

Antti Fihlman

# SUURLUJUUSTERÄSTEN KOR- JAUSHITSAUKSEN OMINAISPIIRTEET

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
19.10.2020

# TIIVISTELMÄ

Antti Fihlman: Suurlujuusterästen korjaushitsauksen ominaispiirteet  
Kandidaatin työ  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikka  
19.10.2020

---

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys suurlujuusterästen korjaushitsauksesta ja sen ominaispiirteistä. Työn tarkoituksena oli selvittää, miten korjaushitsaus eroaa suurlujuusteräksille valmistavasta hitsauksesta ja miten suurlujuusteräksen ominaisuudet muuttuvat korjaushitsausprosessin vaikutuksista. Tämän kandidaatintyön selvityksen mukaan suurlujuusterästen korjaushitsaus on mahdollista, mutta mahdollisten mekaanisten ominaisuuksien muutokset on huomioitava käyttökohteen perusteella. Esimerkiksi teräksen aikaisempi kuormitushistoria, sekä mikrorakenne on syytä tuntea. Lisäksi myös työskentelypaikalla on suuri merkitys hitsattaessa suurlujuusteräksiä, koska työskentelykohde määrittää käytettävissä olevat hitsausmenetelmät.

Avainsanat: Korjaushitsaus, suurlujuusteräs, väsyminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Antti Fihlman: Characteristics of repair welding for high strength steels  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Materials Engineering  
19.10.2020

---

This bachelor's thesis is a study of the repair welding process for high strength steels. The purpose of this thesis was to find out how repair welding differs from fabrication welding for high strength steels and is it even possible to repair weld high strength steels. Also, the change of mechanical properties after repair welding was studied. It was found out that repair welding is possible for high strength steels. However, possible changes in the mechanical properties of the steel must be accounted for. Moreover, the effects working place and its environment need to be carefully accounted for when welding high strength steels.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on saanut alkunsa keväällä 2018. Taustalla on ollut oma kiinnostukseni korjaushitsaukseen sekä kesätoissa opittujen käytännön taitojen tarkastelu teoreettisemmalla tasolla. Työn kirjoittaminen ja siinä käytettävän tiedon hankinta on ollut mielenkiintoinen ja opettava projekti.

Lopuksi haluan vielä kiittää työn ohjaajaa Johanna Ruorasta, joka avosylin otti työn ohjaamisen vastuulle ja tarjosi hyviä neuvoja sekä ideoita kirjoitusprosessin tueksi. Lisäksi suuret kiitokset Masor Works Oy:lle, joka on tarjonnut ajanvietettä ja kokemuksia kesäksi erilaisten käytännönläheisten työtehtävien parissa liittyen tähän kandidaatintyöhön. Kiitos kuuluu myös läheisille ja ystäville, jotka ovat minua tämän kandidaatintyön loppuun saattamisessa potkineet liikkeelle.

Tampereella 19.10.2020  
Antti Fihlman

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SUURLUJUUSTERÄKSET .....	2
2.1 Erilaiset suurlujuusterästyypit valmistusmenetelmittäin .....	3
2.2 Mikrorakenteet .....	5
2.3 Kemiallinen koostumus .....	6
2.4 Mekaaniset Ominaisuudet.....	10
3. SUURLUJUUSTERÄSTEN HITSAUS.....	11
3.1 Suurlujuusterästen hitsauksen ominaispiirteet.....	11
3.2 Muutokset mikrorakenteessa .....	12
3.3 Lämmöntuonti ja jäähtyminen .....	13
3.4 Hitsausmenetelmät .....	15
3.5 Hitsausparametrit.....	18
3.6 Lisäaineet .....	19
3.7 Hitsausvirheet .....	21
4. SUURLUJUUSTERÄSTEN KORJAUSHITSAUS .....	26
4.1 Eroavaisuudet valmistavaan hitsaukseen.....	26
4.2 Korjaushitsausprosessi .....	27
4.3 Korjaushitsaukseen liittyvä tutkimus suurlujuusteräksille .....	31
5. YHTEENVETO.....	36
LÄHTEET .....	37

