjausyksiköt. (Lukkari, 2002, s. 92–278)

Mekanisoidussa hitsauksessa kaikki työvaiheet kappaleen käsittelyä lukuun ottamatta ovat automatisoituja (Lukkari, 2002, s. 24). Mekanisointi on erinomainen vaihtoehto, jos tuote voidaan hitsata lähes täysin mekanisoidusti, kuten säiliöiden valmistuksessa pituushitsit ja kehähitsit voidaan. Mekanisointi voidaan toteuttaa kuljettamalla hitsauspäättä railoa pitkin

tai liikuttamalla hitsattavaa kappaletta paikallaan olevan hitsauspään suhteen kappaleenkäsittelylaitteen avulla. Mekanisointilaitteilla voidaan saavuttaa sama laatutaso kuin kehittyneemmillään automatisointilaitteilla. (Leino, 1991b, s. 4-6)

Hitsauksen mekanisoinnissa yleisiä hitsauspään mekanisointilaitteita ovat kiinteästi asennettavat kuljettimet, kuten hitsausportaalit ja hitsaustornit. Keveät ja helposti siirrettävät kevytmekanisointilaitteet, kuten hitsaustraktorit ovat myös yleinen tapa hitsauspään mekanisoinnille. (Leino, 1991a, s. 14)

Kevytmekanisointilaitteet ovat kevyitä ja helposti siirrettävissä hitsattavan kappaleen luo. Kevytmekanisointilaitteet voidaan jakaa pyörillä kulkeviin hitsauskuljettimiin eli hitsaustraktoreihin, kiskoilla kulkeviin hitsauskuljettimiin, työkappaleeseen kiinnitettäviin mekanisointilaitteisiin sekä putkiyhteiden ja ympyrämäisten pintojen mekanisointilaitteisiin. Pyörillä kulkevat hitsauskuljettimet kulkevat pyöriensä ja sähkömoottorinsa avulla työkappaletta pitkin. Kiskoilla kulkevien hitsauskuljettimien kiskot kiinnitetään magneetilla tai imukupeilla työkappaleeseen ja työkappaleeseen kiinnitettävät laitteet hyödyntävät hitsattavan rakenteen muotoja käyttäen niitä ”kiskona”. Lisäksi putkiyhteiden ja ympyrämäisten pintojen hitsaukseen on erilaisia vaihtoehtoja ja kevytmekanisointilaitteita voidaan helposti räätälöidä myös muihin erilaisiin käyttökohteisiin. (Haula, 2008, s. 2-6)

Hitsaustornit koostuvat pystysuorasta mastosta ja vaakasuorasta puomista, johon hitsauspää kiinnitetään. Hitsaustorneja on useita eri kokoja ja erilaisia variaatioita. Eri variaatioissa esimerkiksi puomi voi olla kiinteä tai liikkua edestakaisin mastoon nähden, mastoa voidaan pyörittää manuaalisesti ja koko hitsaustorni voi olla kiinnitetty vaunuun, jota voidaan liikuttaa kiskoja pitkin eri asemiin. Hitsausportaalit ovat yksinkertaisempia ja ne ovat edullisempia kuin hitsaustornit. Hitsausportaaileilla hitsataan pituushitsejä liikuttamalla hitsauspäättä vaakapuomia pitkin. Hitsaustorneissa ja hitsausportaaileissa nopeuden säädön on oltava tarvittavien rajojen sisässä ja liikkeen oltava sujuvaa ja tasaista, koska hitsaus toteutetaan puomien liikkeen avulla. Myös puomeihin kohdistuvat voimat ääriarvoissa, esimerkiksi hitsauslaitteistosta johtuen, on tunnettava. (Cary & Helzer, 2005, s. 292–293) Kuvassa 11 on esimerkkikuvat hitsaustornista ja hitsausportaalista.



Kuva 11. Hitsausportaali (vas.) ja hitsaustorni (oik.) (SLv welding automation, 2013; Cedric bode engineering, 2013)

Mekanisointilaitteet soveltuvat hyvin säiliönhitsaukseen kuuluville yksinkertaisille pituus- ja kehähitseille. Automatisointi ja robotisointi ovat kuitenkin yleistyneet myös säiliönvalmistuksessa. Automatisoidussa hitsauksessa kaikki tärkeimmät työvaiheet ovat automatisoituja. Robotit voivat hoitaa kappaleenkäsittelyn ja/tai hitsauksen suorituksen. Hitsausrobottijärjestelmään kuuluu yksi tai useampi hitsausrobotti, niiden ohjausjärjestelmä, liikkuva tai kiinteä kappaleenkäsittely, hitsauslaitteistoon kuuluvat komponentit sekä erilaisia kojeita ja antureita, joita robotti tarvitsee toimiakseen (Kuivanen et al., 1995, s. 9; Lukkari, 2002, s.24) Yleisin hitsausrobotti on 6-akselinen nivelvarsirobotti. Nivelvarsirobotin ja muiden robotityyppien rakenne-esimerkkejä on kuvassa 12. Hybridihitsaus on aina automatisoitua, joten robotisointi liittyy oleellisesti myös hybridihitsaukseen. Robottien sijaan hybridihitsauksen automatisointiin voidaan käyttää mekanoisointilaitteisiin kuuluvia hitsaustorneja ja hitsausportaaleja, mutta kevytmekanoisointilaitteet eivät hybridihitsaukselle sovellu.

