LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

MUODONMUUTOSTEN JA JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN HALLINTA KUUMENNETTAESSA
CONTROL OF DISTORTIONS AND RESIDUAL STRESSES WHEN HEATING

Varkaudessa 10.10.2014
Pia Kaila
Työntarkastaja: Professori Timo Björk

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 3

2 KUUMENTAMINEN 4

3 JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET 7

3.1 Jännitystyypit 9

3.2 Jännitysten mittaus 13

3.2.1 Ainetta rikkovat mittausmenetelmät 14

3.2.2 Ainetta rikkomattomat mittausmenetelmät 16

3.3 Jännitysten pienentäminen tai poistaminen 16

4 MUODONMUUTOKSET 19

4.1 Muodonmuutostyypit 21

4.2 Muodonmuutosten mittaus 23

4.3 Muodonmuutosten ennaltaehkäisy, vähentäminen ja oikominen 24

4.3.1 Ennaltaehkäisy-, vähennys- ja oikomistavat toimenpiteittäin 26

4.3.2 Ennaltaehkäisy-, vähennys- ja oikomistavat muodonmuutoslajeittain 31

5 MALLINTAMINEN 32

6 AIHEESTA TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA 34

7 YHTEENVETO 40

LÄHTEET 41

LIITTEET

LIITE I: Outokummun ruostumattomat teräkset.

LIITE II: Outokummun ruostumattomien teräksien fysikaaliset ominaisuudet.

1 JOHDANTO

Teräsrakenteisiin syntyy käsittely- ja valmistusvaiheissa muodonmuutoksia ja jännityksiä, ilman ulkoista kuormitusta. Tässä työssä tarkastellaan kuumentamisesta aiheutuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia sekä niiden hallintaa. Aiheesta on olemassa paljon materiaalia koskien hitsausta, minkä vuoksi kuumennusta tarkastellaan hitsauksen lämmöntuonnista aiheutuvien vaikutusten kautta. Samaa tarkastelua voidaan soveltaa myös polttoleikkaukseen ja kuumilla oikomiseen. Kuumilla oikomisella tarkoitetaan lämmön nostamista paikallisesti muodonmuutoskohdassa, mistä aiheuttaa paikallisen kutistumisen, joka oikaisee ei-toivottua poikkeamaa kappaleessa. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 167.)

Tapauskohtaisella tarkastelulla pystytään tarkemmin perehtymään muodonmuutoksiin ja jäännösjännityksiin sekä niiden hallintaan. Tässä työssä kuitenkin keskitytään vain yleisesti muodonmuutosten ja jäännösjännitysten tarkasteluun kirjallisuuden kautta. Näin ollen kuumennettavassa materiaalissa tapahtuvat sisäiset muutokset, materiaalikohtaiset muutokset ja eri kuumennusprosessit jäävät yleiseksi tarkasteluksi. Tämä työ toimii taustatietona tulevaan diplomityöhöni, jossa tarkastellaan tapauskohtaisesti kuumentamisesta muodostuvia muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä sekä niiden hallintaa. Laskennallista osuutta muodonmuutoksista ja jäännösjännityksistä käsitellään diplomityössä.

Tässä työssä tarkastellaan jäännösjännitysten ja muodonmuutosten syntymistä, eri ilmenemistapoja, mittaamista sekä hallintaa ennaltaehkäisemällä, vähentämällä ja poistamalla kappaleeseen syntyviä muutoksia. Näin saadaan kokonaisvaltainen käsitys muodonmuutosten ja jäännösjännitysten hallinnasta kuumennettaessa, mitä voidaan hyödyntää taustatietona tulevaisuudessa. Työssä pohditaan vielä mallintamisen avulla jäännösjännitysten ja muodonmuutosten tutkimista niin yleisesti kuin jo tehtyjen tutkimusten kautta. Mallintamisen pohtimista sekä aiemmin tehdyistä tutkimuksista saatavaa tietoa hyödynnetään diplomityössä käytettävään mallintamiseen.

2 KUUMENTAMINEN

Materiaalille tehdään valmistusvaiheissa monia eri käsittelyitä. Teräksen valssauksessa lämpötilan nosto ja sen jälkeinen epätasainen jäähtyminen jättävät sisäisiä jännityksiä. Teräslevyn käsittely eri työvaiheissa, kuten leikkauksessa, särmäyksessä tai rullamuovauksessa, synnyttää rakenteeseen veto- ja puristusjännityksiä. Polttoleikkaus ja erityisesti hitsaus aiheuttavat kappaleeseen erisuuntaisia jännityksiä epätasaisesti tuotavan lämmönjakauman vuoksi. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 352.) Paikallinen kuumentaminen ja epätasainen jäähtyminen aiheuttavat myös muutoksia materiaaliominaisuuksiin sekä jäännösjännityksiä ja/tai muodonmuutoksia (Carrolo, 2010, s. 1). Kuumentamisen vaikutuksia arvioidaan kuumentamisen monimuotoisuuden takia yleensä FE-analyysillä, eli elementtimenetelmällä suoritettavalla laskennalla. Kuumentamisen mallintamisessa huomioidaan paikallisen kuumentamisen, materiaaliominaisuuksien riippuvuuden lämpötilasta, liikkuvan lämmönlähteen ja jäähtymisen vaikutukset. (Zeng et al., 2010, s. 535.)

Hitsattava kohta joutuu kokemaan hitsauksen aikana tietyn lämpösyklin ja siitä aiheutuvan muodonmuutossyklin. Kuumennettavassa kohdassa esiintyy eri vaiheita, jotka jokainen omalla tavallaan vaikuttavat syntyviin sisäisiin jännityksiin ja muodonmuutoksiin. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 167.) Nämä vaiheet ovat ferriittisen teräksen tapauksessa Niemen ja Kempin (1993, s. 167) mukaan: ”nopea kuumentuminen ja siihen liittyen lämpölaajeneminen ja lujuuden heikkeneminen, kiderakenteen muuttuminen austeniitiksi, lujuuden häviäminen, sulaminen, jähmettyminen, lujuuden hidas palautuminen, austeniitin hajaantuminen ja siihen liittyvä tilavuuden kasvu sekä jäähtyminen ja siihen liittyen kutistuminen ja lujuuden kasvu.” Sen sijaan austeniittisissa teräksissä ei tapahdu faasimuutoksia.

Kuumennettaessa teräksessä aiheutuvia faasimuutoksia tarkastellaan materiaaliominaisuuksien avulla. Terästä seostamalla saadaan aikaan ruostumattomia, haponkestäviä ja tulenkestäviä materiaaleja, ruostumattomia teräksiä. Teräkseen lisättävät seosaineet vaikuttavat materiaalin jähmettyessä mikrorakenteeseen. Näin ollen ruostumattomat teräkset voidaan jakaa rakennetyyppinsä mukaan austeniittisiin,

ferriittisiin, austeniittis-ferriittisiin eli Duplex-teräksiin ja martensiittisiin ruostumattomiin teräksiin. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 196.) Rakennetyyppien vaikutusta kuumennukseen pystytään vertailemaan lämmönjohtavuuksien ja lämpölaajenemiskertoimien avulla. Lämmönjohtavuus kuvaa kykyä hallita lämmön virtausta materiaalin läpi vakaassa tilassa (Cverna, 2002, s. 1). Lämpölaajenemiskerroin ilmaisee kuumennettaessa tapahtuvan materiaalin laajenemisen määrän. Lämpölaajenemiskerroin voidaan määritellä myös erittäin pienenä pituuden kasvuna jokaista lämpötilan yksikön nostoa kohti. (Cverna, 2002, s. 9.)

Outokumpu Oy on taulukoinut lämmönjohtavuuksia ja lämpölaajenemiskertoimia eri ruostumattomille teräksille. Liitteessä I on taulukko Outokummun ruostumattomista teräksistä ja liitteessä II ruostumattomien terästen fysikaalisista ominaisuuksista. Liitteestä II voidaan kerätä taulukossa 1 olevat lämmönjohtavuuksien ja lämpölaajenemiskertoimien keskiarvot ruostumattomien terästen rakennetyypeille sekä seostamattomalle teräkselle.

Taulukko 1. Lämmönjohtavuuksien ja lämpölaajenemiskertoimien keskiarvot ruostumattomien terästen rakennetyypeille sekä seostamattomalle teräkselle (Outokumpu, 2013, s. 12–13).

	Lämmönjohtavuus, λ [W/m°C]		Lämpölaajenemiskerroin 20 °C ja T välillä [10^{-6}/°C]	
	Huoneenlämpö	400 °C	100 °C	400 °C
Seostamaton teräs	55	44	12,0	14,0
Austeniittinen ruostumaton teräs	15	20	16,0	17,7
Ferriittinen ruostumaton teräs	24	25	10,3	11,1
Duplex-teräs	15	20	13,0	14,5
Martensiittinen ruostumaton teräs	26	25	10,7	11,9

Seostamattoman teräksen lämmönjohtavuus on paljon suurempi kuin seostetun, mistä johtuen ruostumattomilla teräksillä hitsausalueen jäähtyminen on hidasta. Lämpölaajenemiskerroin on martensiittisilla ja ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä pienempi kuin seostamattomalla teräksellä, jolloin hauraan mikrorakenteen, raekoon kasvun ja korroosionkeston menetyksen välttämisen vuoksi hitsattaessa käytetään esi- ja

jälkikäsittelyjä. Duplex-teräksen lämpölaajenemiskerroin on samaa luokkaa seostamattoman teräksen kanssa. Näin ollen Duplex-teräksellä on hyvä hitsattavuus ja siinä tapahtuu vain vähän muodonmuutoksia kuten seostamattomalla teräkselläkin. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 30.)

Austeniittisen teräksen lämpölaajenemiskerroin on suurempi kuin seostamattoman teräksen. Tästä ja pienemmästä lämmönjohtumisesta johtuen hitsausjännitykset keskittyvät pienemmille alueille ja niistä aiheutuvat muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia seostamattomaan teräkseen verrattuna. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 196–197.)

Kappaleen epätasainen kuumeneminen aiheuttaa Niemen ja Kempin (1993, s. 167) mukaan, että ”syntyy jännityksiä; kuumat kohdat pyrkivät laajenemaan ja kylmät kohdat pyrkivät estämään sitä. Tässä vaiheessa syntyy kuumiin kohtiin puristusta ja kylmiin kohtiin vetoa.” Hitsatessa tai esimerkiksi pelkästään liekillä kuumennettaessa kappaleeseen tuotavan lämmön vaikutusalue on pieni, kun verrataan kappaleen kuumentamattomaan osaan. Kuumennetun alueen myötölujuuden pieneneminen aiheuttaa tyssääntymistä, kun kylmät alueet säilyttävät kimmoisuutensa. Jäähtymisvaiheessa kuumat tyssääntyneet alueet pyrkivät kutistumaan alkuperäistä mittaansa lyhyemmiksi, kun taas kylmät kimmoisat alueet pyrkivät estämään kutistumista, erityisesti hitsin pituussuunnassa. Lämpötilan tasaannuttua hitsin luona vallitsee pituussuuntainen, myötölujuuden suuruinen vetojännitys ja muualla ympäristössä puristusjännitys pitämässä kappaleen tasapainossa. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 167–168.)

3 JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET

Jäännösjännitysten jakautuminen ja muodonmuutosten määrä riippuu plastisen rasituksen jakautumisesta, lopputilasta sekä yhteensopivuudesta liitoksessa (Feng, 2005, s. 4). Nämä rasitukset ovat yhdenmukaisia pitkin hitsin pituutta, paitsi aloitus- ja lopetusalueilla (Feng, 2005, s. 7).

Valmiin rakenteen vääränlaisesta oikomisesta, joko kylmänä tai kuumennettuna, aiheutuu ei-toivottuja jännityksiä kappaleeseen, vaikkakin tarkoituksena on ollut poistaa valmistuksen yhteydessä tulleet muodonmuutokset. Sisäiset jännitykset syntyvät kappaleeseen jonkin toimenpiteen seurauksena eivätkä sisällä mitään ulkoisesta kuormasta rakenteeseen aiheuttavia jännityksiä. Sisäisten jännitysten haitoista osa on silmällä havaittavissa ja osa piilevinä vaurioina rakenteessa. Nämä piilevät vauriot saattavat tulevaisuudessa aiheuttaa jännityksen laukeamisen kuormituksen tai jonkun muun tekijän vaikutuksesta. Havaitsematta jääneistä vaurioista voi seurata heikentynyt kestävyys muun muassa haurasmurtumien, väsymisen, nurjahduksen, lommahduksen tai jännityskorroosion muodossa. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 352.)

Hitsaustapa, materiaalin valinta ja suunnitteluyksityiskohdat vaikuttavat syntyviin jäännösjännityksiin seuraavasti:

1) Erityisen korkea moniaksiaalinen jäännösjännitys syntyy kuumennettaessa muutosvyöhykkeelle.
2) Maksimijäännösjännitykset yleensä saavuttavat myötörajan (ilman kovettumista), kuitenkin suuremmat arvot ovat mahdollisia kovettumisen sekä jännityksen moniaksiaalisuuden tuloksina, ja alhaisemmat arvot muodonmuutosvenymien superponoitumisen tuloksina.
3) Jäännösjännitykset voivat vaihdella suuresti pisteestä riippuen muutosvyöhykkeellä.
4) Suuresti eroavat jäännösjännitykset voivat esiintyä osien pinnalla sekä sisällä etenkin muuntuvien seostettujen terästen tapauksessa.

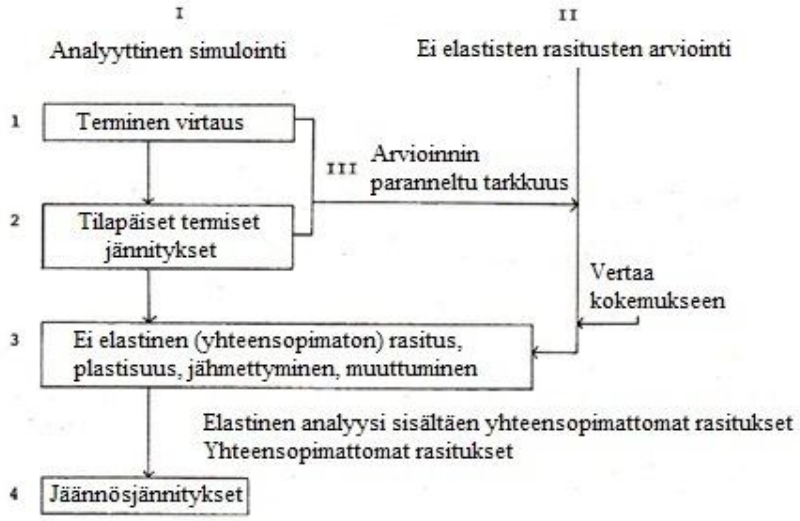
5) Merkittävät erot esiintyvät liittyen poikittaisiin jäännösjännityksiin levykaistaleen pitkittäisen hitsin ja ympärihitsatun sylinterimäisen tai pallomaisen kuoren välillä, johtuen ympärihitsin supistumasta.
6) Erityisen epäsuotuisa hitsausjäännösjännitystila ilmestyy monissa tapauksissa hitsauksen lopetuskohdassa.
7) Huomioitavat erot jäännösjännityksissä esiintyvät verrattaessa yksipalko- ja monipalkohitsauksia. Monipalkohitsauksessa vain ensimmäinen ja viimeinen palko käyttäytyvät samalla tavalla kuin yksipalkohitsaus; kaikki jäljelle jäävät palot ovat esilämmitettyjä edellisten palkojen toimesta ja jälkilämpökäsiteltyjä myöhempien palkojen toimesta.

(Radaj, 1992, s. 200.)

On olemassa useita menetelmiä, joilla hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä voidaan analysoida. Näitä menetelmiä on esitetty kuvassa 1. Ensimmäinen menetelmä, analyyttinen simulointi, tutkii mitä oikeasti tapahtuu hitsauksen aikana. Tässä lähestymistavassa edetään askeleittain:

1) Termisen virtauksen tutkiminen.
2) Tilapäisen termisen jännityksen tutkiminen.
3) Plastisten rasitusten määrittäminen.
4) Jäännösjännitysten tutkiminen.

Plastista rasitusta kutsutaan myös ei elastiseksi ja yhteensopimattomaksi rasitukseksi. Plastisella rasituksella tarkoitetaan jähmettymisessä ja kiinteän olomuodon muutoksissa syntyviä rasituksia. Jäännösjännityksiä tutkiessa kolmas askel on tärkein. Jos tilapäiset termiset jännitykset ovat täysin elastisia ja plastisia rasituksia ei muodostu, ei jäännösjännityksiä jää jäljelle. (Masubuchi, 1980, s. 189.)



