

Vaativien hitsattujen rakenteiden simulointi

Mika Korhonen

Vaativien hitsattujen komponenttien ja rakennekokonaisuuksien valmistuksen aikaisten muodonmuutosten tai rakenteisiin muodostuvien jäännösjännitysten hahmottaminen tai suuruusluokan arvioiminen on suunnitteluvaiheessa vaikeaa tai jopa mahdotonta ilman todella vankkaa ja pitkää kokemusta eikä välttämättä sittenkään. Simulointityökalujen avulla vähäisempi tai vankempikin kokemus voidaan muuttaa analyyttiseksi malleiksi, joiden avulla esimerkiksi vaihtoehtoisten rakenteiden, hitsien paikkojen tai hitsikokojen arviointi muuttuu todelliseksi tiedoksi.

Vaativat hitsatut rakenteet suunnitellaan pääsääntöisesti toiminnallisista lähtökohdista. Hitsatulla osalla tai rakenteella on jokin toiminnallinen tarve kokonaisuudessa eikä sen valmistaminen ole mahdollista tai järkevää muulla tavalla kuin hitsaamalla – tai vaihtoehtoinen tapa ei kuulu suunnittelijan työkalupakkiin. Hitsattu rakenneosaa voi muodostua levy-, tae- tai valukomponenteista, jotka hitsataan yhteen, mahdollisesti lämpökäsitellään, koneistetaan ja hitsataan edelleen laajempaan rakennekokonaisuuteen tai käytetään sellaisenaan.

Hitsatun rakenteen suunnitteluvaiheessa ei aina tule huomioida hitsauksen aikana rakenteeseen muodostuvia muodonmuutoksia puhumattakaan rakenteeseen jäävistä jäännösjännityksistä. Tästä aiheutuu toisinaan yllättäviä, epämiellyttäviä ja jopa rakenteen toimivuuteen sekä käyttökelpoisuuteen vaikuttavia muodonmuutoksia. Rakenteeseen jäävät jäännösjännitykset eivät välttämättä näy lainkaan ulospäin, mutta voivat aiheuttaa jo lyhyen käyttöjakson jälkeen ikäviä yllätyksiä merkittävästi lyhentyneessä käyttöiässä tai jopa äkillisiä vaurioita.

Hitsattujen rakenteiden simulointityökalut ovat kehittyneet merkittävästi. Samaan aikaan menetelmäkehitys simulointityökalujen hyödyntämisessä on ottanut merkittäviä harppauksia eteenpäin ja tällä hetkellä suurien hitsattujen rakennekokonaisuuksien käyttäytymisen arviointi hitsauksen aikana ja rakenteeseen jäävien jäännösjännitysten tasojen arviointi on mahdollista.

Suisto Engineering Oy on tehnyt systemaattista kehitystyötä hitsattujen rakenteiden simuloinnin menetelmäkehityksessä jo yli kymmenen vuoden ajan ja on pystynyt tarjoamaan asiakkailleen erityisiä asiantuntijapalveluita tuotteiden eri kehitysvaiheissa sekä aiemmin suunniteltujen tuotteiden vau-

riotapauksien analyyseissa. Menetelmäkehitystä on tehty pääsääntöisesti omalla kustannuksella, koska hitsattuihin rakenteisiin liittyvien digitaalisten menetelmien kehittäminen ei ilmeisesti ole ollut julkisesta rahoituksesta päättävien tahojen mielestä riittävän innovatiivista tai ”seksikästä”, vaikka useissa projekteissa tehdyllä kehitystyöllä on osoitettu olevan selkeä vaikutus tuotteiden kilpailukykyyn tai elinkaareen ja sitä kautta esim. ympäristövaikutuksiin.