Nimitys pääakseleiden mukaan	Rakenne	Kinemaattinen kaavio	Työalue
Suorakulmainen robotti			
Sylinterirobotti			
Napa-koordinaatirobotti			
Scara-robotti			
Kiertävänivelinen robotti			
Rinnakkaisrakenteinen robotti			

Kuva 12. Robottityyppien rakenne-esimerkkejä (Kuivanen, 1999, s. 12)

5.3.2 Kappaleenkäsittelylaitteisto

Kappaleenkäsittelylaitteiden käyttöönotto parantaa tuottavuutta, työturvallisuutta ja työergonomiaa. Pelkkä hitsausasennon optimointi parantaa tuottavuutta tuntuvasti, sillä kappale voidaan paikoittaa niin, että liitos on hyvin luoksepäästävässä ja edullisimmassa hitsausasennossa eli jalkoasennossa. Jalkoasennossa voidaan hitsata suuremmalla hitsausenergialla ja suuremmalla hitsausnopeudella kuin muissa hitsausasunnoissa. Jalkoasento parantaa myös hitsin laatua, koska jalkoasento on hitsaajalle helpoin hitsausasento. Kappaleenkäsittely parantaa myös työturvallisuutta ja ergonomiaa, koska

fyysisen voimankäytön tarve vähenee ja hitsaus voidaan suorittaa ergonomisemmassa asennossa. Työkappaleen kiinnittäminen kappaleenkäsittelylaitteistoon estää työkappaleen kaatumisen tai putoamisen ja niistä johtuvat tapaturmariskit. (Leino, 1991a, s. 9-10)

Yleisin kappaleenkäsittelylaite on pyörityspöytä, joita on kaikille kokoluokille 15 kilogramman kappaleista yli 100 tonnin kappaleiden käsittelyyn. Pyörityspöytää voidaan kallistaa pystysuunnasta vaakasuoraan tai suurempaankin kulmaan ja samalla pyörittää akselinsa ympäri. Joissain pyörityspöytien variaatioissa on olemassa korkeuden säätömahdollisuus kallistuksen sijaan tai sen lisäksi. Pyörityspöytä on kiinnitettävä tukevasti maahan, kiinnitettävä kappale on kiinnitettävä tukevasti pyörityspöytään ja kiinnitettävistä kappaleista aiheutuvat taivutus- sekä vääntömomentit on laskettava tarkasti, jotta käytettävä pyörityspöytä kestää kiinnitetyn kappaleen aiheuttamat kuormat. Pyörityspöydän pyörimisnopeus akselin ympäri on toteuduttava sujuvasti, tasaisesti ja nopeusvälin oltava tiettyjen rajojen sisällä, sillä hitsaus toteutetaan usein pitämällä hitsauspää paikallaan ja pyörityspöytä suorittaa kappaleen liikuttamisen hitsauspäähän nähdessä. (Cary & Helzer, 2005, s. 296–298) Pöytiin on olemassa ohjelmointilaitteita, joiden avulla vaaditut asennot tallennetaan muistiin ketjuksi ja asennonvaihto tapahtuu automaattisesti. Asennon vaihtuessa hitsaaja voi suorittaa hitsaussivuaikoihin luettavia työvaiheita. (Häkkinen, 2007, s. 44)

Sylinterimäisten kappaleiden, kuten säiliöiden valmistukseen erityisen soveltuva kappaleenkäsittelylaite on pyöritysrullasto. Myös esimerkiksi suorakulmaisia kappaleita voidaan pyörittää pyöritysrullaston avulla kiinnittämällä hitsattavan kappaleen päihin vanteet, joita pyöritetään rullastolla. Pyöritysrullastoja on erikokoisia, mutta pääosin ne on tarkoitettu melko suurille ja painaville kappaleille. Niillä pyöritettävien kappaleiden koko vaihtelee yhden tonnin ja 250 tonnin välillä. Rullien ja rullaparien määrä riippuu kappaleen pituudesta ja painosta. (Cary & Helzer, 2005, s. 298) Kuvassa 13 on esimerkki pyöritysrullastosta.



Kuva 13. Pyöritysrullasto (Pemamek, 2013)

