

# Hyvin suunniteltu tuote kestää

## – Vaativien hitsattujen tuotteiden rakenneanalyysit –

**Mika Korhonen**

Kilpailutilanteen jatkuva tiukkeneminen, tuotteiden elinkaarten sekä toimitusaikataulujen lyheneminen on johtanut jatkuvasti kasvavaan paineeseen yritysten tuotekehitys-, suunnittelu- ja hankintatoiminnoille toimittajaketjuista puhumattakaan. Lisääntyneet tuotevaatimukset yhdessä tuotteiden tiukkojen toimitusaikojen kanssa tuovat merkittävästi uusia vaatimuksia myös suunnittelu- ja valmistusketjulle. Jatkuvan dynaamisen kuormituksen kohteen olevien tuotteiden, esim. kääntöpotkurilaitteet, käyttöikäodotukset ovat lisääntyneet ja eliniän aikaisten kuormitusyhtälöiden määrä kasvaa jatkuvasti.

Tuotteen suunnitteluvaiheessa lukitaan 70-90 % valmistuskustannuksista, joten varsinaisen valmistusvaiheen aikana käytettävien valmistus- ja menetelmätarkastusten kustannuksia alentava vaikutus voi olla parhaimmillaankin vain 10-30 %. Mahdollisuudet vaikuttaa kustannuksiin ovat siten hyvin rajalliset. Suunnitteluvaiheen ratkaisut vaikuttavat yhtä lailla tuotteen valmistuskustannuksiin, laatuun ja toimitusaikaan.

Suunnittelun kanssa samanaikaisesti suoritettava rakenneanalyysi tarjoaa mahdollisuuden tuotteen kustannusrakenteen, valmistettavuuden sekä elinkaaren optimointiin.

Suisto Engineering Oy tarjoaa asiantuntijapalveluina yritysten tuotekehitys- ja suunnitteluorganisaatioille tuotteiden valmistettavuus- ja menetelmätarkasteluita sekä tarkempia rakenneanalyyskejä, jotka voivat sisältää tuotteen rakenteen optimoinnin kustannusrakenteen, valmistettavuuden sekä elinkaaren osalta. Rakenneanalyysissä käytettävien työkalujen avulla tuote rakennetaan digitaalisesti uudelleen ja haetaan mahdollisuuksia tuotteen valmistuskustannusten

sekä elinkaaren optimointiin vaihtoehtoisten ratkaisuiden avulla.

Palveluiden tavoitteena on varmistaa yhteistyökumppaneille mahdollisuudet kustannustehokkaiden materiaaliratkaisuiden, valmistusmenetelmien ja tuotteen lopulliseen käyttöympäristöön parhaiten soveltuvien materiaaliratkaisuiden valintaan. Simulointityökaluja hyödyntämällä tuotteelle voidaan suorittaa rakenteellinen optimointi hitsauksen aikaisia muodonmuutoksia simuloimalla tai kehittää dynaamisen kuormituksen kohteena olevien tuotteiden elinikää arvioimalla tuotteeseen hitsauksesta jääviä jäännösjännityksiä. Tulosten avulla voidaan tuotteen rakennetta, materiaaliratkaisuja sekä tuotteen rakenteessa olevien hitsien sijainteja, tyyppejä tai olemassaoloa arvioida tarkemmin. Simulointitulokset voidaan tarvittaessa varmentaa omissa tiloissamme yhdessä asiakkaan kanssa määrittelemiemme kokeiden avulla. Kuvassa 1 on esitetty simulointitulosten validointia varten suoritettu kapearailo-TIG-hitsauskoe ja kuvassa 2 yhdistelmärakenteen (valu+valssattu levy) hitsauskoe. Kuvassa 3 käydään läpi asiakkaan prototuotteen piirustuksia ennen valmistuksen aloittamista.

### 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

sitä, että tuotteen tavoitekustannustaso sekä valmistettavuus voidaan varmistaa. Suisto tarjoaa asiakkailleen tuotekehitys- ja suunnittelutoimintojen tueksi valmistettavuusanalyyskejä, jolloin suunnittelijat voivat keskittyä tuotteiden toiminnallisuksien optimointiin.

Vaativan ja vähemmänkin vaativan hitsatun rakenteen suunnitteluperusteina tulee olla mm.

1. Rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset ja kuormituksesta aiheutuvat jännityskeskittymät sekä niiden sijainti
2. Hitsauksen aikana muodostuvien muodonmuutosten huomioiminen
3. Hitsauksen aikana muodostuvien jäännösjännitysten minimoiminen
4. Hitsien luokse päästävyys siten, että suunnitellut hitsit ovat hitsattavissa
5. Hitsauksen laadun varmistaminen.

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



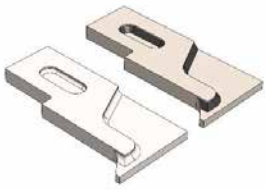
Kuva 1. Simulointitulosten validointia varten kapearailo-TIG-hitsauskoe.



Kuva 2. Yhdistelmärakenteen hitsauskoe.