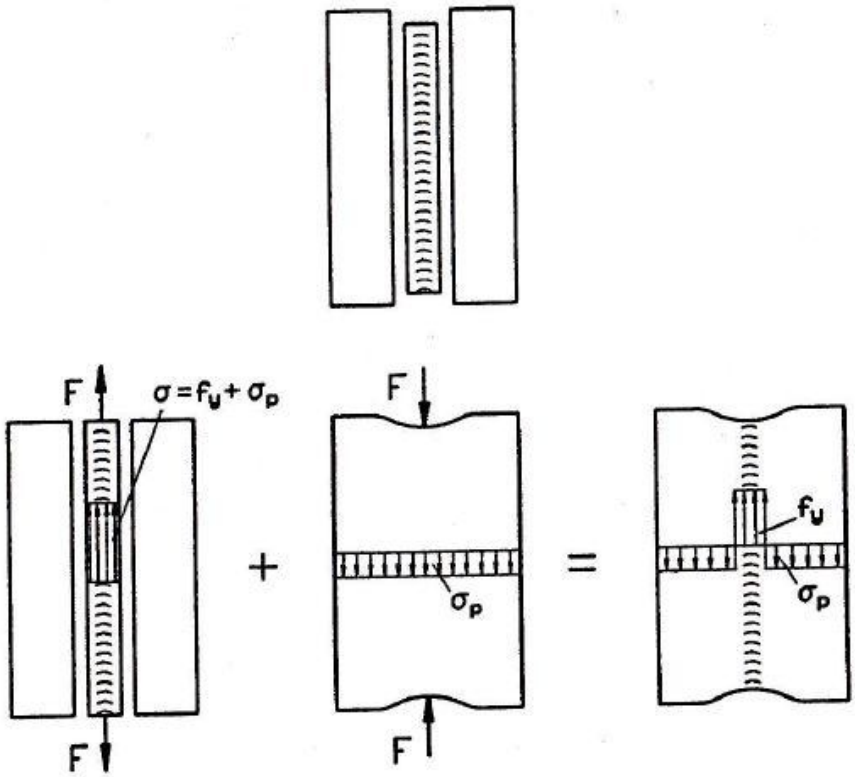
Kuva 1. Menetelmät jäännösjännitysten analysoinnille hitsauksessa (mukaillen Masubuchi, 1980, s. 190).

Analyyttinen simulointi on selvästi perinteisin lähestymistapa ongelmaan, mutta monimutkaisuus etenkin yllä mainitussa kolmannessa askeleessa tekee siitä epäkäytännöllisen ja vaikean soveltaa monimutkaisia hitsauksia tarkastellessa. Koska jäännösjännityksien määrittäminen riippuu pelkästään plastisten rasitusten jakautumisesta, on kehitetty toinen menetelmä, joka ohittaa askeleet yksi ja kaksi sekä välttää monimutkaista plastisuusanalyysiä. Toisin kuin ensimmäinen menetelmä, tätä voidaan soveltaa monimutkaisten hitsauksien analysointiin. Toisaalta ei ole olemassa varmoja tapoja tarkasti arvioida plastisten rasitusten jakautumista. Analyyttistä simulointia käytetään kehittämään plastisten rasitusten jakautumisen arvioimista. Kolmas menetelmä yhdistää kaksi edellistä. Kolmannessa tavassa käytetään matemaattista analyysiä kokeellisessa jäännösjännitysten ja muodonmuutoksien tutkimuksessa. (Masubuchi, 1980, s. 189–190.)

3.1 Jännitystyypit

Hitsattuun kappaleeseen muodostuu pitkittäisjännityksiä, poikittaisjännityksiä ja paksuussuuntaisia jännityksiä. Pitkittäisiä jännityksiä pystyy havainnollistamaan selvästi ajattelemalla kuumentamisesta syntynyt tyssääntynyt kaista leikatuksi irti kylmistä kimmoisista alueista (kuva 2). Tyssääntynyt kaista kutistuu ja näin ollen se on alkuperäistä lyhyempi, kun kylmät kimmoiset alueet pysyvät alkuperäisen pituisina. Kutistunutta osaa on venytettävä voimalla F, jotta se saadaan liitettyä takaisin kutistumattomaan osaan.

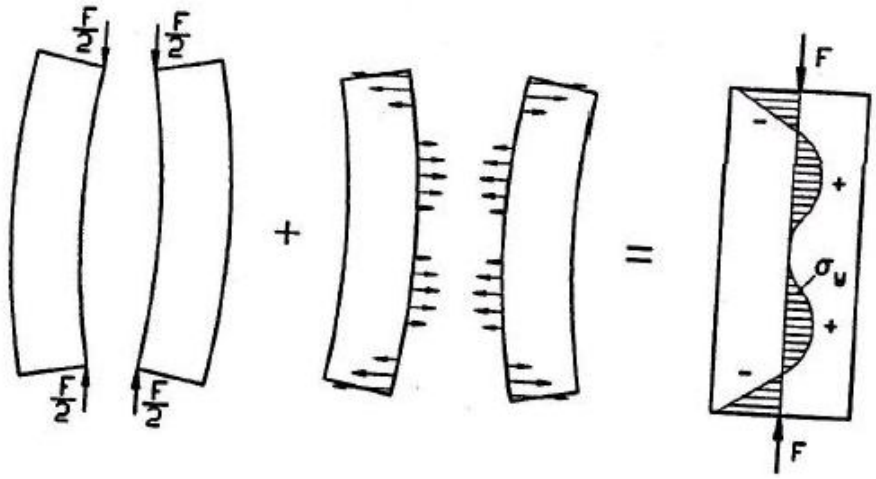
Voima F on näin ollen vetoa ja sen on oltava hieman suurempi kuin kappaleen teoreettinen myötökuorma. Tasapainon ylläpitämiseksi ulkoisesti kuormittamattomassa kappaleessa on voima F kumottava sisäisellä puristusvoimalla. Kuvasta 2 voidaan myös huomata kappaleessa vaikuttavat voimat ja muodonmuutosten käyttäytyminen. Pitkittäisjännityksestä aiheutuvien muodonmuutosten voidaan todeta olevan samat kuin päistä voimalla F kuormitetun hitsaamattoman kappaleen. Ainoana erona on, etteivät sisäiset voimat aiheuta kappaleen nurjahtamista kuten ulkoiset voimat aiheuttaisivat. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 354; Niemi & Kemppi, 1993, s. 168.)



Kuva 2. Kuumennuksen pitkittäisjännitysten aiheuttaman sisäisen jännitystilan kuvaus käyttämällä apuna ulkoista voimaa F (Niemi & Kemppi, 1993, s. 169).

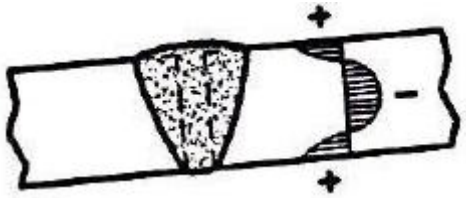
Ohuemmilla ainevahvuuksilla olevissa levyissä kuumennettaessa syntyvä kuumavyöhyke vaikuttaa suurempaan alueeseen ja tällöin kappaleessa ei välttämättä ole tarpeeksi kylmiä kimmoisuutensa säilyttäneitä kohtia vastustamassa lämpöenergian vaikutuksesta tapahtuvia muodonmuutoksia. Näissä tapauksissa kappaleet ovat taipuvaisia lommahtamaan. Tällaisissa levyissä erityisen suuri lommahdusvaara on jäykistämättömillä reuna-alueilla, missä kimmoinen lommahduskestävyys on vain n. 10 % vastaavanlaisen reunoilta tuetun levyn kestävyydestä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 354.)

Poikittaisjännitystä voidaan havainnollistaa leikkaamalla kappale kahtia kuumennuksesta syntyneen tyssääntyneen kaistan keskeltä (kuva 3). Pitkittäisjännitysten tapauksessa lisätty voima F jakautuu puoliksi esijännittämään näin kappaleen puoliskoja kaareviksi. Halkaisureunoihin on laitettava kuvan 3 mukaisesti kuormitus taivuttamaan kaarevat kappaleet suoriksi, jotta puolikkaat voidaan liittää yhteen. Tästä syntyy kuumennetulle kohdalle poikittainen kalvojännitys, joka ilmenee keskemmällä vetona ja päissä puristuksena. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 169.)



Kuva 3. Kuumennuksen poikittaisjännitysten aiheuttaman sisäisen jännitystilan kuvaus käyttämällä apuna pitkittäisjännityksen kumoavaa voimaa F (Niemi & Kemppi, 1993, s. 170).

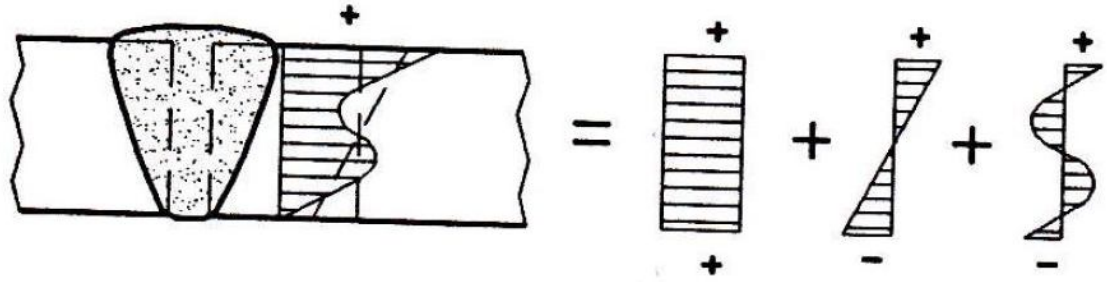
Poikittaisjännitys ei yleensä jakaannu kalvojännitykseksi tasan levyn paksuudelle paksuussuunnassa esiintyvien lämpötilaerojen vuoksi (kuva 4). Kuva 4 esittää paksuussuuntaista poikittaisjännitystä yksipalkohitsauksessa. Periaatetta voidaan soveltaa myös kuumennukseen. Jähmettyminen alkaa sularajalta rakenteen sisältä ja viimeisenä sulana on hitsikuvun alue keskellä. Viimeisenä kutistuessaan keskiosa synnyttää puristusjännityksen ja vastaavasti samalla pintakerroksiin tasapainottavan vetojännityksen, ellei ulkopuolinen jäykkyys estä kutistumista. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 170.)



Kuva 4. Poikittaisjännitysten jakaantuminen paksuussuunnassa yksipalkohitsauksessa (Niemi & Kemppi, 1993, s. 171).

Paksuussuuntaiset jännitykset eivät ole merkittäviä ohuemmilla kappaleilla, joten tässä tarkastelussa niihin ei perehdytä tarkemmin. Paksuussuuntaiset jännitykset vaikuttavat hitsattaessa esimerkiksi hyvin paksujen levyjen päittäisliitoksissa. Tällöin syntyy kolmiakselinen jäännösjännitystila, joka vaikuttaa muun muassa paksuseinäisen paineastian murtumiskäyttäytymiseen. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 171.)

Käytännön rakenteissa todellinen lopputulos on yhdistelmä kuvissa 2–4 esitetyistä jännitysten aiheuttamista ilmiöistä. Tulos vaihtelee suurestikin kappaleen hitsin tai kuumennuksen eri osissa, esimerkiksi hitsausjärjestyksen mukaan. Kuvassa 5 on tarkasteltuna kuvissa 2–4 esitettyjen vaikutusten summasta syntynyt poikittainen jännitysjakauma. Jännitysjakaumasta voidaan erotella poikittaiskutistuman estymisestä aiheutuva seinämänpaksuudelle tasan jakaantunut kalvojännitys, hitsin poikkileikkauksen epäsymmetrisyydestä aiheutuva lineaarisesti jakautunut taivutusjännitys ja hitsin geometriasta sekä pinta- ja sisäosien erilaisesta jäähtymisnopeudesta aiheutuva epälineaarisesti jakautunut jännityshuippu, joka on sisäisesti tasapainossa. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 171–172.)



Kuva 5. Hitsausjännitysten aiheuttama jakauma ja siitä erotellut kalvojännitys, taivutusjännitys ja jännityshuippu (Niemi & Kemppi, 1993, s. 172).

Kalvojännitys muodostaa yleensä koko rakenteen kautta kulkevan sisäisesti tasapainossa olevan voimajärjestelmän, joka paikallisen särön syntyessä estää kalvojännitystilan laukeamisen. Tästä johtuen särön kärkeen muodostuu säröä kasvattava jännitysintensiteetti. Niin ollen kalvojännitykset ovat erityisen haitallisia haurasmurtuman, jännityskorroosion ja väsymisen kannalta, minkä vuoksi hitsausjärjestyksen suunnittelun yhtenä tavoitteena on itse kalvojännityksen ja sen vaikutusalueen pienentäminen. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 172.)

Taivutusjännitysosuus on tasapainossa lähiympäristössä esiintyvien voimien kanssa. Niinpä särön syntyessä, jännitys laukeaa vähitellen särön kasvaessa. Tämä tekee taivutusjännityksestä helpommin rajoittuvan kuin kalvojännityksestä. Jännityshuippuosuus on nopeimmin itse rajoittuva aineen myötäessä tai särön kasvaessa. Jännityshuippu on kuitenkin haitallinen esimerkiksi alentaessaan liitoksen väsymisrajaa tai päästäessään jännityskorroosion aiheuttaman särön kasvamaan. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 172–173.)

3.2 Jännitysten mittaus

Tekninen lähestyminen hitsauksesta syntyvien jäännösjännitysten arvioimiseen on luoda yhteys plastisten rasitusten ja hitsausprosessin, liitoksen suunnittelun ja rakenteellisiin yksityiskohtiin liittyvien muuttujien välille (Feng, 2005, s. 7). Hitsausjännitysten mittauksia suoritetaan yleensä vain tutkimustarkoituksessa. Hitsauksen jäännösjännitysten syntyyn johtavia tapahtumia voi mitata jo hitsauksen aikana, kuitenkin luotettavampia tuloksia saadaan hitsauksen jälkeisistä mittauksista. Hitsauksen jälkeisten hitsausjännitysten mittausmenetelmät voidaan jakaa ainetta rikkomattomaan ja ainetta rikkovaan menetelmään. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 173.) Toisin sanoen ne voidaan jakaa mekaanisiin ja fyysisiin mittausmenetelmiin. Ainetta rikkovan menetelmän tapauksessa ero täytyy tehdä kokonaisvaltaisen ja osittaisen komponentin tuhon välille. Ainetta rikkomattomat menetelmät sisältävät pieniä reikiä tai rengasuria komponentin pinnassa, mitkä vaikuttavat osan käyttöön mittausten teon jälkeen. Ainetta rikkomattomaan menetelmään kuuluvat ultraääni- ja röntgenkuvaus eivät jätä mitään jälkiä kappaleeseen. (Radaj, 1992, s. 229.)

Hitsauksen aikana tehtävän mittauksen tarve esiintyy pääasiassa korkean lämpötilan alueella hitsausliitoksessa, koska siellä ilmaantuu maksimivenymä hitsatessa. Tämän vuoksi korkeissa lämpötiloissa sovellettavissa olevia venymän mittaustapoja tarvitaan. Mekaanisesti kiinnitettävien venymämittarien eli venymäliuskojen täytyy olla viilennettyjä. Hitaiden prosessien tapauksissa on mahdollista toistuvasti sijoittaa viilentämätön irrotettava venymäliuska lyhyeksi aikaväliksi mittapohjaa kuvaaville merkinnöille. Yleensä käytetään kuitenkin korkeaa lämpötilaa sietäviä venymäliuskoja. (Radaj, 1992, s. 227–228.)

3.2.1 Ainetta rikkovat mittausmenetelmät

Jäännösjännityksiä, samalla tavalla kuin kuormajännityksiä, voidaan määrittää purkamalla voimia paikallisista materiaalitilavuuksista. Näitä voimia sitten verrataan sisäisten voimien mittapohjaan. Mitattava arvo on vapautuva venymä tai kokonaan tai osittaisesti jäännöskappaleesta poistetun osan kimmoisuus. Poistetun osan tapauksessa tulisi olla saatavana riittävän suurella tilavuudella ja mahdollisimman tasaisesti jännitetty pala. Jäännösjännitys johtuu Hooken lain mukaan vapautuvasta venymästä. Jäännöskappaleen tilanteessa materiaalia poistetaan kerroksittain palkeista, levyistä tai sylinterimäisistä rakenteista. Jälkeenpäin tehdään laskelmia osittain paikallisesti vapautuneista venymistä tai globaalista jäännöskappaleen kimmoisuudesta. Näin saadaan poiston yhteydessä vapautunut jäännösjännitys kuten myös poistetussa palassa alun perin ollut jäännösjännitys. Mahdollisuus tehdä laskelmia jälkeenpäin ilmenee ainoastaan teoreettisen ratkaisun ollessa saatavana kohtuullisen yksinkertaisien geometrioiden kappaleille elastisen käyttäytymisen takia, esimerkiksi palkki, levy, sylinteri tai pallomainen kuori. Lämpötilan muuttumattomuus on oleellinen vaatimus tarkoille jäännösjännitysten mittausmenetelmille. Erityisiä mittauksia lämpötilan pysyvyyden varmistamiseksi tarvitaan leikatessa, poratessa tai kerrosten poistamisessa. (Radaj, 1992, s. 229–230.)