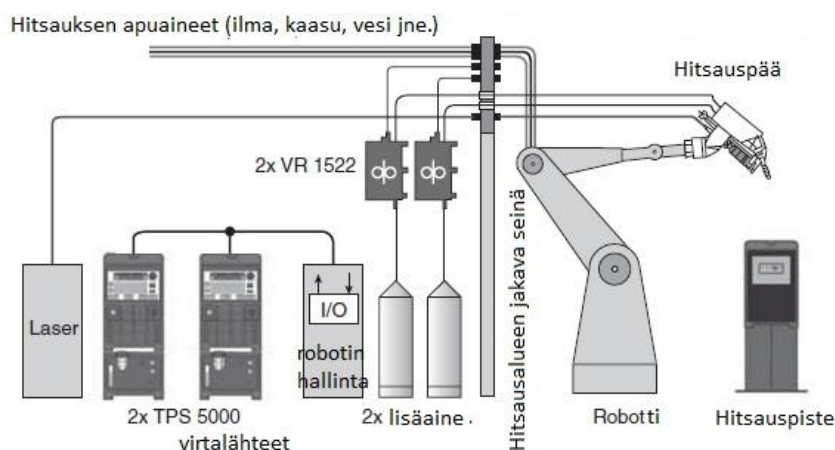
Vastapöytäparia käytetään yleensä pitkien ja epäsymmetristen kappaleiden hitsauksessa. Vastapöytäpari toimii käytännössä kuin pyöritysrullasto, koska siinä kappale kiinnitetään päistään kahteen vastapöytään. Pyörityspöytää voidaan käyttää vastapöytänä toisessa päässä tai kummassakin päädyssä asettamalla pöytätasot pystysuoraan vastakkain. Vastapöydässä ei normaalisti käytetä kallistusominaisuutta, vaan pyöritetään ainoastaan kappaleita akselinsa ympäri. Vastapöytäparia käytetään normaalisti viiden ja 50 tonnin välillä olevien kappaleiden käsittelyyn. (Cary & Helzer, 2005, s. 299)

Pienien ja kevyiden kappaleiden käsittely voidaan toteuttaa tasapainopöydällä. Tasapainopöydässä ei tavallisesti käytetä ulkoista teholähdettä, vaan käytetään hyväksi kappaleen painopistettä siten, että se on samassa linjassa tasapainopöydän akseleiden kanssa. Kääntely eri asentoihin tapahtuu kappaleen painopisteessä kevyesti käsin. Lisäksi robotisoidulle hitsaukselle on olemassa omat erityiset kappaleenkäsittelylaitteensa, jotka kuitenkin toimivat samoilla periaatteilla kuin aikaisemmin läpikäyty kappaleenkäsittelylaitteet. (Cary & Helzer, 2005, s. 296–299) Hybridihitsaukseen soveltuvat kaikki edellä mainitut kappaleenkäsittelylaitteet tasapainopöytää lukuun ottamatta. Oleellisinta on kappaleenkäsittelyn automaattisuus, sillä laserin vuoksi hitsausalue on eristetty ja siksi hitsaushenkilöstö ei voi olla kappaleen liikkumista valvomassa/toteuttamassa.

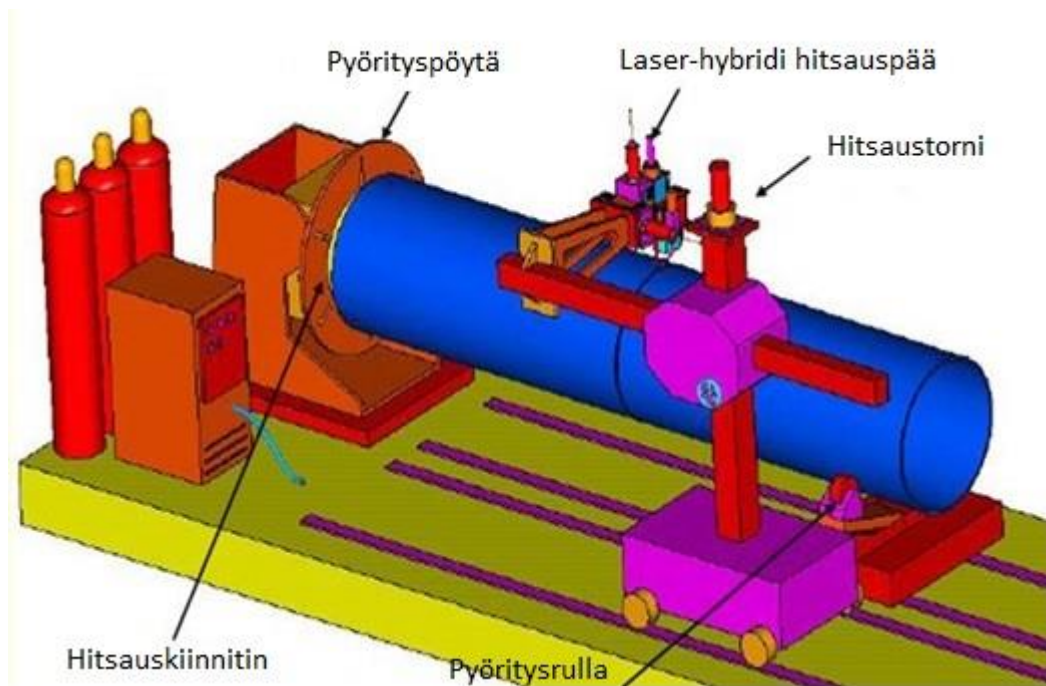
6 HYBRIDIHITSAUKSEN SOVELTUVUUS SÄILIÖNHITSAUKSEEN

Hybridihitsauksen käytöstä säiliönvalmistuksessa löytyy vähän julkaistua kirjallisuutta ja käytettävissä on pääosin vain mainintoja hybridihitsauksen käytöstä säiliönvalmistuksessa. Tutkimuksia ja kirjallisuutta löytyy kuitenkin nykyään jo kohtuullisesti hybridihitsauksen käytöstä telakka- ja autoteollisuudessa sekä jonkin verran artikkeleita hybridihitsauksen käytöstä putkien hitsauksessa. Näistä saatua tietoa apuna käyttäen tässä kappaleessa pohditaan hybridihitsauksen soveltuvuutta säiliönvalmistukseen.