Suisto Engineering Oy tarjoaa asiantuntijapalveluina asiakasyritysten tuotekehitys- ja suunnitteluorganisaatioille tuotteiden valmistettavuus- ja menetelmätarkasteluita sekä tarkempia rakenneanalyysejä, jotka voivat sisältää tuotteen rakenteen optimoinnin kustannusrakenteen, valmistettavuuden ja elinkaaren osalta. Nykyaikaisten suunnittelu työkalujen avulla tuote rakennetaan digitaalisesti uudelleen ja haetaan mahdollisuuksia tuotteen valmistuskustannusten ja elinkaaren optimointiin vaihtoehtoisten ratkaisuiden avulla.

Palveluiden tavoitteena on varmistaa yhteistyökumppaneille mahdollisuudet kustannustehokkaiden materiaaliratkaisuiden, valmistusmenetelmien ja tuotteen lopulliseen käyttöympäristöön parhaiten soveltuvien materiaaliratkaisuiden valintaan. Digitaalisia työkaluja hyödyntämällä tuotteen valmistuksen aikaiset vaatimukset voidaan huomioida paremmin ja tuotteelle voidaan suorittaa rakenteellinen optimointi hitsauksen aikaisia muodonmuutoksia simuloimalla tai kehittää dynaamisen kuormituksen kohteena olevien tuotteiden elinikää arvioimalla tuotteeseen hitsauksesta jääviä jäännösjännityksiä. Työkalujen avulla voidaan tuotteen valmistettavuutta ja valmistuksen aikaista laadunhallintaa kontrolloida paremmin ja tuotteen rakennetta, materiaaliratkaisuja sekä tuot-

teen rakenteessa olevien hitsien sijainteja, tyyppejä tai olemassaoloa voidaan arvioida tarkemmin.

Kuvassa 1 on esitetty tyypillisiä hitsauksen aiheuttamia muodonmuutostyyppejä, jotka tyypillisesti esiintyvät myös yhdistelminä. Kuvassa 2 on esitetty asiakkaan tuote hitsattuna molemmin puoleisilla pienoilla a-mitalla 3 mm ja kuvassa 3 sama tuote hitsattuna a-mitalla 4 mm. Erot rakenteen siirtymissä ovat selkeästi nähtävissä.

Simuloinnilla voidaan nopeasti ja kustannustehokkaasti tarkastella esim. ylittävän hitsin tai epäsymmetrisin hitsin vaikutusta kappaleen muodonmuutoksiin tai voimakkaasti jigiin kiinnitetyn kappaleen rakenteeseen muodostuviin jäännösjännityksiin.

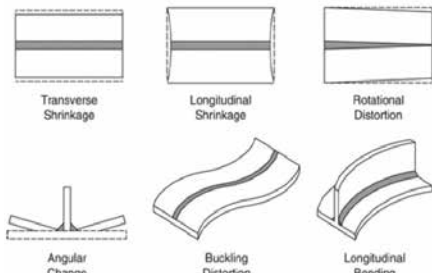
Suunnitteluvaatimukset

Vaativien hitsattujen rakenteiden valmistus ja lopputuotteille asetettavat toiminnalliset sekä laadulliset vaatimukset tuovat mukanaan huomattavia paineita myös tuotteiden suunnittelijoille - kuinka kaikki asetetut vaatimukset voidaan suunnittelullisesti saavuttaa siten, että tuotteen tavoitekustannustaso sekä valmistettavuus voidaan varmistaa. Suisto tarjoaa asiakkailleen tuotekehitys- ja suunnittelutoimintojen tueksi valmistettavuusanalyysejä simulointeineen, jolloin suunnittelijat voivat keskittyä tuotteiden toiminnallisuuksien optimointiin.

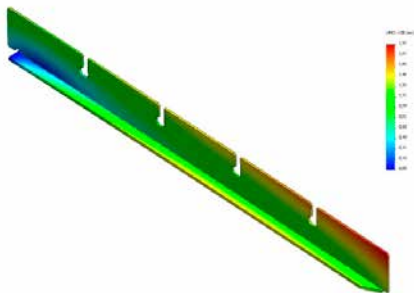
Vaativan ja vähemmänkin vaativan hitsatun rakenteen suunnitteluperusteina tulee olla mm.

- Rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset ja kuormituksista aiheutuvat jännityskeskittymät sekä niiden sijainti.
- Hitsauksen aikana muodostuvien muodonmuutosten huomiointi.
- Hitsauksen aikana muodostuvien jäännösjännitysten minimoiminen.
- Hitsien luoksepäästävyys siten, että suunnitellut hitsit ovat hitsattavissa.
- Hitsauksen laadun varmistaminen.

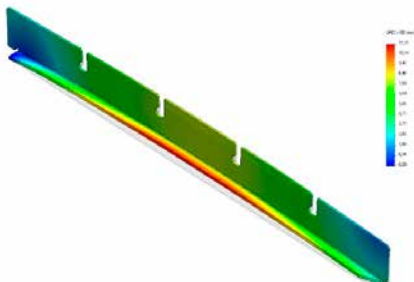
Tuotteen valmistuksen ja valmistuksessa käytettävien menetelmien tunteminen tarjoaa mahdollisuuden suunnitteluvaiheessa suurempien rakenteiden osakokoonpanojen



Kuva 1. Tyypillisiä hitsauksen aiheuttamia muodonmuutostyypppejä.



Kuva 2. Hitsatun kappaleen resultanttisiirtymät symmetrisillä pienoilla, joiden a-mitta on 3 mm.



Kuva 3. Hitsatun kappaleen resultanttisiirtymät symmetrisillä pienoilla, joiden a-mitta on 4 mm. Maksimisiirtymä yli 5x verrattuna a-mitalta 3 mm hitsattuun kappaleeseen.

optimointiin siten, että niiden käsittely ja hitsaus valmistuksen aikana voidaan suorittaa mahdollisimman tehokkaasti. Optimoidut osakokoonpanot mahdollistavat myös suurempien rakenteiden valmistuksen suorittamisen useassa pisteessä samanaikaisesti, jolloin kokonaisläpimenoaika voidaan lyhentää. Vaativien hitsattujen tuotteiden valmistaminen erillisinä osakokoonpanoina asettaa toisaalta lisävaatimuksia suunnitteluvaiheessa hitsatun rakenteen valmistusmenetelmien ja vaatimusten tuntemiselle. Osakokoonpanoissa erityisesti muodonmuutosten ja niiden ennakointi oikeisiin paikkoihin sijoituilla työvaroilla nousee merkittävään rooliin. Vaativassa tuotteessa suunnittelun yhtenä lähtökohdaksi voidaan pitää myös sitä, että kustannus- ja laatumielessä paras hitsi on sellainen, jota ei rakenteessa ole.

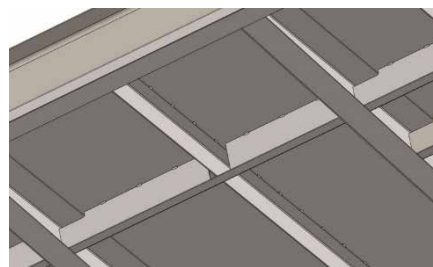
Vaativien hitsattujen rakenteiden optimointi simulointityökalujen avulla

Vaativien hitsattujen komponenttien ja rakennekokonaisuuksien valmistuksen aikaisten muodonmuutosten tai rakenteisiin muodostuvien jäännösjännitysten hahmottaminen tai suuruusluokan arvioiminen on suunnitteluvaiheessa vaikeaa tai jopa mahdotonta ilman todella vankkaa ja pitkää kokemusta. Simulointityökalujen avulla vähäisempi tai vankempikin kokemus voidaan muuttaa analyttisiksi malleiksi, joiden avulla esimerkiksi vaihtoehtoisten rakenteiden, hitsien paikkojen tai hitsien kokojen arviointi muuttuu todelliseksi tiedoksi.

Simulointityökalujen avulla voidaan mm.