Erilaiset ainetta rikkovat jäännösjännitysten mittausmenetelmät voidaan jakaa kaksiaksiaaliseen ja kolmiaksiaaliseen hitsausjäännösjännityksen mittaukseen. Kaksiaksiaaliseen mittaukseen kuuluvat kappaleen leikkaus-, reiän poraus-, umpinaisen reiän, poistamis-, rengasura- sekä kimmoisuusmenetelmä ja kolmiaksiaaliseen mittaukseen kuuluvat kolmiulotteinen leikkaus-, siivun leikkaus- sekä väsyttämis- tai sulkemismenetelmä. (Radaj, 1992, s. 230–240.)

Reiän porausmenetelmässä mitataan säteittäisen venymän vapautumista porattaessa levyyn läpimenevä reikä. Suhteellinen siirtymä poratun reiän reunoilla mitataan asettamalla irrotettavia venymäliuskoja mitta-alueelle, mitkä rakentavat sillan poratun reiän yli. Näistä lasketaan suhteellisesta siirtymästä jäännösjännitykset. Umpinaisen reiän tapauksessa reiän syvyys on hieman isompi kuin reiän halkaisija. Tämän tuloksena saadaan keskiarvostettu jäännösjännitys reiän syvyyden yli. Vaihtoehtoinen reiän porausmenetelmä on poistamismenetelmä, missä vapautuva venymä määritetään ohuesta levystä poistetuista sylinterimäisistä paloista käyttäen venymäliuskoja tai sidosten vastustusvenymäantureita.

Rengasuramenetelmää käytetään vaihtoehtona umpinaisen reiän menetelmälle syvyysriippumattomien ja syvyysriippuvaisten kappalekomponenttien jäännösjännitysten mittauksessa. Rengasura vapauttaa riittävällä syvyydellä jännitystilan täysin kappaleen pinnasta rengasuran sisältä. Reiän poraus, umpinaisen reiän, poistamis- ja rengasuramenetelmät ovat laajalle levinneitä käytössä. (Radaj, 1992, s. 230–238.)

Kappaleen leikkausmenetelmässä mittauspisteet tai venymäliuskat asetetaan yleensä levyn kummallekin puolelle. Tämän jälkeen levy leikataan suorakulmaisiksi kappaleiksi ja lasketaan jäännösjännitykset vapautuneista venymistä. (Radaj, 1992, s. 232.) Kimmoisuusmenetelmässä materiaalia poistetaan kerroksittain. Kimmoisuusmenetelmän laajentaminen palkkiongelmista levyongelmiin on osin sopivaa kaksiaksiaaliselle, homogeeniselle ja syvyysvaihtelevalle hitsausjäännösjännitykselle. Tieto takaisin joustosta yksinään ei kuitenkaan ole riittävä kaksiaksiaalisten ongelmien selvittämiseen. Näin ollen käytetään venymäliuskarusetteja, jotka osoittavat täysin vapautuvien venymien kaksiaksiaalisen tilan, kun materiaalia poistetaan kerroksittain. (Radaj, 1992, s. 238.)

Kolmiulotteinen leikkausmenetelmä, joka ei keskiarvoista jännitysjakaumaa levyn paksuuden yli, koostuu syvien ja kapeiden umpinaisten reikien poraamisesta jäännösjännitysten mittauspisteisiin ja pitkittäisten pienoisvenymäanturielementtien asettamisesta reikiin. Tämän jälkeen leikataan pois oleellinen materiaalitilavuus yhdessä reikien ja anturielementtien kanssa vapauttaen jännitys ja venymä. Siivuleikkausmenetelmässä jäännösjännityslähteet määritellään alustaviksi venymiksi leikkelemällä komponentti palasiksi, jotta voidaan elastisesti laskea jälkeenpäin niistä jäännösjännitykset elementtimenetelmällä. Hitsiin nähden kohtisuorasti erotettu ohut siivu paloitellaan edelleen samalla mitaten vapautuva venymä. Jäännösjännitykset pitkissä kiinteissä ja ontoissa sylinterimäisissä osissa, esimerkiksi sauvoissa, kuiluissa tai putkissa, voidaan määritellä väsyttämis- tai sulkemismenetelmällä, olettaen aksisymmetrisyys ja jännitystilan aksiaalinen itsenäisyys. Väsyttämis- tai sulkemismenetelmässä materiaalia poistetaan kerroksittain sylinterin sisä- ja ulkopuolelta. Mittauspuolella, poistopuolen vastaisella puolella, vapautuvat venymät mitataan kehän suunnasta ja aksiaalissuunnasta venymäliuskoilla. Alustavat jäännösjännitykset lasketaan jälkikäteen mitatuista arvoista huomioiden sylinterin elastisten ominaisuuksien peruskaava. (Radaj, 1992, s. 238–240.)

3.2.2 Ainetta rikkomattomat mittausmenetelmät

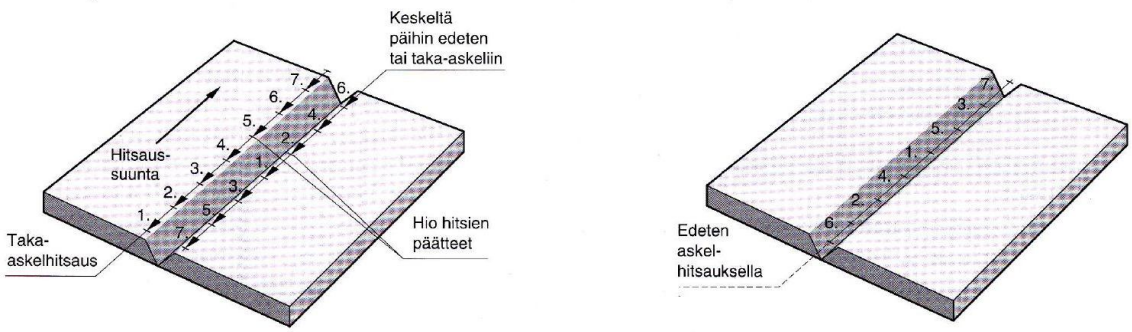
Jäännösjännitykset ja rasitukset mitataan ainetta rikkomatta käyttäen röntgensäteilymenetelmää. Röntgensäteily muodostaa interferenssi-ilmiön, mistä voidaan tehdä johtopäätöksiä hilan sisäisistä väleistä. Kuormajännitys tai jäännösjännitys määritetään sisäisten välien muutoksista verrattuna tilaan, jossa ei ole jännityksiä. Toinen uudempi rikkomaton jännitys- tai rasitusmittaustekniikka on neutronidiffraktiomenetelmä. Neutronit tunkeutuvat syvemmälle kuin röntgensäteily. Näin jännitykset ja rasitukset saadaan mitattua testikappaleiden sisäosista. Muita rikkomattomia jäännösjännitysten mittausmenetelmiä ovat ultraääni- ja magnetostriktiivisyysmenetelmä. Molemmat ovat kehitysasteella eivätkä vielä tarpeeksi kehittyneitä laajempaan käyttöön. Ultraäänimenetelmän muotoja ovat jännitystilan ultraäänen nopeusriippuvuuteen perustuva menetelmä ja pitkittäisten aaltojen aiheuttamiin nopeuseroihin testikappaleen pinnan eri kohdissa perustuva menetelmä. Magnetostriktiivisessä menetelmässä tai Barkhausenin kohinaan perustuvassa menetelmässä jännitystila päätellään paikallisen magnetoitumispidätteen arvon perusteella. (Radaj, 1992, s. 241–243.)

3.3 Jännitysten pienentäminen tai poistaminen

Jäännösjännitysten vähentämistä voi verrata jäännösjännitysten tason, erityisesti maksimivetojännitystason, jäännösjännitteiden vyöhykkeiden ja tilavuuksien sekä vetojännityksen moniaksiaalisen korkean määrän vähentämiseen (Radaj, 1992, s. 248). Hitseissä, kuten myös kuumennuksessa, syntyvät voimat ovat verrannollisia kerralla tuotuun lämpömäärään pituusyksikköä kohti. Näin ollen jännityksiä pystytään pienentämään konstruktiivisilla keinoilla, esimerkiksi hitsaustilavuuden pienentämisellä välttämällä tarpeettoman suuria hitsejä, suurta kerralla tuotua lämpömäärää, välttämällä ylimitoitusta tai sijoittamalla hitsit mahdollisimman symmetrisesti kappaleen neutraaliakseliin nähden. Hitsien kokoa ja tuotua lämpömäärää pituusyksikköä kohden pystytään pienentämään esimerkiksi hitsausmenetelmän tai kuumennusmenetelmän valinnalla, kuumennusalueen mitoituksella, palkokerrosten tai lämmityskertojen määrällä sekä lämmittämällä tai hitsaamalla katkonaisesti. Lisäämällä levyosien jäykkyyttä esimerkiksi taivutuksilla, jäykisteillä tai lisäpaksuudella saadaan jännityksiä edelleen pienennettyä. (Huhtala et al., 1987, s. 115–116; Niemi & Kemppi, 1993, s. 180.)

Kappaleiden kiinnittäminen pienentää muodonmuutoksia estämällä kutistumista. Tästä johtuen irrotettaessa kappale kiinnityksistä, siinä olevat hitsausjännitykset laukeavat osittain. Hitsaus- tai kuumennusjärjestyksen valinta vähentää poikittaista kalvojännitystä. Järjestyksen valinta sallii poikittaisen kutistuman tapahtua kappaleessa mahdollisimman vapaasti. Kulmaliitoksissa lamellirepeilyä pystytään välttämään tarkalla hitsausjärjestyksen valinnalla. (Huhtala et al., 1987, s. 116; Niemi & Kemppi, 1993, s. 180–182.)

Hitsausjärjestyksen suunnittelun tavoite on mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa saavutettava lopullinen jäykkyys. Hitsausjärjestyksen valinnassa pyritään mahdollistamaan hitsien poikittainen kutistuma. Askelhitsauksessa järjestys suunnitellaan niin, että hitsauslämpö ja jännitykset jakautuisivat mahdollisimman tasaisesti liitoksen pituussuunnassa. Näin kappaleen aine pystyy mahdollisesti liikkumaan keskeltä rakenteen reunoille päin. Askelhitsaustekniikoita voi käyttää monissa eri tapauksissa, kunhan hitsit eivät ole liian lyhyitä. Askelhitsaus voidaan toteuttaa taka-askelin tai edeten. Taka-askelhitsauksessa etenemissuunta on vastakkainen kuin hitsauksen suunta. Kuvassa 6 on esitetty esimerkit askelhitsauksesta edeten taka-askelilla reunasta reunaan, edeten taka-askelilla keskeltä päihin ja hitsausjärjestys hyppelehtien. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 364.)



Kuva 6. Askelhitsaus edeten taka-askelilla reunasta reunaan, edeten taka-askelilla keskeltä päihin ja hitsausjärjestys hyppelehtien (Lepola & Makkonen, 2006, s. 364).

Hitsausvetojännityksen muuttaminen puristusjännitykseksi parantaa rakenteen väsymis- ja jännityskorroosiokestävyyttä. Rakenteen pintakerroksen vasartaminen ja kuulapuhallus pyrkivät venyttämään ainetta, jolloin syvemmät muokkaamattomat kerrokset estävät leviämistä ja synnyttävät puristusjännityksen. Värähtelymenetelmässä vetojännityksiä laukaisemalla pystytään edesauttamaan kappaleiden muodon säilymistä koneistuksessa. Värähtelymenetelmää ei kuitenkaan ole vielä tutkittu riittävästä, jotta saataisiin kiistatonta

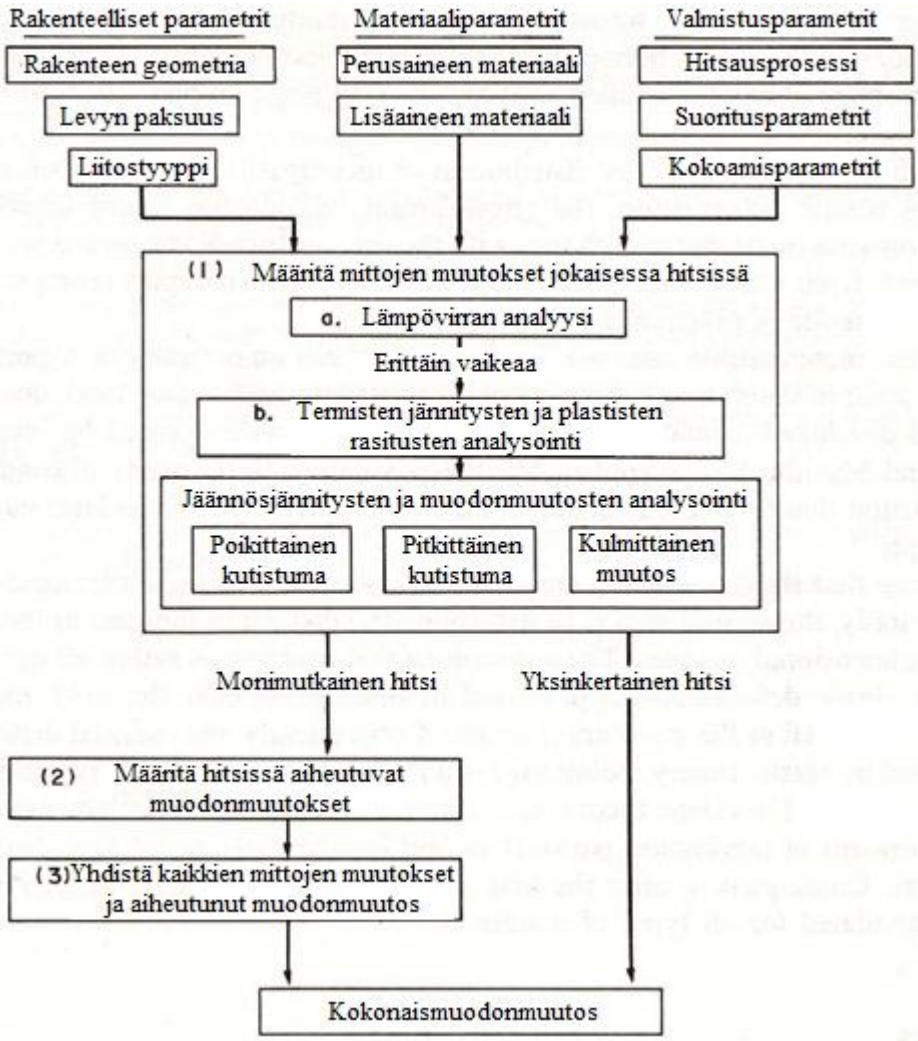
tietoa vaikutustavasta. Väsymislujuuden parantamiseen sitä ei ole ollut tähän mennessä aihetta suositella. (Huhtala et al., 1987, s. 116; Niemi & Kemppi, 1993, s. 182.)

Myöstöllä, eli jännitystenpoistohehkutuksella, saadaan pienennettyä haurasmurtumavaaraa ja varmistettua mittatarkkuus koneistettavissa kappaleissa, etenkin jäykissä rakenteissa. Väsymislujuuteen ja jännityskorroosion kestoon saadaan parannusta, varsinkin jos vaihteleva kuormitus tapahtuu puristuspuolella. Vetopuolella myöstö tuottaa vain vähän hyötyä, jolloin väsymisraja nousee ja näin kestoikä kasvaa. Erilaisia lämpöpitenemiskertoimia omaavien rakenteiden jäännösjännityksiä ei voi poistaa myöstöllä. Tällöin syntyy vain uusi jäännösjännitystila. (Huhtala et al., 1987, s. 116; Lepola & Makkonen, 2006, s. 372; Niemi & Kemppi, 1993, s. 183.) Muitakin hitsauksen jälkeisiä lämpökäsittelyitä, kuten normalisointia tai nuorrutusta, voidaan käyttää vähentämään jäännösjännityksiä. Esimerkiksi normalisointi parantaa kappaleen iskusitkeyttä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 372.)

4 MUODONMUUTOKSET

Hitsauksen tai kuumentamisen aikaiset sekä jäähtymisessä aiheutuvat kutistusvoimat ja jännitystilat aiheuttavat muodonmuutoksia muokattavissa kappaleissa. Kappaleiden valmistusprosessissa piirustukset suunnitellaan esittämään valmista lopputuotetta, jolloin muodonmuutosten ennakointi jätetään valmistajien huoleksi. Muodonmuutokset aiheuttavat ylimääräisiä työvaiheita tarkastusmittauksineen ja työvaran katkaisuineen, kappaleen oikomistyön kasvua, ylimääräisiä aineenpaksuuksia ja työvaroja koneistettaville kappaleille, lastuamisen määrän lisääntymistä sekä puristettujen ja väsyttävästi kuormitettujen rakenteiden kestävyyden heikkenemistä kuin myös epäedullista ulkonäköä. Tämän takia nykyisin pyritään saamaan suoraan valmis kappale hitsauksen jälkeen ja jättämään hitsauksen jälkeinen työstö mahdollisimman vähäiseksi. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 183–184.)