Suurimpana ongelmana hybridihitsauksen käyttöönotolle ovat investointikustannukset, jotka ovat arviolta 300 000 euron luokkaa (Häkkinen, 2007, s. 90). Investointikustannukset koostuvat lähinnä laserhitsauslaitteistosta ja robotista. Hybridihitsaus on aina automatisoitua, joten laser- ja kaarihitsauslaitteiston lisäksi myös kappaleenkäsittelyyn tarvittavat automaatiolaitteet on hankittava. Lisäksi turvatoimiin ja hitsausoperaattoreiden koulutukseen on investoitava. Investointitarve riippuu säiliönvalmistajan käytössä olevasta hitsauslaitteistosta. Useilla säiliönvalmistajilla on jo entuudestaan kappaleenkäsittelylaitteisto sekä mahdollisesti mekanisointilaitteisto tai automatisointilaitteisto hitsaustuotannossa. Käytössä oleva laitteisto voidaan hyödyntää myös hybridihitsauslaitteiston kokoamisessa vähentäen uusien laitteiden investointitarvetta. Hybridihitsauslaitteistoon kuuluvat osat on esitetty kuvassa 14. Kuvassa 15 on putkenhitsaukseen käytettävän hitsausaseman komponentit periaatekuvana. Samankaltainen laitteisto voisi soveltua myös säiliönvalmistukseen.



Kuva 14. Hybridihitsauslaitteiston komponentteja (Olsen, 2009, s. 211, muokattu)

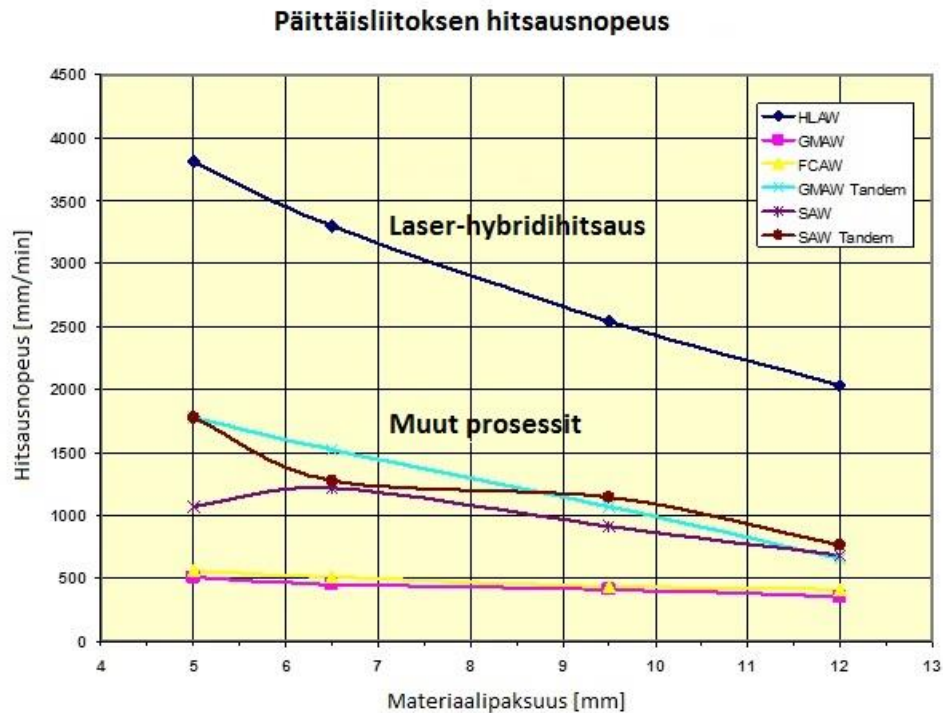


Kuva 15. Putkenhitsausasema, joka voisi soveltua myös säiliöhitsaukseen (Siltanen & Fellman, 2008, s. 13, muokattu)

Säiliöiden valmistuksessa yleisimmät rakennemateriaalit ovat eri teräslaadut. Hybridihitsaus soveltuu erittäin hyvin näille materiaaleille. Säiliöiden koko vaihtelee pienistä säiliöistä, kuten happipulloista, suuriin kymmeniä tonneja painaviin säiliöihin. Säiliöt ovat usein myös paineenalaisia, joka asettaa niiden hitsaukselle ja materiaaleille entistä kovemmat vaatimukset. Materiaalivahvuudet voivat paineesta ja käyttöolosuhteista johtuen olla kymmeniä millimetrejä. Suuret materiaalipaksuudet vaativat suuret railot ja näin myös suuren määrän hitsaustyötä perinteisillä säiliön valmistuksessa käytettävillä prosesseilla, kuten MIG/MAG-hitsauksella ja jauhekaarhitsauksella. Hybridihitsauksella voidaan helposti hitsata yhdellä palolla I-railoon tai vain vähän osaviistettyyn V-railoon yli 10 millimetriä paksuja levyjä. Tekniikka on kehittynyt niin, että jopa yli 30 mm paksuja levyjä voidaan hitsata, jos käytössä on tarpeeksi suuri laserteho (Fellman, 2008a, s. 41). Painesäiliöiden on aina oltava läpihitsattuja, mutta hybridihitsauksen syvän tunkeuman ansiosta juuritukia tai kahdelta puolelta hitsausta ei tarvita. Lisäksi säiliöiden hitsit ovat yksinkertaisia ja suhteellisen pitkiä varsinkin suurempien säiliöiden kehä- ja pituushitseissä. Hitsien on oltava pitkiä, jotta hybridihitsaus olisi taloudellisesti kannattavaa.

