

Matti Kupari

JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN MUODOSTUMINEN KITKAHITSAUKSESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Asko Ellman
Joulukuu 2024

TIIVISTELMÄ

Matti Kupari: Jännösjännitysten muodostuminen kitkahitsauksessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka
Joulukuu 2024

Tämä työ on kolmesta osasta muodostuva kirjallisuuskatsaus, jossa ensimmäisenä käsitellään FSW-menetelmän (Friction Stir Welding) toimintaperiaatetta ja siinä muodostuvan liitoksen rakennetta. Tämän jälkeen perehdytään tarkemmin jännösjännityksiin ja niiden muodostumiseen prosessin aikana eri tekijöiden vaikutuksesta, sekä menetelmiin, joilla voidaan vähentää hitsausprosessissa muodostuvia jännösjännityksiä. Työn tavoitteena on selvittää menetelmän tekijät, jotka vaikuttavat merkittävästi jännösjännitysten muodostumiseen.

FSW on kitkaan ja materiaalivirtaukseen perustuva kiinteän olomuodon liitosmenetelmä, jolla voidaan toteuttaa tehokkaasti mekaanisilta ominaisuuksiltaan vahvoja liitoksia soveltuvan työkalun avulla. Menetelmällä voidaan toteuttaa liitoksia materiaaleihin, kuten korkealujuuksiin alumiineihin, joiden liittäminen perinteisillä sulahitsausmenetelmillä on haastavaa. Kuten muissa hitsausmenetelmissä, myös FSW-menetelmässä muodostuu jännösjännityksiä, jotka vaikuttavat pääasiassa negatiivisesti materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten väsymiskestävyyteen.

Tutkimuksen perusteella menetelmässä muodostuu pääasiassa vetäviä jännösjännityksiä sekä termisesti, että mekaanisesti. Termisesti muodostuvat jännösjännitykset ovat merkittävämpiä, sillä ne vaikuttavat lopullisten jännösjännitysten suuruuteen. Mekaanisesti muodostuvat jännösjännitykset eivät ole suuruudeltaan merkittäviä, mutta ne aiheuttavat jännitysjakamaan epäsymmetriaa. Vetävien jännösjännitysten suuruuteen vaikuttavat merkittävästi työkalun etenemisnopeus. Suuremman etenemisnopeuden vaikutuksesta liitoksen ja sen ympärillä olevan perusmateriaalin lämpötilaero kasvaa johtaen korkeampiin vetäviin jännösjännityksiin. Prosessin aikana jännösjännitysten vähentämiseen voidaan vaikuttaa merkittävästi kappaleen kiinnityksellä, sekä prosessinaikaisella jäädytyksellä. Kiinnityksellä voidaan aiheuttaa vetävä esijännitys kappaleisiin, joiden avulla voidaan saavuttaa tila, jossa kappaleisiin muodostuvat vetävät jännösjännitykset ovat hyvin matalia tai ne ovat täysin puristavia.

Prosessin aikana muodostuvien jännösjännitysten suuruus ei kuitenkaan aina vastaa vaadittua tasoa. Jännösjännityksiä on kuitenkin mahdollista vähentää hitsauksen jälkeen lämpökäsittelyn tai mekaanisten menetelmien avulla. Tavoitteena kuitenkin on minimoida jännösjännitysten muodostuminen liitoksen muodostamisen aikana työvaiheiden, ja siten kustannusten vähentämiseksi.

Avainsanat: Kitkahitsaus, liitos, jännösjännitys, jännösjännitysten vähentäminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KITKAHITSAUS LIITOSMENETELMÄNÄ	3
2.1 FSW-menetelmän toimintaperiaate	3
2.2 Liitoksen rakenne	4
2.3 Prosessin parametrit	5
3. JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET HITSAUSLIITOKSISSA	8
3.1 Jäännösjännitykset yleisesti	8
3.2 Muodostuminen ja esiintyminen liitoksessa	9
3.3 Jäännösjännityksiin vaikuttavat parametrit ja tekijät	12
3.3.1 Etenemis- ja pyörimisnopeuden vaikutus	12
3.3.2 Aksiaalisen voiman vaikutus	13
3.3.3 Kappaleiden kiinnityksen vaikutus	13
3.3.4 Jäähdytyksen vaikutus	15
4. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN VÄHENTÄMINEN	17
4.1 Lämpökäsittelymenetelmät	17
4.2 Mekaaniset menetelmät	18
5. YHTEENVETO	20
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT.

BM	Base material
FSW	Friction stir welding
HAZ	Heat affected zone
MIG	Metal inert gas
SZ	Stir zone
TIG	Tungsten inert gas
TMAZ	Thermo-mechanically affected zone
UQ	Uphill quenching

1. JOHDANTO

Monet metallit, kuten alumiinit ovat laajasti käytetty materiaali muun muassa autoteollisuudessa, laivanrakennusteollisuudessa, ilmailu- ja avaruusteollisuudessa sekä muissa rakennusteollisuuksissa. Teollisuusalaista riippumatta kappaleiden liittäminen on tärkeä osa tuotantoa. Perinteisesti metallien hitsaus on suoritettu TIG (Tungsten inert gas) -tai MIG (Metal inert gas) -hitsauksella. Kuitenkin esimerkiksi alumiinin hitsaaminen perinteisillä sulahitsausmenetelmillä on haastavaa sen ominaisuuksien, kuten korkean lämmönjohtavuuden vuoksi. Hitsausprosessissa alumiiniin muodostuu jäännösjännityksiä sekä kappaleet vääristyvät. (Mishra & Ma 2005)

Jäännösjännityksillä on merkittävä vaikutus erityisesti materiaalin väsymiskestävyyteen. Korkeat jäännösjännitykset laskevat materiaalin väsymiskäykä, mikä johtaa usein rakenteiden enneaikaiseen vaurioitumiseen. (Mishra & Ma 2005) Tämän vuoksi on syytä tuntea jäännösjännitysten muodostuminen hitsauksessa erityisesti rakenteissa, joissa vaurioituminen aiheuttaa vaaraa ihmiselle tai johtaa korkeisiin kustannuksiin.

Metallien hitsaamista kitkan avulla on kuitenkin tutkittu paljon, ja menetelmistä erityisesti liikkuvan työkalun kitkahitsausta (Friction stir welding, FSW). Perinteisiin sulahitsausmenetelmiin verrattuna materiaali pysyy kiinteässä olomuodossa prosessin aikana. Lisäksi se on energiatehokas ja siten ympäristöystävällinen menetelmä liitosten muodostamiseksi. Menetelmää hyödynnetään erityisesti metalleille, joissa perinteisen sulahitsauksen käyttäminen on haastavaa, kuten korkealujuuksisille alumiiniseoksille. FSW-menetelmällä materiaalin mekaaniset ominaisuudet pysyvät myös parempina. (Mishra & Ma 2005)

Tässä tutkielmassa perehdytään kirjallisuuskatsauksen muodossa kitkahitsaukseen ja jäännösjännityksiin. Työn tutkimuskysymyksiä ovat:

- Miten jäännösjännityksiä muodostuu FSW-menetelmässä?
- Mitkä tekijät ja parametrit vaikuttavat merkittävästi jäännösjännitysten muodostumiseen?
- Millä menetelmillä jäännösjännityksiä voidaan vähentää?

Tutkielmassa käsitellään ensin FSW-menetelmän toimintaperiaatetta sekä siinä muodostuvan liitoksen rakennetta. Lisäksi tarkastellaan prosessissa käytettäviä parametreja

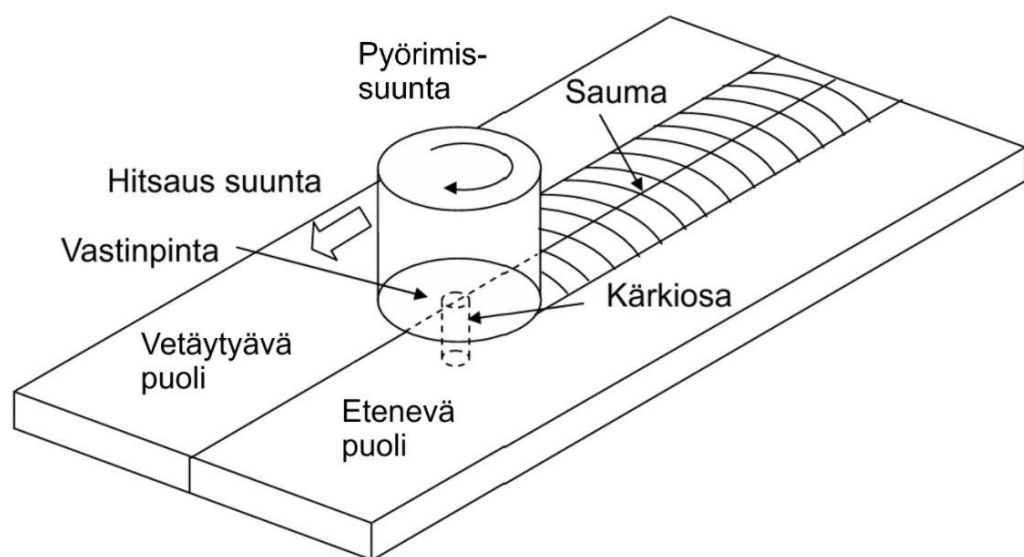
sekä niiden yleisimpiä arvoja. Seuraavaksi esitellään jäännösjännityksiä yleisesti sekä niiden muodostumista menetelmässä eri parametrien sekä muiden tekijöiden vaikutuksesta. Lopuksi käsitellään jäännösjännitysten vähentämiseen käytettäviä menetelmiä, jotka voidaan jakaa lämpökäsittelymenetelmiin sekä mekaanisiin menetelmiin.

