LAPPEENRANNAN
TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

# VALMISTUKSEN HUOMIOONOTTAMINEN SUUNNITTELUSSA, KUN TUOTE KOKOONPANNAAN HITSAAMALLA

# ASSEMBLY- AND MANUFACTURING-FRIENDLY DESIGN FOR WELDING PRODUCTION

Lappeenrannassa 25.1.2010

Kalle Koivunen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO ..... 1
2 VALMISTUKSEN JA KOKOONPANON HUOMIOONOTTAVA SUUNNITTELU ..... 2
2.1 DFMA:n tavoitteet ..... 3
2.2 DFMA:n vaiheet ..... 3
3 HITSATTAVAN KAPPALEEN SUUNNITTELU, DFWA ..... 4
3.1 Hitsausliitosten tyypit ..... 6
3.2 Teräksen valinta hitsattavuuden perusteella ..... 9
3.3 Hitsausprosessit ..... 9
3.3.1 Puikkohitsaus ..... 10
3.3.2 MIG/MAG-hitsaus ..... 12
3.3.3 TIG-hitsaus ..... 14
3.4 Tunkeuman hyödyntäminen ..... 15
3.5 Hitsirailomuodot ja liitostavat ..... 16
3.6 Liitoksen itsepaikoittuvuus ..... 18
4 HITSAUSMUODONMUUTOKSET ..... 20
4.1 Hitsausmuodonmuutoksien eri tyypit ..... 21
4.2 Hitsausmuodonmuutoksien vaikutukset ..... 22
4.3 Hitsausmuodonmuutosten vähentäminen ..... 22
4.3.1 Lämmöntuonnin pienentäminen ..... 23
4.3.1.1 Lämmöntuonnin energiamäärän laskeminen ..... 24
4.3.2 Hitsattavan kappaleen tukeminen kiinnittimin ..... 25
4.3.3 Hitsausjärjestys ..... 26
4.3.4 Jännitystyypin muuttaminen ..... 27
4.3.5 Esitaivutus ..... 28
4.3.6 Lämpökäsittely ..... 28
4.3.6.1 Jännityksenpoistohehkutus ..... 28
5 HITSAAMALLA KOKOONPANTAVAN TUOTTEEN LAATU ..... 29
5.1 Hitsauksen laatuvaatimusstandardi SFS-EN ISO 3834 ..... 30
5.2 Hitsauksen laadunvarmistusmenetelmät ..... 30
5.2.1 Rikkomaton aineenkoetus ..... 31

5.2.2 Rikkova aineenkoetus ..... 32
6 YHTEENVETO ..... 32
LÄHTEET ..... 34
LIITE

# 1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö käsittelee hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen kokoonpanon huomioonottavaa tuotesuunnittelua. Kandidaatintyö on laadittu ohjeeksi suunnittelijoille, missä on pyritty huomioimaan mahdollisimman monia hitsaamalla kokoonpantavan teräksisen tuotteen suunnitteluun liittyviä näkökohtia. Näitä näkökohtia on tarkasteltu yleisesti suunnittelun kannalta, eikä työssä käsitellä esimerkiksi hitsausliitosten lujuuslaskentaa. Kandidaatintyön asiarunko on esitelty liitteessä 1. Suunnittelijan tulee pitää mielessä liitteessä esitettyjä asioita koko suunnitteluprosessin ajan ja näin helpottaa tuotetta kokoavan konepajan työtä. Jokaista yksittäistä hitsausliitosta suunnitellessa, tulee sen valmistusystävällisyyttä miettiä jokaiselta liitteessä esitetyltä kantilta.

Kandidaatintyön teoria-osuus koostuu valmistuksen ja kokoonpanon huomioon ottavan tuotteen suunnittelun perusteista. Siinä käsitellään yleisesti käytettyä termistöä ja valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun vaiheita sekä tavoitteita. Kokoonpanon huomioon ottavaa suunnittelua on tämän jälkeen syvennetty esittelemällä hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnittelu. Tämä osio käsittelee juuri hitsaukselle ominaisia haasteita ja mahdollisuuksia. Jokaista tässä osiossa esiteltyä asiaa on tarkasteltu suunnittelun kannalta. Esimerkiksi hitsausprosessien toimintaperiaatteet on jätetty täysin huomiotta, mutta luvuissa on käsitelty tarkemmin niiden aiheuttamaa lämmöntuontia ja luoksepäästävyyttä.

Hitsausmuodonmuutoksia on käsitelty laajasti omassa luvussa. Hitsausmuodonmuutos-osio alkaa eri hitsausmuodonmuutostyyppien esittelyllä sekä niiden vaikutuksilla. Tämän teoriaosuuden jälkeen tarkastelun kohteena on hitsausmuodonmuutosten vähentäminen. Hitsausmuodonmuutoksien vähentämistä on käsitelty pääosin kappaleen suunnittelun näkökohdasta. Osion loppupuolella on kuitenkin esitelty jokunen hitsausmuodon-muutoksien vähentämistapa, johon suunnittelija ei voi suoraa vaikuttaa. Nämä keinot on esitelty siltä varalta, että hitsausmuodonmuutosten vähentäminen suunnittelunkeinoin on mahdotonta. Näin suunnittelija voi lisätä hitsaamalla kokoonpantavan kappaleen piirustuksiin huomion, että suunnitellut hitsisaumat vaativat jotakin jälkikäsittelyä.

Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen laatua on käsitelty omassa luvussaan. Siinä on esitelty hitsaukseen liittyvät laatustandardit, joita suunnittelija voi käyttää suunnittelun lähtökohtana. Työn loppuosiossa on käsitelty lyhyesti hitsauksen laadun-varmistusmenetelmiä, joilla voidaan mitata hitsatun rakenteen suunnittelun ja kokoonpanon onnistumista.

Kandidaatintyö on laadittu yleisohjeeksi, joten esitellyt asiat on pyritty tiivistämään helposti luettavaksi paketiksi. Jos suunnittelija tarvitsee enemmän tietoa jostakin käsitellystä aiheesta, voi hän etsiä sitä kappaleiden jälkeen esitetyistä lähteistä.

# 2 VALMISTUKSEN JA KOKOONPANON HUOMIOONOTTAVA SUUNNITTELU

Valmistuksen ja kokoonpanon huomioon ottava suunnittelu, DFMA, kuuluu DFX-kokonaisuuteen. Lyhenne DFX juontuu englanninkielen sanoista Design for X, jossa X:n paikalle voidaan sijoittaa suunnittelun kohde. Jos suunnittelussa otetaan huomioon valmistus, käytetään lyhennettä DFM, Design For Manufacturing. Tuotteen kokoonpanon huomioonottavaa suunnittelua kutsutaan DFA:ksi (Design For Assembly). Valmistuksen ja kokoonpanon huomioon ottava suunnittelu kulkee nimellä DFMA. (Savonia-ammattikorkeakoulu, 2005.)

DFMA tarkoittaa systemaattista tuotekehitysmenetelmää, jolla pyritään helpottamaan tuotteen valmistettavuutta. Käytännössä perimmäinen tavoite on aina valmistuskulujen alentaminen, johon pyritään muun muassa oikeilla valmistusmenetelmillä. DFMA-menetelmiä voidaan käyttää paitsi uuden tuotteen suunnitteluun, myös jo valmistettavan tuotteen uudistamiseen. Ennen täysin uuden tuotteen suunnittelun aloittamista, on pohdittava jo markkinoilla olevan tuotteen mahdollisuuksia. Valmiin tuotteen uudelleen suunnittelu markkinoiden tarpeita vastaavaksi on yleensä helpompaa kuin suunnitteluprosessin aloittaminen tyhjältä pöydältä. Ennen tuotteen uudistamista yrityksen tulee kuitenkin pohtia investointia automaatiotason nostoon, jolloin työvoimasta aiheutuvat kustannukset saadaan mahdollisimman pieniksi. Näin tuote voidaan jossain tapauksissa pitää alkuperäisenä ja suunnitteluun ei tarvitse uhrata lainkaan voimavaroja. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 14.)

## 2.1 DFMA:n tavoitteet

DFMA-suunnittelulla pyritään pääasiassa mahdollisimman alhaisiin tuotanto-kustannuksiin, mutta hyvää valmistettavuutta tulee arvioida myös muilla parametreilla. Näitä parametreja ovat tuotteen laatu ja läpimenoaika, sekä tuotannon joustavuus ja -tehokkuus. Lisäksi tulee huomioida ympäristövaikutukset ja tuotannolle aiheutuvat riskit. Alhainen tuotantokustannus ei saa vaikuttaa yhteenkään näistä seikoista enempää, kuin mihin yritys on varautunut. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 20.)

Yritys asettaa tuotteelle tietyt laatuvaatimukset, joihin tuotteen pitää yltää. Nämä vaatimukset on täytettävä, mutta niitä ei kannata liiemmin ylittää, sillä liian laadukkaan tuotteen valmistaminen on turhaa pääoman hukkaamista. Nämä vaaditut laatuvaatimukset selvitetään tuoteselosteessa sekä spesifikaatiossa. Liian huono laatu johtaa kuluihin tuotteiden romuttamisessa sekä korjauksissa. Pahimmassa tapauksessa koko tuote-erä voidaan joutua kutsumaan takaisin ja suorittamaan sille takuukorjaus. Tuotannon läpimenoaika pitää myös pysyä tuotteelle asetetuissa rajoissa. Määritelty läpimenoaika riippuu siitä, onko kyseessä perustuote vai räätälöidäänkö tuote asiakkaan toiveiden mukaiseksi (MTO – Manufacturing To Order). Tuotannon joustavuuden merkitys on tärkeintä juuri asiakkaalle räätälöidyillä tuotteilla. Tuotannon tehokkuudella tarkoitetaan sitä, että koko henkilöstö ja konekanta saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tarkasti. Nykyään yhä tärkeämmässä roolissa ovat tuotteen ympäristövaikutukset. Käytännössä tämä tarkoittaa komponenttien kierrätettävyyttä sekä tuotannon haittavaikutuksia ympäristölle. Myös tuotteen purettavuuteen on kiinnitettävä huomiota, sillä se mahdollistaa tuotteen korjaamisen ja laskee näin ympäristölle aiheutuvaa kuormaa. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 21.)

## 2.2 DFMA:n vaiheet

DFMA ei keskity pelkästään rakenteen yhden komponentin suunnitteluun, vaan se voidaan jakaa neljään eri hierarkiatasoon. Hierarkiatasot muodostavat portaikon, joka tulee kulkea tuotetta suunnitellessa alhaalta ylöspäin. Ensimmäinen porras on yritystaso, jossa suunnittelun tulee keskittyä vertailemaan kehitettävää tuotetta yrityksessä jo valmistettaviin tuotteisiin. Tämä vaihe vähentää suunnittelun tarvetta; Yrityksen valmistaessa jo jotakin vastaavaa tuotetta, niin sitä ei tarvitse suunnitella uudelleen. Tässä

vaiheessa kannattaa tutustua myös muiden yritysten valmistamiin komponentteihin, sillä mitään jo aikaisemmin suunniteltua ei kannata suunnitella uudelleen. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 16.)

Seuraavaa porrasta kutsutaan tuoteperhetasoksi. Tuoteperhetasolla pyritään suunnittelemaan tuotteita siten, että niiden osia voidaan hyödyntää ristiin. Tällä, ns. modulaarisuudella pyritään jälleen pienentämään suunnittelun määrää ja mahdollistaa näin lyhyempi tuotteen suunnitteluaika. Lyhyemmällä suunnitteluajalla voidaan tuoda uusi tuote nopeammin markkinoille ja sitä kautta lisätä yrityksen joustavuutta. Elinkaarensa loppupäässä olevien tuotteiden uusiminen helpottuu, kun jokaista osaa ei tarvitse modulaarisuuden ansiosta suunnitella uudestaan. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 16.)

Vasta näiden portaiden jälkeen voidaan siirtyä tasoille, joilla keskitytään yksittäisen tuotteen rakenteen suunnitteluun. Rakennetasolla saatetaan suunniteltava tuote sopimaan valmistavan konepajan konekantaan ja näin mahdollistaa sille nopein sekä edullisin valmistusmenetelmä. Komponenttitaso on hierarkiaportaikossa ylimpänä ja siinä keskitytään nimensä mukaisesti rakenteen yksittäisiin komponentteihin. Tässä vaiheessa huomio kannattaa kiinnittää komponentteihin, joihin sisältyy jokin haaste, kuten korkea hinta tai vaikea valmistettavuus. Vaikeasti valmistettavissa ja kalliissa tuotteissa hyvällä suunnittelulla voidaan vaikuttaa valmistuksen ja kokoonpanon lopulliseen hintaan eniten. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 17.)

Tässä kandidaatintyössä perehdytään hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnitteluun, joten käytettävä lyhenne on vähemmän tunnettu DFWA (Design For Welding Assembly). (Savonia, 2007.)

# 3 HITSATTAVAN KAPPALEEN SUUNNITTELU, DFWA

Hitsaamalla kokoonpantava tuote asettaa suunnittelulle enemmän haasteita kuin muiden liitostapojen käyttö. Tämän takia onkin yleisesti tiedossa, että ”paras hitsi on hitsi, jota ei ole olemassa.” Ennen kappaleen suunnittelua on siis hyvä tiedostaa myös muiden

liitostapojen mahdollisuudet. Hitsauksen kilpailijoita tässä suhteessa ovat esimerkiksi ruuvi- ja niittiliitokset, sekä nykyään myös liimaus. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 84.)