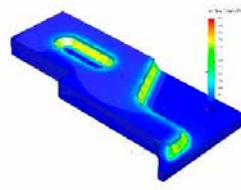
Kuva 3. Piirustusten läpikäyntiä ennen asiakkaan prototuotteen valmistuksen aloittamista.



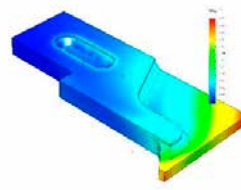
Kuva 4. Runkopilarin sivulevyn osan optimointia – ylempi alkuperäinen hitsattu rakenne, alempi yhdestä levystä koneistettu. Hitsit esitetty tummennettuna.



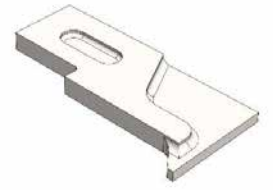
Kuva 5a. Alkuperäinen hitsattu rakenne. Valmistusvaiheina polttoleikkaus, viisteytys, esilämmitys, hitsaus, (NDT), lämpökäsittely, NDT ja koneistus. Hitsit esitetty tummennettuna.



Kuva 5b. Hitsattuun rakenteeseen jäävät jäännösjännitykset (validoitamaton tulos).



Kuva 5c. Hitsatun rakenteen siirtymät (validoitamaton tulos).



Kuva 6. Rakenneanalyysin perusteella muutettu rakenne yhdestä levystä koneistettavaksi. Valmistusvaiheina polttoleikkaus ja koneistus.

lähtökohtana voidaan pitää myös sitä, että kustannus- ja laatumielessä paras hitsi on sellainen, jota ei rakenteessa ole.

## Rakenneanalyysien hyödyntäminen hitsattujen rakenteiden optimoinnissa

Vaativien hitsattavien tuotteiden suunnitteluvaiheessa hitsien määrän tai hitsaustilavuuden minimointi eivät läheskään aina ole riittäviä toimenpiteitä. Erityisesti dynaamisen (väsyttävän) kuormituksen kohteena olevissa tuotteissa rakenteen tarkempi analysointi on tarpeellinen. Hitsatun tuotteen jäännösjännityssimulointi voi antaa suunnittelijalle merkittävää lisätietoa lujuuslaskennan lisäksi arvioitaessa esimerkiksi tuotteen laskennallista kestoikää. Simulointitulosten avulla hitsien sijaintia ja määrää voidaan optimoida käyttämällä yhdistelmä rakenteita, kuten valu-levy- tai tae-levy-yhdistelmiä siten, että esimerkiksi suurempien jännityskeskittymien alueille hitsattuja osakokoonpanoja korvataan valulla tai takeella, jotka liitetään ympäröivään hitsattuun rakenteeseen. Kun rakenteen jännityskeskittymät tunnetaan, voidaan myös materiaaliratkaisuja optimoida hyödyntämällä suurempien lujuusluokkien teräksiä kuormitetuissa kohdissa.

Hitsien sijainnin, määrän ja hitsitilavuuden minimointi vaikuttaa suoraan alentuneiden hitsauskustannusten lisäksi myös rakenteen muodonmuutoksiin, rakenteeseen jääviin jäännösjännityksiin ja odotettavissa olevaan tuotteen elinikään. Kuvissa 4...6 on esitetty kaivoskoneen runkopilarin osan optimointia – alkuperäisen suunnitelman mukaan sivulevy olisi valmistettu hitsaamalla PL150 ja PL80 levyistä, mutta vaihtoehtoinen tapa valmistaa sivulevy koneistamalla osoitautui huomattavasti kustannustehokkaammaksi. Merkittävänä etuna oli myös voimakkaan dynaamisen kuormituksen kohteena olevasta rakenteesta hitsauksesta aiheutuvien jäännösjännitysten poistuminen.



Kuva 7. Prosessilaitteen enneaikainen väsymisvaurio.

Hitsattavien rakenteiden suunnittelussa on huomioitava aina hitsin käyttäytyminen sulan jähmettymis- sekä jäähtymisvaiheessa – hitsi kutistuu aina sekä pituus- että poikittais-suunnassa. Hitsin kutistuminen aiheuttaa muodonmuutoksia tai estyneissä muodonmuutoksissa jäännösjännityksiä. Valitettavan usein hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset tai hitsauksesta rakenteeseen syntyvät jäännösjännitykset tulevat yllätyksenä tuotteen valmistuksen aikana ja valitettavan usein valmistuksen aikana kadonneet työvarat paljastuvat tuotteen loppukoneistuksessa tai valmistuksen aikaiset muodonmuutokset kokoonpanovaiheessa. Rakenteeseen jääneet jäännösjännitykset voivat aiheuttaa yllätyksiä loppukoneistuksessa, mutta vaarallisempina voidaan pitää rakenteeseen muodostuneita jäännösjännityksiä käyttöönotetussa tuotteessa, joka joutuu esimerkiksi jatkuvan väsyttävän kuormituksen altistamaksi. Kuvissa 7 ja 8 on esitetty hitsattuun rakenteeseen muodostuneita väsymisvaurioita, jotka on voitu simuloinnin avulla osoittaa syntyneen ainakin osittain rakenteisiin jääneiden jäännösjännitysten vuoksi. Tutkimuksissa on voitu varmistua,

että vauriot eivät ole johtuneet hitsauksen laatupoikkeamista.