# 1. JOHDANTO

Suurlujuusteräokset ovat tavallisia rakenneteräksiä huomattavasti lujempia, jolloin niiden käyttö vähentää tarvittavan materiaalin ainepaksuutta rakenteissa ja sitä kautta mahdollistaa kevyemmän rakenteen haluttuun käyttökohteeseen. Pienempi materiaalikulutus näkyy materiaalikustannusten vähenemisenä, kun taas kevyemmät rakenteet mahdollistavat pienemmän energiankulutuksen liikkuville koneille. Esimerkiksi autoteollisuudessa suurlujuusteräksiä käytetään nykyään runsaasti.

Suurlujuusteräosten rakenneteräksiä suurempi myötölujuus saadaan valmistuksessa aikaan usein erilaisilla lämpökäsittelyillä ja seostuksilla, jolloin teräs saa lopullisen halutun mikrorakenteen. Teräksen mikrorakenne on sen mekaanisten ominaisuuksien perusta. Hitsauksessa syntynyt nopea lämmönmuutos aiheuttaa paikallisen muutoksen teräksen mikrorakenteessa, jolloin myös mekaaniset ominaisuudet muuttuvat. Valmistavassa hitsauksessa tämä usein korjataan suorittamalla jatkolämpökäsittely kappaleelle hitsauksen jälkeen tai käyttämällä hitsausmenetelmiä, joiden lämmöntuontiarvot ovat hyvin tarkkaan säädettävissä.

Korjaushitsauksessa kappaletta ei välttämättä voida lämpökäsitellä jälkeinpäin johtuen sen sijainnista, koosta tai esimerkiksi muista siihen liitetyistä komponenteista. Tämän takia suurlujuusterästen korjaushitsaus on nykypäivänäkin suhteellisen haastavaa. Tässä kandidaatintyössä on tarkoituksena pureutua kyseisiin erityispiirteisiin ja selvittää mitä on huomioitava suurlujuusterästen korjaushitsauksessa hitsauksen parametrisoinnin ja menetelmien näkökulmasta.

Työssä käydään ensin yleisesti läpi suurlujuusteräksiä, jonka jälkeen siirrytään niiden hitsaamista käsittelevään osaan ja lopuksi itse korjaushitsausta käsittelevään osaan. Tutkimuskysymyksinä työssä olivat:

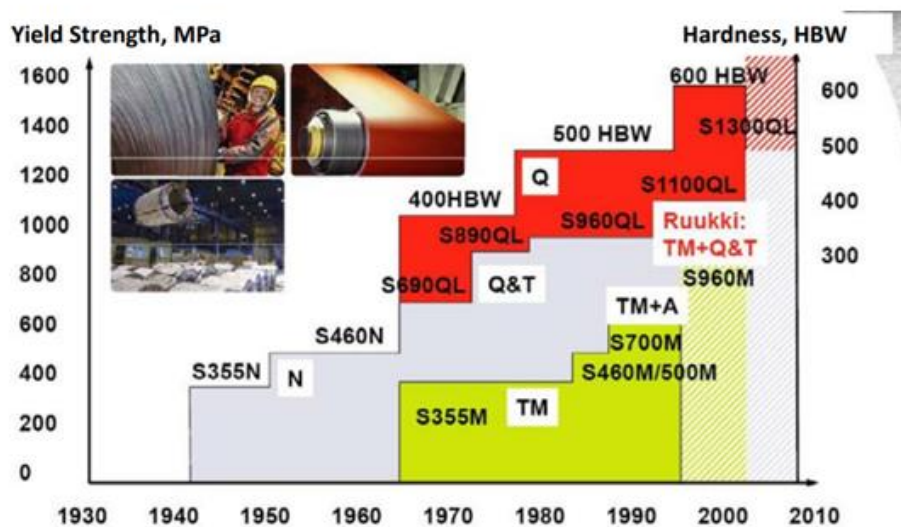
1. Voidaanko suurlujuusteräksiä korjaushitsata?