2. KITKAHITSAUS LIITOSMENETELMÄNÄ

Hitsausliitoksen muodostaminen usein perustuu liitettävien materiaalin ja täyteaineen sulamiseen. FSW on kuitenkin hitsausmenetelmä, jossa materiaali pysyy kiinteässä olo- muodossa koko prosessin ajan. Menetelmä soveltuu erityisesti puskuliitoksille, T-liitok- sille ja päällekkäisliitoksille (Thomas 1998). Menetelmän etuna esimerkiksi alumiinin liit- tämisessä on, että se ei vaadi täyteainetta, jonka yhteensopivuus usein on ongelma alu- miinin sulahitsauksessa (Mishra & Ma 2005). Tässä luvussa esitellään FSW-menetel- män toimintaperiaate liitoksen muodostamisessa ja käsitellään prosessin parametreja. Lisäksi käsitellään liitoksen rakennetta ja sen muodostumista.

2.1 FSW-menetelmän toimintaperiaate

FSW-menetelmässä liitos muodostetaan käyttämällä pyörivää sylinterimäistä työkalua, jonka kuluminen prosessin aikana on hyvin vähäistä. Liitettävät kappaleet on kiinnitetty jäykästi toisiaan vasten sekä pysty- että vaakasuunnassa hitsausalustalle. Menetelmää on havainnollistettu kuvassa 1, jossa pyörivän työkalun kärkiosa ja vastinpinta (engl. shoulder) liikkuvat yhdensuuntaisesti liitettävien kappaleiden kosketuspintojen kanssa siten, että kärkiosa tunkeutuu kappaleiden sisälle ja vastinpinta painautuu kappaleiden pintaa vasten. Kärkiosa ei läpäise kappaleita täysin, mutta sen pituus on lähes yhtä suuri kuin levyjen paksuus. (Threadgill et al. 2009)



Kuva 1. Havainnollistus FSW-menetelmästä, muokattu lähteestä (Nandan et al. 2008, s. 4).

Kappaletta, jossa työkalun pyörimissuunta ja etenemissuunta ovat samansuuntaiset, kutsutaan eteneväksi puoleksi (engl. advancing side). Toisessa kappaleessa pyörimissuunta ja etenemissuunta ovat vastakkaiset, minkä vuoksi sitä kutsutaan vetäytyväksi puoleksi (engl. retreating side). (Peel et al. 2003) Etenemissuunnan ja pyörimissuunnan vaikutuksesta liitokseen muodostuu epäsymmetria keskilinjän suhteen, kun suurin osa plastisesti muuttuneesta materiaalista työntyy vetäytyvän puolen ohitse etenevälle puolelle (Threadgill et al. 2009).

Työkalun päätehtäviä on tuottaa materiaaliin paikallista lämpöä ja aiheuttaa prosessissa materiaalivirtausta. Prosessissa lämpöä muodostuu kitkan vaikutuksesta ja materiaalin plastisesta muodonmuutoksesta. Etenevä pyörivä työkalu kohdistetaan voimalla liitettäviin kappaleisiin, jolloin prosessissa muodostuu kitkaa. Materiaalin muodonmuutoksessa lämpöä muodostuu, kun työkalun kohdistama leikkausjännitys muokkaa materiaalia. (Nandan et al. 2008) Lämmön vaikutuksesta materiaali alkaa pehmenemään työkalun ympäristössä. Tällöin vetäytyvällä puolella oleva pehmentynyt materiaali sekoittuu muokkaamattoman materiaalin kanssa muodostaen liitoksen työkalun taakse sen edessä. (Threadgill et al. 2009)

Prosessissa materiaalivirtaus muodostuu pääasiassa työkalun kärkiosan vaikutuksesta ja osittain vastinpinnan pyörimisestä. Pyörimisen vaikutuksesta vastinpinnan ja kappaleen välillä oleva pintamateriaali plastisoituu ja alkaa liikkumaan pyörimisen mukana. Kärkiosan kierteen vaikutuksesta materiaali virtaa työkalun kärkeä kohti, jolloin kärkiosan ympärillä oleva materiaali työntyy kohti työkalun vastinpintaa. Vastinpinta estää liikkuvan materiaalin poistumisen liitoksesta. Etenemisliikkeen vaikutuksesta materiaalivirtaus pysyy jatkuvana. (Nandan et al. 2008)

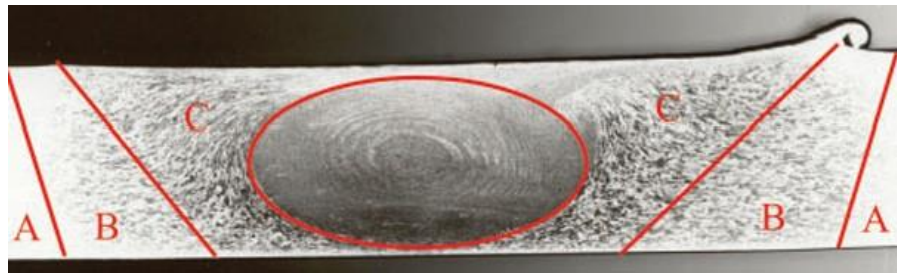
2.2 Liitoksen rakenne

Lämmön, plastisen muodonmuutoksen ja materiaalivirran vaikutuksesta liitokseen muodostuu alueita, jotka voidaan erotella mikrorakenteiden perusteella toisistaan. Muutosalueet ovat merkittäviä liitoksen mekaanisten ominaisuuksien kannalta. (Mishra & Ma 2005)

Kärkiosan ja kitkan vaikutuksesta liitoksen keskilinjalle muodostuu sekoitusalue (engl. stirred zone, SZ) sekä termomekaaninen alue (engl. thermo-mechanically affected zone, TMAZ). Lämmön ja kärkiosan tuottaman plastisten muodonmuutosten vaikutuksesta liitokseen keskilinjalle muodostuu sekoitusalue, jossa tapahtuu uudelleenkiteytymistä materiaalissa. Sekoitusalue ei ole symmetrinen liitoksen keskilinjän suhteen, vaan siitä voidaan havaita ellipsimäinen alue ja kappaleen pintaa kohti vetäytyvä alue. (Mishra & Ma

2005) Termomekaanisella alueella materiaaliin kohdistuu lämpöä ja plastista muodonmuutosta, joka on sekoitusalueeseen verrattuna vähäisempää. Tämän lisäksi alueen materiaalissa ei tapahdu uudelleenkiteytymistä. (Threadgill et al. 2009)

Termomekaanisen alueen ja perusmateriaalin (engl. base material, BM) välissä olevaan lämpövaikutteiseen alueeseen (engl. Heat affected zone, HAZ) kohdistuu pelkästään lämpövaikutusta, joka vaikuttaa materiaalin mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Liitoksen ulkopuolelle jäävään perusmateriaaliin ei kohdistu muutoksia prosessissa. (Threadgill et al. 2009) Liitoksen rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. FSW-liitoksessa sekoitusalueen ympärille muodostuvat alueet: (A) BM, (B) HAZ ja (C) TMAZ (Threadgill et al. 2009, s. 55).

2.3 Prosessin parametrit

Muihin hitsausmenetelmiin verrattuna FSW-menetelmässä lämpöä ei tuoteta ulkoisen lähteen avulla. Lämpö muodostuu kitkan vaikutuksesta, johon voidaan vaikuttaa hitsausparametrien avulla. Tällöin parametrit ovat merkittäviä prosessissa liitoksen muodostumisen kannalta. Lämpötila ei voi nousta liian korkealle materiaalin kiinteän olomuodon pysymisen vuoksi. Vastaavasti lämpötila ei voi jäädä liian matalaksi, jolloin materiaali ei pehmene riittävästi liitoksen muodostamiseksi.