Jos liitosmenetelmässä päädytään hitsaukseen, tulee kappaleen suunnittelussa ottaa huomioon useita eri tekijöitä. Tällaisia asioita ovat muun muassa hitsauksen lämmöntuonnin vaikutukset kappaleen geometriaan sekä käytetyn teräksen mikrorakenteen muutoksiin. Myös liitettävien terästen tulee olla mielellään samoja, jotta lämmöntuonti olisi hallittavissa. Hitsaamalla kokoonpantujen tuotteiden ulkonäkö ei myöskään ole aina paras mahdollinen, joten ne vaativat usein jälkikäsittelyä. Jos materiaalit ovat valmiiksi pintakäsiteltyjä, vaativat ne lähes aina pinnoitteen uusimisen hitsaustapahtuman jälkeen. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 83.)

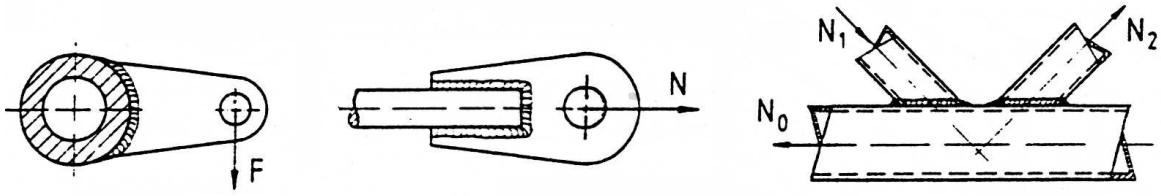
Hitsattavan kappaleen DFWA-suunnittelulla pyritään mahdollisimman hyvään hitsattavuuteen. Kokoonpantavan kappaleen hitsattavuuteen vaikuttavat perusaine, konstruktio sekä kappaleen valmistustapa. Hitsattavuus on sitä parempi, mitä vähemmän hitsaustapahtumassa olevia muuttujia on otettava huomioon. Muuttujina ovat hitsauksen vaatima esivalmistelu, itse hitsauksen suoritus ja sen jälkeiset toimenpiteet. Esivalmisteluun sisältyvät sopivan hitsausprosessin valinta, käytettävä lisäaine ja – railomuoto. Esivalmisteluun sisältyvät myös mahdollinen kappaleen esilämmitys, sekä erityisesti robotisoidussa hitsauksessa huomioon otettava osavalmistuksen tarkkuus. Hitsauksessa on otettava huomioon lämmöntuonti ja sen mahdolliset haittavaikutukset. Hitsauksen jälkeisissä toimenpiteissä tarkastellaan jälkilämpökäsittelyn ja – työstön tarpeellisuutta. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 83.)

Jotta kappaleen suunnitteluvaiheessa voidaan huomioida kaikki kappaleen hitsattavuuteen vaikuttavat seikat, suunnittelijan on tunnettava mahdollisimman tarkasti työn suorittavan konepajan laitekanta. Tämä on erityisen tärkeää, jos hitsaava konepaja suorittaa työn robotisoidusti, jolloin huomioon otettavien asioiden määrä lisääntyy. Robotisoidussa ympäristössä suunnittelijan on tiedostettava robottien ja niiden apulaitteiden liikeradat, sekä tutustua laitteistojen railonhakujärjestelmiin. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 84.)

## 3.1 Hitsausliitosten tyypit

Hitsattavan kappaleen suunnittelussa on otettava huomioon hitsin paikka kappaleen rakenteessa. Tämä tulee huomioida ennen hitsattavan tuotteen valmistusteknisiä seikkoja, koska liitoksen tyyppi on ratkaisevassa asemassa määritettäessä muita hitsaukseen liittyviä seikkoja, kuten taloudellissuutta. Hitsausliitokset voidaan jaotella neljään eri kategoriaan.

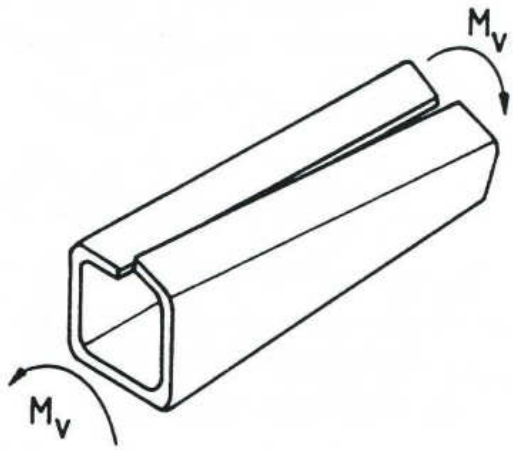
*Voimaliitoksen* tarkoitus on välittää voimia hitsattavan kappaleen osasta toiseen. Näin ollen voimaliitos mitoitetaan yhtä lujaksi liitettävien osien kanssa. Tämä tarkoittaa käytännössä lujuuslaskelmia liitoksen heikomman osan perusteella. Voimaliitos suunnitellaan yleensä läpihitsautuvaksi, joten hitsirailojen huolellinen valmistelu on tarpeellista. Esivalmistelun ja korkean laatuvaatimuksen takia voimaliitos on kalliimpi valmistaa kuin muut liitostyypit. Läpihitsautuvuus ja suuri hitsin a-mitta aiheuttavat yleensä lisäksi jälkikäsittelyn tarvetta. Näistä syistä liitoksia ei kannata ylimitoittaa voimaliitoksiksi, jos sille ei ole tarvetta. Voimaliitoksia ovat esimerkiksi vipujen ja niiden varsien liitokset, vetosauvojen silmukat sekä erilaisten ristikkorakenteiden nurkat. Esimerkkejä voimaliitoksista on esitelty kuvassa 1. (Niemi & Kemppi 1993, s. 16; Airila, Karjalainen, Mantovaara, Nurmi, Ranta & Verho 1985, s. 403; Kemppi 2008, s. 5.)




**Kuva 1.** Vipu, vetosauvan silmukka ja ristikkorakenteen nurkka (Airila et al. 1985, s. 404).

*Kiinnitysliitoksia* käytetään erilaisten kotelopalkkien ja I-palkkien kokoonpanohitsaukseen. Myös erilaisten levyrakenteiden jäykisteet luokitellaan kiinnitysliitoksiksi. Kiinnitysliitoksien lujuus ei tarvitse yleensä olla perusaineen kaltainen, koska usein esimerkiksi kotelorakenteissa ne vain estävät kotelon kiertymisen, eikä näin ollen joudu kantamaan saamaa kuormaa kuin itse kotelo. Kotelon kiertymistä on selvennetty kuvassa

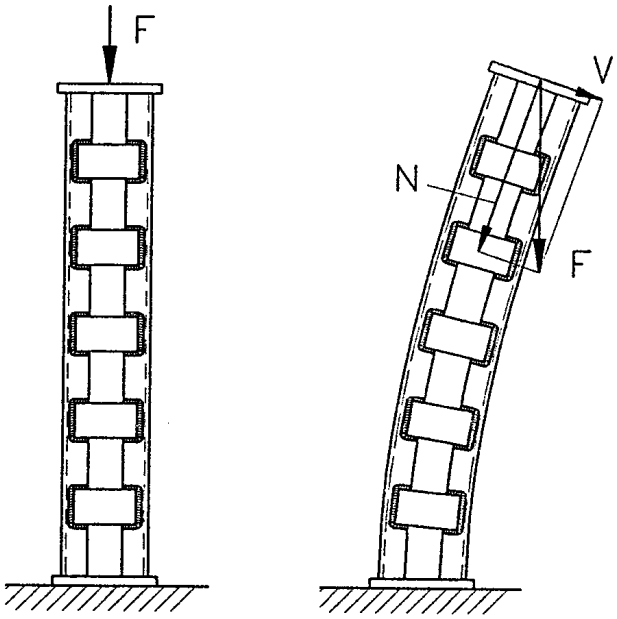
2, jossa $M_V$ kuvaa kappaleen kiertymiseen tarvittavaa momenttia. (Niemi & Kemppi 1993, s. 18.)




**Kuva 2.** Kotelon kiertyminen ilman kiinnitysliitoksia (Niemi & Kemppi 1993, s. 18).

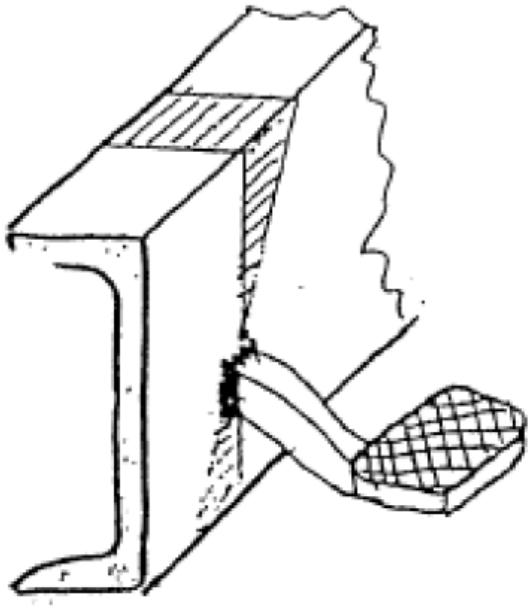
Kiinnitysliitoksen suunnittelussa on huomioitava, että kuormitusten tyypistä johtuen kiinnitysliitokset voidaan usein suorittaa käyttäen pienempää hitsin a-mittaa. Myöskään läpihitsausta ei useimmiten vaadita. Hitsin a-mittaa on käsitelty jäljempänä luvussa 3.4. Pienempi hitsin a-mitta, sekä voimaliitoksia vähäisemmät kuormituksenkestovaatimukset tekevät kiinnitysliitoksista voimaliitoksia halvempia. Ainevahvuus on kotelorakenteissa yleensä voimaliitoksia pienempi, mikä laskee materiaalikustannuksia. (Niemi & Kemppi 1993, s. 18.)

*Sideliitoksia* käytetään esimerkiksi kotelorakenteiden sisälaipoissa ja niiden tarkoituksena on estää rakenteen nurjahtamista sekä lommahtamista. Nämä sideliitoksella hitsatut laipat eivät joudu käyttökohteessaan rasitukselle muuten kuin palkin puristustilanteessa, mikä tulee ottaa huomioon hitsien mitoittamisessa. Sideliitoksilla hitsattujen laippojen ainevahvuudet ovat samaa luokkaa itse kotelorakenteen kanssa. Esimerkki sideliitoksilla kootusta kotelorakenteesta on esitetty kuvassa 3. (Niemi & Kemppi 1993, s. 20; Airila et al. 1985, s. 407.)




**Kuva 3.** Sidelaipoin tuettu puristussauva (Airila et al. 1985, s. 407).

*Varusteluhitseillä* tarkoitetaan hitsejä, joilla liitetään jokin muu rakenne valmiiseen rakenteeseen. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi putkien – ja kaapeleiden kannattimet. Varusteluhitsit eivät varsinaisesti kuormita rakennetta, mutta ne saattavat aiheuttaa siihen lämmöntuonnista johtuvia muutoksia, kuten haurasmurtumia. Esimerkki varusteluhitsistä ja sen jännitysjakaumasta on esitetty kuvassa 4. (Niemi & Kemppi 1993, s. 20.)



**Kuva 4.** Varusteluhitsi ja sen jännitysjakauma (Kemppi, J., 2008, s. 14).

## 3.2 Teräksen valinta hitsattavuuden perusteella

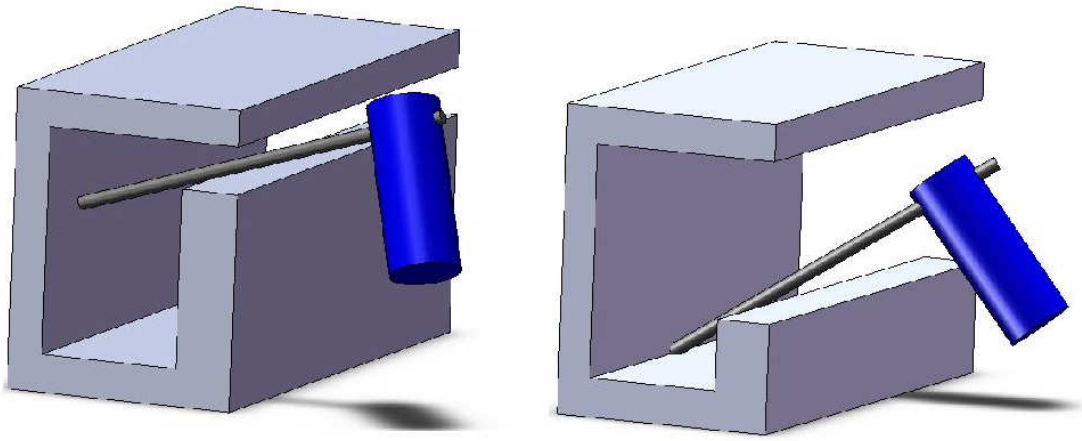
Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnittelussa tulee huomioida konstruktioon valittujen terästen hitsattavuus. Teräksen hitsattavuuteen vaikuttavat siihen seostetut lisäaineet. Seosaineiden vaikutusta hitsattavuuteen on esitetty standardissa SFS-EN 1011. Sen mukaan hitsattavuutta voidaan arvioida teräksen hiiliekvivalentin avulla, millä määritetään teräksen karkenemisherkkyys. Standardi esittää hiiliekvivalentin määrittämiseen kaavan 1.