Kuvassa 7 esitetään tekijät, jotka vaikuttavat hitsauksessa syntyvään muodonmuutokseen ja niiden suhde toisiinsa nähden sekä lopulliseen muodonmuutokseen. Hitsiin vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen ryhmään, rakenteelliset parametrit, materiaaliparametrit ja valmistusparametrit. Rakenteellisia parametreja ovat rakenteen geometria, levyn paksuus ja liitostyyppi. Materiaaliparametreja ovat perusaineen materiaali ja hitsauslisäaineen materiaali. Valmistusparametreja ovat hitsausprosessi, suoritusparametrit ja kokoamisparametrit. Hitsin mittojen muutos määritetään analysoimalla lämpövirtaa, analysoimalla termisiä jännityksiä ja plastisia rasituksia sekä analysoimalla jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia. Jos kyseessä on ollut yksinkertainen hitsi, saadaan näitä tekijöitä tarkastelemalla kokonaismuodonmuutosta. Jos kyseessä onkin ollut monimutkainen hitsi, on vielä määriteltävä hitsissä muodostuvat muodonmuutokset sekä yhdistettävä kaikkien mittojen muutokset ja aiheutuvat muodonmuutokset, jotta saadaan kokonaismuodonmuutos. (Masubuchi, 1980, s. 109.) Kuvassa 7 esitetyt tekijät ovat sovellettavissa myös pelkälle kuumentamiselle.

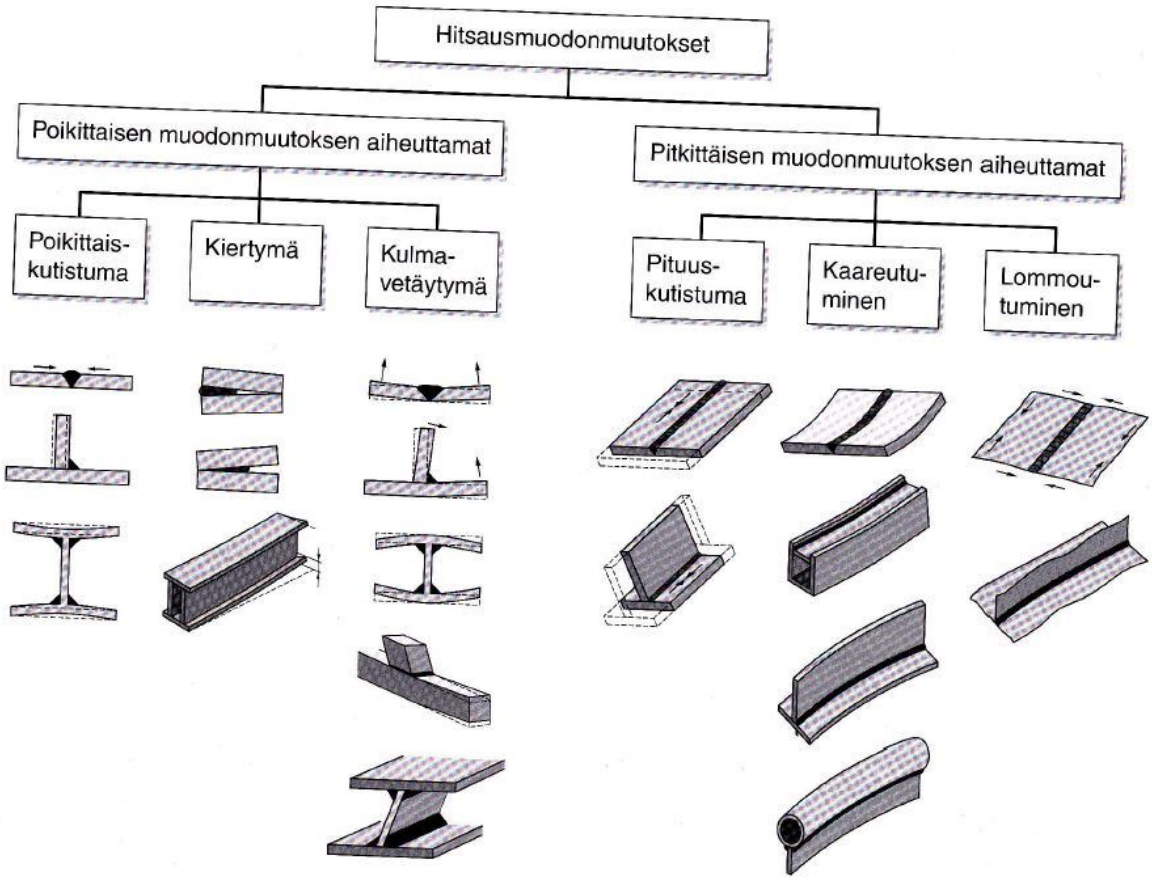


Kuva 7. Tekijät, jotka vaikuttavat hitsauksessa syntyvään muodonmuutokseen ja niiden suhde toisiinsa nähden sekä lopulliseen muodonmuutokseen (mukaillen Masubuchi, 1980, s. 109).

Muodonmuutosten kaikkien valmistusmenetelmien ja oikomisien jälkeen rakenteeseen jäävät haitat ovat yleensä silmällä havaittavissa tai ilmaantuvat vasta piilevistä vaurioista aiheutuvasta jännityksen laukeamisesta kuormituksen tai jonkun muun tekijän vuoksi. Yleisimpiä näkyviä haittoja rakenteissa ovat kieroutuminen, taipuminen, lommahtaminen tai muut vastaavat tapaukset. Näkyvät haitat heikentävät tuotteen ulkonäköä sekä rakenteen toimivuutta esimerkiksi tarkkoja paikoituksia tarvittaessa. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 352.)

4.1 Muodonmuutostyypit

Hitsien pitkittäis- ja poikittaisjännityksistä aiheutuvista muodonmuutoksista voidaan laatia jaottelu, joka sisältää eri muodonmuutosten havainnointiesimerkkejä. Tämä jaottelu ja havainnointiesimerkit löytyvät kuvasta 8. Hitsausmuodonmuutoslajit voidaan karkeasti jakaa poikittaisen ja pitkittäisen muodonmuutoksen aiheuttamiin hitsausmuodonmuutoksiin. Pitkittäisen muodonmuutoksen aiheuttamiin kuuluvat pituuskutistuma, kaareutuminen ja lommoutuminen. Poikittaisen muodonmuutoksen aiheuttamiin kuuluvat poikittaiskutistuma, kiertymä ja kulmavetäymä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 356; Niemi & Kemppi, 1993, s. 183.)



Kuva 8. Hitsausmuodonmuutoslajit (Lepola & Makkonen, 2006, s. 356).

Riippuen muodonmuutoksen tyypistä ja komponentista, hitsausmuodonmuutokset voidaan myös jakaa alla oleviin luokkiin:

1) Muodonmuutos hitsatun komponentin tasossa, esimerkiksi pituus- ja poikittaiskutistuma hitsatussa tasossa.
2) Muodonmuutos kohtisuorassa hitsattavaan tasoon nähden, esimerkiksi taso- tai yksiakselinen kulmakutistuma hitsatussa tasossa.

3) Taipumismuodonmuutos palkeissa, joissa on pitkittäisiä ja kohtisuoria hitsejä.
4) Kiertyvä muodonmuutos kotelopalkeissa, joissa on pitkittäisiä hitsejä.
5) Muodonmuutos aksisymmetrisissä kuorissa, joissa on rakenteen pituuspiirin suuntaisia hitsejä ja kehämäisiä hitsejä.

Hitsausvääristymät eli ohutseinämäisten komponenttien lommahdus kutistusvoimien seurauksena edustaa erityisluokkaa. (Radaj, 1992, s. 210.)

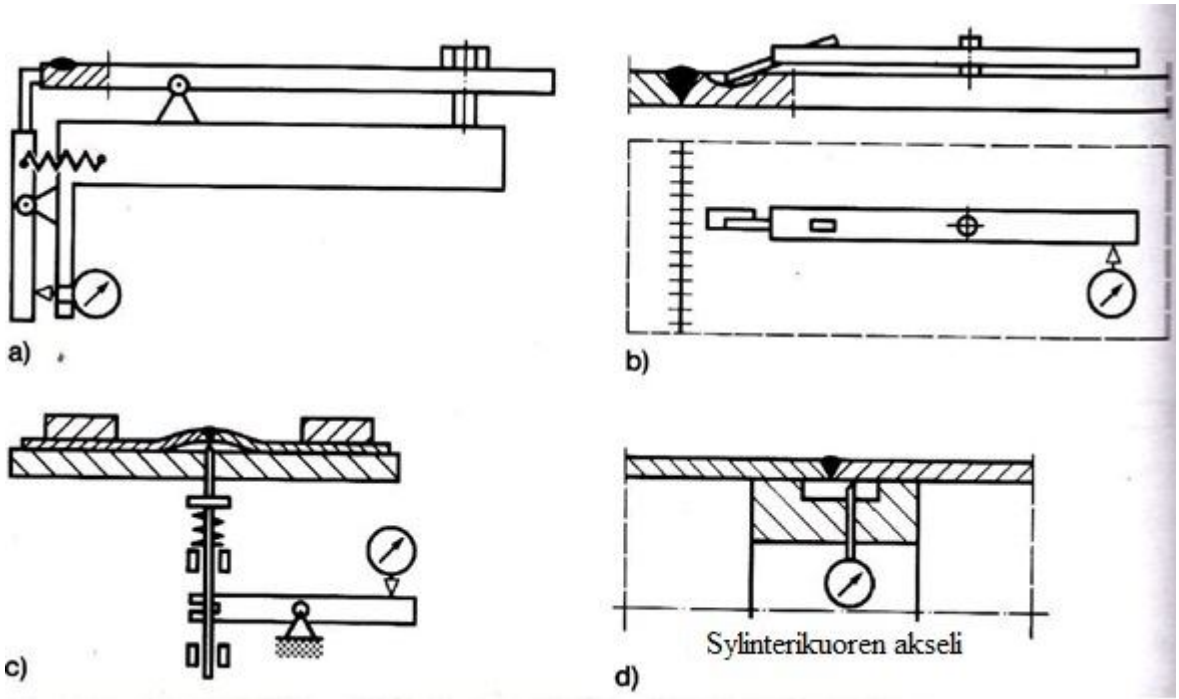
Kappaleen osan kuumetessa alkaa ilmetä lämpöpitenemistä lämmönnousun vaikutuksesta. Samaan aikaan epätasainen lämmöntuonti ja kappaleen kuumentamattomat alueet estävät laajenemista. Näin ollen lämmitetyn alueen myötöraja alkaa laskea ja alueella tapahtuu tyssääntymistä. Tyssääntynyt alue jäähtyessään pyrkii kutistumaan alkuperäistä mittaansa pienemmäksi ja tekeekin niin kylmempien kimmoisten alueiden sallimissa rajoissa. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 353.) Nämä pituuskutistumat syntyvät hitsausjännitysten aiheuttamina työkappaleessa. Pituuskutistumia tapahtuu erityisesti tehtäessä pitkittäishitsejä ja polttoleikatessa. Kaareutumista tapahtuu, kun hitsi sijaitsee epäsymmetrisesti poikkileikkauksen neutraaliakseliin nähden. Vinoutumista tapahtuu muun muassa vastakkaisista nurkista hitsatuissa koteloissa. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 184–185.)

Poikittaisia muodonmuutoksia aiheutuu poikittaisista hitsausjännityksistä, joiden suuruuteen vaikuttaa hitsaustapa, tuotu lämpöenergia ja sen poistumisen tasaisuus. Materiaaliominaisuuksilla, palkojen/kuumennusten lukumäärällä, railomuodolla ja rakenteen jäykkyydellä on myös merkitystä jännityksiin ja näin ollen muodonmuutoksiin. Yleisin ilmentymä poikittaisesta muodonmuutoksesta on kulmavetäymä. Kulmavetäymä muodostuu jäähtyvän hitsin kutistumisen ja alla olevan sulamattoman materiaalin lämpölaajenemisen aiheuttamasta momentista. Kulmavetäymää vastustaa levyn vääntöjäykkyys ja hitsattavan kohdan edessä oleva taivutusjäykkyys. Toisin kuin muut hitsausmuodonmuutokset kulmavetäymä ei ole suoraan verrannollinen tuotuun hitsauslämpöön. Hitsattaessa suurella teholla aine kuumenee tasaisemmin koko paksuudelta, jolloin momentti jää pienemmäksi. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 355; Niemi & Kemppi, 1993, s. 188.)

Toinen haitallinen poikittainen muodonmuutos on hitsin tai kuumennuksen aiheuttama poikittaiskutistuma. Poikittaiskutistumassa hitsi tai kuumennettu kohta lyhentää kutistuessaan kappaleen lämmöntuontikohtaan nähden poikittaista mittaa. Poikittaiskutistumaa aiheutuu varsinkin vapaasti kutistumaan pääsevissä päittäisliitoksissa. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 355; Niemi & Kemppi, 1993, s. 188.)

4.2 Muodonmuutosten mittaus

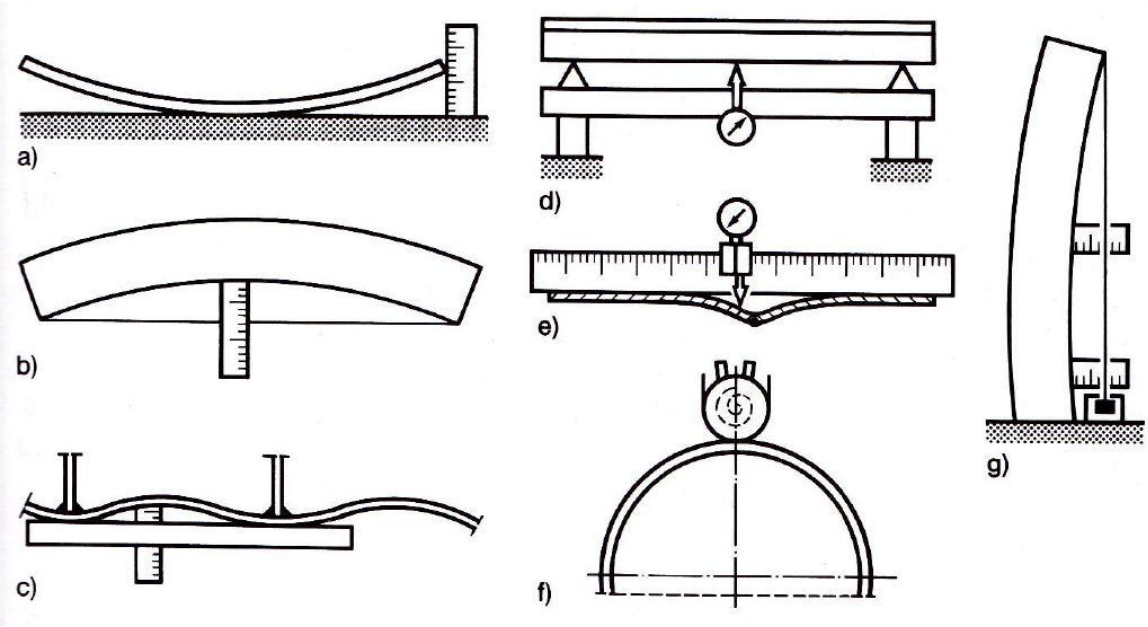
Hitsauksen aikana siirtymä mitataan korkean lämpötilavyöhykkeen yksittäisestä pisteestä ja saatua arvoa verrataan kylmän alueen pisteen tai ulkopuolisen pisteen arvoon. Tämä menetelmä on sovellettavissa yksittäisessä tapauksessa. Poikittaisen ja pitkittäisen siirtymän mittaus hitsissä, pystysuoran siirtymän mittaus kohtisuorasti levytasoon nähden ja sylinterin kuorissa tapahtuvan siirtymän mittaus ovat esitetty kuvassa 9. Siirtymämittausvälineet toimivat mekaanisesti, optisesti, induktiivisesti, varaavasti tai sähköisen vastustuskyvyn pohjalta. (Radaj, 1992, s. 229.)



Kuva 9. Poikittais- ja pitkittäismuodonmuutoksen mittaus (a, b), kuten myös poikkeamien (c, d) mittaus hitsissä (Radaj, 1992, s. 228).

Muodonmuutos hitsauksen jälkeisestä viilennetystä tilasta määritetään käyttäen yleisesti käytännössä pituuden ja kulman mittaustekniikoita ilman mitään tarvetta hitsauskohtaisiin mukauttamisiin. Käyttösovellusesimerkkejä nähdään kuvassa 10. Poikittaiset ja pitkittäiset

kutistumat määritetään helpoiten mittanauhalla. Taipumista tai kulmavetäymää voidaan mitata viivoittimilla käyttäen apuna kiristettyä nauhaa tai suoraa reunaa asetettuna kappaletta vasten. Poikkeaman voi myös mitata jatkuvasti määrittääkseen taipumis- tai kulmittaisen muodonmuutosprofiilin. Pystysuoraan ojennetusta komponentista, kuten pilareista, tuista ja seinistä, kallistuma ja poikkeama mitataan pystysuoraan roikkuvalla nauhalla (esimerkiksi luotilanka). Kehämäinen mittaaminen pallomaisilla tai sylinterimäisillä kuorilla suoritetaan laittamalla naru rakenteen ympärille, narun ollessa tiukasti joka sivulta kahdella pingotuspyörällä, jotka ovat käännetty toisiaan vasten jatkuvalla jousivoimalla. Ympärysmitan muutos, mistä poikkeamat voidaan laskea, seuraa pingotuspyörien kääntymiskulmasta hitsatuissa komponentissa verrattuna hitsaamattomiin komponentteihin. (Radaj, 1992, s. 243–244.)