1. Simuloida suunnitellun rakenteen rakenteellinen lujuus tunnettujen rakenteeseen kohdistuvien kuormien sekä mahdollisten standardien, lakien, asetusten tms. lisävaatimusten mukaisesti.
2. Simuloida hitsien aiheuttamat muodonmuutokset ja jäännösjännitykset sekä optimoida hitsausjärjestys.
3. Simuloida suunnitellun rakenteen rakenteellinen lujuus huomioiden laskennalliset hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset (esim. dynaamisen kuormituksen alaisessa rakenteessa).
4. Suunnitella tarvittavat työvarat esim. osakokoonpanojen hitsaukseen ja koneistukseen sekä loppukoneistukseen muodonmuutossimuloinnin perusteella.
5. Simuloida rakenteen laskennallinen kestoikä (dynaamisen kuormituksen alaisessa rakenteessa).

Laskentaesimerkkinä esitetään hitsattu kansirakenne, jossa kannen tasomaisuudelle on asetettu toiminnan kannalta tietty toleranssi. Tuotannon yhteydessä on kuitenkin ilmennyt, että tavoiteltuun tasomaisuusvaatimukseen ei päästä johtuen hitsauksesta aiheutuvista muodonmuutoksista. Suunnittelu on esittänyt vaihtoehdoksi kansilevyn paksuuden lisäämisen PL3 -> PL4 tai PL5,



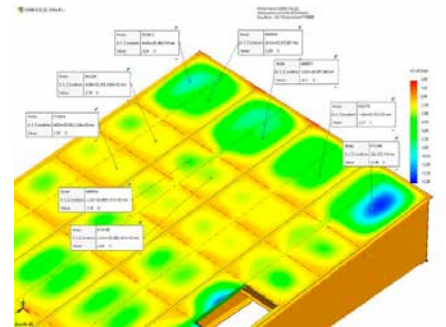
Kuva 4. Kansirakenteen 3D-malli hitsausmuodonmuutossimulointiin. Jäykisteiden katkohaitsit on mallinnettu rakenteeseen erillisinä solid-osina.

mutta haittapuolena levyn paksuuden lisäämisessä on rakenteeseen muodostuva merkittävä lisäpaino.

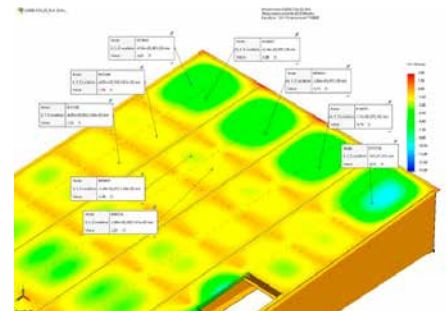
Kuvassa 4 on esitetty kansirakenteen 3D-malli, josta laadittiin neljä (4) eri konfiguraatiota muodonmuutosten laskentaa varten.

Kuvassa 5 on esitetty rakenteeseen muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY) kansilevyn paksuus PL3.

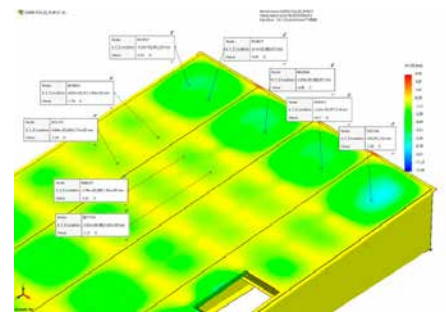
Kuvassa 6 on esitetty rakenteeseen muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY) kansilevyn paksuus



Kuva 5. Hitsauksen vaikutuksesta kansilevyn muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY), kansilevyn paksuus PL3. Maksimisiirtymä on 13,7 mm.



Kuva 6. Hitsauksen vaikutuksesta kansilevyn muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY). Kansilevyn paksuus on PL4. Lisäpainoa levynpaksuuden muutoksesta PL3->PL4 tulee 540 kg. Maksimisiirtymä 9,3 mm.