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

Kaavaan sijoitetaan kaavassa esitetyt seosaineet niiden painoprosentteina. Teräs on hiiliekvivalentin perusteella hyvin hitsattavaa kun $C_{ekv} < 0{,}41$. Jos $C_{ekv} > 0{,}45$, joudutaan hitsauksessa käyttämään korotettua työlämpötilaa. (SFS-EN 1011-1)

## 3.3 Hitsausprosessit

Hitsattavan kappaleen suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon hitsaukseen käytettävä prosessi. Suunnittelun kannalta hitsausprosessit eroavat toisistaan sekä niiden tuottaman lämpöenergian, että luoksepäästävyyden suhteen. Luoksepäästävyydellä tarkoitetaan käytännössä hitsauspistoolin / puikonpitimen kokoa ja sitä, kuinka hyvin se saadaan taittumaan hitsattavaan kohteeseen. Kuvassa 5 on esitetty tapaus, jossa kappaleen suunnittelulla luoksepäästävyys on tehty mahdottomaksi. Kuvassa vasemmalla kotelorakenteen alahuuli on suunniteltu liian pitkäksi, jolloin lisäainepuikko ei ulotu hitsattavaan kohteeseen. Korjaavana toimenpiteenä voidaan käyttää esimerkiksi alahuulen suunnittelua matalammaksi tai hitsien siirtoa toiselle puolelle rakennetta.



**Kuva 5.** Luoksepäästävyyden huomioiminen suunnittelussa (mukaillen Hiltunen 2005, s. 31).

Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös hitsauksessa syntyvät savukaasut. Savukaasut muodostavat umpinaiseen rakenteeseen ylipaineen, joka vaikeuttaa hitsisulan hallintaa hitsin lopussa. Ylipaineesta aiheutuvien ongelmien takia hitsin lopetuskohta joudutaan usein korjaamaan jälkikäteen, mikä hidastaa tuotteen valmistumista. (Hiltunen, 2009.)

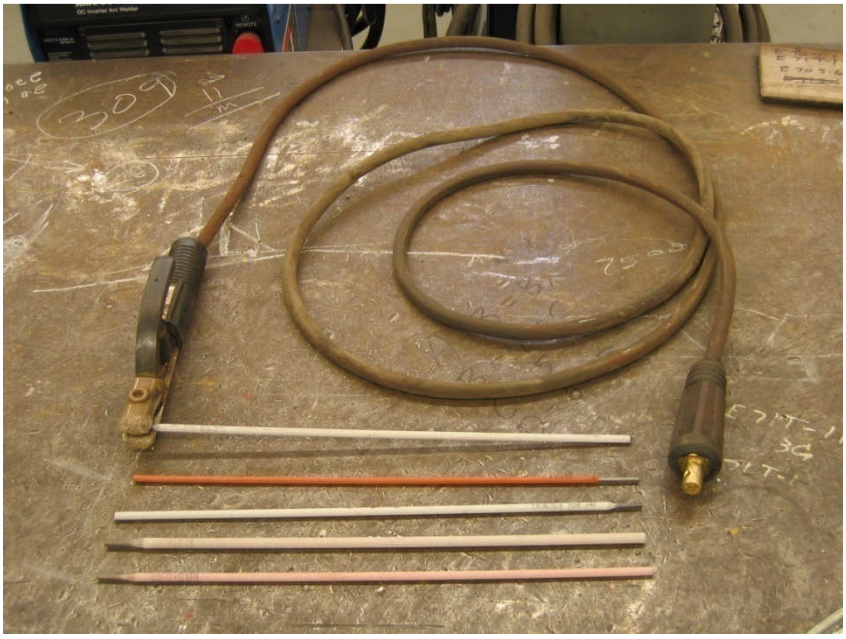
Hitsausprosessin tuottaman lämpöenergian määrä vaikuttaa hitsausmuodonmuutoksiin, joita käsitellään jäljempänä luvussa 4.

Seuraavissa luvuissa on esitelty lyhyesti yleisimmät hitsausprosessit hitsaamalla kokoonpantavan kappaleen suunnittelun kannalta: Puikkohitsaus, MIG/MAG-hitsaus sekä TIG-hitsaus. Kutakin hitsausprosessia käsittelevään lukuun on lisätty kuva kyseisessä prosessissa käytetystä hitsauspolttimesta. Kuvien tarkoituksena on helpottaa suunnittelijaa valitsemaan sopiva hitsausprosessi sen luoksepäästävyyden kannalta. Kullekin hitsausprosessille sopivia railomuotoja on käsitelty jäljempänä kappaleessa 3.5.

### 3.3.1 Puikkohitsaus

Puikkohitsaus on metallikaarihitsausta, jossa valokaari palaa työkappaleen ja lisäainepuikon välillä. Puikkohitsauksen suosio on vähentynyt 1960-luvun yli 80 % uudempien, tuottavampien prosessien tieltä, mutta se on yhä käyttökelpoinen monessa

eri hitsauskohteessa. Nykyään puikkohitsauksen osuus kaikesta hitsauksesta on n. 12 – 13 %, mitattuna käytetyn lisäainemäärän perusteella. Vähäisestä käytöstään huolimatta puikkohitsauksella on edelleen tärkeä rooli hitsaavassa teollisuudessa, esim. varusteluhitsien saralla. Tämä johtuu siitä, että puikkohitsauslaitteisto on edullinen ja pienikokoinen suhteessa muiden prosessien vaatimiin laitteistoihin. Pienestä koosta johtuen laitteisto on helppo siirtää hitsattavan kohteen työalueelle ja näin omalta osaltaan nopeuttaa prosessia. Laitteiston pienestä koosta johtuen hitsattava rakenne voidaan suunnitella kokoonpantavaksi työkohteessa. Kuvassa 6 on esitetty puikko-hitsauksessa käytettävä hitsauspuikko ja puikonpidin helpottamaan luoksepäästävyyden suunnittelua. (Lukkari 2002, s. 89; Hämäläinen, 2006; Kemppi, 2008.)



**Kuva 6.** Puikonpidin ja lisäainepuikkoja (Wikimedia, 2009).

Puikkohitsaus ei vaadi niin ikään erillistä suojakaasuvirtausta, jolloin se soveltuu siltäkin osin ulkona, tuulisissa olosuhteissa tehtävään kokoonpano- ja varusteluhitsaukseen. Hitsin suojaus ilman hapettavalta vaikutukselta on hoidettu lisäainepuikon pinnoitteella. (Lukkari 2002, s. 90.)

Tuottavuutta sarjatuotannossa heikentää se tosiseikka, että puikkohitsaus on käytännössä mahdotonta automatisoida. Tämä johtuu määrämittaisesta lisäainepuikosta, jonka vaihto on nykytekniikalla vaikeaa suorittaa automatisoidusti. Puikkohitsauksen huonoa

tuottavuutta voi tosin tehostaa käyttämällä suurriittoisuuspuikkoja. Puikkohitsauksen ulottuvuus on muita prosesseja parempi. Tämä johtuu siitä, että puikkohitsauksessa vain lisäainepuikko (pituus 200 – 350 mm) pitää saada mahtumaan hitsattavaan kohteeseen, toisin kuin esimerkiksi MIG/MAG-prosessissa, jossa koko hitsauspistoolin on mahduttava lähelle hitsirailoa. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää suunnitellessa hitsattavan rakenteen muotoja. Puikkohitsauksella on mahdollista päästä osaavissa käsissä erittäin hyviin hitsin laatuihin, mutta aloitus- ja lopetuskohtia tulee puikonvaihtojen yhteydessä väistämättä paljon. Puikkohitsaus jättää hitsisauman päälle aina kuonakerroksen, joten sauman jälkikäsittely on pakollista. (Lukkari 2002, s. 91.)

### 3.3.2 MIG/MAG-hitsaus

MIG/MAG-hitsaus (Metal-Arc Inert Gas Welding/Metal-Arc Active Gas Welding) on metallikaasukaarihitsausta. MIG-hitsauksessa hitsisula suojataan ilman hapettavalta vaikutukselta inertillä suojakaasulla, kun taas MAG-hitsauksessa suojakaasu on aktiivinen. Aktiivisia suojakaasuja ovat esimerkiksi puhdas hiilidioksidi tai hiilidioksidin ja argonin seos. Inerttejä eli reagoimattomia suojakaasuja puolestaan ovat esim. puhdas argon sekä helium. Tyypillisesti terästen hitsaamiseen käytetään MAG-menetelmää ja esim. alumiineille MIG:ä. MIG/MAG-hitsaus eroaa periaatteeltaan puikkohitsauksesta sen laitteiston osalta. Tässä menetelmässä hitsauslaitteisto syöttää automaattisesti lisäainelankaa kelalta polttimen läpi hitsattavaan kohteeseen. Kun lisäaine kohtaa hitsattavan kappaleen, virtapiiri sulkeutuu ja valokaari syttyy. Lisäainelangan paksuudet alkavat n. 0,6 mm:stä ja niitä on saatavilla aina 2,4 mm:n vahvuuksiin. Suunnittelun kannalta tulee ottaa huomioon lisäainelangan vahvuus, koska se vaikuttaa suoraan kappaleeseen tuotettuun virta-tiheyteen sekä hitsauksen tuottavuuteen. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki MIG/MAG-polttimesta helpottamaan luoksepäästävyyden suunnittelua. (Esab, 2006.)

**Kuva 7.** MIG/MAG-poltin (Turun-hitsauskone, 2009).

MIG/MAG-hitsausmenetelmällä on laitteistosta johtuen huonompi luoksepäästävyys kuin puikkohitsauksella. Hitsauspistoolin läpi johdetaan lisäainelangan lisäksi suojakaasu, joten pistoolista tulee väistämättä suhteellisen kookas (Ø ≈ 25 mm) ja sen mahduttaminen hitsauskohteeseen voi muodostua ongelmaksi. Nykyisellään MIG/MAG-laitteistoja on saatavilla myös suhteellisen pienessä koossa, joten niillä suoritettavat, kohteessa tehtävät varusteluhitsaukset ja kokoonpanot ovat mahdollisia. Laitteistojen koko on samaa luokkaa puikkohitsauslaitteiston kanssa, mutta prosessin vaatima suojakaasupullo tuo oman hankaluutensa kokonaisuuden liikutteluun. (Kemppi, 2008.)

MIG/MAG-prosessilla on monia etuja verrattuna puikkohitsaukseen. Siinä jatkuvan lisäainesyötön ansiosta hitsiin muodostuu vähemmän aloitus- ja lopetuskohtia, mikä parantaa hitsin laatua. Jatkuva lisäainesyöttö mahdollistaa myös kokoonpanohitsauksen mekanisoinnin tai automatisoinnin. Lisäaine ei puikkohitsauksen tavoin muodosta kuonaa hitsisulan päälle, joten jälkikäsittelyn määrä pienenee tai poistuu kokonaan. Tämä laskee omalta osaltaan kustannuksia nopeuttamalla tuotteen valmistusta. MIG/MAG-prosessin tuottavuus on omaa luokkaansa verrattuna puikkohitsaukseen. Puikkohitsauksessa, hitsattaessa normaaleilla hitsauspuikoilla tuottavuus jää 0,5 – 4 kg tunnissa, kun taas MIG/MAG-prosesseilla voidaan päästä jopa yli 12 kg / tunti. Hitsaus on puikkohitsauksen tavoin mahdollista kaikissa asennoissa. Haittapuolena tässä prosessissa on arkuus vetoisuudelle. Tämä johtuu siitä, että vedon myötä suojakaasu ei pysy hitsattavan railon ympärillä ja aiheuttaa näin hitsausvirheitä. Tämä ominaisuus on otettava huomioon, jos hitsattava rakenne on suunniteltu kokoonpantavaksi ulkotiloissa. Laitteisto on lisäksi kalliimpi kuin puikkohitsauslaitteisto ja se vaatii enemmän huoltoa. MIG/MAG-hitsauksessa voi lisäksi tulla näennäinen helppouden tuntu hitsaustapahtumaan. Tämä

johtaa helposti hitsausvirheisiin, kuten vajaaseen tunkeumaan. (Lukkari 2002, s.177; Suoranta, 2007.)

### 3.3.3 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas arc welding) on kaasukaarihitsausta, jossa valokaari palaa volframielektrodin ja työkappaleen välillä. Mahdollinen lisäaine syötetään hitsisulaan käsin, mikä mahdollistaa tarkan lisäaineen määrän säätelyn ja osaavissa käsissä esteettisesti kauniin hitsisauman. TIG-prosessi soveltuu tilanteisiin, jossa vaaditaan hitsiltä hyvää laatua ohuilla ainepaksuuksilla. Tämä hitsausprosessi ei yleensä vaadi aikaa vievää jälkikäsittelyä. Valokaaren energiatiheys on pienempi kuin muissa kaarihitsausprosesseissa, joten se ei sovellu paksuille ainevahvuuksille (> 6 mm). (Lukkari 2002, s. 249.)