Kuva 10. Muodonmuutoksen mittaus; taipuman mittaus levyn avulla (a) tai kiristetyllä langalla (b), kulmavetäymän mittaus suoran kulman viivoittimella (c), jatkuva poikkeaman mittaus (d, e), supistumisen mittaus (f) ja kallistuman mittaus (g) (Radaj, 1992, s. 243).

4.3 Muodonmuutosten ennaltaehkäisy, vähentäminen ja oikominen

Rakenteiden ja valmistusvaiheiden suunnittelulla sekä käytettävän hitausprosessin valinnalla pystytään suurestikin vaikuttamaan muodonmuutosten ennaltaehkäisyyn. Kappaleisiin syntyvien muodonmuutosten estämiseksi ja vähentämiseksi löytyy erilaisia laskennallisia ja kokemusperäisiä menetelmiä. Muodonmuutosten ehkäisy on aloitettava suunnitteluvaiheessa, jolloin voidaan vaikuttaa kappaleessa hitsauksen aikana ja

jäähtymisessä vaikuttavien kutistusvoimien ja jännitystilojen aiheuttamaan kaareutumiseen, vinoutumiseen, kulmavetäymään ja lommoutumiseen. Muodonmuutosten oikominen hitsauksen jälkeen on kallista ja tarvittava työmäärä voi olla jopa useita kymmeniä prosentteja hitsaustyön määrästä. Oikeilla tapaukseen sopivilla rakenneratkaisuilla on mahdollista vähentää materiaalin kulutusta, hitsaustyötä ja oikomista. Usein kuitenkin kannattaa vähentää työmäärää vaikkakin materiaalin kulutuksen kustannuksella. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357–358; Niemi & Kemppi, 1993, s. 197.)

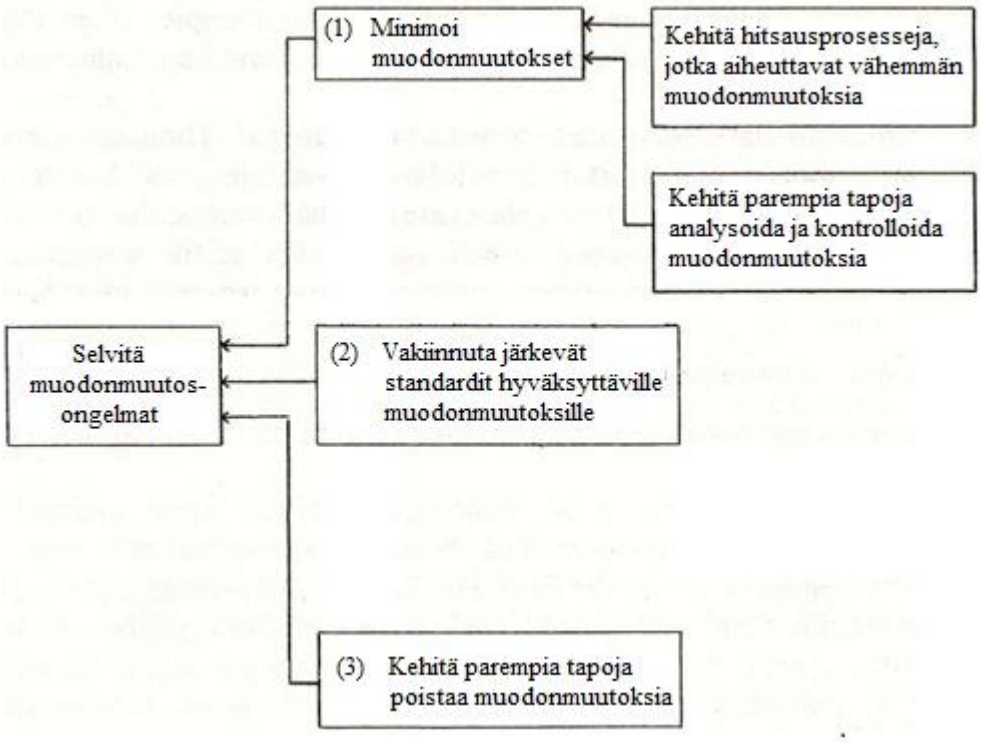
Suunnittelussa ja valmistuksessa päätetään mallintamisen kautta käytettävät arvot ja menetelmät. Ensimmäisten kappaleiden valmistuttua suoritetaan mittaustarkastuksia ja korjataan tarvittaessa laskennallisia arvoja. Käytännön kokemuksista ja erilaisista kokeista saaduista tuloksista laaditaan yleensä taulukoita käytettäväksi yleisohjeina tulevaisuudessa samankaltaisten tilanteiden kohdalla. Näitä taulukoita tutkiessa on muistettava arvojen olevan yleisohjeita eikä vastaavan kaikkia rakenteita. Jokaisen rakenteen kohdalla ratkaisut ovat yksilöllisiä. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 358.)

Oikomiseen johtavia tärkeimpiä vaikutuksia ovat rakenteen lujuusvaatimukset, kokoonpanon onnistuminen, muiden hitsauksen jälkeisten työvaiheiden onnistuminen, ulkonäköseikat sekä rakennetta koskevat asetukset ja standardit. Standardit ja asetukset koskevat valmiita tuotteita, mikä on huomioitava kokoonpanon valmistuksessa osista. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 365.)

Kolme lähestymistapaa muodonmuutosongelman selvittämiseen ovat:

1) Hitsausprosessin ja valmistuksen menettelytapojen kehittäminen muodonmuutoksien minimoimiseksi.
2) Hyväksyttävien muodonmuutosrajojen järkevien standardien vakiinnuttaminen.
3) Kunnollisten tekniikoiden kehittäminen muodonmuutosten poistamiseksi ilmaantumisen jälkeen.

Oikea yhdistelmä yllä olevia lähestymistapoja on tehokas tapa hallita hitsauksen muodonmuutoksia. Nämä lähestymistavat muodonmuutosongelman ratkaisemiseksi on esitetty kuvassa 11. (Masubuchi, 1980, s. 236.)



Kuva 11. Eri lähestymistapoja muodonmuutosongelman ratkaisuun (mukaillen Masubuchi, 1980, s. 237).

Tarkastellaan tarkemmin eri muodonmuutostyyppien ennaltaehkäisyä, vähentämistä ja oikomista ensin eri toimenpiteiden mukaan. Tämän jälkeen keskitytään siihen, mitä tapaa käytetään mihinkin muodonmuutokseen. Näin saadaan avattua eri toimenpiteiden periaatteita ja keskityttyä tarkemmin eri muodonmuutostyyppeihin käytettäviin ennaltaehkäisy-, vähennys- ja oikomistapoihin.

4.3.1 Ennaltaehkäisy-, vähennys- ja oikomistavat toimenpiteittäin

Hitsausjärjestykseen kiinnitetään huomiota jo silloituksessa. Silloitus on Ihalainen, Aaltonen, Aromäki ja Sihvonen (1985, s. 282) mukaan ”työkappaleen liittämistä toisiinsa lyhyillä hitseillä ennen varsinaista hitsausta.” Silloituksella voidaan ehkäistä ja vähentää muodonmuutoksia. Silloituksen tarkoituksena on hitsauksen vaikutusten pitäminen ennalta tehdyissä asetuksissa, joihin kappaleen toivotaan hitsauksen jälkeen jäävän. Käytettäessä sopimatonta silloitusjärjestystä voidaan aiheuttaa muodonmuutoksia, jotka vain vahvistuvat hitsattaessa. Yleisesti joka kohteeseen sopivaa ohjetta ei ole olemassa. Standardituotteisiin, kuten palkkeihin ja vastaaviin, voidaan kokemuksen antamalla varmuudella määritellä toimiva silloitusjärjestys. Hitsauksen pystyy tekemään ilman

silloitustakin valmistusta varten tehdyn jigin eli hitsauskiinnittimen avulla. Silloitusta käytettäessä tulee muistaa silloituksen oikea sijoittaminen, mahdollisuus hioa silloituksen vaatimat hitsit pois ja silloituksen riittävä suuruus verrattuna siihen kohdistuviin rasituksiin. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 361–362.)

Hitsattavien kappaleiden kiinnittäminen tukevasti hitsauksen ajaksi pienentää muodonmuutoksia, etenkin kulmavetäymää. Kiinnitettynä kappaleen kuuma hitsi ei pysty kutistuessaan siirtämään kiinni olevia osia vaan myötää. Kiinnittämisellä ei kuitenkaan täysin voida estää muodonmuutoksia. Jäähtymisen loppuvaiheessa kappaleen lujuus on palautunut riittävän suureksi, ettei muodonmuutoksilta vältytä. Irrotettaessa kiinnityksistä osa hitsausjännityksistä laukeaa ja kappaleeseen syntyy kimmoisia muodonmuutoksia. Kuitenkin kiinnityksien avulla voidaan huomattavasti vähentää muodonmuutoksia verrattuna rakenteen ollessa vapaana hitsauksen aikana. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 197.)

Kappaleiden muodonmuutoksia voidaan estää tekemällä toimenpiteitä, joilla ennakoidaan hitsattaessa aiheutuvien jännitysten synnyttämät muodonmuutokset. Esijännittämisellä tarkoitetaan taivuttamista ennalta päinvastaiseen suuntaan kuin hitsausjännitykset kappaletta tulevat hitsauksen jälkeen taivuttamaan. Esijännityksen suuruus arvioidaan laskennallisesti hyödyntäen työtulokseen vaikuttavia seikkoja. Myös rakenteen mallintamisen tai simuloimisen avulla voidaan paljastaa tapahtuvat muutokset ja näin myös ennakoida niitä. Esijännitystä tehdään myös ennakoimaan esimerkiksi palkki- tai ristikkorakenteiden valmistuttua niille asetettavien kuormien aiheuttavat muodonmuutokset. Tällöin esijännitetään niin, että kappale suoristuu käyttötilanteessa aiheutuvien voimien ansiosta. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 364–365.) Samaa periaatetta käytetään myös kappaleiden muodon suunnittelussa ajatellen valmistuksessa tapahtuvia muutoksia, esimerkiksi luomalla ennakkokulman varsinkin kulmavetäymän estämiseksi. Pitkiin kappaleisiin jätetään työvaraa päihin. Näin voidaan jättää laskennallinen ennakointi tekemättä ja varaudutaan kutistumiseen. Ylimääräinen materiaali leikataan hitsauksen jälkeen pois. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 197.)

Oikominen jaetaan mekaaniseen oikaisuun ja lämmöllä oikaisuun. Mekaaninen oikaisu perustuu ulkoisen voiman käyttöön taivuttamalla rakennetta kylmänä tai kuumana päinvastaiseen suuntaan kuin hitsauksessa tai kuumennuksessa tapahtunut muodonmuutos

on ilmennyt. Rakennetta kuormitetaan kunnes saavutetaan myötöraja, jolloin pintakerrokset antavat periksi ja tapahtuu plastista muokkautumista. Plastinen muokkautuminen etenee kappaleen neutraaliakselia kohti aiheuttaen elastista muokkausta. Ulkoisen voiman lakattua vaikuttamasta elastisen muodonmuutoksen aiheuttamat sisäiset jännitykset pyrkivät palauttamaan kappaleen alkuperäiseen muotoonsa. Ulkoisen ja sisäisen pinnan plastiset muodonmuutokset kuitenkin estävät palautumisen sisäisen tasapainon sallimissa rajoissa. Oikaistu kappale jää näin sisäisesti tasapainossa olevaan jäännösjännitystilaan. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 367.)

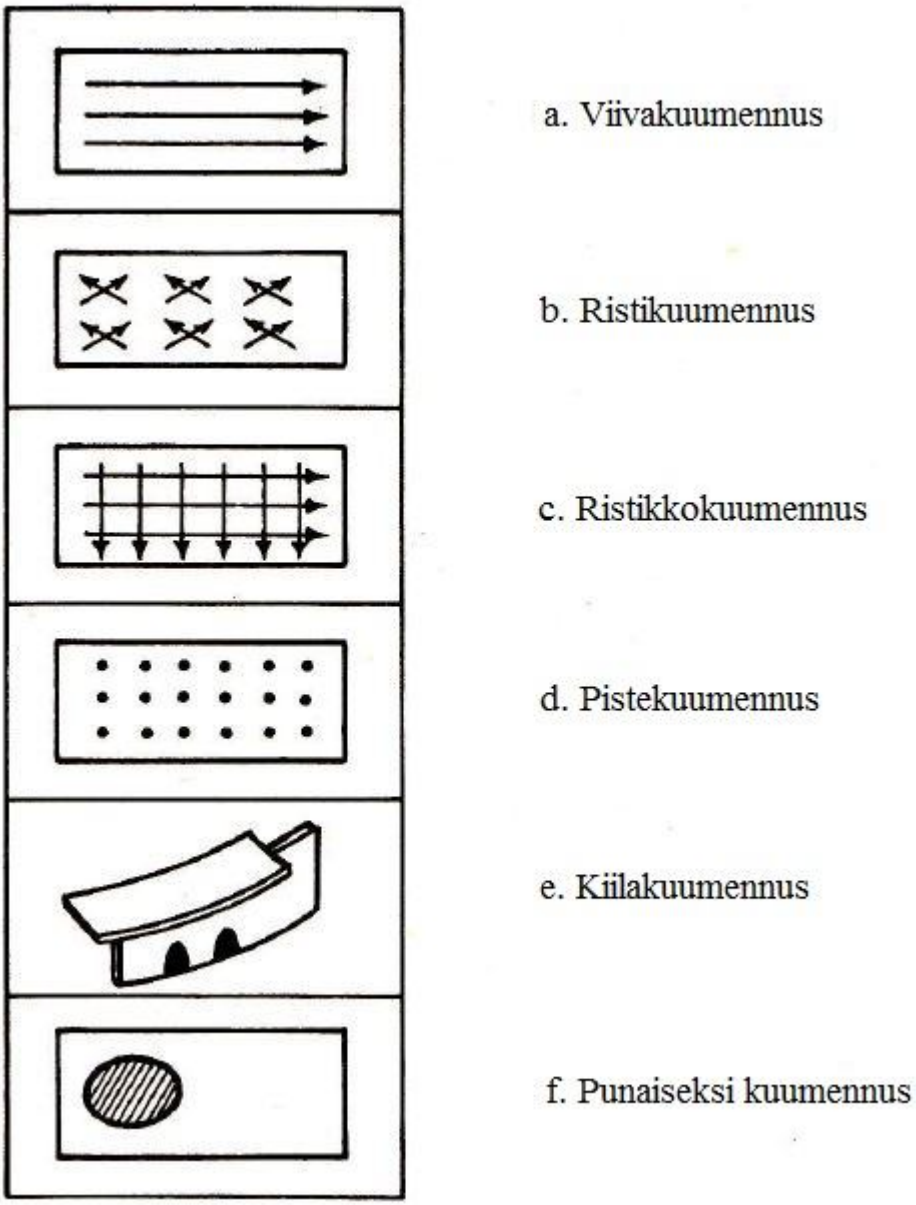
Rakenteen mekaanisella kuormituksella venytetään kutistuneita alueita ylikuormittamalla esimerkiksi puristimessa. Hitsausjännitykset laukeavat suureksi osaksi vetojäännösjännitysalueella tapahtuvan myötäämisen seurauksena. Kaareutumisen muuttuminen ja jännitysten pieneneminen auttavat myös väsymisen, haurasmurtumisen ynnä muiden sellaisten kannalta. Ylikuormituksesta johtuva venymä pyöristää mahdollisia säröjä lovien pohjalla ja aiheuttaa alueelle puristusjännitystä. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 199.) Mekaanisesta oikomisesta toinen esimerkki on vasarointi. Kuumana sekä kylmänä kappaletta voidaan venyttää vasaroinnilla, joka on tehokas tapa poistaa pitkittäisiä ja taivuttavia kutistumia. Samalla vähennetään vetojäännösjännityksiä, minkä seurauksena halkeiluriski vähenee. Vasarointi toteutetaan kerroksittain elektronisella, pneumaattisella tai käsin talttavasaralla mukautettuna hitsin muotoon. (Radaj, 1992, s. 307.)

Kuulapuhalluksessa levyn pinta venyy ja käyristynyt kappale oikeaa. Kuulapuhallusta käytetään muun muassa lentokoneenrakennuksessa, kuitenkaan sitä ei ole vielä oikein sovellettu teräsrakenteisiin. (Niemi & Kemppi, 1993, s. 199.)

Lämmöllä eli kuumilla oikaisu perustuu paikalliseen lämmön nostamiseen ja siitä aiheutuvaan paikalliseen kutistumiseen. Kuumilla oikaisussa kutistetaan jälkeenpäin osia, joissa on puristusjännityksestä aiheutuneita esijännitysvoimia. Kappaletta on lämmitettävä hieman myötörajan ylittämiseen tarvittavan lämpötilan yli, jotta saadaan pysyviä muodonmuutoksia. Kuumilla oikoessakin kuumennuksen jälkeen kappaleessa vallitsee jäännösjännitysten muodostama tasapaino. Tämän jälkeen kappaletta kuumennettaessa laukaistaan nämä jäännösjännitykset ja aiheutetaan uudelleen kappaleeseen muodonmuutos. Suurilla ainevahvuuksilla levy ei pääse lämpenemään kokonaan vaan sen

pinta kutistuu ja ilmenee kulmavetäymän tapainen ilmiö. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 368.)