Railotoleranssien ja ilmaraon osalta useimmat säiliönvalmistajat eivät todennäköisesti ole tottuneet valmistamaan laserhitsauksen edellyttämää tasoa, mutta hybridihitsaus lieventää huomattavasti railotoleranssivaatimuksia. Laserhitsaukseen verrattuna hybridihitsauksen railotoleranssivaatimukset ovat huomattavasti lievemät, mutta perinteisten hitsausmenetelmien edellyttämiin railotoleransseihin nähden kuitenkin tiukat. Laserhitsauksessa ilmaraako voi olla maksimissaan 0,2 mm luokkaa, mutta hybridihitsauksella ilmaraoksi sallitaan jopa 1,5 mm. Tarkkoihin railotoleransseihin päästään koneistamalla railot, jolloin myös hitsistä tulee siisti ja useimmiten virheetön. Koneistus on kuitenkin kallista ja aikaa vievää. Railonvalmistuksen olisi toivottavaa olla nopeaa ja helppoa, joka onnistuu esimerkiksi laserleikkaamalla. Laserleikkaus on railonvalmistusmenetelmänä nopea ja tarkka sekä leikkauspinta on suora. Myös levyleikkurilla tai plasmaleikkauksella railonvalmistus on nopeaa ja railot hyvälaatuisia. (Lukkari & Pekkari, 2004, s. 39; Fellman, 2002, s. 40)

Optimaalisella railomuodolla, hybridihitsauksen nopeudella ja syvällä tunkeumalla saadaan hitsausnopeuksia nostettua huomattavasti perinteisiin hitsausmenetelmiin verrattuna. Kuvassa 16 on esitetty eri hitsausmenetelmien hitsausnopeuksia 5-12 mm välillä olevien materiaalipaksuuksien päittäisliitoksissa. Esimerkiksi 9,5 mm paksun levyn päittäisliitoksen hitsausnopeus jauhekaarella on 0,69 m/min, mutta laserhybridihitsauksella nopeudeksi on saatu 2,5 m/min. 12,7 mm paksun levyn päittäisliitoksessa jauhekaarella hitsausnopeutena on ollut 0,5 m/min, kun hybridihitsauksella nopeutena on pystytty käyttämään 2,0 m/min ja palkomäärä on saatu vähennettyä kolmesta yhteen. Nämä tarkoittavat 400 % ja 1200 % kasvua hitsausnopeuksissa. (Siltanen & Fellman, 2008, s. 21)