Lämmöntuottamisen kannalta merkittävimpiä parametrejä prosessissa ovat pyörimisnopeus ja etenemisnopeus (Mishra & Ma 2005). Pyörimisnopeudella tarkoitetaan työkalun pyörimisnopeutta ja etenemisnopeudella tarkoitetaan saumansuuntaisen etenemisliikkeen nopeutta. Pyörimisnopeuden ollessa liian pieni, prosessissa ei muodostu plastisoituneen materiaalin virtausta, sillä kitkasta muodostuva lämpö ei ole riittävän suuri. Vastaavasti liian suurella pyörimisnopeudella liitettävät materiaalit sulavat. Etenemisnopeuden ollessa liian matala, prosessin lämpötila nousee liian korkealle pyörimisnopeuden vaikutuksesta, mikä aiheuttaa huonon liitoksen. Liian suurella etenemisnopeudella pyörimisnopeuden tuottama paikallinen lämpö ei ole riittävän suuri liitoksen muodosta-

miseksi. (Prasanna et al. 2013) Nopeuksien lisäksi aksiaalinen voima vaikuttaa muodostuvaan lämpöön. Aksiaalisella voimalla tarkoitetaan voimaa, jolla työkalu kohdistetaan liitettäviin kappaleisiin. Suuremman voiman vaikutuksesta myös kitka on suurempi, jolloin muodostuu enemmän lämpöä. (Nie et al. 2020). Liian suurella voimalla prosessissa muodostuva lämpö on liian suuri, jolloin liitokseen muodostuu epätasaisuutta, kuten purseita. Vastaavasti liian pienellä voimalla materiaali pääsee karkaamaan, jolloin liitokseen muodostuu tyhjiä alueita. (Prasanna et al. 2013)

Liitoksen laadun kannalta myös työkalun geometria on merkittävä parametri. Vastinpinta ja kärkiosan koko vaikuttavat lämmöntuottoon. Suurempi vastinpinta tuottaa enemmän lämpöä ja siten vaikuttaa liitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Se myös vaikuttaa lämpövaikutteisen alueen muodostumiseen. Pienemällä työkalulla lämpövaikutteinen alue muodostuu lähemmäs liitoksen keskiliinjaa ja vastaavasti suuremmalla kauemmas keskiliinjasta. (Prasanna et al. 2013)

Prosessissa työkalu ei usein ole kohtisuorassa kappaleisiin nähden, vaan sitä kallistetaan etenemissuuntaan. Kallistuskulman vaikutuksesta sekoittuva materiaali pysyy työkalun ja kappaleiden välissä, eikä se poistu liitoksesta. Lisäksi materiaali siirtyy paremmin työkalun etuosasta sen takaosaan. (Mishra & Ma 2005) Prosessin parametrien yleisimpiä arvoja on esitetty taulukossa 1. Arvojen vaihtelu johtuu pääasiassa käytettävästä materiaalista, materiaalin paksuudesta sekä muista parametreistä.

Taulukko 1. Prosessin parametrien yleisimpiä arvoja ((He et al. 2016; Jia et al. 2021; Nie et al. 2020; Peel et al. 2003)).

Parametri	Arvojen vaihteluväli
Pyörimisnopeus	500–1200 (rpm)
Etenemisnopeus	100–500 (mm/min)
Vastinpinnan halkaisija	12–18 (mm)
Aksiaalinen voima	220–35000 (N)
Työkalun kallistuskulma	0–2°

Kuten taulukosta huomataan, prosessissa käytettävissä parametreissa voi olla melko suurta vaihtelua, jonka vuoksi parametrien suhde toisiinsa voi olla haastava hahmottaa. Esimerkiksi Richter-Trummer et al. (2012) suorittivat hitsauksen 3,18 mm alumiinilevyille siten, että etenemisnopeutena he käyttivät 250 mm/min, pyörimisnopeutena 600 rpm, aksiaalisenä voimana 10 kN ja vastinpinnan halkaisijana 17 mm.

Prosessi on myös mahdollista toteuttaa erittäin korkeilla nopeuksilla, jolloin kyseessä on suurnopeushitsaus. Tällöin esimerkiksi pyörimisnopeus voi olla 5000 rpm ja etenemisnopeus 3000 mm/min tai mahdollisesti vielä korkeampia. Korkeimmilla nopeuksilla voidaan saavuttaa tehokkaampaa tuotantoa. (Jia et al. 2021)

Työkalun nopeuksien ja voimien takia liitettävien kappaleiden kiinnitys on oleellinen tekijä prosessissa, sillä onnistuneen liitoksen saavuttamiseksi niiden tulee pysyä paikallaan prosessin aikana. Kappaleet voidaan kiinnittää sekä pysty- että vaakasuunnassa siten, että ne eivät pääse liikkumaan prosessin aikana. (Richter-Trummer et al. 2012). Kiinnityksen avulla kappaleisiin voidaan myös kohdistaa vetojännitystä joko ennen hitsausta tai hitsauksen aikana. Vetojännitys voidaan kohdistaa koko kappaleeseen tai sen tiettyyn alueeseen prosessin eri vaiheissa. (Altenkirch et al. 2008)

3. JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET HITS AUSLIITOKSISSA

FSW-menetelmällä voidaan saavuttaa laadukkaita liitoksia kappaleiden pienillä vääristymillä. Kappaleisiin kuitenkin muodostuu prosessin vaikutuksesta jännitystiloja, joita kutsutaan jäännösjännityksiksi. Jäännösjännitykset voivat vaikuttaa merkittävästi kappaleen käyttöikään ja mekaanisiin ominaisuuksiin. (Staron et al. 2004) Sen vuoksi jäännösjännitysten muodostumisen ymmärtäminen prosessissa on tärkeää. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin jäännösjännityksiä, niiden esiintymistä liitoksessa sekä eri tekijöiden vaikutuksia jäännösjännityksiin.

3.1 Jäännösjännitykset yleisesti

Usein kappaleissa vallitsevia jännitystiloja tarkastellaan, kun siihen kohdistuu ulkoista kuormitusta, esimerkiksi toisen kappaleen painon vaikutuksesta. Tämän lisäksi kappaleessa saattaa ilmetä jännitystä, vaikka ulkoinen kuormitus poistettaisiin. Kyseiset jännitykset ovat jäännösjännityksiä, ja ne voivat vaikuttaa kappaleessa väliaikaisesti tai pysyvästi. Jäännösjännitykset ovat tasapainossa olevia moniaksaalisia jännitystiloja, kun kappaleeseen ei kohdistu ulkoista voimaa tai momenttia. (Radaj 1992, s. 5) Materiaaliin muodostuu jäännösjännitystä, kun siihen kohdistuu epähomogeenistä plastista muodonmuutosta mekaanisen työstön, lämmön tai faasimuutoksen seurauksena (Radaj 1992, s. 6).

Kappaleessa jäännösjännityksiä esiintyy mikro- ja makrotasolla. Makrotason jäännösjännitykset ovat homogeenisiä kappaleen kiderakenteessa, eli jännitykset ovat tasapainossa sekä niiden suuruus ja suunta pysyvät muuttumattomina. Mikrotasolla ilmenevät jäännösjännitykset ovat lähes homogeenisiä materiaalin kideatasolla ja epähomogeenisenä atomitasolla. Materiaalin mekaanisten ominaisuuksien kannalta makrotason jäännösjännitykset ovat merkitsevämpiä. (Radaj 1992, s. 5–6)