ja

2. Miten korjaushitsattu rakenne kestää mekaanisia rasituksia verrattuna alkuperäiseen rakenteeseen?

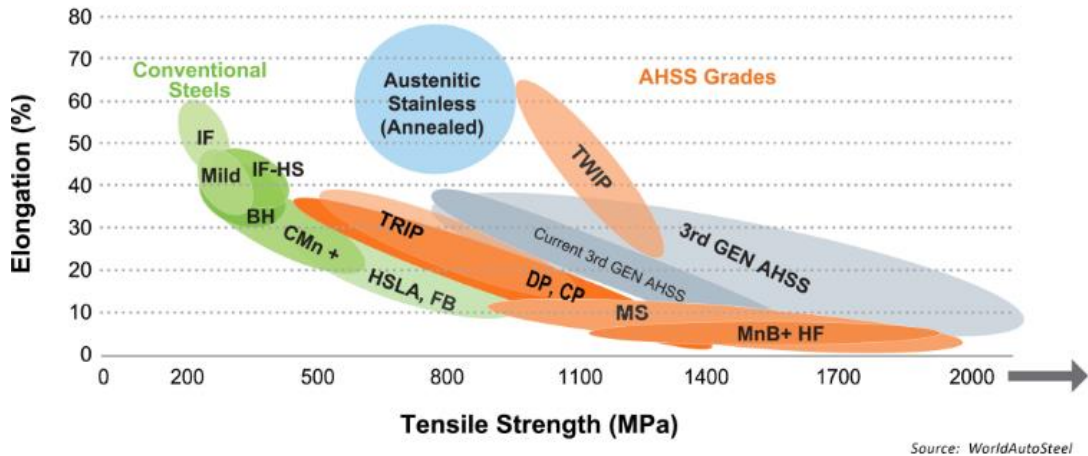
## 2. SUURLUJUUSTERÄKSET

Termille suurlujuusteräs ei vielä nykypäivänäkään ole tarkkaa määritelmää, vaan se on muuttunut teräsvalmistuksen kehittyessä. Ensimmäinen suurlujuusteräkseksi luokiteltu teräs S355 kehitettiin 1940-luvulla. Moderneilla valmistusmenetelmillä on voitu valmistaa teräksiä, joiden myötölujuus on yli 1300 MPa. [4]



**Kuva 1:** Suurlujuusterästen historia [6]

Nykypäivän suurlujuusteräkset voidaan jakaa kahteen eri luokkaan. Tavanomaiset suurlujuusteräkset (HSS) ovat myötölujuudeltaan alle 550 MPa ja kehittyneet yli 550 MPa. Tavanomaiseksi luokiteltuja suurlujuusteräksiä ovat esimerkiksi IF-teräkset (interstitial free), lämpölujittuvat teräkset (bake hardened), CM-teräkset (chrome molybdenum) ja HSLA-teräkset (high strength-low alloy). Kehittyneitä (AHSS) suurlujuusteräksiä ovat esimerkiksi TRIP-teräkset (Triple phase), DP-CP-teräkset (dual- ja complexphase) ja martensiittiset teräkset.[4]



**Kuva 2:** Suurlujuusterästen jaottelu mekaanisten ominaisuuksien perusteella. [3]

Tavanomaisia suurlujuusteräksiä, kuten HSLA-teräksiä on käytetty useita vuosikymmeniä erilaisissa vaativissa teräsrakenteissa, kuten sillat ja pilvenpiirtäjät, kun taas Kehittyneitä suurlujuusteräksiä on käytössä huomattavasti vähemmän. Yhtenä suurimpana ongelmana AHSS-terästen (kuvassa oranssilla) käyttöönotossa on kokonaisuhyötymän lasku, myötölujuuden kasvaessa. Ideaalinen teräs löytyisi kuvan 2, kuvaajan oikeasta yläkulmasta. [4]

## 2.1 Erilaiset suurlujuusterästyypit valmistusmenetelmittäin

Suurlujuusteräkset voidaan luokitella niiden valmistuksessa käytettävän menetelmän perusteella kolmeen erilliseen ryhmään: suorakarkaistuihin- (DQ), termomekaanisesti valssattuihin- (TMCP) ja nuorrutusteräksiin (QT). Valmistusmenetelmällä on oleellinen merkitys hitsauksen kannalta, sillä eri menetelmillä valmistettujen teräksen mikrorakenteet eroavat toisistaan. Teoriassa kolmella eri menetelmällä valmistetulla teräslaadulla voi olla täsmälleen sama myötölujuus, mutta erilaiset ominaisuudet hitsauksessa. [4]