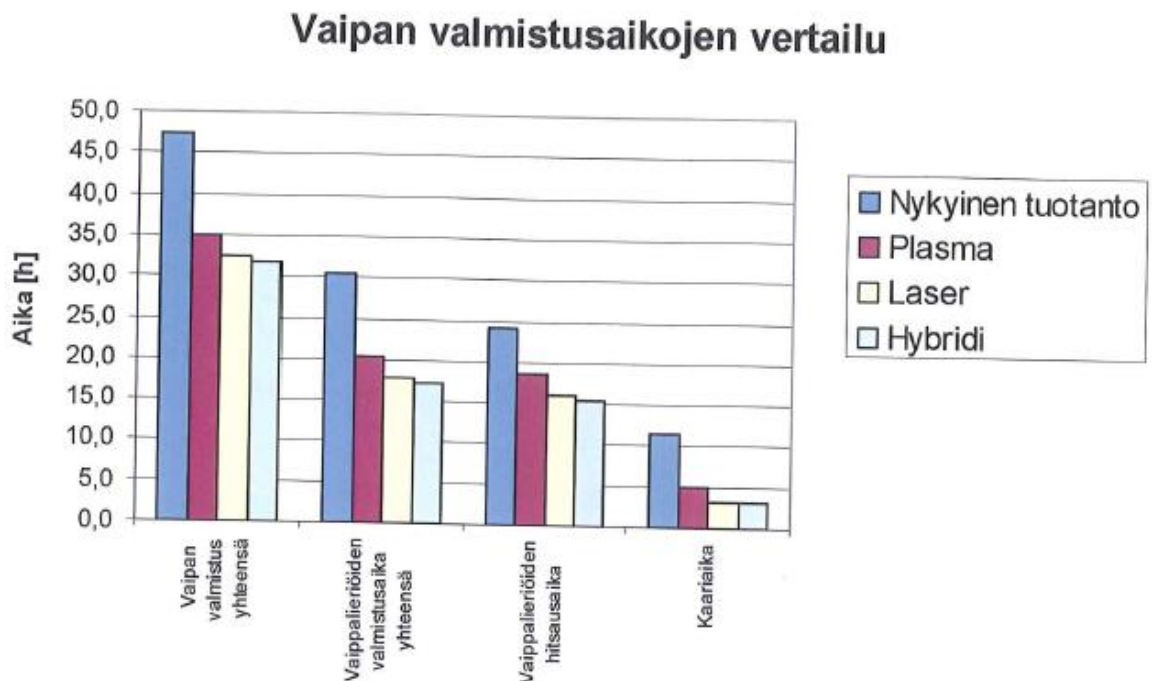


Kuva 16. Eri hitsausmenetelmien hitsausnopeuksia eri materiaalipaksuuksien päittäisliitoksissa (Siltanen & Fellman, 2008, s. 5)

Suuren hitsausnopeuden lisäksi lämmöntuonti pysyy hybridihitsauksessa pienenä, joten muodonmuutokset ja jäännösjännitykset pysyvät säiliöissä pieninä ja näin hitsauksen jälkityö vähenee. Säiliöiden valmistuksessa saadaan siis hyödynnettyä käytännössä kaikki edut, joita hybridihitsauksella on esitetty saavutettavan. Hybridihitsauksen nopeus voi kuitenkin nousta esiin myös negatiivisessa mielessä kannattavuutta ajatellen, sillä suuremman hitsausnopeuden vastapainoksi hitsauslaitteiston kuormitettavuutta olisi nostettava.

Putkien jatkohitsauksessa General Dynamics Nasscolla käytetään hybridihitsausta. Selkein säästö siirryttäessä MAG-hitsauksesta hybridihitsaukseen on saavutettu palkomäärän vähentymisen ansiosta. Ennen putkien jatkohitsit jouduttiin hitsaamaan 5-6 palolla, mutta hybridihitsauksen myötä hitsit saadaan hitsattua yhdellä palolla. Tämä on pienentänyt hitsausaikaa noin 80 %. Hitsausaika on lyhentynyt myös pienemmästä aloitus- ja lopetuskohtien määrästä johtuen. Lisäksi General Dynamics Nasscolla mittatarkkuus on parantunut selkeästi ja pienemmän railotilavuuden myötä säästöjä on syntynyt pienemmän lisäainekulutuksen ja pienemmän railon koneistus tarpeen myötä. (Fellman, 2008a, s. 41)

Häkkinen (2007, s. 95–98) on diplomityössään tutkinut hybridihitsauslaitteiston käyttöönottoa lämmönvaihtimien valmistuksessa. Lämmönvaihtimet ovat tässä tapauksessa säiliöihin verrattavissa olevia prosessilaitteita, joissa on useita kehä- ja pituushitsejä. Häkkinen teki tutkimuksissaan hitsaustestejä, joiden avulla hän laski esimerkkilämmönvaihtimen valmistukseen liittyvät ajat. Häkkinen on tutkimuksissaan saanut kokonaiskustannuksiksi, lämmönvaihtimen vaipan valmistusajaksi sekä hitsaukseen liittyviksi parametreiksi ja hitsausajoiksi kuvassa 17 sekä taulukoissa 4 ja 5 esitettyjä tuloksia.



Kuva 17. Vaipan valmistusaikojen erot eri hitsausprosessien välillä (Häkkinen, 2007, s.96)

Taulukko 4. Kokonaiskustannukset vertailtaville hitsausprosesseille hitsauskokeiden perusteella (Häkkinen, 2007, s. 95)

Kustannukset [€/m]	Puikko	MAG-täytelanka	Plasma	CO ₂ -laser	Hybridi (CO ₂ +MAG)
Työkustannukset	16,03	7,67	7,58	5,21	4,69
Lisäainekustannukset	1,61	2,80	0,43	0,00	0,18
Kaasukustannukset	0,00	1,41	1,61	0,28	0,21
Energiakustannukset	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02
Muut kustannukset	6,24	6,24	2,78	2,78	2,78
Kokonaiskustannukset	23,02	18,17	12,80	8,29	7,87

Taulukko 5. Testikappaleiden hitsauksessa käytettyjä parametreja ja hitsausaikoja eri prosesseille (Häkkinen, 2007, liite 3)

	Puikko	MAG-täytelanka	Plasma	CO ₂ -laser	Hybridi (CO ₂ +MAG)
Railomuoto	Y	Y	I	I	I
Ilmarako [mm]	~0,5-1	~0,5-1	~0	~0	0,5
Palkoluku	2	2	1	1	1
Hitsausnopeus [cm/min]	7,5	30,0	25,0	160,0	220,0
Kaariaikasuhte [%]	65	36	22	5	4
Kaariaika [min/m]	13,3 11,7	3,3 3,3	4,0 -	0,63 -	0,45 -
Kokonaisaika [min/m]	38	18	18	13	11