Kuumilla oikomista toteutetaan käyttämällä kiilakuumennusta, pistekuumennusta, viivakuumennusta, ristikkokuumennusta, ristikuumennusta ja punaiseksi kuumennusta (kuva 12). Kiilakuumennuksessa lämpö asetetaan kolmikulmion muotoiselle alueelle (kuva 12 e). Tämä menetelmä on käytännöllinen profiilien oikomisessa, etenkin taipumismuodonmuutoksen poistamisessa kehyksistä. Pistekuumennuksessa lämpö asetetaan useisiin pisteisiin (kuva 12 d). Pistekuumennusta käytetään laajalti muodonmuutosten poistoon, erityisesti ohutlevyrakenteilla ja varsinkin ohuemmilla ainevahvuuksilla lommoutumien oikomisessa. Pistekuumennusta käytettäessä tulee muistaa jättää pisteiden väliin riittävästi kylmää kimmoista aluetta. Viivakuumennuksessa polttimen lämpö asetetaan viivaa pitkin tai sarjana yhdensuuntaisia viivoja (kuva 12 a). Viivakuumennusta käytetään yleensä kulmittaista muodonmuutosta poistaessa levyyn kiinnitetystä jäykisteestä sekä suurien levykenttien ja alueiden oikomiseen. Viivakuumennusta voidaan myös käyttää menetelmänä taivuttaa levyjä. Ristikkokuumennuksessa lämpö asetetaan pitkin levyä systeemillä, jossa kaksi viivaa risteää toisiaan (kuva 12 c). Tätä menetelmää käytetään yleensä vakavien muodonmuutosten poistamiseen. Tällöin täytyy olla varovainen, ettei metallia kuumenna liikaa. Ristikuumennuksessa asetetaan kaksi viivaa risteämään toisiaan pitkin levyä (kuva 12 b). Tämä menetelmä on pistekuumennuksen ja viivakuumennuksen puolessa välissä. Koska kutistuma ja kulmittainen muodonmuutos esiintyvät kahteen suuntaan, tämä menetelmä tuottaa yhtenäisen muodonmuutoksen poistovaikutuksen. Punaiseksi kuumentamista käytetään, kun vakavia muodonmuutoksia esiintyy paikallisilla alueilla ja saattaa olla tarvittavaa kuumentaa alue korkeaan lämpötilaan (kuva 12 f), ja mahdollisesti hakata sitä vasaralla. Tämä tapa saattaa kuitenkin aiheuttaa metallurgisia muutoksia. Välillä käytetään myös rengaskuumennusta, jolloin kuumennetaan renkaan muotoinen alue. Rengaskuumennusta käytetään levytasoissa lommojen oikaisuun. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 369; Masubuchi, 1980, s. 322–324.)



Kuva 12. Kuumilla oikomistavat (mukaillen Masubuchi, 1980, s. 323).

Valmistettavan rakenteen neutraaliakselin tai massan keskipisteen hyödyntäminen valmistuksessa vähentää kaareutumista ja muunlaista käyristymistä. Neutraaliakselin tai massan keskipisteen kohdalle hitsattu hitsi tai asetettu kuumennus eroaa muihin rakenteen osiin sijoitetusta lämmöntuonnista siinä, ettei toimenpide hitsiin jäävistä vetojännityksistä huolimatta käyristä kappaletta. Hitsin tai kuumennuksen asettelu rakenteessa vaikuttaa muodonmuutoksien syntyyn ja kaareutumiseen. Kaareutumista pystyy ehkäisemään hyvällä jigin suunnittelulla ja rakenteella. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357.)

4.3.2 Ennaltaehkäisy-, vähennys- ja oikomistavat muodonmuutoslajeittain

Kaikkia eri muodonmuutostyyppejä pystytään ennaltaehkäisemään. Yleisesti lämmöntuonnin vähentäminen pienentää aiheutuvia muodonmuutoksia kappaleessa. Ennaltaehkäisytoimenpiteitä pituuskutistumaan ovat monipalkohitsauksen käyttäminen, katkohitsaus, siltahitsien rajattu käyttö ja reunoilta keskelle päin oleva silloitussuunta, mahdollisen venyttävän esijännityksen asettaminen lämpövyöhykkeen kohdalle kuumennettavan osuuden pituussuuntaan, kuumennusalueiden symmetrinen sijoittelu rakenteen neutraaliakseliin nähden, mihin myös palkoluku tai kuumennuskertojen määrä vaikuttaa, sekä hitsauksen suoritusjärjestys. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357.)

Poikittaiskutistumaa voidaan ehkäistä välttämällä ylisuurien pienahitsien hitsaamista, käyttämällä kiinnittimiä, railovalinnalla (esimerkiksi käyttämällä X-railoa tai molemminpuolista hitsausta/kuumentamista), välttämällä lyhyitä siltahitsejä (vähintään 25 x levynvahvuus siltojen välinä), käyttämällä taka-askelhitsausta, pienentämällä ilmarakoa sekä valitsemalla rakenteeseen tarvittavan jäykkyyden saavuttamisvaihtoehdot oikein (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357–358).

Kiertymää pystytään ehkäisemään riittävällä silloittamisella ja kiinnittimien käytöllä. Silloittaminen kannattaa tehdä laajemmaltakin alueelta kuin vain hitsattavasta kohdasta. (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357.)

Kulmavetäymää ennaltaehkäistään railovalinnoilla, välttämällä suuria palkomääriä, välttämällä pienahitsin a-mitan kasvattamista, käyttämällä katkohitsejä huomioiden rajoitukset, käyttämällä esitaivutuksia ja/tai esijännityksiä kiinnittimien avulla sekä käyttämällä ennakkokulmia (Lepola & Makkonen, 2006, s. 357–358).

Lommahtamista voidaan ehkäistä etukäteen pienentämällä levyn hoikkuussuhdetta, mitoittamalla vain todellisen tarpeen mukainen a-mitta, asentamalla uumaan etukäteen pitkittäiset lommahdusjäykisteet, esilämmittämällä uumalaippoja tai esijännittämällä mekaanisesti ennen kokoamista (Niemi & Kemppi, 1993, s. 198).

5 MALLINTAMINEN

Hitsausjäännösjännitysten ja hitsausmuodonmuutosten analysointi elementtimenetelmällä, kun otetaan huomioon termiset ja mekaaniset materiaalin ominaisuudet ja komponenttien käyttäytyminen hitsauksen aikana mahdollisimman yksityiskohtaisesti elastisten komponenttien analyysillä, on jäänyt ratkaisematta vielä tänä supertietokoneiden aikanakin. Alla olevat ominaisuudet elementtimenetelmässä auttavat ymmärtämään yleisen ratkaisun vaikeutta ja suunnatonta vaivaa:

1) Malli tulisi suunnitella kolmiulotteiseksi ainakin hitsauskohdasta, jotta nähdään erilaiset jäähdytysolosuhteet kappaleen sisä- ja ulkopinnoilla.
2) Mallinnettava prosessi on suurelta osin ohimenevä. Siinä on paikasta ja ajasta riippuvia erittäin erilaisia aluegradientteja, mitkä aiheutuvat nopeista kuumennus- ja jäähdytystapahtumista.
3) Mallinnettava prosessi on epälineaarinen ja lämpötilariippuvainen suuresti liittyen termomekaaniseen materiaalin käyttäytymiseen.
4) Hetkellinen ja paikallinen materiaalin käyttäytyminen on riippuvainen paikallisen termisen ja mekaanisen jännityksen sekä rasituksen esihistoriasta.
5) Materiaali on sula hitsatessa, joissain tapauksissa liitettynä toiseen kappaleeseen. Jähmettyessään materiaali muuttaa kiinnittymistä toiseen kappaleeseen.
6) Muutokset olotilassa ja mikrorakenteessa täytyy simuloida.
7) Virheet ja halkeamat, joita saattaa esiintyä kriittisissä pisteissä, tekevät kappaleen jatkuvuudesta arveluttavan.

(Radaj, 1992, s. 148–149.)

Yllä mainitut kriittiset huomautukset kohdistuvat vain monimutkaisen todellisuuden simulointiin elementtimenetelmällä käyttäen maksimimäärää yksityiskohtia. Ne eivät päde, jos ongelmaa näin ollen pelkistetään vain keskinäiseen kysymykseen ja vain vaikuttavat hallitsevat muuttujat tapauskohtaisesti esitetään elementtimallissa. Mallinnukseen voidaan tehdä helpottavia yksinkertaistuksia:

1) Vähentämällä haluttu kolmiulotteinen mekaaninen malli kaksiulotteiseksi tai jopa yksiulotteiseksi matemaattiseksi malliksi (esimerkiksi olettamalla kappale aksisymmetriseksi), tarkastelemalla vain levyn tasoon nähden tai osan tason

kohtisuoraa hitsiin nähden, supistamalla ongelma sauva elementtiin tai kutistusvoimamalliin.

2) Geometrian, tuennan ja kuormituksen tilan yksinkertaistamisella.
3) Käyttämällä hyväksi mallin symmetriaa tai jaksottaisuutta.
4) Käyttämällä epälineaarisen termoelastisen-viskoosiplastisen mallin sijasta lineaarista termoelastista mallia.
5) Muuttamalla ohimenevä prosessi näennäisesti muuttumattomaksi prosessiksi.
6) Erottamalla terminen ja mekaaninen prosessi.
7) Jättämällä muodostuvat virheet ja halkeamat huomioimatta.
8) Jättämällä pois yhdistymis- ja kiinteäksi muuttumisvaihe kuten myös muuttumisprosessi, jota tapahtuu nostetuissa lämpötiloissa ja sen seurauksena alhaisissa myötöjännityksissä.
9) Merkitsemällä muuttuminen alhaisemmissa lämpötiloissa vain globaalisti lämmön ja termisen laajenemisen vakiolla.
10) Jättämällä viruminen ja kovettuminen huomioimatta, kuten myös käyttämällä yksinkertaistuksia myötösäännöissä.
11) Yksinkertaistamalla uran muotoa ja kerrosrakennetta.
12) Korvaamalla lämpölähteen liike hetkellisesti asetettavalla lämpömäärällä tai nopealla lämpölähteen liikkeellä, jättämällä lämmön eteneminen liikkeen suuntaan huomioimatta.
13) Korvaamalla lämpötilariippuvaiset materiaaliominaisuuksien arvot lämpötilavakion keskiarvoilla päätetyllä lämpötila-alueella.
14) Mallintamalla jäännösjännitysten muodostuminen vain pelkästään jäähdytysprosessina.

Hyväksyttävät yksinkertaistukset yksittäisessä tapauksessa riippuvat asetetuista kysymyksistä pelkistettyä keskinäistä tutkittavaa asiaa kohtaan. Käytännön tilanne huomioiden yksinkertaistukset johtavat siihen, että analyysien on pääasiassa odotettu toimittavan suhteellisia toteamuksia tiettyyn ongelmaan. (Radaj, 1992, s. 149–150.)

Mahdollisten parametriyhdistelmien ja prosessimuuttujien määrä on käytännössä melkein rajoittamaton. Elementtimenetelmä voidaan toteuttaa vain erittäin rajalliselle määrälle tapauksia kokonaisparametrialueelta, jos kustannukset ovat rajallisia. Usein käytännössä on mahdollista käsitellä vain yksi asiaankuuluva tapaus. (Radaj, 1992, s. 150–151.)

6 AIHEESTA TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA

1930 vuodesta lähtien tutkijat ovat yrittäneet ymmärtää hitsausjäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia käyttäen ennustavia menetelmiä, parametrisia kokeiluja ja luotuja kokeita. Viimeisten kolmen vuosikymmenen aikana on siirrytty saman aiheen tutkimiseen ja ennustamiseen hitsausprosessin tietokonesimuloinnilla käyttäen FE-analyysiä. Yksi merkittävä johtopäätös näistä tutkimuksista on, että hitsausjäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin ei vaikuta niin paljoa hitsauksen kuumennussykli kuin materiaalissa jäähtymisen aikana tapahtuva kutistuminen, jolloin myötölujuus ja materiaalin elastisuus palautuvat korkeammiksi arvoiksi alemmissa lämpötiloissa. Näin ollen hitsauksen kutistumisilmiön analysointi yksinään voi olla riittävän tarkka ennustamaan hitsausjäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia. (Feng, 2005, s. 3.)

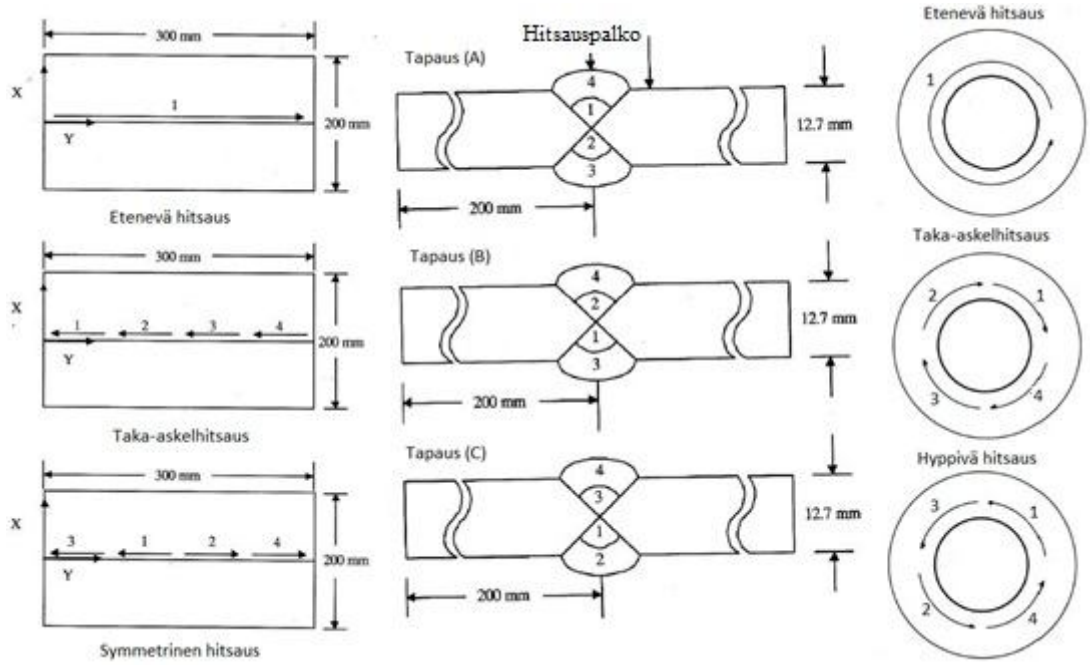
Tutkimuksia on tehty koskien eri hitsityyppejä, muun muassa Teng, Chang ja Ko (2000, s. 644) käyttivät termisen rakennekentän analyysiä elementtitekniikoilla tutkiakseen termomekaanista käyttäytymistä ja arvioidakseen jäännösjännitysten jakautumista ympyrämäisessä hitsauksessa. Tutkimuksen tulokseksi saatiin alla olevat johtopäätökset:

1) Ympyrämäisen hitsin jälkeen hitsilinja kokee kutistuman. Tämä johtaa kehämäiseen jäännösjännitykseen lähellä materiaalin myötölujuutta.
2) Hitsin keskellä on alue missä kehämäinen ja säteittäinen jäännösjännitys ovat samansuuruiset.
3) Jos hitsin koko on pienempi, syntyy suurempi jäännösjännitys hitsin keskelle.

(Teng et al., 2000, s. 650.)