Rakenteelliset ratkaisut, joissa ollaan pakotettuja hitsaamaan tuote loppukoneistuksen tai tuotteen kokoonpanon jälkeen muuhun ympäröivään rakenteeseen, voivat aiheuttaa omat lisävaatimuksensa suunnitteluvaiheessa. Simulointityökalujen avulla voidaan tarkastella myös asennusvaiheen hitsausten aiheuttamia muodonmuutoksia ja varmistaa, että tuotteen toiminnalliset ominaisuudet eivät asennushitsauksen jälkeen vaaranna tai tuotteen laskennalliseen kestoikään ei ole odotettavissa muutosta rakenteisiin jäävistä jäännösjännityksistä hu-



Kuva 8. Offshore-laitteen enneaikainen väsymisvaurio.

limatta. Simuloinnin avulla voidaan vertailla esimerkiksi vaihtoehtoisten hitsausjärjestysten vaikutusta rakenteen muodonmuutoksiin asennushitsausvaiheen aikana, jolloin suunnittelijalle tarjoutuu mahdollisuus hyvinkin yksityiskohtaisten hitsausohjeiden laatimiseen asennusta suorittavalle toimittajalle.

Vaativien hitsattujen rakenteiden suunnitteluvaiheessa tai viimeistään valmistusmenetelmiä valittaessa voidaan suorittaa rakenneanalyysi, jossa simulointityökalujen avulla hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä voidaan mallintaa ja siten ennakoita rakenteen käyttäytymistä valmistuksen aikana. Simuloinnin hyödyntäminen antaa myös mahdollisuuden työvarojen optimointiin sekä niiden kohdistamiseen oikeisiin kohtiin, joka voi erityisesti uusien tuotteiden kohdalla alentaa merkittävästi tuotteen valmistuskustannuksia. Mahdollisissa ongelma- tai korjaustilanteissa ennen korjaustoimenpiteitä suoritettu simulointi mahdollistaa oikein suoritettun korjauksen tai ainakin estää suurempien vahinkojen tapahtumisen.

## Yhteenveto

Suunnitteluvaiheessa tehtävät valmistusratkaisut tuovat mukanaan mahdollisuuden vakioida tuotteiden valmistusta. Siten valmistuskustannusten ja -aikataulun hallinta paranee merkittävästi. Ennen tuotteen valmistuspiirustusten tekemistä suoritettava lujuslaskenta antaa mahdollisuuden hitsausliitosten sijoittamiseen kuormitusten

kannalta optimaalisesti sekä ohjaa myös tuotteelle tehtävää NDT-suunnitelmaa oikeisiin rakenteellisesti kriittisiin kohtiin. Rakenneanalyysissa voidaan simulointityökaluja hyödyntämällä suorittaa tuotteelle rakenteellinen optimointi hitsauksen aikaisia muodonmuutoksia simuloimalla tai kehittää dynaamisen kuormituksen kohteena olevien tuotteiden elinikää arvioimalla tuotteeseen hitsauksesta jääviä jäännösjännityksiä. Tulosten avulla voidaan tuotteen rakennetta, materiaaliratkaisuja sekä tuotteen rakenteessa olevien hitsien sijainteja, tyyppiä tai olemassaoloa arvioida tarkemmin.

Suunnitteluvaiheessa hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten ja jäännösjännitysten tunteminen on erittäin tärkeää sekä mahdollistaa tavoitekustannus- ja laatutason saavuttamisen. Myös yllättävät vauriotapaukset tuotteen käyttöönoton jälkeen voidaan minimoida tai jopa kokonaan välttää, kun hitsauksen aiheuttamat vaikutukset on huomioitu suunnitteluvaiheessa. Rakenteiden suunnitteluvaiheessa on huomioitava valmistuksen aikainen luoksepäästävyys sekä toimialan erityisvaatimukset, esim. offshore-rakenteiden suunnittelussa.

Yhteistyö valmistettavuuden ja valmistusmenetelmien asiantuntijoiden kanssa mahdollistaa parhaiden suunnitteluratkaisuiden hyödyntämisen kustannusten ja laadun optimoinnin sekä läpimenoajan kannalta.

**Mika Korhonen, toimitusjohtaja**  
**+358 400 828 173**  
**mika.korhonen@suistoeng.fi**  
**www.suistoeng.fi**

**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. Tuotteiden valmistettavuusanalyysit (DFM ja DFMA)
  3. Tuotteiden vaurioanalyysit
  4. Projektinhoitopalvelut
- Käytössämme on menetelmäkehitykseen oma tuotantotila, joissa voimme testata kaikki yleisimmät kaarihitsausmenetelmät (mm. kapearailo-TIG) sekä testata pienimuotoisesti asiakkaiden valitsemia menetelmäratkaisuja prototai pilot-valmistussarjoina.