Häkkisen saamien tulosten perusteella vaippalieriön valmistusaikaa on hybridihitsauksen avulla mahdollista lyhentää 44 %, hitsauksen läpimenoaika lyhenee 36 % ja kaariaika 73 %. Kaariaikasuhte eli kaariajan (0,45 min/m) ja hitsaustyön suorittamiseen käytetyn kokonaisajan (11 min/m) välinen suhte Häkkisen toteuttaman testin esimerkkikappaleella on kuitenkin ollut vain 4 %. Kokonaisaika sisältää hitsauksen lisäksi levyjen silloituksen ja kiinnityksen hitsauspöytään puristimien avulla. Nämä vaiheet vievät kokonaisajasta pienillä 600 mm x 150 mm x 6 mm testikappaleilla suhteessa enemmän aikaa kuin tuotannossa käytetyillä suuremmilla kappaleilla. Tuotannon läpimenoaikoja voitaisiinkin lyhentää entisestään, jos kaariaikasuhte saataisiin yleensä automatisoidussa hitsauksessa käytetylle 60–80 % tasolle. Häkkinen on tullut tulokseen, että hybridihitsaus soveltuu lämmönvaihtimen kaltaisen prosessilaitteen valmistukseen, mutta laitteistolle ei saataisi kyseisessä tapauksessa riittävää kuormitusta. Sama ongelma voi tulla esiin myös säiliönvalmistuksessa ja investointeja mietittäessä tämä on otettava huomioon. (Häkkinen, 2007, s. 98)

7 YHTEENVETO

Säiliöitä käytetään useissa sovelluksissa niin teollisuudessa kuin yksityisellä sektorillakin. Usein säiliöt ovat lieriömäisiä, paineen alaisia ja niitä käytetään vaativissa käyttöolosuhteissa, kuten korkeissa lämpötiloissa tai syövyttävien aineiden vaikutuksen alaisena. Näistä syistä materiaalinvalinta ja hitsausliitosten kestävyys ovat erittäin tärkeässä asemassa. Painesäiliöiden hitsien on oltava mm. läpihitsattuja ja pätevöitetyn hitsaushenkilöstön valmistamia. Hitsaukseen liittyvät työvaiheet vievät myös suuren osan säiliöiden valmistusajasta. Säiliöitä valmistetaan usein vielä perinteisten hitsausmenetelmien avulla, mutta säiliönvalmistajat ovat kehittäneet tuotantoaan uusilla hitsausmenetelmillä ja mekanisointi-/automatisointilaitteilla tuottavuuden ja laadun parantamiseksi. Tässä työssä tutkittiin melko uuden hitsausmenetelmän eli hybridihitsauksen soveltumista säiliönvalmistukseen ja sen vaikutuksia hitsauksen tuottavuuteen ja laatuun.

Hybridihitsauksessa yhdistetään kaksi erilaista hitsausprosessia. Yleisin yhdistelmä on laser-MIG/MAG-yhdistelmä. Kaariavusteisessa laserhitsauksessa on suuri määrä parametreja, jotka ovat osaltaan vaikuttaneet sen varovaiseen ja rajoittuneeseen käyttöönottoon. Parametreja prosesseissa ovat kaari- ja laserparametrien lisäksi yhdistetyt parametrit. Niitä ovat mm. prosessijärjestys, prosessien välinen etäisyys, asetuskulmat, hitsausnopeus, kokonaisenergia ja käytetty suojakaasu. Oikeilla parametrivalinnoilla ja käyttökohteilla hybridihitsauksella saavutetaan kuitenkin erinomainen hitsin laatu todella suurella nopeudella. Hybridihitsaus onkin ollut käytössä jo yli vuosikymmenen erityisesti telakka- ja autoteollisuuden alalla.

Kaksi erilaista hitsausprosessia yhdistämällä saadaan hyödynnettyä kummankin prosessin parhaat puolet ja toisaalta vältytään yksittäisten prosessien rajoituksilta. Hybridihitsauksen etuja ovat mm. suurempi hitsausnopeus, pienemmät railotoleranssit, hyvänmuotoinen hitsi, paremmat hitsin mekaaniset ominaisuudet sekä pienet hitsauksesta syntyvät muodonmuutokset. Huonoja puolia hybridihitsauksessa ovat mm. hitsauskokemuksien vähäinen määrä, suuret investointikustannukset sekä se, että hitsien pitää olla pitkiä ja tuotannon suurta, jotta prosessi saadaan kannattavaksi.

Hybridihitsauksen soveltavuudesta säiliönvalmistukseen voidaan todeta, että prosessi soveltuu erittäin hyvin säiliöiden materiaaleille ja valmistukseen tuottaen säiliöiden hitseiltä vaadittua hyvää laatua perinteisiä menetelmiä huomattavasti, jopa satoja prosentteja suuremmalla nopeudella. Säiliönvalmistuksessa saadaan hyödynnettyä myös pienemmästä lämmöntuonnista johtuvat pienet muodonmuutokset sekä yksipalkohitsauksen mahdollistaman pienemmän railon koneistus tarpeen ja pienemmän lisääineen tarpeen. Investointeja harkittaessa säiliönvalmistajan tulee kuitenkin tarkkaan miettiä tarvittavien laitteiden kokoonpano, niiden investointikustannukset sekä laitteistolle syntyvän kuormitusmäärän riittävyys, jotta investointi olisi kannattava.