Suorakarkaisuprosessissa (DQ) teräs on kuumennettu austeniitin uudelleenkiteytymislämpö-tilan yläpuolelle (738 °C) valmistuksen aikana. Kuumennettu teräs jäädytetään nopeasti, jolloin matalamman lämpötilan faasimuutosta austeniitista ferriitiksi ei tapahdu. Tuloksena on mikrorakenne, joka koostuu martensiitista, bainiitista tai bainiitin ja martensiitin yhdistelmästä. Lopullinen mikrorakenne riippuu hiilen, muiden seostettujen alkuaineiden määrästä sekä jäähtymisnopeudesta. Karkaisun jälkeen teräkselle voidaan suorittaa vielä päästö lopullisen sitkeys-/kovuussuhteen saavuttamiseksi. [1]

Termomekaanisesti kontrolloidussa prosessissa (TMCP) teräksen muokkaus ja lämpökäsittely toteutetaan samanaikaisesti. Teräs kuumennetaan austeniitin uudelleenkiteyty-

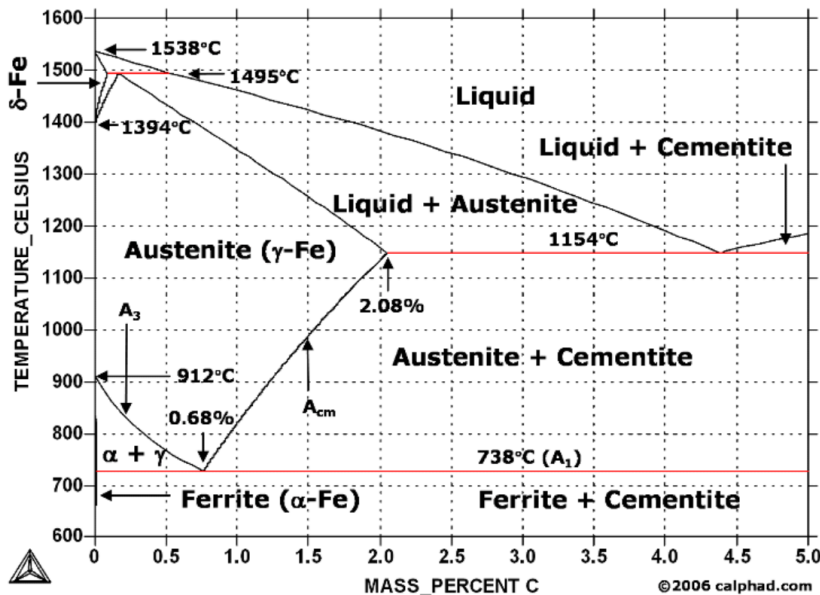


mislämpötilan yläpuolelle ja jäähdytetään nopeasti austeniittialueelle samalla muokaten sitä esimerkiksi valssilla. Muodostuneet austeniittirakeet venyvät ja orientoituvat rasituksen vaikutuksesta, koska muokkaus tapahtuu uudelleenkitetyislämpötilan alapuolella. Tuloksena on hyvin hienorakeinen austeniittirakenne. Lopuksi teräs jäähdytetään, jolloin austeniitti hajaantuu jäähtymisnopeuden vaikutuksesta muodostaen lopullisen mikrorakenteen. Mikrorakenne TMCP-teräksellä määräytyy prosessiparametrien perusteella, joita ovat esimerkiksi jäähtymisnopeus, muokkauslämpötilat ja muokkausvoimat. Mikrorakenne TCMP-teräksellä on bainiittis-ferriittinen. TCMP-teräksillä on valmistusprosessin jälkeen jonkinlainen tekstuuri, sillä rakeet ovat orientoituneet muokkaussuuntaan. [1]