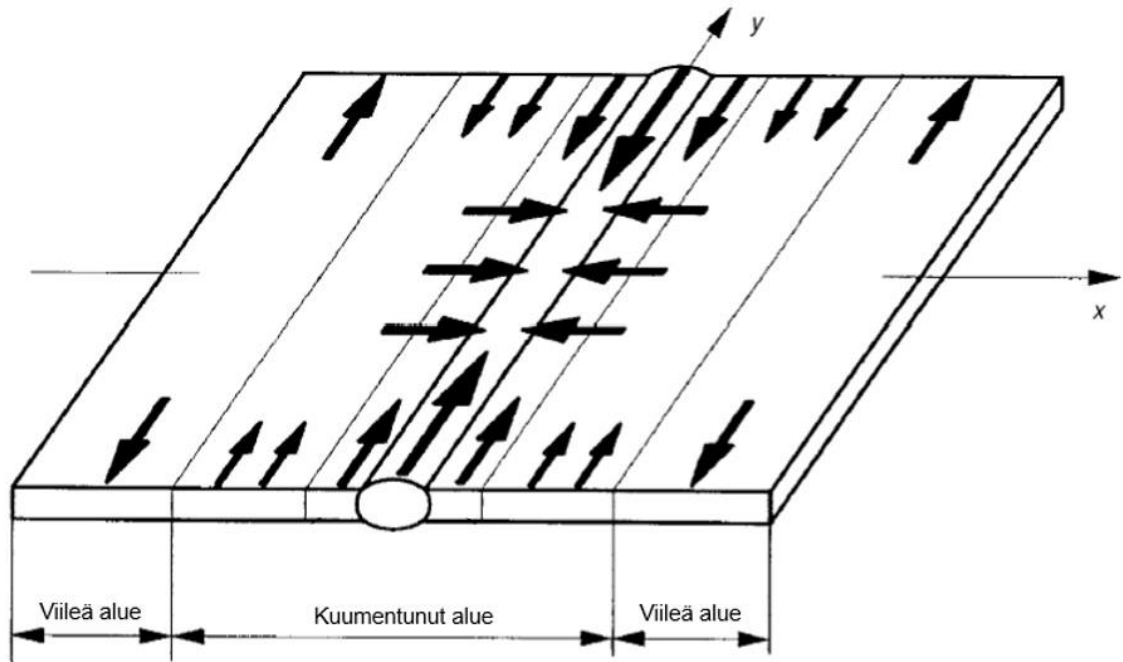
Jäännösjännitykset voivat olla luonteeltaan joko puristavia tai vetäviä. Materiaalin ominaisuuksien kannalta vetojännitys on haitallista, koska se aiheuttaa materiaaliin vetoa, joka heikentää materiaalin mekaanisia ominaisuuksia, kuten väsymiskestävyyttä. Puristusjännitys taas on liitoksen kannalta suotuisaa, koska se aiheuttaa materiaaliin puristusta, ja siten parantaa kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. (Mishra & Ma 2005) Vetojännitystä merkitään positiivisena arvona ja puristusjännitystä negatiivisena arvona.

3.2 Muodostuminen ja esiintyminen liitoksessa

FSW-menetelmässä muodostuu jäännösjännityksiä pääasiassa kitkan tuottaman lämmön vaikutuksesta. Liitokseen muodostuu lämpöjännityksiä, jotka aiheuttavat jäännösjännityksiä sekä muutoksia materiaalin ominaisuuksissa. FSW-menetelmässä jäännösjännitysten uskotaan pysyvän matalina, koska lämmöntuotto on suhteellisen pientä verrattuna muihin hitsausmenetelmiin, kuten sulahitsaukseen. Kuitenkin menetelmässä lämmöntuotto on epätasaista ja liitettävät kappaleet kiinnitetään erittäin jäykästi. Tämän seurauksena liitoksissa esiintyvät jäännösjännitykset voivat olla melko suuria, koska materiaali ei pääse vapaasti laajenemaan. (Mishra & Ma 2005)

Prosessin alussa materiaaliin muodostuu puristavaa jännitystä työkalun vaikutuksesta. Materiaalin lämpenemisen ja laajenemisen takia puristava jännitys kuitenkin vaihtuu vetäväksi. (Zhao et al. 2014) Liitoksen muodostuu vetävää jäännösjännitystä, kun plastinen muodonmuutos jää pysyväksi ja liitoksen lämpötila alkaa laskemaan liian nopeasti, epätasaisesti tai lämpötila-alue on pieni suhteessa ympärillä olevaan viileämpään alueeseen. Liitoksen ympärillä olevaan materiaaliin muodostuu puristusjännitystä, koska materiaalin lämpötila pysyy suhteellisen matalana liitoksen lämpötilaan verrattuna. (Radaj 1992, s. 8).

Liitokseen muodostuu sekä saumaan nähden pituussuuntaisia, että saumaa vasten kohtisuoria jäännösjännityksiä. Koska jäännösjännitykset ovat moniaksaalisia, niitä esiintyy myös liitettävien materiaalien ainepaksuuden suunnassa. Pituus- ja poikittaissuuntaisiin jäännösjännityksiin verrattuna niiden merkitys on vähäinen. (Feng et al. 2007) Pituussuuntaisia jännityksiä muodostuu pituussuuntaisen kutistumisen seurauksena liitoksen jäähtyessä. (Radaj 1992, s. 200) Vastaavasti poikittaissuuntaisia jännityksiä muodostuu liitoksen poikittaissuuntaisessa kutistumisessa jäähtymisen seurauksena sekä osittain pituussuuntaisesta kutistumisesta. (Radaj 1992, s. 204) Jäähtymisestä johtuva materiaalin kutistuminen aiheuttaa siis pääasiassa jäännösjännityksiä kappaleeseen. Kutistumista on havainnollistettu kuvassa 3.



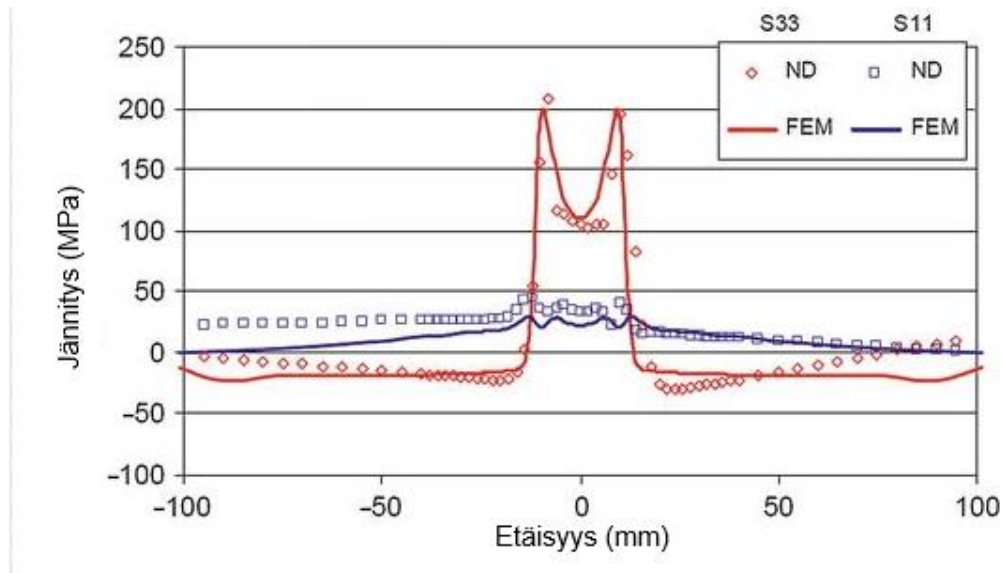
Kuva 3. Materiaalin kutistuminen jäähtymisen seurauksena liitoksen ympäristössä, muokattu lähteestä (Totten et al. 2002, s. 391).

Menetelmässä tapahtuu myös mekaanista työstöä työkalun kärkiosan vaikutuksesta. Tällöin muodostuu myös mekaanisia jäännösjännityksiä. Mekaaniset jäännösjännitykset vaikuttavat erityisesti jännitysjakaman symmetrisyyteen liitoksessa (He et al. 2016).

Etenevällä puolella työkalun kärkiosa aiheuttaa vetävää jäännösjännitystä liitokseen, koska kärkiosa venyttää termomekaanisella alueella olevaa materiaalia. Vastaavasti vetäytyvällä puolella kärkiosa puristaa termomekaanisella alueella olevaa materiaalia, jolloin muodostuu puristavaa jäännösjännitystä. Tämän seurauksena lämpövaikutteiseen alueeseen muodostuva vetävän pituussuuntaisen jännityksen maksimiarvo ei ole symmetrinen liitoksen suhteen. Kärkiosan venytyksen vaikutuksesta etenevälle puolelle muodostuva pituussuuntaisen jäännösjännityksen maksimiarvo on suurempi kuin vetäytyvän puolen maksimiarvo. Vastaavasti vetäytyvälle puolelle muodostuva mekaaninen puristusjännitys laskee lämmöstä muodostuvaa vetävää jännitystä. (He et al. 2016)

Liitoksessa pituussuuntaiset jännitykset ovat poikittaissuuntaisiin jännityksiin verrattuna huomattavasti suurempia. Erityisesti pituussuuntaisen jäännösjännityksen vetojännitys on merkittävää, koska se esiintyy puristavaan jäännösjännitykseen verrattuna huomattavasti suurempana. Vetojännitystä ilmenee liitosalueen lisäksi sen reunalla muokkamattomassa materiaalissa, jossa se vaihtuu puristavaksi, kun tarkastellaan kappaleita

riittävältä etäisyydeltä liitoksesta. (Feng et al. 2007) Suurin vetojännitys ilmenee liitoksessa lämpövaikutteisella alueella, usein työkalun ulkoreunan läheisyydessä. Termomekaanisella alueella ja sekoitusalueella jäännösjännitykset ovat lämpövaikutteiseen alueeseen verrattuna pienempiä, mutta luonteeltaan vetäviä. (Threadgill et al. 2009) Tyypillistä jännitysjakamaa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Tyypillinen FSW-menetelmässä muodostuva jäännösjännitysjakama, jossa pituussuuntaiset jännitykset ovat punaisella ja poikittaissuuntaiset sinisellä, muokattu lähteestä (Feng et al. 2007).