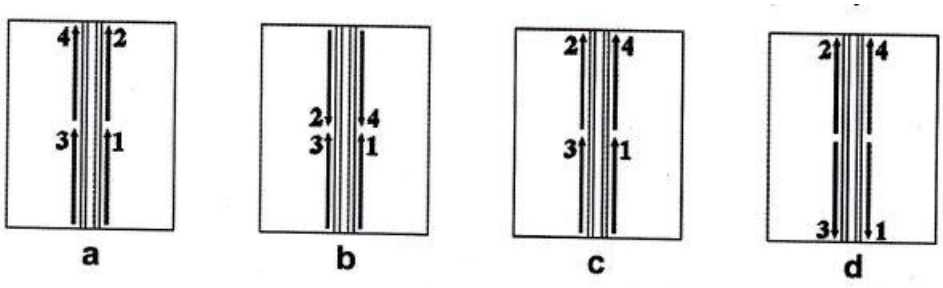
Tutkimuksia on tehty koskien eri jäännösjännitysten ja muodonmuutosten vähentämistä. Muun muassa Teng, Chang ja Tseng (2003, s. 283) tutkivat hitsausjärjestyksen vaikutusta jäännösjännitykseen. He käyttivät elementtimenetelmää arvioidakseen jäännösjännityksiä yksi- ja monipalkopäittäishitseissä sekä ympyrämäisessä hitsauksessa, kuten myös pohtivat miten hitsausjärjestys vaikuttaa jäännösjännityksiin. Yksi- ja monipalkopäittäishitseissä esiintyy erittäin suuri vetojännitys hitsin lähellä ja puristusjännitys esiintyy poispäin hitsistä. Yksipalkopäittäishitseissä jäännösjännitykset ovat melkein yhtenäisesti jakaantuneet, paitsi jännitykset hitsin päätyjen lähellä. Vetojännitys syntyy levyn

keskialueelle ja sitten yhtäkkiä muuttuu puristukseksi hitsin päissä yksipalkohitsissä. Yksipalkohitsissä käytetyt hitsausjärjestykset on esitetty kuvassa 13. Teng et al. (2003, s. 280) toteavat pitkittäisen jäännösjännityksen olevan symmetrisessä hitsauksessa pienempi kuin muilla hitsausjärjestyksillä. Monipalkopäittäishitseissä vetojännitys ilmenee yläpinnalla vähitellen muuttuen puristusjännitykseksi alapinnalle levyn paksuuden läpi. Monipalkohitsausjärjestykset on esitetty kuvassa 13. Teng et al. (2003, s. 282) päätyvät siihen tulokseen, että monipalkohitsauksessa pitkittäinen jännitys ei vaihtele merkittävästä hitsausjärjestyksen mukaan. Poikittainen jäännösjännitys kuitenkin on monipalkotapauksessa (A) pienempi kuin muilla hitsausjärjestyksillä. Ympyrämäiselle hitsille kehämäisessä jäännösjännityksessä hitsillä on yhtenäinen vetojännityskenttä hitsin keskialueella, mikä sitten vähenee puristukseksi lopulta mennen nollaan etäällä hitsistä. Säteittäinen jäännösjännitys esiintyy yhtenäisenä vetojännityksenä hitsin keskialueella, eikä vähene merkittävästi mennessä kauemmas hitsiltä. Kuvassa 13 nähdään ympyrämäisen hitsin arvioidut hitsausjärjestykset. Niistä taka-askelhitsaus aiheutti pienimmät säteittäiset jäännösjännitykset, kun taas kehämäisiin jännityksiin ei muodostunut merkittävää eroa hitsausjärjestysten välillä. (Teng et. al., 2003, s. 280–286.)



Kuva 13. Vasemmalla eri hitsausjärjestykset yksipalkopäittäishitsaukselle, keskellä monipalkopäittäishitsaukselle ja oikealla ympyrämäiselle hitsaukselle (Teng et al., 2003, s. 282).

Gannon, Liu, Pegg ja Smith (2010, s. 402) tutkivat myös hitsausjärjestyksen vaikutusta jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin. He vertailivat neljää eri hitsausjärjestystä (kuva 14) suosien D järjestystä pienempien jäännösjännitysten ja muodonmuutosten takia. (Gannon et al., 2010, s. 402.)



Kuva 14. Hitsausjärjestyksiä (Gannon et al., 2010, s. 390).

Zeng, Wang, Du ja Li (2010, s. 543) käyttivät kolmiulotteista irtikytkettyä termomekaanista elementtimenetelmää tutkiakseen vaikutusta jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin katkonaisilla täyttöhitseillä alumiinisylinterirakenteissa havainnollistaen kulmittaisen muodonmuutoksen tekijät ja hitsausjärjestyksen vaikutukset jäännösjännitysten jakautumiseen. He päätyivät alla oleviin johtopäätöksiin tutkimuksissaan:

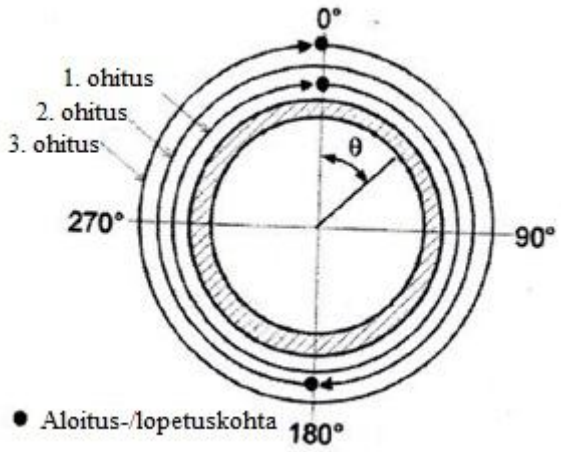
1) Simuloidut tulokset vastaavat kokeellisia mittauksia. Termistä elastisplastista elementtimallia voidaan tehokkaasti käyttää hitsausmuodonmuutosten ennustamiseen. Suuri ajan ja kustannusten säästö voidaan odottaa, jos heidän tutkimuksessaan esitetyt tietokoneelliset menetelmät otetaan käyttöön.
2) Katkonaista hitsiä tehtäessä (riippumatta hitsistä ja rakenteesta itsestään) jäännösjännitys kasvaa ja muodonmuutokset vähenevät.
3) Simuloidut tulokset osoittavat lämpötilagradientin paksuuden läpi olevan päätekijä, joka aiheuttaa kulmavetäymää heidän täytehitsatulle liitokselle. Kulmavetäymä pienenee katkoittain hitsattaessa käytettäessä esi- ja jälkilämmitystä. Kuitenkin ulkopinnan ja sisäpinnan välisen lämpötilan puute pahentaa kulmavetäymää.
4) Hitsausjärjestys ja hitsin pituus ovat tärkeitä tekijöitä jäännösjännityksen ja muodonmuutoksen muodostumisessa.

(Zeng et al., 2010, s. 543.)

Deng ja Kiyoshima (2010, s. 620) tutkivat hitsausjäännösjännitysten jakautumista kolmiulotteisella elementtimallilla ottaen huomioon liikkuvan lämmönlähteen. He korostivat hitsin aloitus- ja lopetuskohdassa hitsausjäännösjännitysten tutkimista verraten simuloinnin tuloksia mitattuun dataan. Kuvassa 15 on esitetty Dengin ja Kiyoshiman (2010, s. 613) tutkimuksessa käyttämät hitsauksen aloitus ja lopetuskohdat sekä hitsaussuunta joka palolla. Tutkimuksessaan he päätyivät näihin johtopäätöksiin:

1) Simuloinnin tuloksien ja mitatun datan vertailu ehdottaa elementtimallin yleisesti saavuttavan hitsausjäännösjännitysten jakautumisen ominaisuudet lähellä hitsin aloitus- ja lopetusaluetta.
2) Simuloinnin tulokset osoittavat kehä- ja aksiaalisen jännityksen terävän muutoksen keskinäisen kulman kanssa, 30 asteen keskuskulmasta 330 asteen keskuskulmaan alueella.
3) Simuloinnin tulokset keskialueella osoittavat, sekä maksimi vetokehäjännityksen että maksimi aksiaalisen vetojännityksen esiintyvän lähellä 350 asteen keskuskulman paikkaa.
4) Molemmat kehä- ja aksiaalinen jännitys vaihtelevat suuresti jokaisella hitsipalolla. Verrattaessa ensimmäistä ja toista palkoa kolmanteen ja viimeiseen palkoon löytyy suurin vaikutus lopulliseen jäännösjännityksen jakautumiseen.

(Deng & Kiyoshima, 2010, s. 620–621.)



Kuva 15. Hitsin aloitus- ja lopetuspisteet sekä hitsauksen suunta joka palolla (mukaillen Deng & Kiyoshima, 2010, s. 613).

Monia tutkimuksia on tehty perustuen jäännösjännitysten ja muodonmuutosten määrittämiseen käytettäessä eri hitsausmenetelmiä. Muun muassa Deng (2009, s. 366) on

tutkinut kolmiulotteisella elementtimallilla TIG -kaarihitsausprosessia (huomioiden faasimuutokset) ja simuloinut jäännösjännitykset sekä muodonmuutokset. Ehdotettua menetelmää käytettiin ennustamaan jäännösjännitykset ja hitsausmuodonmuutokset sekä matalahiilisissä teräksissä että keskisuurihiilisissä teräksissä. Tutkimuksesta hän teki alla olevia päätelmiä:

1) Faasimuutoksilla on matalahiilisillä teräksillä mitätön vaikutus hitsausjäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin. Tämä johtuu martensiittisista muutoksista aiheutuen pienestä laajenemisesta ja kohtuullisen suuresta lämpötila-alueesta.
2) Faasimuutoksilla on keskisuurihiilisillä teräksillä merkittävä vaikutus jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin johtuen kohtuullisen suuresta laajenemisesta ja matalasta lämpötilasta.
3) Nykypäivän simulaatiotuloksien mukaan ennustettaessa käyttäen numeerista simulaatiota jäännösjännitykset ja hitsausmuodonmuutokset keskisuurihiilisillä teräksillä on tarpeellista harkita kiinteän tilan faasimuutosta. Toisaalta kiinteän tilan faasimuutos voidaan laiminlyödä matalahiilisillä teräksillä. Faasimuutoksen laiminlyönti matalahiilisen teräksen hitsausrakenteessa tekee numeerisen mallin yksinkertaiseksi ja vähentää laskemisaikaa.

(Deng, 2009, s. 366.)

Tutkimuksia on myös tehty perustuen käyttökohteisiin. Muun muassa Michaleris ja DeBiccari (1997, s. 180) tutkivat termoelastisplastisella elementtianalyysillä hitsauksen simulointia. He keskittyivät tarkastelemaan etenkin pitkittäisjännityksistä aiheutuvaa lommahdusta paneelirakenteissa laivanrakennuksessa. He totesivat käytetyn menetelmän oleva tehokas ja tuloksia tuottava. Kaksiulotteisen analyysin käyttö vähentää laskennallista aikaa ja kustannuksia. Ennustava lähestymistapa voidaan toteuttaa monissa suunnittelu- ja valmistuskierroksen asteissa. Heidän käyttämäänsä menetelmää voi myös käyttää parantamaan tehokkuutta ja vakiinnuttamaan suoritusparametrit muodonmuutosten vähentämistekniikan arvioinnissa. (Michaleris & DeBiccari, 1997, s. 180.)

Tsai, Park ja Cheng (1999, s. 156) tutkivat muodonmuutosmekanismia ja hitsausjärjestyksen vaikutusta paneelien muodonmuutoksiin. He käyttivät elementtimenetelmää tutkiessaan muodonmuutosten käyttäytymistä sisältäen paikallisen

levyn taipumisen ja lommahduksen kuten myös globaalin palkin taipumisen. (Tsai et al., 1999, s. 156.) Tutkimus osoitti, että paneelirakenteen hitsauskokoonpano voi vain lommahtaa, kun paneeli taipuu globaalisti pinnassa olevien suurien kaartumien johdosta. Sijoittamalla hitsit lähemmäs paneelin poikkileikkauksen neutraaliakselia voidaan hallita globaalia taipumista ja pienentää hitsausmuodonmuutoksia jäykistetyissä paneeleissa. Muita muodonmuutosten vähennystekniikoita ovat painavampien jäykisteiden käyttäminen poikkileikkauksen hitsausmomentin kasvattamiseksi tai Eggcrate-valmistusmenetelmää käyttämällä paneelirakenteen taivutuskestävyyden parantamiseksi äärimmäisesti. Optimaalisen hitsausjärjestyksen käyttämisellä voidaan parantaa paneelin tasaisuutta ja minimoida kulmavetäymä pintalevyssä. (Tsai et al., 1999, s. 165.)

Carrolo (2010, s. 1) keskittyi pro gradu -tutkielmassaan prosesseihin ja valmistukseen erään Carr’s Welding Technologies -yrityksen tuotteen kohdalla yrittäen tehdä tuotannosta mahdollisimman tasalaatuista ja aiheutuvista kustannuksista kilpailukykyisiä. Prototyypin analysoinnin jälkeen hän huomasi hitsausprosessin ongelman aiheutuvan lämmöstä syntyvistä muodonmuutoksista. (Carrolo, 2010, s. 1.) Hän testasi tuotteeseen eri muodonmuutosten poisto- ja vähennystapoja pienentääkseen aiheutuvia muodonmuutoksia. Kyseiseen tuotteeseen vasarointi ei aiheuttanut mitattavia tuloksia, kiinnitys yksinään ei osoittautunut kovinkaan tehokkaaksi menetelmäksi ja esitaivutuksella voitiin tehokkaasti vähentää hitsausmuodonmuutoksia. Parhaimmat tulokset saatiin kuitenkin yhdistämällä esitaivutuksen ja kiinnitteiden käytön. Hän myös toteaa tutkimuksessaan, että Ansys-ohjelmalla simuloidut muodonmuutostestit vastasivat kokeissa saatuja tuloksia. (Carrolo, 2010, s. 9.)

7 YHTEENVETO

Jäännösjännitykset ja muodonmuutokset syntyvät paikallisesti lämmitettäessä tapahtuvan estetyn laajenemisen aiheuttamasta tyssääntymisestä ja jäähtymisestä aiheutuvasta kutistumisesta. Jäännösjännityksiä on pitkittäisiä, poikittaisia ja paksuilla kappaleilla myös paksuussuuntaisia jännityksiä. Muodonmuutoksia on pituuskutistuma, kaareutuminen, lommoutuminen, poikittaiskutistuma, kiertymä ja kulmavetäymä.

Jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia pystytään hallitsemaan hyödyntämällä ennaltaehkäisy, vähennys- ja poistotoimenpiteitä. Jäännösjännityksen hallintaan käytetään muun muassa konstruktiivisia keinoja, hitsausmenetelmän valintaa, hitsausprosessin ominaisuuksien variointia, kuten esimerkiksi hitsaustilavuuden pienentämistä, hitsatessa kiinnittimien käyttöä tai hitsauksen jälkeen erilaisia työstömenetelmiä käyttäen, esimerkiksi myöstö ja vasartaminen. Muodonmuutosten hallintaan käytetään valmistuksen sekä hitsausprosessin menettelytapojen optimointia ja kunnollisia tekniikoita hitsauksen jälkeen, esimerkiksi, mekaaninen ja lämmöllä oikominen.

Mallintamisen avulla pystytään ennakoimaan tapahtuvia jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia. Näin ollen pystytään optimoimaan valmistusta aiheutuvien ominaisuuksien minimoimiseksi. Varsinkin hitsausjäännösjännitysten ja hitsausmuodonmuutosten ennustamista ja hallintaa mallintamisen kautta on tutkittu erittäin paljon useilta eri kanteilta. Näitä ovat muun muassa eri hitsityyppien, hitsausjärjestyksen, katkonaisen hitsin käytön, aloitus- ja lopetuskohdan vaikutuksen, eri hitsausmenetelmien sekä eri käyttökohteiden vaikutusta hitsausjäännösjännityksiin ja tapahtuviin muodonmuutoksiin.

LÄHTEET

Carrolo, V. S. 2010. Laser welding distortions on thin plates. Technical university of Lisbon, department of mechanical engineering. Lisbon: [viitattu 18.6.2014]. Konetekniikan pro gradu -tutkielman artikkeli. 9 s. Saatavana Pdf-tiedostona: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142134403/Paper%20Laser%20welding%20heat%20distortion.pdf

Cverna, F. 2002. Thermal properties of metals. Ohio: Novelty. ASM International. 560 s.

Deng, D. 2009. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. Materials & Design, 30: 2. S. 359–366.

Deng, D. & Kiyoshima, S. 2010. FEM prediction of welding residual stresses in a SUS304 girth-welded pipe with emphasis on stress distribution near weld start/end location. Computational Materials Science, 50: 2. S. 612–621.

Feng, Z. 2005. Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion. Florida: Boca Raton. Woodhead Publishing Limited. 364 s.

Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N. & Smith, M. 2010. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. Marine Structures, 23: 3. S. 385–404.

Huhtala, V., Makkonen, T., Ojanen, T. & Rusanen, A. 1987. Konstruktiotekniikka. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 180 s.

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 1985. Valmistustekniikka. 10. painos. Helsinki: Otatieto osakeyhtiö. 490 s.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2006. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1.–2. painos. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö. 429 s.

Masubuchi, K. 1980. Analysis of welded structures. Lontoo: Pergamon Press Ltd. 642 s.

Michaleris, P. & DeBiccari, A. 1997. Prediction of welding distortion. Welding Journal, 76: 4. S. 172–180.

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

Outokumpu. 2013. Steel grades, properties and global standards. [julkaisu Outokummun www-sivuilla]. Päivitetty toukokuu, 2013. [viitattu 2.7.2014]. 20 s. Saatavissa: http://www.outokumpu.com/en/tools-and-downloads/product-downloads/stainless-grade-properties-and-standards/Pages/default.aspx

Radaj, D. 1992. Heat effects of welding. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 348 s.

Tsai, C. L., Park, S. C. & Cheng, W. T. 1999. Welding distortion of a thin-plate panel structure. Welding Journal, 78. S. 156–165.

Teng, T. L., Chang P. H. & Ko, H. C. 2000. Finite element analysis of circular patch welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 77: 11. S. 643–650.

Teng, T. L., Chang, P. H. & Tseng, W. C. 2003. Effect of welding sequences on residual stresses. Computers & Structures, 81: 5. S. 273–286.

Zeng, Z., Wang, L., Du, P. & Li, X. 2010. Determination of welding stress and distortion in discontinuous welding by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements. Computational Materials Science, 49: 3. S. 535–543.

Outokummun ruostumattomat teräkset (Outokumpu, 2013, s. 2).