Nuorutusprosessiksi (QT) kutsutaan valmiiksi muokatun teräskappaleen kuumentamista austeniittialueelle, jonka jälkeen sille suoritetaan nopea jäähdytys vedessä tai öljyssä martensiittirakenteen synnyttämiseksi. Ero suorakarkaisuun syntyy, kun jäähdytyksen jälkeen teräkselle suoritetaan korkean lämpötilan päästö eli varsinainen nuorutus. Teräs pehmenee huomattavasti suorakarkaistuun teräkseen verrattuna, mutta lujuus, sitkeys ja väsymiskestävyys kasvavat. Korkean lämpötilan päästö nuorutuksessa voi aiheuttaa päästöaurautta joissakin teräslaaduissa, joten ennen nuorutuskäsittelyä on otettava huomioon käytetyn teräksen karkenevuus. Kuten suorakarkastuilla teräksillä, lopullinen mikrorakenne nuorutusteräksellä koostuu päästetystä martensiitista ja bainiitista. [1]

## 2.2 Mikrorakenteet

Teräksen mikrorakenne on yksi tärkeimmistä parametreista tutkittaessa sen hitsautuvuutta. Kuvassa 4 on esitetty teräs-hiilifaasidiagrammi, joka on perustana kaikille difuusioerusteisille faasimuutoksille.



**Kuva 3** Faasimuutosdiagrammi [21]

Lopullisen mikrorakenteen alkupiste on austeniitin muodostuminen teräksen lämmitessä austeniitin muodostuslämpötila-alueen yläpuolelle (738°C). Lämpötilan edelleen kohotessa välille (738-912 °C) teräksen mikrorakenne on austeniittis-ferriittinen hiilipitoisuuden ollessa alle 0,68% ja austeniittis-sementiittinen sen ollessa yli 0,68%. Puhdas austeniitti alkaa muodostua hiilipitoisuuden ollessa 0,68%. Koska austeniitti on hyvin sitkeää ja pehmeää, sitä käytetään hyödyksi teräksen muokkaamiseen erilaisissa valmistusprosesseissa. Teräksen jäähtyessä austeniitti hajaantuu ferriitiksi, perliitiksi, sementiitiksi, bainiitiksi tai martensiitiksi riippuen jäähtymisnopeudesta ja teräkseen lisätyistä seosaineista. Tässä kappaleessa käsitellään tarkemmin kappaleen 2.1 valmistusmenetelmien perusteilla saavutetut mikrorakenteet.[2]

Ferriitti syntyy diffuusiomekanismilla austeniittirakeiden raerajoilla teräksen jäähtyessä austeniittialueen alapuolelle. Ferriitin kyky sitoa hiiltä (0.023%) on huomattavasti austeniitin hiilensitomiskykyä pienempi (2,06%), joten ylimääräinen hiili diffundoituu takaisin austeniittiin. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan ferriitti on usein sitkeää ja helposti muokattavaa. Toisaalta matalat lämpötilat ja suuret kuormat saattavat johtaa ferriittisellä rakenteella repeävään murtumaan. [2]

Martensiitti syntyy hyvin nopeasti jäähdetyistä austeniitista ilman diffuusiota. Lopullisella martensiittirakenteella on sama koostumus, kuin austeniitilla, josta martensiitti on

muodostunut. Suuren jäähtymisnopeuden takia hiili ei kykene diffundoitumaan pintakesisestä austeniittihilasta ulos vaan se jää hilan sisälle, jolloin muutosta ferriitiksi ei tapahdu. Syntyy tilakeskinen tetragonaalinen hilarakenne, joka on ylikyllästetty hiilellä. Martensiitin kovuus riippuu siinä olevan hiilen määrästä. Suurempi hiilipitoisuus kasvattaa kovuutta. Martensiittia on kahta eri tyyppiä levy- ja sälemartensiittia. Käytännössä suurlujuusteräksillä martensiittirakenne on lähes aina sälemartensiittia sillä suurlujuusterästen hiilipitoisuus on korkeintaan 0,2%. Teräksen kykyä muodostaa martensiittia kutsutaan karkenevuudeksi. Karkenevuus on merkittävät tekijä tutkittaessa materiaalin hitsautuvuutta.[2]