Kuvassa 4 on sekä kokeellisesti määritetty jäännösjännitysjakama, että mallintamalla muodostettu jäännösjännitysjakama. Kokeellisesti määritetty jakauma on havainnollistettu pistemäisillä merkeillä, kun mallintamalla määritetty jakauma on jatkuva käyrä.

Kuvan 4 jännitysjakamasta huomataan, että jäännösjännitykset ovat selkeästi luonteeltaan vetäviä, mutta vaihtuvat melko nopeasti puristaviksi, kun siirrytään kauemmaksi liitoksen keskikohdasta. Jäännösjännitysten suuruus myös muuttuu maksimikohdan ympäristössä nopeasti. Poikittaissuuntaiset jäännösjännitykset ovat pienempiä suhteessa pituussuuntaisiin. Niiden suuruuden muutos on myös tasaisempaa pituussuuntaisiin verrattuna. Lisäksi kokeellisesti määritetystä jakaumasta huomaa, että jäännösjännityksen maksimiarvo on hieman suurempi toisella puolella.

Prosessin aikana työkalun eteen muodostuu puristavaa jännitystä materiaalin lämpölaajenemisen vuoksi. Materiaaliin kohdistuu plastista muodonmuutosta, kun puristava myötöraja ylittyy. Työkalun jälkeen materiaaliin muodostuu pituussuuntaisia jännityksiä jäähdytymisen seurauksena. Vetävän jäännösjännityksen kehittyminen rajoittuu kuitenkin matalan myötölujuuden vaikutuksesta. Tällöin liitoksen keskilinjalle muodostuu paikallista

plastista muodonmuutosta, jolloin keskilinjalla jäännösjännitys jää pienemmäksi lämpövaikutteiseen alueeseen verrattuna. (Richards et al. 2008)

3.3 Jäännösjännityksiin vaikuttavat parametrit ja tekijät

FSW-menetelmässä säädettäviä parametrejä on runsaasti ja niiden arvoissa voi olla suurta vaihtelua. Koska parametrit vaikuttavat lämmöntuottoon prosessissa, ne myös vaikuttavat liitokseen muodostuviin jäännösjännityksiä. Jäännösjännitysten muodostumiseen vaikuttaa parametrien lisäksi muita tekijöitä, kuten kappaleiden kiinnitys ja jäähtyminen. Tässä luvussa tarkastellaan jäännösjännitysten kannalta merkittävien parametrien ja tekijöiden vaikutusta niiden muodostumiseen alumiinissa hyödyntämällä aiempien tutkimusten tuloksia. Jäännösjännityksistä käsitellään pääasiassa pituussuuntaisia jännityksiä, koska ne ovat poikittaisiin jännityksiin verrattuna merkitsevempiä.

3.3.1 Etenemis- ja pyörimisnopeuden vaikutus

Feng et al. (2007) tutkivat etenemisnopeuden vaikutusta jäännösjännitysten muodostumiseen. Etenemisnopeuksina käytettiin 280 ja 787 mm/min ja muut merkitsevät parametrit pysyivät vakioina. Nopeuden kasvattamisen seurauksena liitoksen jäännösjännitykset kasvoivat 24 % lämpövaikutteisella alueella, missä jännitykset ovat suurimmillaan. Lisäksi nopeuden kasvattaminen kaventaa jäännösjännityksen maksimikohtia. Maksimikohtat siirtyvät lähemmäksi liitoksen keskilinjaa, jolloin myös jäännösjännitykset vaihtuvat puristaviksi lähempänä liitosta. Myös sekoitusalueella ja termomekaanisella alueella jäännösjännitykset nousevat, kuitenkin vähemmän maksimiarvoihin verrattuna.

Suuremman etenemisnopeuden vaikutuksesta prosessissa muodostuva lämpö ehtii vaikuttamaan paikallisesti perusmateriaalissa vain liitoksen lähellä, jolloin lämpövaikutteinen alue jää lähemmäksi liitosta. Kun kappaleet alkavat jäähtymään, lämpövaikutteisen alueen ja liitoksen ulkopuolelle jäävän perusmateriaalin lämpötilaero on suurempi, jolloin jäähtymisessä muodostuvat pituussuuntaiset jäännösjännitykset ovat suurempia ja ne esiintyvät kapeammalla alueella. Vastaavasti pienemmällä etenemisnopeudella lämpövaikutteisen alueen ja perusmateriaalin lämpötilaero on pienempi, jolloin pituussuuntaiset jäännösjännitykset pysyvät pienimpinä. (Farajkhah & Liu 2017)

He et al. (2016) tutkivat pyörimisnopeuden vaikutusta jäännösjännitysten muodostumiseen. Tutkimuksessaan he käyttivät pyörimisnopeuksina 500, 700 ja 900 rpm. Pyörimisnopeuden kasvattamisen vaikutuksesta pituussuuntaiset jäännösjännitykset kasvoivat 16 %. Suuremmalla pyörimisnopeudella prosessissa muodostuu enemmän lämpöä ja siten materiaalin jäännösjännitykset nousevat. Nopeuden kasvattamisen vaikutuksesta myös kärkiosan kohdistama voima ennen materiaalin pehmenemistä kasvaa, jolloin

myös mekaanisesti muodostuvat jäännösjännitykset kasvavat. Jäännösjännitysten nousu pyörimisnopeuden kasvattamisen vaikutuksesta on kuitenkin vähäisempää suhteessa etenemisnopeuden kasvattamiseen.

3.3.2 Aksiaalisen voiman vaikutus

Nie et al. (2020) tutkivat aksiaalisen voiman vaikutusta jäännösjännitysten suuruuteen. Tutkimuksessa he käyttivät 15, 25 ja 35 kN suurista voimaa. Voiman kasvattamisen seurauksena pituussuuntaisen jäännösjännityksen maksimiarvo kasvoi noin 33 %.

Aksiaalisen voiman kasvattamisen seurauksena vetävien pituussuuntaisten jäännösjännitysten maksimiarvo kasvaa. Jäännösjännitys jakauma pysyy maksimikohtia lukuun ottamatta lähes samanlaisena. Vastinpinnan, kärkiosan ja materiaalin välinen kitka kasvaa suuremman voiman vaikutuksesta. Tällöin lämpöä muodostuu enemmän ja materiaalissa tapahtuu enemmän plastista muodonmuutosta, jolloin jäännösjännitykset kasvavat. Tutkimus toteutettiin simuloimalla prosessia. Jäännösjännitysten tarkka simulointi on kuitenkin haastavaa prosessin kaikki tekijät huomioiden. (Nie et al. 2020) Simuloinnissa käytetyt voimat ovat kuitenkin todella korkeita. Aiemmissä tutkimuksissa käytetyt aksiaaliset voimat olivat huomattavasti pienempiä kuin 25 kN ja 35 kN.

3.3.3 Kappaleiden kiinnityksen vaikutus

Kiinnityksessä käytettävä voima voi vaihdella merkittävästi prosessissa ja siten vaikuttaa jäännösjännityksiin. Jäykemmän kiinnityksen seurauksena liitoksen vetävät pituussuuntaiset jäännösjännitykset kasvavat. Vastaavasti pienemmällä kiinnitysvoimalla jäännösjännitykset ovat matalampia. Erot johtuvat pääasiassa siitä, että lämmitessään materiaalit laajenevat, jonka kiinnitys estää aiheuttaen jäännösjännityksiä. Lisäksi Kiinnitys vaikuttaa jäännösjännitysten jakaumaan liitoksessa. Jäykemmällä kiinnityksellä korkeita jäännösjännityksiä ilmenee myös koko liitoksen ainepaksuudella. Kevyellä kiinnityksellä korkeat jännitykset muodostuvat pääasiassa kappaleiden pintaan ja liitoksen sisällä jännitykset jäivät pienemmiksi. Epätasainen jännitys jakauma kappaleiden paksuudessa muodostuu, kun kappaleet pääsevät laajenemaan vapaammin. (Richter-Trummer et al. 2012)

Vaikka kiinnitysvoimalla voidaan pienentää liitoksen jäännösjännityksiä, tämä toimenpide saattaa kuitenkin johtaa kappaleiden muodonmuutokseen, kun kappaleet pääsevät liikkumaan vapaammin. Kiinnitysvoimaa valittaessa onkin pyrittävä löytämään tasapaino jäännösjännitysten ja epämuodostumisen välille. Tämä voi aiheuttaa haasteita tilanteissa, jossa kappaleelle asetetut muototoleranssit ovat tarkat ja jäännösjännitykset pitää pysyä matalina.