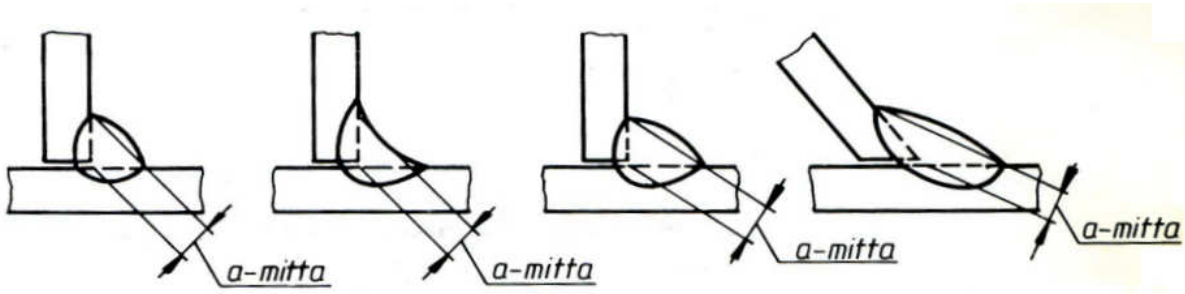
Luoksepäästävyys on heikompi kuin puikkohitsauksella, mutta toisaalta parempi kuin MIG/MAG-prosessilla. TIG-hitsauksessa käytettävä hitsain on ohuempi kuin MIG/MAG:ssa, mutta sen muoto on usein pidempi. Kuvassa 8 on esitetty TIG-hitsaimen malli helpottamaan luoksepäästävien liitosten suunnittelua.

**Kuva 8.** TIG-hitsain (Turun-hitsauskone, 2009).

TIG-hitsaus on MIG/MAG:n tavoin kuonaton prosessi, joten jälkikäsittelyä ei senkään osalla aina tarvita. Laitteisto on suhteellisen kevyt ajatellen rakenteen kokoonpanoa työkohteessa. Kokonaisuuden liikuttelua haittaa kuitenkin prosessin vaatima suojakaasupullo. (Lukkari 2002, s. 250.)

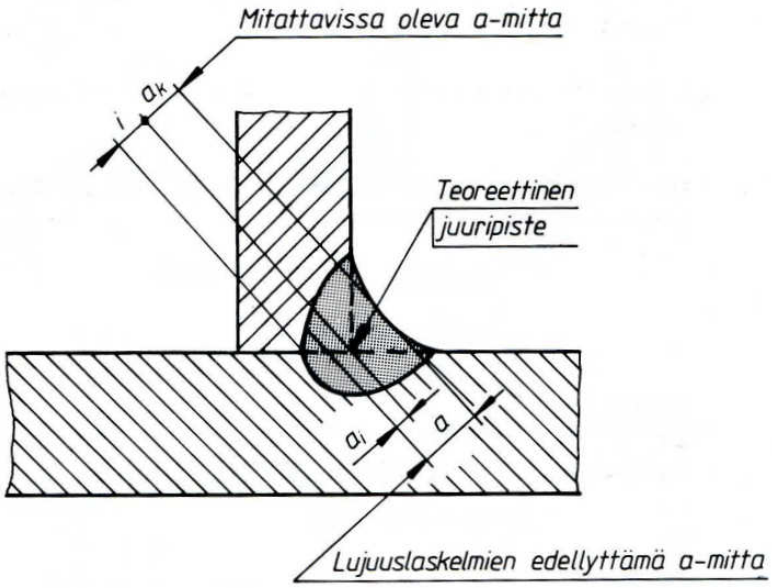
## 3.4 Tunkeuman hyödyntäminen

Tunkeumalla tarkoitetaan sitä osuutta hitsistä, joka on tunkeutunut perusaineen sisälle. Pienaliitoksissa hitsin a-mittaa käytetään liitoksen laskentapaksuutena. A-mitalla tarkoitetaan pienahitsin sisään piirretyn tasakylkisen kolmion korkeutta, jossa kyljet yhtyvät hitsirailon kylkiin. A-mitta on esitetty standardiin SFS 2373 perustuvassa kuvassa 9.




**Kuva 9.** Pienaliitoksen a-mitta (SFS 2373).

Tunkeuman hyväksikäytöllä tarkoitetaan sitä, että hitsauksen tunkeuma hyödynnetään liitoksen lujuuslaskelmissa. Tunkeuman hyväksikäytön periaate on esitetty kuvassa 10. (SFS 2373)




**Kuva 10.** Tunkeuman hyväksikäyttö (SFS 2373).

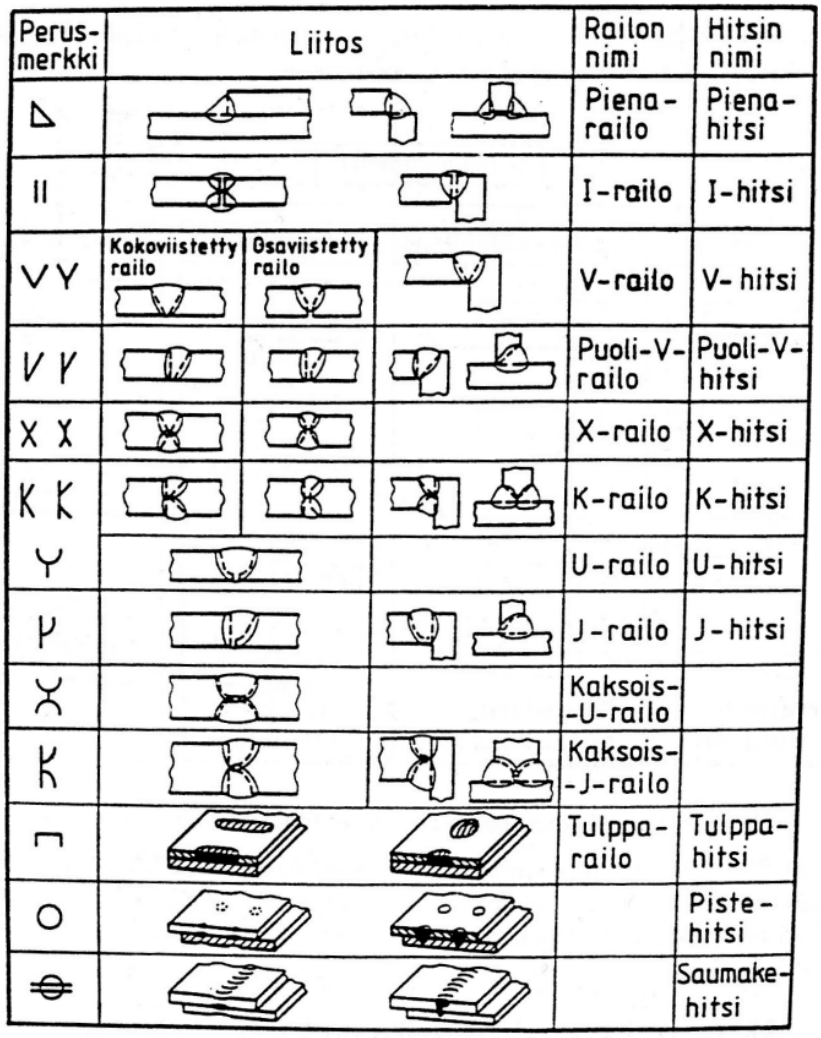
Käytettäessä hyväksi hitsin tunkeumaa, hitsin kupu voidaan jättää pienemmäksi. Tämä vaikuttaa positiivisesti hitsauksen kustannuksiin, koska lisäainetta kuluu näin vähemmän.

Se nopeuttaa myös kappaleen hitsattavuutta sekä pienentää hitsauksesta aiheutuvia lämpömuodonmuutoksia, johtuen pienemmästä hitsin tilavuudesta ja tätä kautta hitsiin johtuvasta lämpömäärästä. Standardissa SFS 2373 on esitetty tunkeuman hyväksikäyttöön liittyviä arvoja laskennan perusteeksi. Jos tunkeuma pystytään mittaamaan luotettavasti käyttämällä apuna esimerkiksi ultraääntä, voidaan mitatusta tunkeumasta hyödyntää jopa 90 % teholliseksi tunkeumaksi ($a_i$). (SFS 2373.)

### 3.5 Hitsirailomuodot ja liitostavat

Suunnittelijan tulee ottaa huomioon hitsien vaatimat railomuodot jo suunnitteluvaiheessa, jotta niiden työstäminen kokoonpantavaan rakenteeseen on mahdollista. Tällä tarkoitetaan sitä, että hitsejä sijoittaessa suunnittelijan tulee huomioida esimerkiksi hitsirailojen vaatima tila.

Hitsauksessa käytettävät railomuodot riippuvat hitsausprosessista ja hitsattavasta ainevahvuudesta. Esimerkiksi käytettäessä MIG/MAG-hitsausprosessia ja hitsattaessa yhdeltä puolelta alle neljän millimetrin ainevahvuutta, voidaan käyttää I-railoa. Ilmaraon tulee tällöin olla n. 0,5-kertainen ainepaksuuteen verrattuna. Yli neljän millimetrin ainevahvuuksilla tulee käyttää 50 – 60° V-railoa. Mitä jyrkempää kulmaa railonvalmistuksessa käytetään, sitä haastavammaksi hitsaus muodostuu. Tällöin kuitenkin hitsin kokoa saadaan pienenettyä ja sitä kautta lämmöntuonti saadaan pienemmäksi. Ilmarakona pidetään yli neljän millimetrin ainevahvuuksilla 2 – 4 millimetriä. Eri hitsausrailotyypit on esitetty kuvassa 11. (Lukkari 2002, s. 220.)

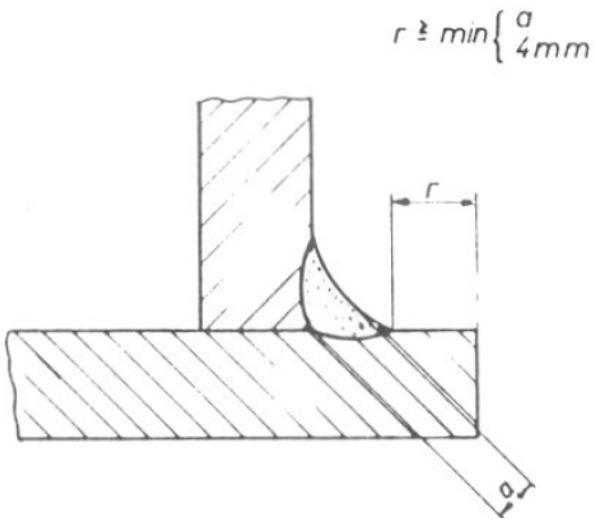



**Kuva 11.** Hitsirailotyypit ja liitostavat (Airila et al. 1985, s. 398).

Puikkohitsauksessa tyypillisin hitsausrailo on 50° V-railo. Ilmarakona puikkohitsauksessa käytetään n. 2 -4 mm (Lukkari 2002, s. 112). TIG-hitsauksessa voidaan käyttää kaikkia edellä mainittuja railomuotoja, mutta poikkeuksena hitsattaessa ohuita ainevahvuuksia ilman lisäainetta, voidaan hitsaus suorittaa ilman ilmarakoa. (Lukkari 2002, s. 266.)

Railomuodon valinnan tekee yleensä rakenteen valmistaja ja suunnittelija esittää piirustuksissaan ainoastaan vaaditut laatuvaatimukset. Jos kuitenkin hitsausrailot poikkeavat standardeissa esitetyistä tavanomaisista hitseistä, on suunnittelijan syytä ottaa kantaa käytettyyn hitsirailomuotoon. Suunnittelijalle jää myös vastuu käytetyistä railomuodoista, jos rakenteen suunnitelmat joudutaan hyväksyttämään viranomaisella ennen valmistuksen aloittamista. (Niemi 1993, s. 286.)

Hitsiliitostapoja on olemassa lukuisia erilaisia (kuva 11), mutta suunnittelijan tulee suosia pienaliitoksia aina kun se on mahdollista. Pienaliitoksen merkitys korostuu erityisesti hitsattaessa robotisoidussa ympäristössä MIG/MAG-prosessilla, sillä tällöin lisäainelangan kohdistus on helpompaa. Pienaliitoksissa myös läpipalamisen vaara on pienempi kuin muissa liitostyypeissä, sillä liitostapa tukee hitsiä sen alapuolelta. Näin ollen hitsaus ei vaadi erillisen juurituen käyttöä. Pienaliitosten suosiminen vähentää huomattavasti myös hitsausrailoilta vaadittavaa tarkkuutta ja liitettävien kappaleiden asemointi toisiinsa nähden nopeutuu. Kappaleiden kohdistustoleranssi voi olla vain viidesosa verrattuna päittäisliitokseen. Pienaliitoksia suunnitellessa, tulee huomioida hitsin vaatima tila. Tämä tarkoittaa sitä, että hitsiä ei tule sijoittaa liian lähelle kappaleen reunaa, jotta vältytään reunan sulamiselta. Riittävä tila hitsin ja kappaleen reunan välillä mahdollistaa automaattisen railonseurannan onnistumisen. Hitsin sijoituksessa nyrkkisääntönä on jättää aihion reunan ja pienan etäisyydeksi 3 – 4 mm + pienan kyljen korkeus. Pienaliitoksen paikan määrittämistä on selvennetty kuvassa 12. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 87.)