Perliitin muodostuminen pysähtyy lämpötilassa 500°C ja martensiitin muodostus alkaa vasta huomattavasti matalammassa lämpötilassa. Tällä lämpötilavälillä syntyy bainiittia. Bainiittireaktio on eräänlainen perliitti ja martensiittireaktion välimuoto. Bainiittinen rakenne syntyy osittain diffuusion ja osittain martensiittireaktion aiheuttamana. Lämpötila määrittää ajavan voiman. Matalammassa lämpötilassa diffuusio vaikeutuu ja bainiitista tulee hienorakeisempaa. Ajavan voiman perusteella voidaan myös määrittää kaksi erilaista bainiittilaatua. Korkean lämpötilan yläbainiitti on kovuudeltaan noin 400 HBW, joka vastaa hienolamellista perliittiä. Matalammassa lämpötilassa muodostuva alabainiitin kovuus on lähes martensiitin veroinen 600 HBW. Ylä- ja alabainiitin rajalämpötila on noin 350°C. [2]

### 2.3 Kemiallinen koostumus

Hiilen ja typen määrän säätölemisen lisäksi teräksen mikrorakennetta muutetaan myös seostamalla siihen pieniä määriä muita alkuaineita, jotka omalta osaltaan vaikuttavat lopullisen mikrorakenteen syntyyn ja raekokoon. Usein käytettyjä seosaineita suurlujuusteräksillä ovat alumiini, pii, niobium, vanadiini, titaani, boori, kupari, mangaani, nikkeli, kromi, kalsium ja molybdeeni. [4]

Hiiltä pidetään yleisesti tärkeimpänä teräksen seosaineena. Suurlujuusteräksillä hiilipitoisuudet ovat usein suhteellisen matalat (0,2%). Hiilipitoisuuden kasvaessa teräksen kovuus ja vetolujuus kasvaa, mutta hitsattavuus heikkenee. Hiili muodostaa karbideja raudan, kromin, molybdeenin, vanadiinin ja volframin kanssa. Hiilen määrä vaikuttaa myös teräksen hitsattavuuteen. Pientämällä hiilipitoisuutta materiaalin hiiliekvivalenttiarvo pienenee, jolloin hitsattavuus paranee. [1]

Kaikki teräkset sisältävät joitakin määriä typpeä, joko epäpuhtautena tai tarkoituksellisesti seostettuna. Typpi epäpuhtautena synnyttää hauraita kohtia heikentäen teräksen

ominaisuuksia. Toisaalta typpi voi muodostaa haluttuja erkaumia yhdessä muiden seostettujen alkuaineiden kanssa hallittuina määrinä. [4]

Alumiinia käytetään tiivistämään terästä, sillä se sitoo tehokkaasti happea ja typpeä. Alumiinin tai piin seostus teräksen muodostaa pehmeitä oksideja teräksen rakenteeseen niiden hapettuessa. Korkea alumiinipitoisuus kuitenkin heikentää teräksen lujuusominaisuuksia, koska se edistää ferriitin ja yläbainiitin syntymistä mikrorakenteeseen. Vapaa alumiini synnyttää myös suuren hiilipitoisuuden alueita rakenteeseen, jotka estävät hiilen diffundoitumista ja karbidien muodostumista. Pii on usein ensisijainen pelkistin terästen valmistuksesta ja sitä esiintyykin esimerkiksi HSLA-teräksissä, koska se ei vaikuta niiden mekaanisiin ominaisuuksiin. [4]