Steel grades, chemical composition and products

Table 2

Outokumpu steel name	International steel designation				Typical chemical composition, %						Products
	EN	ASTM	UNS	JIS	C	N	Cr	Ni	Mo	Others	
FERRITIC GRADES											
4600	1.4600	–	–	–	0.02		11.2	0.85		Ti	H S
4512	1.4512	409	–	SUS409	0.02		11.5	0.2		Ti	H C S
4003	1.4003	–	S40977	–	0.02		11.5	0.5			P H C S
4000	1.4000	410S	S41008	SUS 403	0.03		12.5				P H C S
4589	1.4589	–	S42035	–	0.045		14	1.65	0.25	Ti	H C S
4016	1.4016	430	S43000	SUS 430	0.05		16.2				H C B R S
4511	1.4511	–	–	–	0.02		16.2			Nb	H C S
4520	1.4520	–	–	–	0.02		16.2			Ti	H C S
4510	1.4510	439	S43035	SUS 430LX	0.02		17			Ti	H C S
4509	1.4509	–	S43940	–	0.02		18			Ti Nb	H C S
4607	1.4607[1]	–	–	–	0.02		19			Ti Nb	H C S
4113	1.4113	434	S43400	–	0.045		16.5		1		H C S
4513	1.4513	–	S43600	–	0.02		17		1	Ti	H C S
4521	1.4521	444	S44400	SUS 444	0.02		18		2	Ti Nb	P H C S
MARTENSITIC AND PRECIPITATION HARDENING GRADES											
4006	1.4006	410	S41000	SUS 410	0.12		12				P H C B R S
4005	1.4005	416	S41600	SUS 416	0.10		13			S	B R S
4021	1.4021	420	S42000	SUS 420J1	0.20		13				P H C B R S
4031	1.4031	420	S42000	–	0.38		13.5				H C S
4034	1.4034	420	S42000	–	0.45		13.7				H C S
4028	1.4028	420	S42000	SUS 420J2	0.30		12.5				H C B S
4313	1.4313	–	S41500	SUS Ti6NM	0.03		12.5	4.1	0.6		P S
4542	1.4542	630	S17400[3]	SUS 630	0.02		15.5	4.8		3.4Cu Nb	B R S
4116	1.4116	–	–	–	0.5		14.4		0.55	V	H C S
4110	1.4110	–	–	–	0.5		14.8		0.63		H C S
4568	1.4568	631	S17700	SUS 631	0.08		17	7		1Al	R S
4122	1.4122	–	–	–	0.41		16.1		1		H C S
4574	1.4574	632	S15700	–	0.08		14.5	7.5	2.2	1.1Al	C S
FERRITIC HIGH TEMPERATURE GRADES											
4713	1.4713	–	–	–	0.06		6.5			0.8Si 0.8Al	P H C S
4724	1.4724	–	–	–	0.07		12.5			1Si 0.9Al	P H C S
4736	1.4736	–	–	–	0.02		17.5			1.8Al Ti	H C S
4742	1.4742	–	–	–	0.07		17.5			1Si 1A	P H C S
4762	1.4762	–	–	–	0.08		23.5			1Si 1.5Al	P H C S
AUSTENITIC HIGH TEMPERATURE GRADES											
4948	1.4948	304H	S30409	SUS 304	0.05		18.1	8.3			P H C B R S T
4878	1.4878[2]	321H	–	SUS 321	0.05		17.3	9.1		Ti	P H C B R S T
153 MA™	1.4818	–	S30415	–	0.05	0.15	18.5	9.5		1.3Si Ce	P C R S T
4833	1.4833[2]	309S[2]	S30908	SUS 309	0.06		22.3	12.6			P H C B R S T
4828	1.4828	–	–	SUH 309	0.04		20	12		2Si	P H C B S
253 MA®	1.4835	–	S30815	–	0.09	0.17	21	11		1.6Si Ce	P H C B R S T
4845	1.4845[2]	310S[2]	S31008	SUS 310S	0.05		25	20			P H C B R S T
4841	1.4841	314	S31400	–	0.07		24.5	19.5		2Si	P H C B R S

[1]designation according to Stahl Eisen Liste (register of European Steels). [2]additional creep resisting grades are: 1.4941, 1.4950, 1.4951. [3]also available as S15500.

Steel grades, chemical composition and products

Table 4

Outokumpu steel name	International steel designation				Typical chemical composition, %						Products
	EN	ASTM	UNS	JIS	C	N	Cr	Ni	Mo	Others	
DUPLEX GRADES											
LDX 2101®	1.4162	–	S32101	–	0.03	0.22	21.5	1.5	0.3	5Mn Cu	P H C B R S T D
2304[1]	1.4362	–	S32304	–	0.02	0.10	23	4.8	0.3	Cu	P H C B R S T D
LDX 2404®	1.4662*	–	S82441	–	0.02	0.27	24	3.6	1.6	3Mn Cu	P H C B R S T
2205	1.4462	–	S32205[2]	SUS 329J3L	0.02	0.17	22	5.7	3.1		P H C B R S T D
4501	1.4501	–	S32760	–	0.02	0.27	25.4	6.9	3.8	W Cu	P B R S T
2507	1.4410	–	S32750	–	0.02	0.27	25	7	4		P H C B R S T
AUSTENITIC GRADES											
4310	1.4310	301	S30100	SUS 301	0.10		17	7			H C B R S
4618	1.4618	–	–	–	0.06		16.6	4.6		7.9Mn 1.7Cu	H C S
4318	1.4318	301LN	S30153	SUS 301L	0.02	0.14	17.7	6.5			H C S
4376	1.4376	–	–	–	0.035	0.2	17.5	4		6.8Mn	H C S
4372	1.4372	201	S20100	SUS 201	0.05	0.20	17	4		7Mn	H C S
4301	1.4301	304	S30400	SUS 304	0.04		18.1	8.1			P H C B R S T
4307	1.4307	304L	S30403	–	0.02		18.1	8.1			P H C B R S T
4311	1.4311	304LN	S30453	SUS 304LN	0.02	0.14	18.5	9.2			P H C R S
4541	1.4541	321	S32100	SUS 321	0.04		17.3	9.1		Ti	P H C B R S T
4550	1.4550	347	S34700	SUS 347	0.05		17.5	9.5		Nb	P H C B R S T
4305	1.4305	303	S30300	SUS 303	0.05		17.3	8.2		S	P B R S
4303	1.4303	305	S30500	SUS 305J1	0.04		17.7	12.5			H C R S
4306	1.4306	304L	S30403	SUS 304L	0.02		18.2	10.1			P H C B R S T
4567	1.4567	–	S30430	SUS XM7	0.01		17.7	9.7		3Cu	B R S
4640	1.4640	–	–	–	0.06		18	6.5		1.7Cu 1.8Mn	H C S
4401	1.4401	316	S31600	SUS 316	0.04		17.2	10.1	2.1		P H C B R S T
4404	1.4404	316L	S31603	–	0.02		17.2	10.1	2.1		P H C B R S T
4427	1.4427*	–	–	–	0.05		16.9	10.7	2.5	S	P
4436	1.4436	316	S31600	SUS 316	0.04		16.9	10.7	2.6		P H C B R S T
4432	1.4432	316L	S31603	–	0.02		16.9	10.7	2.6		P H C B R S T
4406	1.4406	316LN	S31653	SUS 316LN	0.02	0.14	17.2	10.3	2.1		P H C B R S T
4441	1.4441	–	–	–	0.02		17.6	14.5	2.8		H C S
4429	1.4429	–	S31653	SUS 316LN	0.02	0.14	17.3	12.5	2.6		P R S
4571	1.4571	316Ti	S32100	SUS 316Ti	0.04		16.8	10.9	2.1	Ti	P H C B R S T
4435[3]	1.4435[3]	316L	–	SUS 316L	0.02		17.3	12.6	2.6		P H C B R S T
3952	1.3952*	–	–	–	0.02	0.18	16.9	13.2	2.7		P
HIGH PERFORMANCE AUSTENITIC GRADES											
4438	1.4438	317L[6]	S31703	SUS 317L	0.02		18.2	13.7	3.1		P C B R S T
4439	1.4439	317LMN[4]	S31726	–	0.02	0.14	17.3	13.7	4.1		P H C S T
725LN	1.4466	–	S31050	–	0.01	0.12	25	22.3	2.1		P
3964	1.3964*	–	–	–	0.02	0.27	20.5	15.4	3.2	4.3Mn Nb	P
904L	1.4539	904L	N08904	–	0.01		20	25	4.3	1.5Cu	P H C B R S T
254 SMO®	1.4547	–	S31254	SUS312L	0.01	0.20	20	18	6.1	Cu	P H C B R S T
4529	1.4529	–	N08926[5]	–	0.01	0.20	20.5	24.8	6.5	Cu	P C T
4565	1.4565	–	S34565	–	0.02	0.45	24	17	4.5	5.5Mn	P H C S T
654 SMO®	1.4652	–	S32654	–	0.01	0.50	24	22	7.3	3.5Mn Cu	P C S T

*designation according to Stahl Eisen Liste (Register of European Steels). [1]also available as EDX 2304™ with enhanced properties. [2]also available as S31803. [3]724L is a modifies version of 4435 for Urea applications. [4]317LMN not available in all product forms. [5]also available as N08367. [6]also available as 317L with 11.7% Ni which is not consistent with 1.4438.

Outokummun ruostumattomien teräksien fysikaaliset ominaisuudet (Outokumpu, 2013, s. 12–13).

Physical properties

Table 12

Outokumpu steel name	EN	Density, ρ kg/dm³	Modulus of elasticity, E GPa		Coefficient of thermal expansion between 20°C and T, 10^{-6}/°C		Thermal conductivity, λ W/m°C		Thermal capacity, c J/kg°C	Electrical resistivity, ρ µΩm	Magnet-izable
		RT	RT	400°C	100°C	400°C	RT	400°C	RT	RT	RT
Non alloy steel	1.0345	7.8	210	175	12.0	14.0	55	44	460	0.18	Y
FERRITIC GRADES											
4600	1.4600	7.7	220	195	10.5	–	25		460	0.60	Y
4512	1.4512	7.7	220		10.5	12.0	25		460	0.60	Y
4003	1.4003	7.7	220	195	10.4	11.6	25		430	0.60	Y
4000	1.4000	7.7	220	195	10.5	12.0	30		460	0.60	Y
4589	1.4589	7.7	220	165	10.5	12.0	25		460	0.60	Y
4016	1.4016	7.7	220	195	10.0	10.5	25	25	460	0.60	Y
4511	1.4511	7.7	220	195	10.0	10.5	25		460	0.60	Y
4520	1.4520	7.7	220	195	10.4	11.6	20		430	0.70	Y
4510	1.4510	7.7	220	195	10.0	10.5	25		460	0.60	Y
4509	1.4509	7.7	220	195	10.0	10.5	25		460	0.60	Y
4607	1.4607	7.7	220	195	10.3	11.1	18		390	0.65	Y
4113	1.4113	7.7	220	195	10.0	10.5	25		460	0.70	Y
4513	1.4513	7.7	220	195	10.0	10.5	25		460	0.70	Y
4521	1.4521	7.7	220	195	10.4	11.6	23		430	0.80	Y
MARTENSITIC AND PRECIPITATION HARDENING GRADES											
4006	1.4006	7.7	215	190	10.5	12.0	30		460	0.60	Y
4005	1.4005	7.7	215	190	10.5	12.0	30		460	0.60	Y
4021	1.4021	7.7	215	190	10.5	12.0	30	25	460	0.60	Y
4031	1.4031	7.7	215	190	10.5	12.0	30		460	0.55	Y
4034	1.4034	7.7	215	190	10.5	12.0	30		460	0.55	Y
4028	1.4028	7.7	215	190	10.5	12.0	30	25	460	0.65	Y
4313	1.4313	7.7	200	170	10.5	11.6	25		430	0.60	Y
4542	1.4542	7.8	200	170	10.9	–	16		500	0.71	Y
4116	1.4116	7.7	215	190	10.5	11.5	30		460	0.65	Y
4110	1.4110	7.7	215	190	10.5	12.0	30		460	0.62	Y
4568	1.4568	7.8	200	170	13.0		16		500	0.80	Y
4122	1.4122	7.7	215	190	10.4	11.6	15		430	0.80	Y
4574	1.4574										
FERRITIC HIGH TEMPERATURE GRADES											
					400°C	1000°C	RT	500°C			
4713	1.4713	7.7			12.0	–	23	25	450	0.70	Y
4724	1.4724	7.7			11.5	–	21	23	500	0.75	Y
4736	1.4736	7.7			10.8	13.0	21	23	500	0.60	Y
4742	1.4742	7.7			11.5	13.5	19	25	500	0.93	Y
4762	1.4762	7.7			11.5	13.5	17	23	500	1.10	Y
AUSTENITIC HIGH TEMPERATURE GRADES											
			500°C	1000°C	500°C	1000°C	500°C	1000°C	500°C		
4948	1.4948	7.9	158	120	18.4	20.0	21.9	28.8	582	0.71	N
4878	1.4878	7.9	158		18.4	20.5	21.6		582	0.74	N
153 MA™	1.4818	7.8	163	120	18.2	19.5	21.2	29.0	585	0.84	N
4833	1.4833	7.8	158	120	18.4	20.0	20.5	27.5	582	0.87	N
4828	1.4828	7.8	158	120	18.4	20.0	20.5	27.5	582	0.87	N
253 MA®	1.4835	7.8	163	120	18.2	19.5	21.2	29.0	585	0.84	N
4845	1.4845	7.8	158	120	18.4	20.0	19.8	27.1	582	0.96	N
4841	1.4841	7.8	158	120	18.8	20.0	19.0	27.8	582	0.96	N

[1]Outokumpu typical values

Physical properties

Table 13

Outokumpu steel name	EN	Density, ρ kg/dm³	Modulus of elasticity, E GPa		Coefficient of thermal expansion between 20°C and T, 10^{-6}/°C		Thermal conductivity, λ W/m°C		Thermal capacity, c J/kg°C	Electrical resistivity, ρ µΩm	Magnet-izable
		RT	RT	400°C	100°C	400°C	RT	400°C	RT	RT	RT
Non alloy steel	1.0345	7.8	210	175	12.0	14.0	55	44	460	0.18	Y
DUPLEX GRADES											
LDX 2101®	1.4162	7.8	200	172	13.0	14.5	15	20	500	0.80	Y
2304	1.4362	7.8	200	172	13.0	14.5	15	20	500	0.80	Y
LDX 2404™	1.4662	7.7	205		13.0	14.5	15		500	0.80	Y
2205	1.4462	7.8	200	172	13.0	14.5	15	20	500	0.80	Y
4501	1.4501	7.8	200	172	13.0	14.5	15	20	500	0.80	Y
2507	1.4410	7.8	200	172	13.0	14.5	15	20	500	0.80	Y
AUSTENITIC GRADES											
4310	1.4310	7.9	200	172	16.0	18.0	15	20	500	0.73	N
4618	1.4618	7.9	200	172	16.0	17.5	15		500	0.73	N
4318	1.4318	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N
4376	1.4376	7.9	200	172	16.0	17.5	15		500	0.73	N
4372	1.4372	7.8	200	172			15	20		0.70	N
4568	1.4568	7.8	200	170	13.0		16		500	0.80	Y
4301	1.4301	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N
4307	1.4307	7.9	200	172	16.0	18.0	15	20	500	0.73	N
4311	1.4311	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N*
4541	1.4541	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N
4550	1.4550	7.9	200	172	16.0	17.5	15		500	0.73	N
4305	1.4305	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N
4303	1.4303	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N*
4306	1.4306	7.9	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.73	N
4567	1.4567	7.9	200	172	16.7	18.1					N
4640	1.4640	7.9	200	172	16.0	17.5	15		500	0.73	N
4401	1.4401	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
4404	1.4404	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
4427[1]	–	8.0	200	172	16.5	18.5	15		500	0.75	N
4436	1.4436	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
4432	1.4432	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
4406	1.4406	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N*
4441	1.4441										
4429	1.4429	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
4571	1.4571	8.0	200	172	16.5	18.5	15	20	500	0.75	N
4435	1.4435	8.0	200	172	16.0	17.5	15	20	500	0.75	N
3952[1]	–	7.9	200		16.5		15		500	0.75	N
HIGH PERFORMANCE AUSTENITIC GRADES											
4438	1.4438	8.0	200	172	16.0	17.5	14	20	500	0.85	N
4439	1.4439	8.0	200	172	16.0	17.5	14	20	500	0.85	N
725LN	1.4466	8.0	195	166	15.7		14	17	500	0.80	N
3964[1]	–	7.9	195	165	15.7	17.8	14		475	0.81	N
904L	1.4539	8.0	195	166	15.8	16.9	12	18	450	1.00	N
254 SMO®	1.4547	8.0	195	166	16.5	18.0	14	18	500	0.85	N
4529	1.4529	8.1	195	166	15.8	16.9	12	18	450	1.00	N
4565	1.4565	8.0	190	165	14.5	16.8	12	18	450	0.92	N
654 SMO®	1.4652	8.0	190	164	15.0	16.2	8.6		500	0.78	N

[1]Outokumpu typical values