LÄHTEET

Admorcomposites. Admor esite [verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavilla: http://www.admorcomposites.fi/doc/admor_esite.pdf

Cary, H & Helzner, S. 2005. Modern welding technology. 6. painos. Columbus, Ohio. Pearson education. 715 s.

Cedric bode engineering. Kotisivu – column & boom manipulators [verkkosivu]. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavilla: <http://www.cedricbodeengineering.com/column-and-booms.html>

Fabri-tek engineers. Kotisivu – products [verkkosivu]. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavilla: <http://flowelement.net/pressure-vessels.html>

Fellman, A. 2002. Suojakaasuseoksen koostumuksen vaikutus CO₂-laser-MAG-hybridihitsauksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 121 s.

Fellman, A. 2008a. Laserhybridihitsaus kasvun eväänä? Hitsaustekniikka 5/2008. s. 35–42.

Fellman, A. 2008b. The effects of some variables on CO₂ laser-MAG hybrid welding. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 153 s.

Haula, J. 2008. Hitsauksen kevytmekanisoinnilla tehoa tuotantoon!. Hitsaustekniikka 4/2008. s. 2–6.

Heikkilä, E & Huhdankoski, E. 1997. Rautaruukin paineastiakäsikirja. 3. painos. Raahe. Otava. 176 s.

Häkkinen, T. 2007. Hitsausmenetelmät ja niiden kehittämismahdollisuudet painelaitteiden valmistuksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 109 s.

Jernström, P. & Kujanpää, V. Hybridihitsaus – yhdistelmä laser- ja kaarihitsauksen etuja. Hitsaustekniikka 4/2001. s. 4–7.

Jernström, P. & Fellman, A. & Kouvo, S. & Mäkinen, T. & Seppä, S. & Jokinen, T. & Kujanpää, V. Uusia tutkimustuloksia hybridihitsauksesta ja sen tuotesovelluksista. Hitsaustekniikka 5/2002. s. 34–41.

Kah, P. 2011. Usability of laser-arc hybrid welding processes in industrial applications. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 100 s.

Ketola, S. 2001. Säiliön päädyn robotisoitu varustelu ja viimeistely. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 99 s.

Kuivanen, R & Viitaniemi, J & Leino, K & Ruuhilehto, K. 1995. Tavoitteena toimiva ja turvallinen hitsausrobotijärjestelmä. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tiedotteita 1688. 69 s.

Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Vantaa. Talentum Oyj/MetalliTekniikka. 188 s.

Lappalainen, E. 2010. Uuden sukupolven lasereiden käyttö niukkaseosteisen teräksen laser-MAG-hybridihitsauksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikka. 117 s.

Leino, K. 1991a. Kaarihitsauksen low-cost-automatisointi. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tiedotteita 1318. 55 s.

Leino, K. 1991b. Hitsauksen mekanisointi – jo ohitettu askelko kohti hitsausautomaatiota? Hitsaustekniikka 1/1991. s. 4–9.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka – perusteet ja kaarihitsaus. 4. painos. Helsinki. Edita Prima Oy. 292 s.

Lukkari, J. & Pekkari, B. Katsaus hitsauksen nykypäivään ja tulevaisuuteen. ESAB hitsausuutiset 2/2004. s. 27–41.

Matilainen, J. & Parviainen, M. & Harvas, T. & Hiitelä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevy tuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki. Teknologiateollisuus. 387 s.

Olsen, O. 2009. Hybrid laser-arc welding. Cambridge. Woodhead Publishing Limited. 323 s.

Painelaitedirektiivi. 1997. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 97/23/EY [verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.7.2013] Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1997:181:0001:0055:FI:PDF>

Pemamek. Kotisivu – welding automation solutions [verkkosivu]. [Viitattu 20.8.2013]. Saatavilla: http://www.pemamek.fi/eng/welding_automation_solutions/?group=2

Riedel, F. 2008. Joining powers [verkkodokumentti]. [Viitattu 2.11.2012]. Saatavilla: <http://www.trumpf.com/en/innovation/media-center/magazines/lasercommunity/m407page/2/m407start/3.html>

Ruukki. 2008. Laser-hybridi-hitsaus osa Ruukin osaamista [verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.12.2012]. Saatavilla: http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Julkaisut-ja-esitykset/~media/Files/News-and-events/Inline/Ruukki-Inline_2_08%20fin.ashx

SFS-EN 13445-4. 2009. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 4: Valmistus. Helsinki. Suomen standardoimisliitto. 103 s.

Siltanen, J & Fellman, A. 2008. Laserhybridihitsaus teräsrakentamisessa [verkkodokumentti]. teräsrakenteiden t&k päivät 2008. Seminaariesitys. [Viitattu 3.8.2013] Saatavilla PPT-tiedostona: <http://www2.turkuamk.fi/steel08/esitykset.htm>

SLv welding automation. Kotisivu – hitsauslinjat [verkkosivu]. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavilla: <http://www.slvoy.fi/20.html>

Terästorni. Kotisivu – referenssit [verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavilla: <http://www.terastorni.com/referenssit.php?year=1995>