Kuva 7. Hitsauksen vaikutuksesta kansilevyn muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY). Kansilevyn paksuus on PL5. Lisäpainoa levynpaksuuden muutoksesta PL4->PL5 tulee 540 kg ja alkuperäisestä levynpaksuudesta PL3->PL5 1080 kg. Maksimisiirtymä 7,5 mm.

PL4. Lisäpainoa rakenteelle tulee levyn paksuuden muuttamisesta +540 kg.

Kuvassa 7 on esitetty rakenteeseen muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY). Kansilevyn paksuus on PL5. Lisäpainoa rakenteelle tulee levyn paksuuden muuttamisesta PL4->PL5 +540 kg ja alkuperäisestä levynpaksuudesta PL3->PL5 1080 kg.

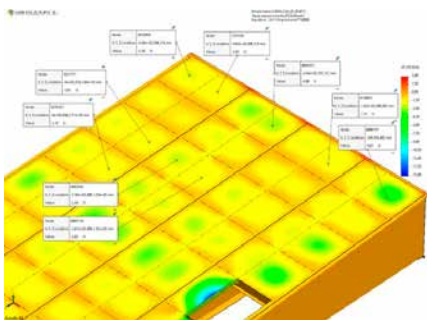
Vaikka tasomaisuuspoikkeamaa saatiin merkittävästi pienennettyä kansilevyn paksuutta muuttamalla (13,7 mm -> 7,5 mm), ei tavoitteeksi asetettuun < 5 mm simulointitulosten perusteella päästy ja samalla rakenteen kokonaispaino lisääntyi merkittävästi, yli 1000 kg.

Koska muodonmuutosten simulointi on nopeaa ja suhteellisen edullista verrattuna todellisella rakenteella kokeilemiseen, lisättiin alkuperäiseen rakennemalliin kansilevyn paksuudella PL3 kaksi (2) jäykistettä lisää ja laskettiin hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset uudelleen. Kuvassa 8 on esitetty rakenteeseen muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY) kansilevyn paksuudella PL3 ja kahdella lisätyllä jäykistepalkilla. Lisäpainoa rakenteelle tulee jäykistepalkkien lisäämisestä +80 kg.

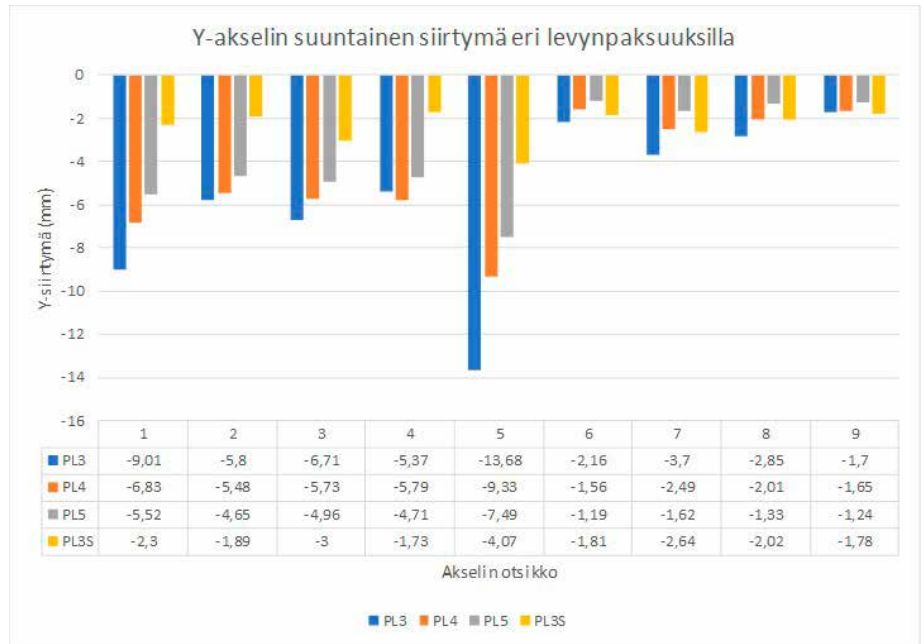
Kuvassa 9 on esitetty yhteenveto kuvissa 5-8 esitetyistä siirtymistä, kuvaajassa on selkeästi havaittavissa simulointien tuloksissa havaittavat erot ja jäykistepalkkien lisäämisen vaikutus.