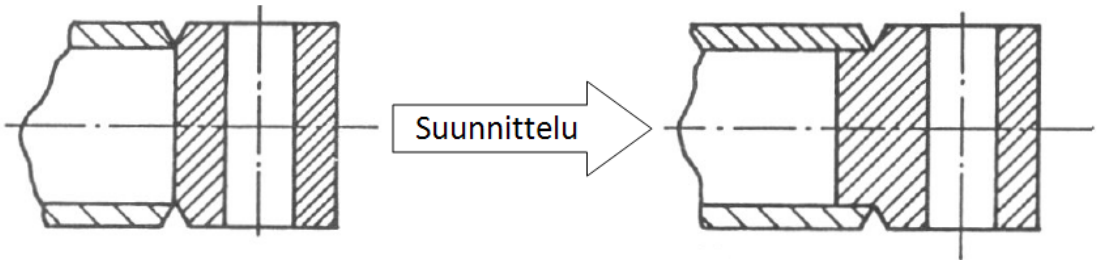



**Kuva 12.** Pienaliitoksen paikan määrittäminen (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 87).

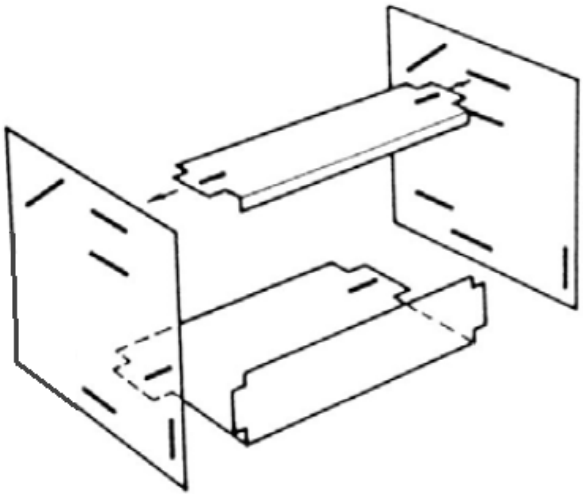
### 3.6 Liitoksen itsepaikoittuvuus

Itsepaikoittavalla liitoksella tarkoitetaan liitostyyppiä, joka paikottuu automaattisesti suunniteltuun kohtaan rakennetta. Itsepaikoittuvuus voidaan toteuttaa työstämällä hitsattaviin aihioihin kolot liitettäville pinnoille tai muotoilla kappaleet siten, että

paikoitus tapahtuu automaattisesti. Vaihtoehtona on myös käyttää ylimääräisiä paikoitusnastoja, jotka sopivat vastinkappaleeseen työstettyihin reikiin. Kahdessa ensin mainitussa tapauksessa liitokseen muodostuu hitsausta helpottava kiinteä juurituki. Juurituen avulla hitsisulan hallinta on helpompaa ja läpipalamisen vaaraa pienenee merkittävästi. Etuna on myös railotilavuuden pysyminen hallinnassa, mikä vaikuttaa suotuisasti syntyviin hitsausmuodonmuutoksiin. Kuvissa 13a ja 13b on esitetty itsepaikottuvia liitoksia. Kuva 13a esittää tilannetta, jossa liitettävän kappaleen uudelleen muotoilulla on saatu aikaan juurituki. Kuvassa 13b on esitetty itsepaikottuvaliitos, joka on toteutettu työstämällä aihioihin sopivat kolot. (Hietikko 2007, s. 48.)




**Kuva 13a.** Liitoksen suunnittelu itsepaikoittavaksi (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 88).



**Kuva 13b.** Liitoksen suunnittelu itsepaikottuvaksi aihioita työstämällä (Hiltunen 2005, s. 24).

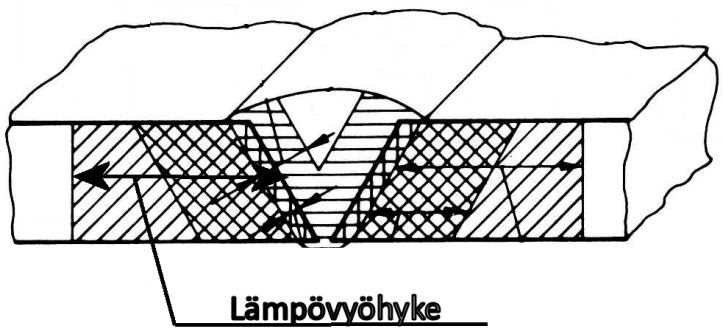
Hitsausliitokset kannattaa suunnitella aina kun mahdollista itsepaikottuviksi. Hitsauksen helpottamisen lisäksi ne nopeuttavat hitsauksen esivalmistelua, koska useassa tapauksessa vältytään aikaa vievältä silloitushitsaukselta. Silloitushitsausten puuttuminen

nopeuttaa työtä erityisesti automatisoidussa ympäristössä, koska tällöin koko hitsausprosessi voidaan suorittaa yhdessä pisteessä ilman manuaalista hitsaamista. Itsepaikottuvuudella voidaan välttää myös silloitushitsauksessa aiheutuvat virheet ja kappaleet saadaan paikoitettua tarkasti haluttuun kohtaan. (Hiltunen 2005, s. 24.)

# 4 HITSAUSMUODONMUUTOKSET

Hitsausmuodonmuutokset tulee ottaa huomioon jo kappaleen suunnitteluvaiheessa, jotta hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen kokoaminen on mahdollista. Tämä tarkoittaa muodonmuutoksien huomioimista esimerkiksi kappaleen mitoittamisessa.

Hitsausmuodonmuutokset syntyvät hitsausjännitysten tuloksena. Hitsausjännitysten syntyminen johtuu hitsattavan kappaleen epätasaisesta kuumenemisesta. Hitsin lämpövyöhyke käy läpi nopean kuumentumisen, jonka johdosta tapahtuu lämpölaajenemista. Hitsin lämpövyöhyke on esitetty kuvassa 14, muokattuna standardin SFS 3052:n kuvasta 27. (Niemi & Kemppi 1993, s. 166.)



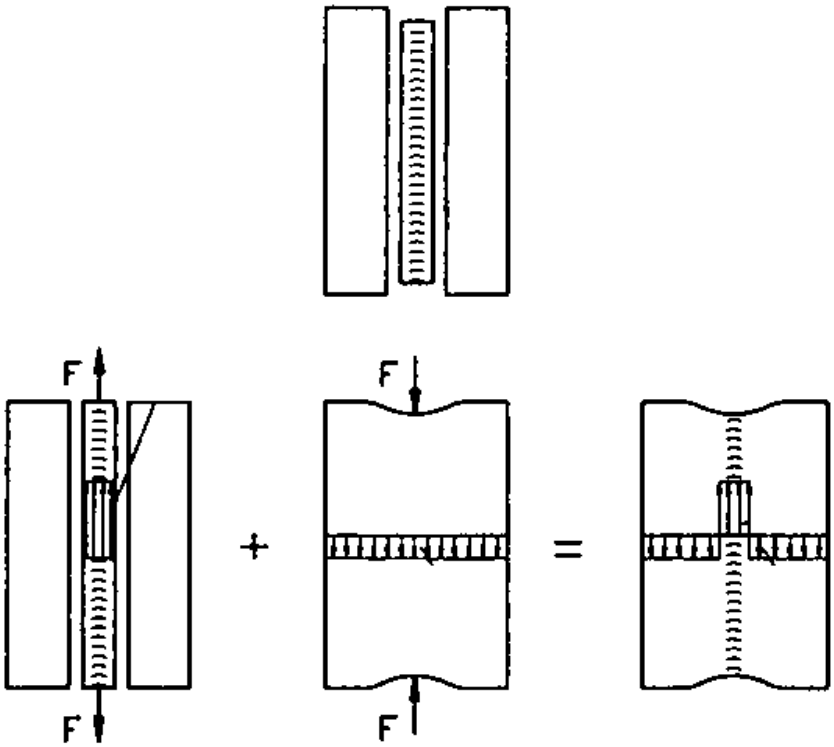

**Kuva 14.** Hitsin lämpövyöhyke (SFS 3052).

Lämpölaajenemisen suuruuteen vaikuttaa hitsiin kerralla tuotu lämpömäärä suhteessa hitsin pituuteen. Kiderakenne muuttuu austeniitiksi ja kappaleelle ominainen lujuus häviää sulavyöhykkeessä. Tämän jälkeen kappale sulaa, jota seuraa hidas jähmettyminen sekä lujuuden hidas palautuminen. Tämä sykli aiheuttaa hitsattavaan rakenteeseen epätasaista kuumenemista, jossa kuumat kohdat pyrkivät laajentumaan ja kylmät kohdat

vastaavasti estämään sitä. Kuumat kohdat joutuvat näin ollen puristukselle, kun taas rakenteen kylmät osat ovat vedon alaisina. (Niemi & Kemppi 1993, s. 167.)

## 4.1 Hitsausmuodonmuutoksien eri tyypit

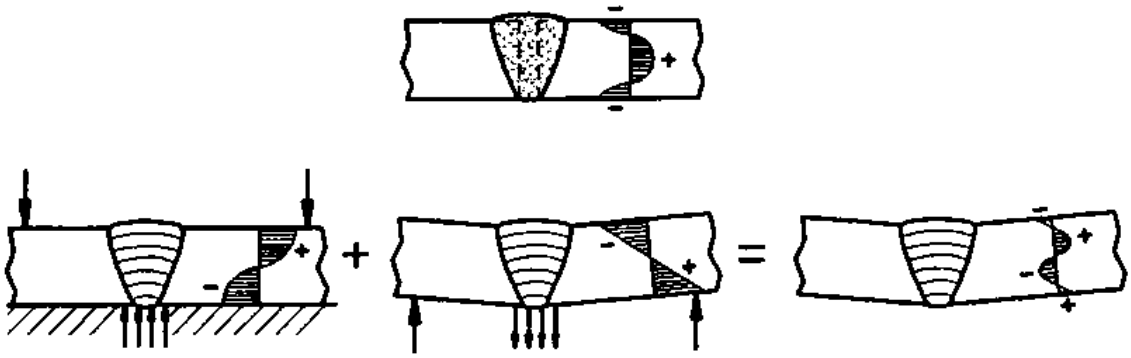
Hitsattuun kappaleeseen syntyneet kylmät alueet tyssääntyvät helposti. Kun kappale jäähtyy, nämä tyssääntyneet alueet pyrkivät kutistumaan alkuperäistä mittaansa lyhyemmiksi. Tyssääntyneiden alueiden ympärillä on kimmoisina säilyneitä kylmiä alueita, jotka pyrkivät pitämään kuuman alueen alkuperäisen mittaisena. Näin ollen hitsiin syntyy *pitkittäisjännityksiä*. Pitkittäisjännitysten synty on esitetty kuvassa 15, jossa on kuvattuna hitsattuun levyyn vaikuttavat jäännösjännitykset. Nämä jännitystyypit ovat ominaisia pitkille hitseille. (Niemi & Kemppi 1993, s. 168.)




**Kuva 15.** Hitsin pituussuuntainen jäännösjännitys (Niemi & Kemppi 1993 s. 169).

*Poikittaisjännityksille* otollinen syntypaikka on leveän levyn keskelle muodostettu hitsi. Se muodostuu samalla tavalla pitkittäisjännityksen kanssa, mutta syntyvien jännitysten suunta on erilainen. Levyn päissä vaikuttavat puristusvoimat ja keskemmällä levy joutuu vedolle. Tämä jännitystyyppi on kalvojännitystä, joka aiheuttaa levyyn kaarevuutta. Poikittaisjännitystä voi syntyä myös käytettäessä monipalkohitsausta. Siinä juuripalko

ehtii jäähtyä runsaasti ennen päällimmäisen hitsipalon jäähtymistä. Tämä voi johtaa kuvassa 16 esitettyyn tilanteeseen, jossa hitsattu levy vääntyy kiinnittimestä irrottamisen jälkeen. Kuvassa ylhäällä on esitettynä yksipalkohitsauksen jännitysjakauma. (Niemi & Kemppi 1993, s. 169–170.)



**Kuva 16.** Yksipalko- ja monipalkohitsauksen jännitysjakaumat (Niemi et al. 1993, s. 171).

## 4.2 Hitsausmuodonmuutoksien vaikutukset

Hitsausjännitykset ja sitä kautta hitsausmuodonmuutokset vaikuttavat rakenteen kestävyyteen käyttökohteessa. Jännitykset heikentävät kappaleen puristuskestävyyttä. Puristuskestävyyteen vaikuttavat ensisijaisesti jäännösjännitysten paikat. Suunnittelijan tuleekin siis ottaa huomioon jännitysten suuntien ja suuruksien lisäksi, myös jännitysten paikat suhteessa kuormaan. Hitsausjännitykset edesauttavat kappaleen murtumista, jos se sisältää jo ennestään hitsausvirheen tai väsymisestä johtuvan särön. Lamellirepeilyä syntyy eritoten kulmaliitoksissa jäähtyvän hitsin kutistuessa. Lamellirepeilyä syntyy pääasiassa erityisen jäykissä rakenteissa. Hitsausjännitykset aiheuttavat myös jännityskorroosiota. Jännityskorroosio syntyy vedyn diffundoituessa teräkseen. Vetojännitykset edesauttavat korroosion syntymistä. (Niemi & Kemppi 1993, s. 175–179.)