Voiman lisäksi kiinnityksessä vaikuttaa pinta-ala, joka kappaleesta on käytetty kiinnitykseen. Farajkhah & Liu (2017) tutkivat sekä kiinnitysalueen suuruuden, että kiinnityksen vapauttamisen vaikutusta jäännösjännityksiin eri etenemisnopeuksilla. Kappaleet kiinnitettiin kokonaan saumansuuntaiselta pituudelta, ja analysointi suoritettiin muuttamalla kiinnityksen etäisyyttä liitoksesta.

Kiinnitykseen käytetty pinta-ala vaikuttaa jäännösjännitysten purkautumiseen liitoksen ollessa jäähtynyt huoneenlämpötilaan. Kiinnityksen ollessa lähellä liitosta, vapauttamisen jälkeen jäännösjännitykset laskevat enemmän kuin tilanteessa, jossa kiinnitys on kauempana liitoksesta, eli kiinnitykseen käytetty pinta-ala kappaleesta on pienempi. Suurimmillaan jäännösjännitykset laskivat 36 % liitoksessa, kun liitoksen ja kiinnityksen välinen etäisyys oli 50 mm. Pienimmillään jäännösjännitykset laskivat 10 % etäisyyden ollessa 125 mm. Kiinnityksen ollessa lähempänä liitosta, liitettävät kappaleet eivät pääse vääristymään prosessin aikana. Tällöin kappaleiden kiinnitettyihin alueisiin varastoituu jännitystä, joka vapautuu kiinnityksen poiston yhteydessä. (Farajkhah & Liu 2017)

Kiinnitysalan kasvaessa muodonmuutosten tapahtuminen estyy laajemmalla alueella kappaleissa. Tällöin jäännösjännitysten väheneminen on pientä ennen kiinnityksen vapauttamista, mutta suurta kiinnityksen vapauttamisen jälkeen. Suuremmalla kiinnitysalalla lopulliset jäännösjännitykset ovat matalampia pienempään kiinnitysalaa verrattuna johtuen suuremmasta jäännösjännitysten vapautumisesta, kun kiinnitys poistetaan. Kiinnitysalaa ei kuitenkaan vaikuta prosessissa muodostuviin puristaviin jäännösjännityksiin, eikä vetävän jäännösjännitysjakauman leveyteen. (Farajkhah & Liu 2017)

Etenemisnopeuden vaikutus jäännösjännityksiin riippuu myös kiinnitysalasta. Pienemällä kiinnitysalalla etenemisnopeuden kasvattaminen ei vaikuta jäännösjännityksiin merkittävästi. Suuremmalla kiinnitysalalla vetävät saumansuuntaiset jäännösjännitykset kuitenkin kasvavat merkittävästi etenemisnopeuden kasvaessa. Myös maksimikohdat siirtyvät lähemmäksi liitoksen keskilinjaa. (Farajkhah & Liu, 2017)

Kiinnityksen ollessa toteutettu vain kappaleiden päätyihin, niihin voidaan kohdistaa vetävää esijännitystä. Esijännityksellä voidaan vaikuttaa merkittävästi jäännösjännitysten muodostumiseen. Esijännityksen vaikutuksesta liitokseen voidaan muodostaa pituus-suunnassa vetävien jäännösjännitysten sijaan korkeita puristavia jäännösjännityksiä. Myös poikittaiset jäännösjännitykset voidaan muuttaa puristaviksi. Tällöin esijännityksen avulla liitoksesta voidaan välttää vetävät jäännösjännitykset kokonaan. Esijännityksen vaikutuksesta suurin puristava jäännösjännitys muodostuu liitoksen keskelle lämpövaikutteisen alueen sijasta. (Staron et al. 2004).

Tutkimuksessa Staron et al. (2004) vertailivat esijännittämättömän ja esijännitettyjen alumiinilevyjen hitsauksessa muodostuvia jäännösjännityksiä. Ilman esijännitystä saumansuuntainen jäännösjännitys oli suurimmillaan 130 MPa. Kappaleisiin kohdistettu vetävä esijännitys, joka oli 70 % materiaalin myötölujuudesta, aiheutti liitokseen suurimmillaan -150 MPa jäännösjännityksen sekoitusalueelle. Materiaalista ja hitsausprosessista riippuen, liitokseen voidaan saavuttaa jäännösjännityksetön tila, kun esijännitys on 40–50 % prosessin materiaalin myötölujuudesta (Richards et al. 2008).

Vetävän esijännityksen vaikutuksesta prosessin aikana materiaalissa tapahtuu enemmän vetojännityksestä tapahtuvaa muodonmuutosta kuumetuneilla alueilla ja työkalun aiheuttama puristava muodonmuutos vähenee. Ilman esijännitystä työkalu aiheuttaa prosessissa puristavaa plastista muodonmuutosta, joka jäähtymisen alettua kehittyy vetäväksi. Vetävän esijännityksen vaikutuksesta puristava muodonmuutos vähenee prosessissa. Korkeimmilla esijännityksillä muodostuva puristava jännitys on hyvin vähäistä tai sitä ei muodostu ollenkaan. Tällöin pehmenneillä kuumilla alueilla tapahtuu pelkästään vetävää plastista muodonmuutosta ja kappaleet ovat ylijännittyneessä tilassa, minkä seurauksena esijännityksen poistaminen alentaa vetäviä jäännösjännityksiä tai aiheuttaa liitokseen puristavia jäännösjännityksiä. (Richards et al. 2008)

Esijännityksen aiheuttamaa jäännösjännitysten pienenemistä voidaan pitää likimain lineaarisena. Vetävien jäännösjännitysten pienentyessä esijännityksen vaikutuksesta, jännitysalue levenee hieman liitoksessa. (Altenkirch et al. 2008) Jäännösjännitysten muodostumisen tutkimukset tyypillisesti suoritetaan yksinkertaisilla kappaleilla, kuten suorakulmaisilla levyillä. Teollisuudessa liitettävät kappaleet ovat kuitenkin usein muodoiltaan kompleksisia, joissa hitsaus suoritetaan tietyn suunnan sijaan tasoliikkeenä. Tällöin vetojännityksen kohdistaminen hitsauksen aikana voi olla haastavaa tai kiinnitystä ei välttämättä ole mahdollista suorittaa siten, että se peittäisi suuren alan suhteessa liitettäviin kappaleisiin. Tällöin kiinnitys joudutaan toteuttamaan kappaleiden ehdoilla.

3.3.4 Jäähdytyksen vaikutus

FSW-menetelmän etuna on myös se, että se voidaan suorittaa nesteessä suhteellisen yksinkertaisesti. Ilmaan verrattuna prosessin suorittaminen esimerkiksi vedessä vaikuttaa merkittävästi materiaaliin muodostuvan lämmön suuruuteen ja siten jäännösjännitysten suuruuteen. Ilmajäähdytyksessä materiaalin lämpötila nousee huomattavasti korkeammalle ja jäähtyminen on hitaampaa vesijäähdytykseen verrattuna. (Papahn et al. 2016) Vesijäähdytyksellä voidaan myös saavuttaa puristavampaa jäännösjännitystä liitokseen. (Zhao et al. 2014)

Papahn et al. (2016) tutkivat jäähdytyksen vaikutusta jäännösjännityksiin eri pyörimis- ja etenemisnopeuksilla. Jäähdytyksen merkitys korostuu korkeammilla etenemisnopeuksilla, jolloin lämpöä muodostuu enemmän. Vesijäähdytyksen vaikutuksesta pituussuuntaiset jännitykset pienenevät enimmillään 18 % liitoksen sekoitusalueella. Poikittaissuuntaisiin jännityksiin jäähdytyksellä on kuitenkin merkittävämpi vaikutus erityisesti lämpövaikutteisella alueella, missä puristavat jäännösjännitykset pienenevät 30 %. Jäähdytyksen vaikutuksessa korostuu, että lämmöllä on suurempi vaikutus jäännösjännitysten muodostumiseen mekaaniseen työstöön verrattuna.