Yhteenveto

Vaativien hitsattavien rakenteiden simuloineilla suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa merkittävästi rakenteissa valmistuksen aikana muodostuviin muodonmuutoksiin tai dynaamisten kuormituksen vaikutuksen alaisten rakenteiden jäännösjännityksiin. Simulointien avulla voidaan pienentää rakenteeseen jätettäviä työvaroja tai yksinkertaisesti varmistaa työvarojen riittävyys, jos



Kuva 8. Hitsauksen vaikutuksesta kansilevyn muodostuvat siirtymät kohtisuorassa suunnassa kansilevyä vasten (UY), kansilevyn paksuus PL3 ja rakenteeseen on lisätty kaksi jäykistepalkkia. Lisäpainoa jäykistepalkkien lisäämisestä tulee 80 kg. Maksimisiirtymä 4,1 mm < 5 mm, OK!



Kuva 9. Kansirakenteen simulointien tulokset vertailutaulukkona. Simuloinnin perusteella valittiin kansilevyn paksuudeksi PL3 ja lisättiin rakenteeseen pari jäykistepalkkia. Alkuperäisen rakenteen paino nousi 80 kg, mutta suurin siirtymä pieneni 13,7 mm -> 4,1 mm < 5 mm, OK!

hitsattuja rakenneosia tai -kokonaisuuksia koneistetaan hitsauksen jälkeen. Myös koneistamattomien hitsattujen rakenneosien tai -kokonaisuuksien yhteensopivuutta kokonpanovaiheessa voidaan arvioida simulointitulosten perusteella.

Kuvassa 10 on esitetty esimerkki tuotantotilanteesta, jossa ennen tuotantovaihetta oli simulointityökalujen avulla varmistettu oikeat työvaiheet ja oikea hitsausjärjestys siten, että koneistusvaiheessa tarvittavat työvaraa oli jäljellä riittävästi.

Mika Korhonen
Toimitusjohtaja
mika.korhonen@suistoeng.fi
www.suistoeng.fi



Kuva 10. Esimerkki tuotantotilanteesta, jossa vaativan hitsatun rakenteen käyttäytyminen on simuloitu ennen tuotannon aloittamista. Simulointitulosten perusteella rakenteen hitsaukselle laadittiin tarkka hitsausjärjestys ja rakenteen (ruostumaton teräs 1.4404, 316L) hitsauksesta aiheutuvat muodonmuutokset saatiin pidettyä hyvin koneistusvaiheen vaatimissa toleransseissa.

Suisto Engineering Oy on 2014 perustettu toimivan johdon omistama teknologia-yhtiö Porissa. Palveluksessamme olevilla asiantuntijoilla ja ammattilaisilla on pitkä kokemus raskaiden vaativien hitsattujen rakenteiden valmistusmenetelmistä ja valmistettavuustarkasteluista. Erikoisosaamisalueitamme ovat mm. rakenneanalyysit, hitsaus, materiaalit, standardit ja dokumentointi. Palvelutarjontamme sisältää mm.

1. Tuote- ja menetelmäkehityspalvelut
2. Tekninen laskenta
3. Hitsaussimuloinnit
4. Tuotteiden valmistettavuusanalyysit (DFM ja DFMA)
5. Tuotteiden vaurioanalyysit
6. Projektinhoitopalvelut

Käytössämme on menetelmäkehitykseen oma tuotantotila, joissa voimme testata kaikki yleisimmät kaarihitsausmenetelmät (mm. kapearailo-TIG) sekä testata pienimuotoisesti asiakkaiden valitsemia menetelmäratkaisuja proto- tai pilot-valmistussarjoina.