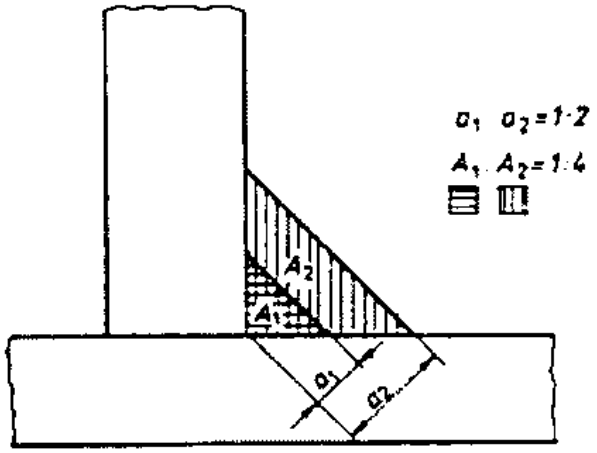
## 4.3 Hitsausmuodonmuutosten vähentäminen

Hitsausmuodonmuutoksien vähentäminen on tärkeää monestakin eri syystä. Jos kappale saadaan pysymään mittatoleranssien sisällä hitsauksen jälkeen, vältytään aikaa vieviltä tarkastusmittauksilta ja ns. työvaraa ei tarvitse ottaa huomioon hitsattavien palkkien katkaisussa. Jos hitsattava rakenne ei pysy muodonmuutoksien takia vaadituissa

mitoissaan, joudutaan turvautumaan kappaleen oikomiseen tai koneistamiseen. Muodonmuutoksien huomioimisella vältytään myös liialliselta rakenteen heikkenemiseltä, sekä tuote pysyy esteettisesti edullisessa kunnossa myös hitsauksen jälkeen. Tämä vähentää kalliin jälkikäsittelyn määrää. (Niemi & Kemppi 1993, s. 183.)

### 4.3.1 Lämmöntuonnin pienentäminen

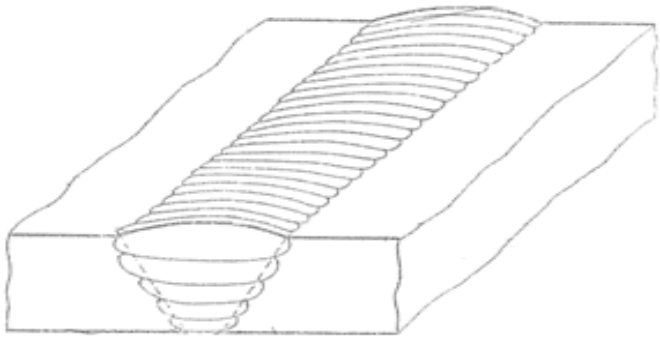
Kuten luvussa neljä esitettiin, kerralla hitsiin tuotu lämpömäärä vaikuttaa hitsattuun rakenteeseen muodostuviin jännityksiin. Näin ollen hitsejä pienentämällä, hitsiin tuotu lämpömäärä pienenee ja sitä kautta vähentää kappaleen muodonmuutoksia. Hitsien tilavuutta voidaan vähentää pienentämällä käytettyä a-mittaa tai siirtymällä jatkuvasta hitsistä katkohitsiin. Katkohitsin käyttö kasvattaa kuitenkin kappaleen väsymisriskiä ja nostaa hitsin kustannuksia. Jotta tiettyyn hitsisaumaan saataisiin sama staattinen lujuus sekä katko- että jatkuvalla saumalla, tulee a-mitta kaksinkertaistaa kuvan 17 osoittamalla tavalla. Tämä johtaa siihen, että hitsin pinta-ala nelinkertaistuu. Näin ollen hitsausmatkaa tulee puolet vähemmän, mutta hitsausaika on vastaavasti kaksinkertainen. Tämä tulee ottaa huomioon erityisesti hitsattaessa robotisoidusti, sillä automaattisesti tapahtuvassa hitsauksessa n. 90 % häiriöistä liittyy valokaaren sytyttämiseen. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 89.)




**Kuva 17.** A-mitan vaikutus hitsin pinta-alaan (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 90).

A-mitan tulee täyttää myös pienentämisen jälkeen hitsille asetetut lujuusvaatimukset. A-mitan käyttöä ja sen määrittämistä on esitetty tarkemmin luvussa 3.4.

Siirtymisellä yhdestä suuren tilavuuden omaavasta hitsipalosta monipalkohitsaukseen (Kuva 18), voidaan vaikuttaa vähentävästi kerralla hitsiin tuotuun lämpömäärään ja sitä kautta kappaleen lämpömuodonmuutoksiin. (Niemi et al. 1993, s. 180.)



**Kuva 18.** Monipalkohitsaus (Copper, 2009).

Hitsiin tuotua lämpömäärää saadaan pienennettyä myös johtamalla lämpö tehokkaammin pois hitsistä. Tehokkaampi lämmönjohtuminen saadaan aikaan esimerkiksi muotoilemalle hitsin viereen kolot, jotka kasvattavat kappaleen pinta-alaa ja edesauttavat näin lämmönjohtumista. Lämmönjohtumista voidaan parantaa myös käyttämällä kuparisia juuritukia. (Hiltunen, 2009.)

4.3.1.1 Lämmöntuonnin energiamäärän laskeminen

Suunnittelija voi vertailla hitsausprosessista riippuvia lämpömuodonmuutoksia hitsausenergian avulla. Hitsausenergiaa ja sitä kautta lämmöntuontia voidaan tarkastella kaavan 2 avulla. (Lukkari 2002, s. 54.)

$$E = \frac{I(A) \times U(V)}{v\left(\frac{mm}{s}\right) \times 1000} \text{ (kJ/mm)} \qquad (2)$$

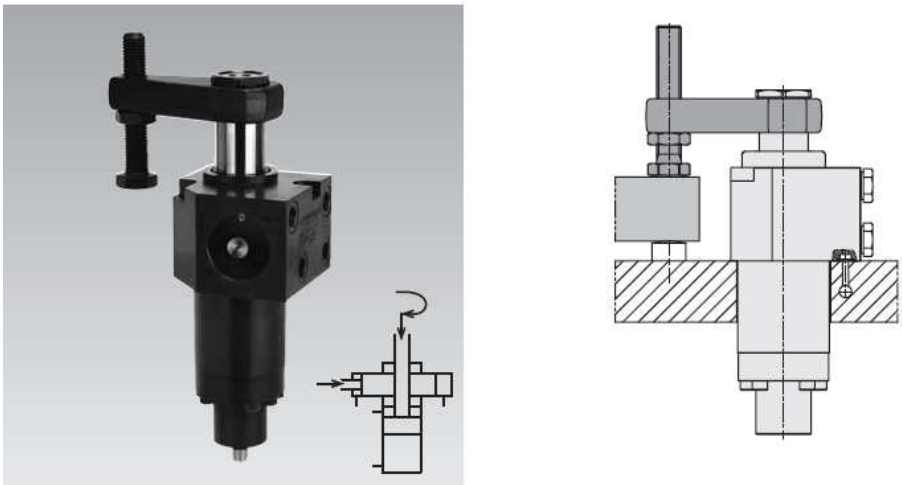
Kaavassa 2 $I$ on hitsausvirta ilmoitettuna ampeereina, $U$ on kaarijännite ilmoitettuna voltteina ja $v$ on kuljetusnopeus ilmoitettuna millimetreinä sekunnissa. Tästä saadaan johdettua kaavan 3 avulla hitsiin tuotu todellinen lämpömäärä huomioituna termisellä hyötysuhteella.

$$Q = \mathrm{k} \times \mathrm{E} \text{ (kJ /mm)} \quad (3)$$

Lämpömäärän $Q$ kaavassa $k$ on hitsausprosessille ominainen terminen hyötysuhde ja $E$ on käytetty hitsausenergia. Puikko- ja MIG/MAG-hitsauksen terminen hyötysuhde on 0,8 ja TIG-hitsauksessa hyötysuhteena käytetään arvoa 0,6. (Lukkari 2002, s. 54.)

### 4.3.2 Hitsattavan kappaleen tukeminen kiinnittimin

Hitsattava kappale voidaan tukea hitsauksen ajaksi sopivalla hitsauskiinnittimellä ja edesauttaa näin kappaleelle asetettujen mitta- ja muototoleranssien toteutumista. Kiinnittimen toiminta voi olla toteutettu hydraulisesti, paineilmalla tai manuaalisesti. Joissakin tapauksissa voidaan hyödyntää myös magneettiin perustuvaa toimintatapaa, mutta tällöin kappaleen on oltava ferromagneettinen. Hitsauskiinnittimen suunnittelussa on huomioitava kokoonpantavan kappaleen hitsausjärjestys sekä muodonmuutos-jännitysten suuruus. Lisäksi hitsauksen luoksepäästävyys on varmistettava. Tällä tarkoitetaan sitä, että kiinnittimen paikoitus ei saa estää hitsauspistoolin liikkeitä. Kiinnittimen käyttö tulee olla nopeaa, jotta se ei pidennä kappaleen läpimenoaikaa. Käytettävän kiinnittimen käytön nopeus on huomioitava jo suunnitteluvaiheessa, koska suunnittelu tehdään valitun kiinnitintyypin perusteella. Roemheld:n paineilmalla toimiva hitsauskiinnitin on esitetty kuvassa 19. (Savonia-ammattikorkeakoulu, 2005.)

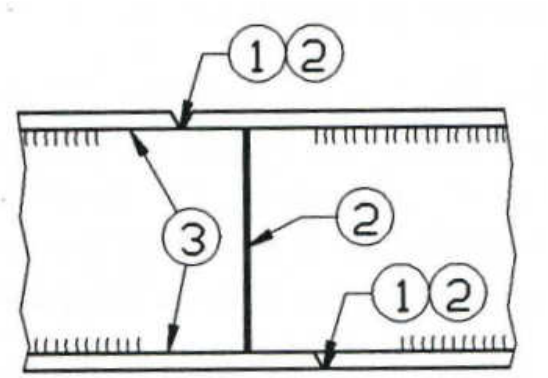


**Kuva 19.** Pneumaattisesti toimiva hitsauskiinnitin (Roemheld, 2009).

Automaattisesti toimivassa, robotisoidussa hitsaustapahtumassa kiinnittimen suunnittelu on manuaalihitsausta tarkempaa. Tällöin hitsattavan kappaleen on kiinnityttävä hitsauskiinnittimen avulla aina samaan paikkaan, koska robotisoidun hitsauksen tarkkuus on kiinni kappaleen kiinnitystarkkuudesta. Paikoituksen tarkkuus korostuu laitteistoissa, joita ei ole varustettu automaattisella railonseurannalla, vaan hitsausrata kulkee aina ennalta määritetyn radan mukaisesti. Tämän lisäksi hitsauskiinnittimen on kyettävä hoitamaan kappaleen maadoitus, mikä tulee ottaa huomioon kiinnittimen materiaalien valinnassa. (Tekninen tiedotus, 1988 s. 31.)

### 4.3.3 Hitsausjärjestys

Oikealla hitsausjärjestyksellä voidaan vaikuttaa erityisesti poikittaissuuntaisten jännitysten esiintymiseen. Käytännössä hitsausjärjestys valitaan niin, että poikittainen, jäähtyvän hitsin aiheuttama kutistuminen annetaan tapahtua mahdollisimman vapaasti. Hitsausjärjestyksellä voidaan pienentää erityisesti lamellirepeilyn vaaraa. Hitsatun I-palkin kokoonpanon hitsausjärjestys on esitetty kuvassa 20. (Niemi & Kemppi 1993, s. 182.)




**Kuva 20.** I-palkin kokoonpanon suositeltava hitsausjärjestys (Niemi & Kemppi 1993, s. 181).

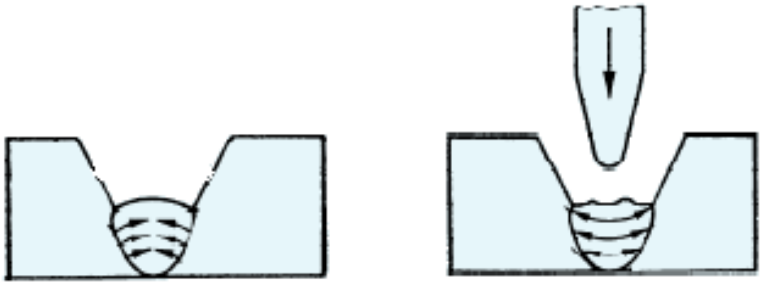
Kulutusteräksillä nyrkkisääntönä pidetään, että kaksi hitsipalkoa hitsataan aina päällekkäin. Näin toimien alimmalle palolle saadaan suoritettua päästö, jolloin rakenteen lujuus laskee, mutta sitkeyttä saadaan nostettua. Kulutusteräksillä tarkoitetaan teräslaatuja, joiden kulutuskestävyyttä on nostettu seosaineilla sekä teräsaihion lämpökäsittelyllä. Kulutusteräksen murtolujuus ja kovuus ovat yleisiä rakenneteräksiä korkeampia. (Miilux, 2008.)