Vesijäähdytys ei vaikuta jäännösjännitysjakautumiseen liitoksessa. Etenevällä puolella vetävät pituussuuntaiset jäännösjännitykset ovat hieman suurempia vetäytyvään puoleen verrattuna. Lisäksi pituussuuntaisten jännitysten suuruus suhteessa poikittaisiin jännityksiin pysyy likimain nelinkertaisena. (Papahn et al. 2016) Veden alla materiaaliin kohdistuva lämpö on vähäisempää ja sen vaikutus on lyhyempi. Työkalun puristuksen vaikutuksesta liitokseen tulee puristavia jännityksiä, jotka kuitenkin muuttuvat nopeasti vetäviksi jännityksiksi, kun materiaalin lämpötila on noussut riittävästi, ja se on laajentunut. Tällöin vesijäähdytyksellä voidaan saavuttaa liitokseen vetävien jäännösjännitysten sijasta puristavia jännityksiä, mikäli jäähdytys on riittävän tehokasta. (Zhao et al. 2014)

4. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN VÄHENTÄMINEN

Toisinaan prosessin parametreilla ja muilla tekijöillä ei pystytä vaikuttamaan muodostuviin jäännösjännityksiin, jolloin valmiin liitoksen jäännösjännityksiä täytyy vähentää muilla keinoilla. Jäännösjännitysten vähenemiseksi materiaalissa täytyy tapahtua plastista muodonmuutosta tai uudelleenkiteytymistä (Lados et al. 2010). Tässä luvussa esitellään menetelmiä, joiden avulla jäännösjännityksiä voidaan vähentää valmiissa liitoksessa. Menetelmät voidaan jakaa lämpökäsittelymenetelmiin ja mekaanisiin menetelmiin.

4.1 Lämpökäsittelymenetelmät

Materiaalin jäännösjännityksiä voidaan vähentää kuumentamalla se lämpötilaan, jolloin materiaalissa tapahtuu plastista muodonmuutosta tai uudelleenkiteytymistä (Lados et al. 2010). Menetelmää kutsutaan myös hehkutukseksi. Lämpötilan nousun vaikutuksesta vetäviä jäännösjännityksiä omaavat alueet venyvät ja uudelleenkiteytyvät. Lisäksi jäähtymisen aikana jännitysten väheneminen ilmenee virumisena. (Radaj 1992, s. 273) Virumisella tarkoitetaan materiaalin pysyvää muodonmuutosta, joka riippuu ajasta ja materiaalin lämpötilasta. Materiaaliin kohdistuvan lämpötilan muutoksen täytyy olla hallittua ja riittävän hidasta, jotta materiaaliin ei muodostu liian suuria lämpötilaeroja. Materiaalin kuumentamista voidaan toteuttaa hehkutusuunissa, jossa koko kappaletta lämmitetään.

Hehkutus ei kuitenkaan vähennä jäännösjännityksiä merkittävästi kaikilla metalleilla, esimerkiksi joillain alumiiniseoksilla. Tällöin jäännösjännityksiä voidaan vähentää UQ-menetelmällä (engl. Uphill Quenching), jossa kappaleisiin kohdistetaan nopeasti lämpötilanmuutoksia matalasta korkeaan lämpötilaan. Kappaleiden jäännösjännitykset laskevat, kun nopeiden lämpötilanmuutosten vaikutuksesta materiaaliin muodostuu luonteeltaan sellaisia jäännösjännityksiä plastisen muodonmuutoksen vaikutuksesta, jotka tasapainottavat alkuperäisiä jäännösjännityksiä. (Lados et al. 2010)

UH-menetelmässä kappaleet lämmitetään ensin hehkutuksen tapaan korkeaan lämpötilaan. Tämän jälkeen kappaleet asetetaan välittömästi jäähtymään veteen, jonka lämpötila on lähellä kiehumispistettä. Kuumasta vedestä kappaleet siirretään jäähtymään nestemäiseen tyypeen, jossa kappaleiden lämpötilat laskevat erittäin matalaksi. Jäähtymisen jälkeen kappaleet siirretään takaisin kiehuvaan veteen kuumentumaan, jonka jälkeen ne asetetaan huoneenlämpöön jäähtymään. (Lados et al. 2010)

Jotta jäännösjännitykset vähenisivät mahdollisimman paljon menetelmässä, lämpötilan muutosnopeus täytyy olla mahdollisimman suuri. Nestemäisen tyyden avulla lämpötila

saadaan mahdollisimman alas ja siten lämpötilan lyhytaikainen muutos suureksi. Kappaleissa olevat jäännösjännitykset voivat kuitenkin kasvaa, mikäli kappaleet siirretään kiehuvaan vedestä nestemäiseen tyypeen liian nopeasti. Tämän vuoksi kappaleita voidaan jäähdyttää hetken huoneenlämpötilassa ennen siirtoa nestemäiseen tyypeen. (Lados et al. 2010)

Jäännösjännitysten vähennyksessä voidaan hyödyntää myös lämmön vaikutusta siten, että kappaleen lämpötila ei nouse merkittävästi. Kappaleen pintoja lämmitetään liitoksen kummaltakin puolelta liikkuvan lämmönlähteen, kuten kaasupolttimen avulla. Välittömästi lämmityksen jälkeen kuumentunutta materiaalia jäähdytetään vesisuihkutuksen avulla. Tällöin materiaaliin muodostuu rajoitetusti lämmentuneita, ja sen myötä lämpölaajentuneita alueita. Tämän vaikutuksesta liitokseen kohdistuu pituussuunnassa vetojännitystä. Liitoksen jäännösjännitykset laskevat, kun myötöraja ylittyy kasvaneen vetojännityksen seurauksena. (Radaj 1992, s. 304)

4.2 Mekaaniset menetelmät

Sen lisäksi, että hehkutus ei vähennä jäännösjännityksiä merkittävästi kaikilla metalleilla, lämpökäsittelymenetelmissä usein haasteiksi nousee menetelmien energian- ja ajan tarve. Kappaleiden hidas lämmittäminen ja lämmön ylläpito vaativat runsaasti energiaa sekä hitaan jäähtymisen lisäksi paljon aikaa. (Kwofie 2009) Tällöin jäännösjännityksiä voidaan vähentää mekaanisilla menetelmillä, jotka ovat nopeampia ja tarvitsevat vähemmän energiaa lämpökäsittelymenetelmiin verrattuna.

Kappaleiden ollessa muodoiltaan yksinkertaisia, jäännösjännityksiä voidaan vähentää mekaanisilla menetelmillä. Jäännösjännitysten vähentäminen mekaanisten menetelmien avulla perustuu siihen, että materiaaliin aiheutetaan plastista muodonmuutosta. Muodonmuutosta voidaan aiheuttaa ilman lämmitystä tai lämmityksen avulla. (Lados et al. 2010) Menetelmissä materiaaliin kohdistetaan kuormitusta, jonka vaikutuksesta materiaaliin muodostuu jännitystiloja, joissa myötöraja ylitetään, kun huomioidaan jäännösjännitykset. Ilman jäännösjännityksiä kuormitus ei olisi riittävän suuri myötörajan ylittämiseksi. Kohdissa, joissa myötöraja ylitetään, materiaaliin kohdistuu sekä elastista, että plastista muodonmuutosta, joiden vaikutuksesta jäännösjännitykset laskevat. Kuormituksen vaikutuksesta jäännösjännitykset saattavat myös nousta. (Radaj 1992, s. 292)

Plastinen muodonmuutos voidaan aiheuttaa kohdistamalla kappaleisiin puristusta. Jäännösjännityksiä voidaan vähentää mekaanisesti vasaroinnilla tai valssauksella. Vasaroinnissa liitokseen kohdistetaan iskuja hitsauksen suuntaisesti, jolloin materiaaliin kohdistuva plastinen muodonmuutos laskee jäännösjännityksiä. Vasarointi voi kuitenkin olla

haastavaa ohuille kappaleille, jolloin jäännösjännityksiä voidaan vähentää valssaamalla. Menetelmässä valssaus suoritetaan kapeilla rullilla liitoksen suuntaisesti ensin liitoksen kohdalta. Tämän jälkeen valssaus suoritetaan liitoksen vieressä olevaan lämpövaikutteeseen alueeseen. Valssauksen seurauksena liitoksen pituussuuntaiset jäännösjännitykset laskevat plastisen muodonmuutoksen seurauksena. (Radaj 1992, s. 307)

Kappaleisiin voidaan myös kohdistaa värähtelyä jäännösjännitysten laskemiseksi. Värähtelyn vaikutuksesta materiaaliin kohdistuu mikrotasolla vähäistä plastista muodonmuutosta. Toistuvan värähtelyn seurauksena materiaalissa alkaa tapahtumaan virumista, jonka myötä jäännösjännitykset laskevat. Värähtelyn tapahtuessa kappaleen ominaistuuksilla, jäännösjännitysten väheneminen on tehokkainta. (Kwofie 2009)

Värähtelyssä jäännösjännitysten purkautumista tapahtuu, kunnes jännityksen ja sitä vastaavan venymän suhde pysyy muuttumattomana (Kwofie 2009). Tämän vuoksi jäännösjännitysten väheneminen on suurimmillaan värähtelyn alussa, kunnes sen vaikutus puutoa merkittävästi lyhyen ajan kuluttua (Radaj 1992, s. 307)

5. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa perehdyttiin kirjallisuuskatsauksen muodossa FSW-menetelmän toimintaperiaatteeseen hitsausliitoksen muodostamisessa sekä erityisesti prosessissa muodostuviin jäännösjännityksiin. Tavoitteena oli selvittää, miten jäännösjännityksiä muodostuu FSW-menetelmässä sekä merkittävimmät tekijät ja hitsausparametrit, jotka vaikuttavat jäännösjännitysten muodostumiseen prosessin aikana. Tässä rajoituttiin tutkimuksiin, joissa materiaalina käytettiin alumiinia. Tämän lisäksi selvitettiin menetelmiä, joilla voidaan vähentää materiaalin jäännösjännityksiä, mikäli prosessissa muodostuvat jäännösjännitykset ovat korkeita.