Palkojen päällekkäisyyden merkitys korostuu hitsattaessa lujia teräslaatuja (Myötölujuus ≥ 360 N/mm$_2$). Kun kaksi palkoa on hitsattu päällekkäin, voidaan ruveta miettimään seuraavien palkojen hitsausjärjestystä. Niiden hitsaamisessa on otettava huomioon se, että poikittaista hitsausrailon täyttöä on pyrittävä välttämään. Päällimmäinen hitsauspalko jätetään mieluummin vajaaksi kuin ylitäytetyksi. (Miilux, 2008.)

### 4.3.4 Jännitystyypin muuttaminen

Vetojännitykset voidaan muuttaa puristusjännityksiksi vasaroimalla hitsiä**.** Jännitystyypin muuttamisella pyritään ehkäisemään kappaleen väsymistä ja jännityskorroosiota. (Niemi & Kemppi 1993, s. 182.)

Hitsin perinteinen vasarointi tapahtuu käyttäen nopealiikkeistä (25 – 100 iskua / min) vasaraa. Vasaran liike saadaan aikaiseksi joko pneumaattisesti tai hydraulisesti. Vasaroissa on tyypillisesti karkaistu puolipallon muotoinen pää, johon saadaan 5 – 15 joulen iskuenergia. Vasaroinnilla tavoitellaan syntyvän uran syvyydeksi 0,5 millimetriä. Hitsin vasaroinnin periaate ja jännitysten suunnan muutos on esitetty kuvassa 21. (Lepistö 2004, s. 24.)

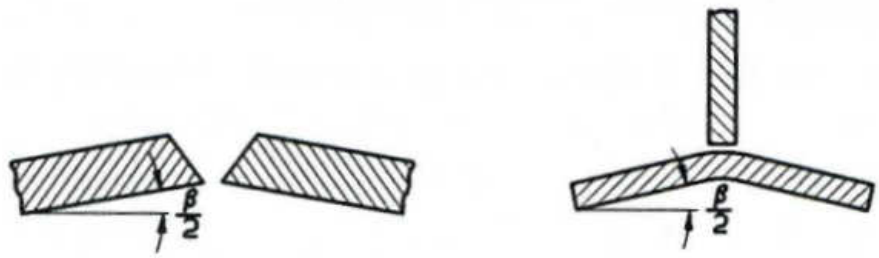


**Kuva 21.** Hitsin vasarointi (Kunnossapitokoulu 1997, s. 5).

Puristusjännitys voidaan saada aikaan myös kuulapuhalluksella. Kuulapuhalluksessa kappaleen pintaa pommitetaan halkaisijaltaan maksimissaan 1 mm:n kuulilla. Kuulien materiaali voi olla terästä, valurautaa tai keraamia ja ne saavuttavat prosessissa nopeuden 20 – 60 m/s. Kappaleen pintaan osuvat kuulat voivat nostaa kappaleen väsymislujuutta jopa 70 %. (Lepistö 2004, s. 24.)

4.3.5 Esitaivutus

Lämmöntuonnista johtuvia muodonmuutoksia voidaan vähentää hitsattavan kappaleen esitaivutuksella. Esitaivutuksessa kappale taivutetaan ennen hitsaustapahtumaa kulmaan, joka on samansuuruinen mutta erisuuntainen kulman kanssa, jonka arvioidaan syntyvän hitsaustapahtumassa. Kuvassa 22 on esitetty esitaivutuksen filosofia kulman β avulla. β kuvaa hitsaustapahtumasta johtuvaa taipumakulmaa. (Niemi & Kemppi 1993, s. 197.)




**Kuva 22.** Esitaivutuksen periaate (Niemi & Kemppi 1993, s. 198).

4.3.6 Lämpökäsittely

Lämpökäsittely on tapa poistaa hitsatuista rakenteista jännitykset ja näin pyrkiä palauttamaan niille hitsausta edeltävät ominaisuudet. Hitsauksen jälkilämpökäsittely voidaan toteuttaa käyttäen paikallista lämmitystä esimerkiksi kaasupolttimen tai lämmitysvastuksen avulla. Tällöin kuitenkin lämpötilojen hallinta on vaikeaa ja varmempi jännityksen poisto saadaan suoritettua uunissa. Tätä jännityksenpoistohehkutustapaa on käsitelty seuraavassa kappaleessa 4.3.6.1.

4.3.6.1 Jännityksenpoistohehkutus

Jännityksenpoistohehkutus tunnetaan myös myöstöhehkutuksena tai myöstönä. Hitsauksessa syntyneet jännitykset poistetaan tässä menetelmässä kuumentamalla kappale 500 – 650 °C. Tarkka kuumennuslämpötila saadaan kyseiselle materiaalille laaditusta jatkuvan jäähtymisen käyrästöstä. Kuumennus tavoitelämpötilaan tapahtuu siihen tarkoitetussa uunissa, jonka lämpötilaa voidaan hallita tarkasti. Kun tavoitelämpötila on saavutettu, hehkutetaan kappaletta uunissa useita tunteja riippuen aineen paksuudesta. Nyrkkisääntönä kuumennusajalle on tunti / ainepaksuuden tuuma. Hehkutuksen jälkeen kappaleen annetaan jäähtyä huoneenlämpöön hitaasti, esimerkiksi

uunin mukana. Jos jäähdytys uunissa ei ole mahdollista, voidaan jäähtymisen hidastamiseen käyttää alumiinioksidivillaa. Kappaleen suunnittelun kannalta on huomioitava käytössä olevan uunin koko, jotta hitsattu rakenne mahtuu sinne kokonaisuudessaan. (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, s. 318.)

# 5 HITSAAMALLA KOKOONPANTAVAN TUOTTEEN LAATU

Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnittelulla on merkittävä osa lopputuotteen laadusta. Onnistuneesti suunniteltu kappale on ennen kaikkea sille asetettujen vaatimusten mukainen ja sopiva käyttötarkoitukseensa. Tämän lisäksi lopputuotteen komponentit ovat suunniteltu niin, että ne sopivat toisiinsa ilman aikaa vievää sovittelua. Tällä tarkoitetaan käytännössä komponenttien mittojen suunnittelua oikein ja edellä käsiteltyjen lämpömuodonmuutosten hallintaa. (Martikainen 2009, s. 27.)

Suunnittelemalla kappale oikein, voidaan vaikuttaa suoraan myös hitsien tekniseen laatuun. Oikealla suunnittelulla mahdollistetaan esimerkiksi helposti toteutettavat hitsausasennot ja luoksepäästävyys. Nämä tekijät helpottavat hitsarin työtä ja edesauttavat näin laadukkaan hitsin syntymisessä. Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen tarkoituksenmukaisella suunnittelulla voidaan nostaa myös robotilla hitsattavien hitsien laatua.

Hitsin tekninen laatu voidaan jakaa neljään eri laatukategoriaan. Ensimmäinen näistä on visuaalinen laatu, jossa laadun kriteerinä on hitsin ulkonäkö. Hitsiä pidetään visuaalisesti laadukkaana, jos sen pinta on sileä eikä se sisällä esimerkiksi reunahaavoja tai pintahuokosia. Seuraavana laatukategoriana on hyvä konepajalaatu. Hyvä konepaja laatu tarkoittaa, että hitsaus on suoritettu normaalilla huolellisuudella ja vastuuntuntoisella työllä. Hitsiluokkavaatimuksena pidetään vähintään C:tä, jonka tarkastuksessa ei huomioida vajaata hitsautumissyvyyttä. Seuraavaa laatukategoriaa kutsutaan hitsiluokkalaaduksi. Hitsiluokkalaadussa hitsille on esitetty jokin standardin mukainen laatutavoite, joka sen tulee täyttää. Hitsiluokat määritellään seuraavissa luvuissa käsiteltyjen laadunvarmistusmenetelmien avulla. Tarkimpana hitsin teknistä laatua kuvaavana kategoriana pidetään hitsin metallurgista laatua. Tässä luokassa tutkitaan hitsi

menetelmäkokein, joilla varmistetaan esimerkiksi sen mikrorakenteen sopiva sitkeys. (Martikainen 2009, s. 31.)

## 5.1 Hitsauksen laatuvaatimusstandardi SFS-EN ISO 3834

Hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen suunnittelussa voidaan käyttää perusteena sellaista standardia, jolla määritetään tietty hitsauksen laatutaso yrityksessä. Hitsauksen laatuvaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN ISO 3834. Standardi sisältää huomioon otettavat asiat hitsauksen laadun kannalta. Tällaisia asioita ovat esimerkiksi a-mitan hallitseminen sekä suunnittelun ja valmistuksen yhteistyö. Standardi SFS-EN ISO 3834 ei ole sellaisenaan varsinainen laatustandardi, mutta se toimii hyvänä toimintaohjeena hitsauksen laadunhallinnassa. (SFS-EN ISO 3834.)

## 5.2 Hitsauksen laadunvarmistusmenetelmät

Hitsatun rakenteen suunnittelun ja valmistuksen takana ovat viime kädessä aina ihmiset, joten inhimilliset virheet ovat mahdollisia. Tästä johtuen hitsaamalla kokoonpantavan tuotteen laatu tulee varmistaa. Laadunvarmistus on erityisen tärkeää tilanteissa, joissa huonosti hitsattu tuote asettaisi merkittävän turvallisuusriskin. Tarkastusmenetelmillä ei voida tarkastaa tuotteelle asetettuja vaatimuksia täydellisesti, mutta ne lisäävät tuotteen turvallisuutta ja luotettavuutta huomattavasti. Hitsauksen laadunvarmistusmenetelmät ovat jaettu karkeasti kahteen pääjoukkoon, ainetta rikkomattomiin - ja rikkoviin menetelmiin. (Martikainen 1993, s. 21.)

Seuraavissa kappaleissa on käsitelty lyhyesti molempia standardien mukaisia tarkastustapoja. Aineenkoetustapojen tarkemmat tiedot ja toteutustavat löytyvät standardeista, joiden numerot on koottu taulukkoon 1.

*Taulukko 1. Aineenkoetusmenetelmien standardit.*

| Aineenkoetusmenetelmä | Standardi |
|---|---|
| Iskukoe | SFS-EN 10045-1 |
| Kovuuskoe | SFS-EN ISO 6507 |
| Radiografinen kuvaus | SFS-EN 1435 |
| Silmämääräinen tarkastus | SFS-EN 13018 |
| Tunkeumanestetarkastus | SFS-EN 571-1 |
| Ultraäänitarkastus | SFS-EN 583-1 |
| Vetokoe | SFS–EN 10002 |

### 5.2.1 Rikkomaton aineenkoetus

Ainetta rikkomattomia tarkastustapaoja kutsutaan NDT-menetelmiksi (Non Destructive Testing). Niiden tavoitteena on varmistaa kappaletta rikkomatta, että tuotteelle suunniteltu laatuvaatimus täyttyy. (Martikainen 1993, s. 21.)

NDT-tarkastus aloitetaan aina kappaleen silmämääräisellä tarkastelulla. Silmämääräinen tarkastelu voidaan suorittaa joko paljaalla silmällä tai käyttäen apuna jotakin optista apuvälinettä. Yksinkertaisesta menetelmästä huolimatta, silmämääräisellä tarkastelulla voidaan havaita pintaan aukeavat virheet joiden pituus on yli 0,05 mm. Optimaalisessa valaistuksessa ja käyttäen apuna jotakin optista apulaitetta, myös tätä pienemmät virheet on mahdollista havaita. (Martikainen 1993, s. 27.)

Silmämääräisen tarkastelun jälkeen hitsiä voidaan tutkia esimerkiksi tunkeumanestetarkastelulla. Tunkeumanestetarkastuksessa hyödynnetään kappaleen pintaan levitettävää tunkeumanestettä, joka kapillaarivoiman vaikutuksesta tunkeutuu hitsivirheisiin. Tämän jälkeen tunkeumaneste pestään pois ja pintaan levitetään kehite, jossa tietyn ajan kuluttua näkyvät hitsissä olevat virheet. Kehitteeseen jääneen näyttämän perusteella voidaan päätellä hitsausvirheen tyyppi. Tunkeumanesteen avulla voidaan havaita halkeamat, joiden leveys on vähintään 0,2 µm ja pituus yli 1 mm. Tunkeumanestetarkastelu ei sovellu luonnostaan huokoisille aineille, kuten joillekin metallivalumateriaaleille. Näissä tapauksissa voidaan käyttää jotakin muuta

tarkastusmenetelmää, kuten radiografia- tai ultraäänitarkastusta. (Martikainen 1993, s. 30.)