Työn tavoitteet saavutettiin, sillä tutkimuskysymyksiin saatiin vastauksia. FSW-menetelmän toimintaperiaate ja jäännösjännitysten muodostuminen selkeytyi. Menetelmässä jäännösjännityksiä muodostuu pääasiassa kitkan tuottaman lämmön vaikutuksesta. Liitettäviin kappaleisiin muodostuu jäännösjännityksiä sekä saumaan nähden pituussuunnassa, että poikittaissuunnassa kappaleiden jäähtymisestä aiheutuvan kutistumisen seurauksena. Pituussuuntaiset jäännösjännitykset ovat merkitsevempiä, koska ne ovat poikittaissuuntaisiin jäännösjännityksiin verrattuna suurempia ja luonteeltaan vetäviä. Lisäksi jäännösjännityksiä muodostuu mekaanisen työstön vaikutuksesta, mikä aiheuttaa pääasiassa epäsymmetrian jäännösjännitysjakaumaan liitoksessa.

Menetelmässä haastavuus on löytää optimaalinen tasapaino hitsausparametrien ja muodostuvien jäännösjännitysten välille. Tutkimuksen perusteella erityisesti työkalun etenemisnopeus ja kappaleiden kiinnitys vaikuttavat vetävien jäännösjännitysten muodostumiseen. Etenemisnopeuden kasvattaminen nostaa selkeästi jäännösjännityksiä. Kiinnityksessä jäännösjännitysten muodostumiseen vaikuttaa kiinnitykseen käytetty voima sekä pinta-ala, jonka kiinnitys peittää kappaleista.

Toisaalta kiinnityksen avulla kappaleisiin voidaan kohdistaa esijännitystä. Esijännityksen avulla jäännösjännitykset voidaan vaihtaa täysin puristaviksi, mikä on mekaanisten ominaisuuksien kannalta suotuisaa. Esijännityksen lisäksi jäännösjännityksiin voidaan vaikuttaa prosessin aikana hyödyntämällä nestejäähdytystä. Jäännösjännityksiä voidaan myös vähentää valmiissa liitoksissa lämpökäsittelyllä tai kylmämuokkauksella.

Tutkielman laajuuden vuoksi aihe rajattiin käsittelemään pelkästään jäännösjännityksiä, jolloin esimerkiksi hitsausparametrien vaikutus materiaalin kovuuteen ja vetolujuuteen sivuttiin. Nämä voisivatkin olla jatkotutkimusaiheita, jonka myötä saataisiin tarkempaa

tietoa prosessin optimoimiselle. Lisäksi jäännösjännitysten vaikutus materiaalin väsymiskestävyyteen jätettiin käsittelemättä, joka myös voisi olla jatkotutkimusaihe erityisesti FSW-menetelmällä muodostetulle liitokselle, sillä väsymiskestävyys on merkittävä tekijä rakenteiden ja koneiden suunnittelussa käyttöään arvioimiseksi.

LÄHTEET

- [1] Altenkirch, J., Steuwer, A., Peel, M., Richards, D.G. & Withers, P.J. (2008). The effect of tensioning and sectioning on residual stresses in aluminium AA7749 friction stir welds. *Mater. Sci. Eng. A* Vol.488(1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.055>
- [2] Farajkhah, V. & Liu, Y. (2017). Effect of clamping area and welding speed on the friction stir welding-induced residual stresses. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.90(1–4), pp. 339–348. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9393-7>
- [3] Feng, Z., Wang, X.-L., David, S.A. & Sklad, P.S. (2007). Modelling of residual stresses and property distributions in friction stir welds of aluminium alloy 6061-T6. *Sci. Technol. Weld. Join.* Vol.12(4), pp. 348–356. <https://doi.org/10.1179/174329307X197610>
- [4] He, J., Ling, Z. & Li, H. (2016). Effect of tool rotational speed on residual stress, microstructure, and tensile properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy thick plate. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.84(9–12), pp. 1953–1961. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7859-7>
- [5] Jia, H., Wu, K., Sun, Y., Hu, F., Lin, Y. & Zhang, H. (2021). Experimental research and process parameter optimization of high-speed friction stir welding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.115(11.12), pp. 3829–3838. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07369-9>
- [6] Kwofie, S. (2009). Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief. *Mater. Sci. Eng. A* Vol.516(1), pp. 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.014>
- [7] Lados, D.A., Apelian, D. & Wang, L. (2010). Minimization of residual stress in heat-treated Al–Si–Mg cast alloys using uphill quenching: Mechanisms and effects on static and dynamic properties. *Mater. Sci. Eng. A* Vol.527(13), pp. 3159–3165. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.064>
- [9] Mishra, R.S. & Ma, Z.Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Mater. Sci. Eng. R Rep. Rev. J.* Vol.50(1), pp. 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [10] Nandan, R., DebRoy, T. & Bhadeshia, H. (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* Vol.53(6), pp. 980–1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
- [11] Nie, L., Wu, Y.X., Gong & H. (2020). Prediction of temperature and residual stress distributions in friction stir welding of aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.106(7–8), pp. 3301–3310. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04826-4>
- [12] Papahn, H., Bahemmat, P. & Haghpanahi, M. (2016). Effect of cooling media on residual stresses induced by a solid-state welding: underwater FSW. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol.83(5–8), pp. 1003–1012. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7653-6>

- [13] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. & Withers, P.J. (2003). Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Mater.* Vol.51(16), pp. 4791–4801. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00319-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00319-7)
- [14] Prasanna, P., Penchalayya, D.C. & Rao, D.D.A. (2013). EFFECT OF TOOL PIN PROFILES AND HEAT TREATMENT PROCESS IN THE FRICTION STIR WELDING OF AA 6061 ALUMINIUM ALLOY. *Am. J. Eng. Res.* Vol.2(1), pp. 7-15.
- [15] Radaj, D. (1992). *Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion*, 1st ed. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg., 342 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48640-1>
- [16] Richards, D.G., Prangnell, P.B., Williams, S.W. & Withers, P.J. (2008). Global mechanical tensioning for the management of residual stresses in welds. *Mater. Sci. Eng. A* Vol.489(1), pp. 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.12.042>
- [17] Richter-Trummer, V., Suzano, E., Beltrão, M., Roos, A., dos Santos, J.F. & de Castro, P.M.S.T. (2012). Influence of the FSW clamping force on the final distortion and residual stress field. *Mater. Sci. Eng. A* Vol.538, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.016>
- [18] Staron, P., Koçak, M., Williams, S. & Wescott, A. (2004). Residual stress in friction stir-welded Al sheets. *Phys. B Condens. Matter, Proceedings of the Third European Conference on Neutron Scattering* Vol.350(1), pp. E491–E493. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.03.128>
- [19] Thomas, W. (1998). Friction stir welding and related friction process characteristics. 7th International Conference on Joints in Aluminium, 16 April, Cambridge, UK. https://www.researchgate.net/publication/273122758_Friction_stir_welding_and_related_friction_process_characteristics
- [20] Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R., Withers, P.J. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *Int. Mater. Rev.* Vol.54(2), pp. 49–93. <https://doi.org/10.1179/174328009X411136>
- [21] Totten, G.E., Howes, M.A.H., Inoue, T. (2002). *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, Ohio.
- [22] Zhao, Y., Wang, Q., Chen, H. & Yan, K. (2014). Microstructure and mechanical properties of spray formed 7055 aluminum alloy by underwater friction stir welding. *Mater. Des.* 1980-2015 Vol.56, pp. 725–730. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.071>