### 5.2.2 Rikkova aineenkoetus

Ainetta rikkovalla aineenkoetuksella päästään tarkempiin ja luotettavampiin tuloksiin kuin käytettäessä pelkkiä NDT-menetelmiä. Rikkovaa aineenkoetusta käytetäänkin yleensä vasta kappaleen hyväksytyn NDT-tarkastelun jälkeen. Ainetta rikkovilla koemenetelmillä voidaan määrittää hitsausliitokselle murto- ja myötölujuus sekä sen kovuus. Murto- ja myötölujuudet mitataan vetokokeen avulla. Vetokokeessa hitsatusta rakenteesta tehdään määrämittaisia sauvoja, jotka vedetään poikki siihen tarkoitetulla laitteella. Laite mittaa kappaleen rikkomiseen tarvittavaa voimaa, jonka perusteella voidaan määrittää rakenteelle lujuusarvot. Hitsausliitoksen kovuus mitataan yleensä itse hitsistä, sekä sen muutosvyöhykkeestä siihen tarkoitetulla laitteistolla. (Valorinta 1983, s. 63.)

Näiden lisäksi voidaan mitata liitoksen sitkeyttä iskumaisessa kuormituksessa. Iskumaisen kuormituksen kesto voidaan määrittää laitteistolla, jossa näytekappaletta lyödään heilurin päässä olevalla vasaralla. Vasaran liikeradasta voidaan määrittää kappaleen sitkeys. (Martikainen 2009, s. 216.)

# 6 YHTEENVETO

Jos tuotteen kokoonpanotavassa päädytään hitsaamiseen, tulee huomioida useita eri seikkoja. Tuotteen tarkoituksenmukaisella suunnittelulla voidaan sen kokoonpanoa helpottaa merkittävästi, mutta toisaalta huono suunnittelu voi tehdä tuotteen kokoamisesta mahdotonta. Lähtökohtana suunnittelussa tulee aina olla sen tarkka käyttötarkoituksen määrittäminen ja hitsausliitosten tyyppi, sekä sen laatuvaatimus. Vasta näiden seikkojen pohtimisen jälkeen voidaan siirtyä miettimään kokoonpantavan tuotteen valmistus- ja kokoonpanoystävällisyyttä. Valmistus- ja kokoonpano-ystävällisyyden suunnittelussa pyritään aina mahdollisimman tuottaviin ratkaisuihin. Tuottavuutta ei tule kuitenkaan parantaa tuotteelle asetettujen laatuvaatimusten kustannuksella. Tuotteen laatu kulkeekin usein käsi kädessä helpon valmistettavuuden kanssa. Esimerkiksi suunnittelemalla kokoonpantavan tuotteen hitsausliitokset siten, että

ne voidaan toteuttaa hitsarille helpossa hitsausasennossa, saavutetaan samalla sekä parempi hitsin laatu että tuottavuus.

Hitsaamalla kokoonpantavien tuotteiden suunnittelussa monet valinnat vaikuttavat useaan eri muuttujaan ja valintojen välillä täytyy tehdä joskus kompromisseja. Esimerkiksi vähäisiin hitsausmuodonmuutoksiin pyrittäessä kannattaisi aina valita TIG-hitsausprosessi. TIG:n valinnan voi kuitenkin estää liitoksen mahdoton luoksepäästävyys kyseessä olevan laitteiston hitsaimella tai valinnan voi kaataa TIG-hitsaukselle ominainen huono tuottavuus. Vaikka nämä seikat voitaisiinkin kokoonpantavan tuotteen yhteydessä hyväksyä, voi ongelmaksi muodostua se, että tuotetta valmistavalta yritykseltä ei löydy sopivaa laitteistoa ja osaamista hitsauksen suorittamiseen. Hitsaamalla kokoonpantavaa tuotetta suunnitellessa on siis tarkasteltava jokaista muuttujaa monelta eri kantilta.

Suunnittelijalta vaaditaan riittävää tietoutta hitsauksen mahdollisuuksista ja rajoituksista, sekä eri hitsausprosessien eroista. Suunnitteluprosessi kannattaakin aloittaa tutustumalla tuotetta valmistavan konepajan kalustoon mahdollisimman tarkasti. Huomiota tulee kiinnittää sekä käytettäviin hitsauslaitteistoihin, että niiden hitsaustehoihin ja erityispiirteisiin. Erityispiirteitä ovat esimerkiksi laitteistojen robotisointi ja erikokoiset hitsaimet. Laitekantaan tutustuttuaan suunnittelija voi valita sopivan konstruktiomateriaalin ja suunnitella hitsausliitokset siten, että tuote on taloudellisesti kannattavaa valmistaa.

LÄHTEET

Airila, M. & Karjalainen J. & Mantovaara U. & Nurmi L. & Ranta A. & Verho A. 1985. Koneenosien sunnittelu 2. Porvoo, Werner Söderström Oy. 482 s.

Copper, 2009. Tuote-esite. [verkkojulkaisu] [viitattu 25.9.2009] Saatavissa: <http://www.copper.org/Applications/cuni/images/welded_joint.gif>

Esab, 2006. MIG/MAG-hitsaus. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.9.2009] Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-mig-gmaw.cfm>

Hietikko, E. 2007. From Experience to Skill – HitSavonia-hankkeen loppuraportti. Kuopio, Savonia-ammattikorkeakoulu. 128 s.

Hiltunen, E. 2005. Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi. Seminaari-materiaali. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 34 s.

Hiltunen, E. 2009. Haastattelu 15.12.2009.

Hämäläinen, M. 2006. Tekniikka & Talous. Robotilla ja laserilla halpamaita vastaan. [verkkolehti] [viitattu 25.9.2009] Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/metallitekniikka/article142530.ece>

Kemppi J. 2008. Suunnittelun merkitys tuotantokustannuksiin hitsauksessa. Seminaarimateriaali.

Kemppi, 2008. Tuote-esite. [verkkojulkaisu] [viitattu 25.9.2009] Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPlWeb/minarc_family_AD211FI_0820.pdf/$file/minarc_family_AD211FI_0820.pdf

Kunnossapitokoulu, 1997. Kunnossapito-lehden erikoisliite 8/97. Helsinki. 11 s.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu. 1.painos. Helsinki, Hakapaino. 180 s.

Lepistö, J. 2004. MIG-juotto väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä. Tutkimusraportti. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 72 s.

Lindroos, V. & Sulonen, M. % Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. 1.painos. Keuruu, Otava. 841 s.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus. 4.painos. Helsinki, Edita Prima. 292 s.

Martikainen, J. 2009. Hitsauksen laadunvarmistus. Luentomoniste. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 296 s.

Martikainen, J. 1993. NDT-Tarkastuskäsikirja. 1.painos. Lahti, Lahden kirjapaino ja Sanomalehti Oy. 138 s.

Miilux, 2008. Hitsausohjeet. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.9.2009] Saatavissa: <http://www.miilux.fi/UserFiles/File/miilux%20hitsausohjeet%20suomi%20%20R%20082008%20kevyt.pdf>

Niemi, E. & Kemppi J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. 1.painos. Helsinki, Painatuskeskus. 337 s.

Roemheld, 2009. Tuote-esite. [verkkojulkaisu] [viitattu 25.9.2009] Saatavissa: <http://www.roemheld.de/EN/roemheld.aspx?cmd=home#pagetop>

Savonia-ammattikorkeakoulu. Kiinnitintekniikka. [verkkojulkaisu] 2005. [viitattu 18.9.2009] Saatavissa: <http://webd.savonia-amk.fi/projektit/markkinointi/hit/kiinnitintek.html>

SFS-EN ISO 1011-1. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2009. 26 s.

SFS 2373. Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 1980. 38 s.

SFS 3052. Hitsaussanasto. Railo ja sen valmistus, hitsit ja liitosmuodot. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 1976. 11 s.

SFS-EN ISO 3834. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2006. 17 s.

Suoranta R. 2007. Luennot. Hitsaustekniikan yleiskurssi. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

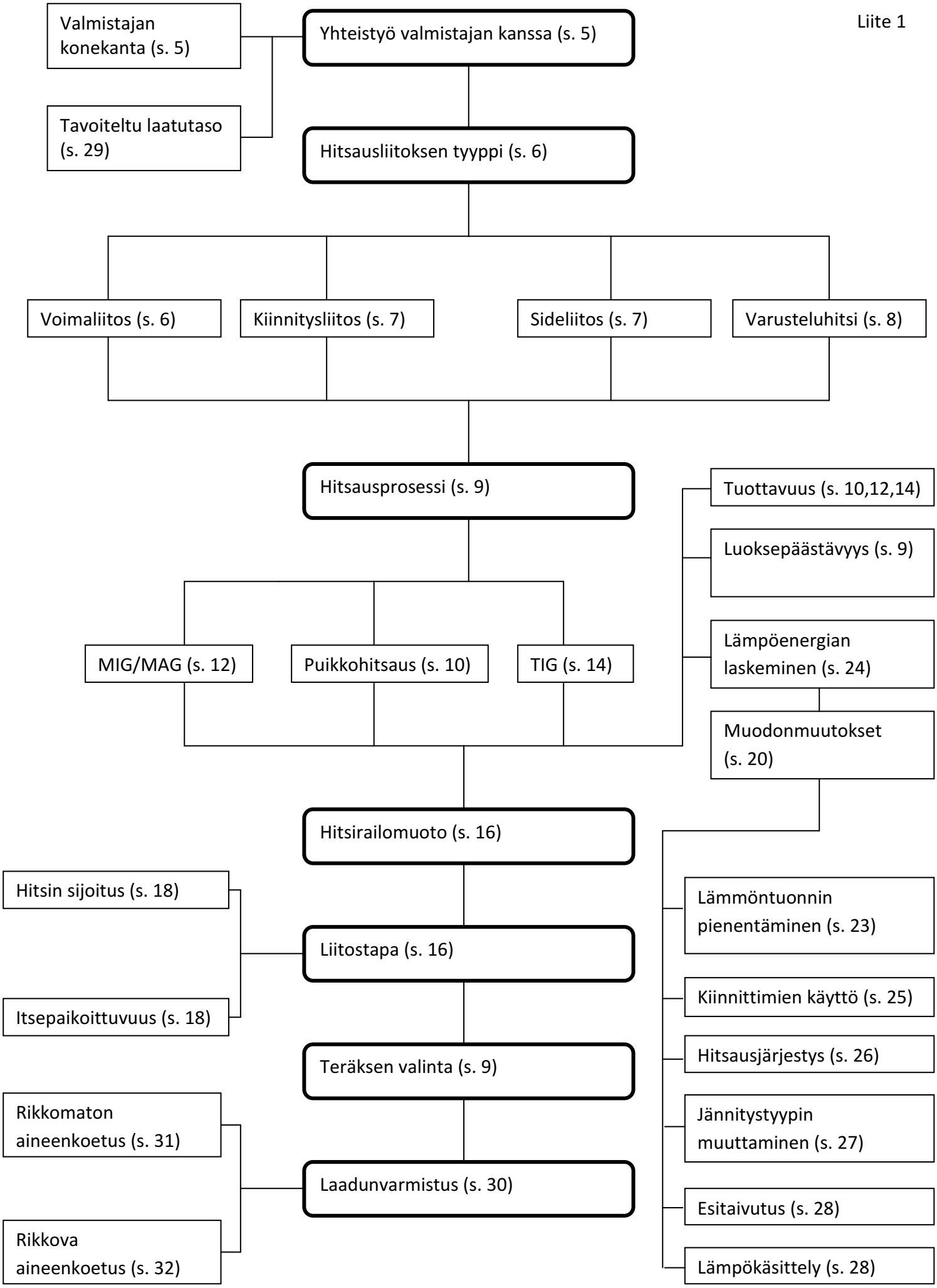
Tekninen Tiedotus. 1988. Automatisoidun kaarihitsauksen huomioonottaminen tuotteen suunnittelussa. Helsinki, Metalliteollisuuden keskusliitto. 66 s.

Turun Hitsauskone, 2009. Tuote-esite. [verkkojulkaisu] [viitattu 25.9.2009] Saatavissa: <http://www.turun-hitsauskone.com/tmp/04_shop_ikuva2-7700-.jpg>

Valorinta, V. 1983. Koneenrakentajan metallioppi. Tampereen kirjapaino Oy, Tampere. 261 s.

Wikimedia, 2009. Kuva saatavissa: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons /4/41/Arc_welding_electrodes_and_electrode_holder.triddle.jpg>

Liite 1


Valmistajan konekanta (s. 5)
Tavoiteltu laatutaso (s. 29)
Yhteistyö valmistajan kanssa (s. 5)
Hitsausliitoksen tyyppi (s. 6)
Voimaliitos (s. 6)
Kiinnitysliitos (s. 7)
Sideliitos (s. 7)
Varusteluhitsi (s. 8)
Hitsausprosessi (s. 9)
Tuottavuus (s. 10,12,14)
Luoksepäästävyys (s. 9)
Lämpöenergian laskeminen (s. 24)
Muodonmuutokset (s. 20)
MIG/MAG (s. 12)
Puikkohitsaus (s. 10)
TIG (s. 14)
Hitsirailomuoto (s. 16)
Hitsin sijoitus (s. 18)
Itsepaikoittuvuus (s. 18)
Liitostapa (s. 16)
Teräksen valinta (s. 9)
Rikkomaton aineenkoetus (s. 31)
Rikkova aineenkoetus (s. 32)
Laadunvarmistus (s. 30)
Lämmöntuonnin pienentäminen (s. 23)
Kiinnittimien käyttö (s. 25)
Hitsausjärjestys (s. 26)
Jännitystyypin muuttaminen (s. 27)
Esitaivutus (s. 28)
Lämpökäsittely (s. 28)