Niobiumin seostamisella on tärkeä rooli suurlujuusterästen valmistuksessa, koska se pienentää raekokoa. Niobiumin ominaisuudet saadaan aikaan yhteisvaikutuksena, kun sen lisäksi teräkseen on seostettu titaania ja vanadiinia. Niobiumin vaikutukset teräksen ominaisuuksiin esiintyvät hitsauksen yhteydessä ja ne riippuvat hitsauksessa tuodun lämmön määrästä kappaleeseen. Matalalla lämpömäärällä hitsaussauman iskutkeys kasvaa ja vastaavasti korkealla lämpömäärällä se heikkenee. Lisäksi pienet niobium pitoisuudet (0,02-0,05 %) nostavat austeniitin uudelleenkiteytymislämpötilaa muodostamalla termisesti stabiileja Nb(C,N) ja Nb,Ti(C,N) erkaumia. Hitsauksen yhteydessä erkaumat rajoittavat austeniitin raekasvua saumassa, jolloin sauman kovuus rajoittuu ja hitsattavuus paranee. Suuret niobium pitoisuudet (>0,05%) saattavat heikentää sauman lujuutta korkean lämpömäärän hitsauksissa. [4]

Niobiumilla on myös pienillä pitoisuuksilla myötölujuutta nostava vaikutus hiiliteräksillä ja 0,31-0,60% hiilipitoisuuden teräksillä myötölujuus voi nousta 490 MPa:sta 700 MPa:in. Myötölujuutta nostava vaikutus kuitenkin saattaa heikentää teräksen iskutkeyttä ellei sitä huomioida valmistuksen yhteydessä. HSLA teräksillä seostettu niobium edistää bainiitin syntymistä rakenteeseen estämällä ferriitin muodostumista raerajoilla. [4]

Vanadiini nostaa austeniitin uudelleenkiteytymislämpötilaa suurlujuusteräksissä. Se myös lujittaa terästä muodostamalla VN, V(C,N) ja (V,Ti)N erkaumia ferriittiin. HSLA-teräksillä vanadiinilla on lujittava vaikutus kahdella eri tavalla. Ensimmäinen on ferriittiin muodostuneet erkaumat ja toiseksi erkaumien vaikutus raekoon hienouteen. Toisaalta kasvava vanadiinipitoisuus heikentää suurlujuusterästen iskutkeyttä. Onkin siis syytä pitää vanadiinipitoisuus suhteellisen matalana (> 0,1%), koska muuten havaitaan sitkeyden heikentymistä johtuen suuremmista M-A partikkeleista. [4]

Hitsauksen näkökulmasta titaani on suuri merkitys mikroseosaineena. Stabiilit titaaninitridit, jotka muodostuvat korkeissa lämpötiloissa hallitsevat raekasvua hitsausaumassa, jolloin se rajoittaa mahdollisten murtumien syntymistä hitsauksen aikana. Tämän lisäksi titaania hyödynnetään myös erkaumalujituksessa ja sulfidihallinnassa. Pienet titaanipitoisuudet (<0,025 %) ovat myös hyödyllisiä austeniittirakeiden kasvun rajoittamisessa. Matalan lämpötilan hitsauksissa TiN erkaumat saattavat vähentää hitsausauman lujuutta. Lisäksi nestefaasissa titaani voi reagoida typen kanssa muodostaen suuria TiN erkaumia, jotka eivät kykene estämään raekasvua, kuten matalassa lämpötilassa muodostuneet erkaumat. Liian suuret erkaumat saattavat ydinnyttää halkeamia ja vähentää väsymiskestävyyttä teräksessä. [1]

Booria lisätään 0,0005-0,0003 % teräkseen kovuuden kasvattamiseksi. Lähtökohtaisesti kovuuden kasvattaminen on ainoa boorin seostamisen tarkoitus, koska sen syrjäyttäessä muita seosaineita niiden tuomat ominaisuudet heikkenevät. Eniten booria käytetään matalahiilisissä teräksissä. Kovuusominaisuuksien kasvu johtuu hienojakoisen martensiittirakenteen syntymisestä. Boori siis lisää teräksen karkenevuutta. [1]

Mangaani on kustannustehokkain karkenevuutta lisäävä seosaine, jota käytetään lisäämään rakenteen kovuutta, lujuutta ja kulumiskestävyyttä. Lisäksi mangaanin transitiolämpötilaa madaltava vaikutus parantaa teräksen iskusitkeyttä. Lisäksi se estää austeniitin hajaantumista, jolloin saadaan aikaan hienompi raerakenne. Lisäksi mangaani sitoo hyvin rikkiä estäen rautasulfidien muodostumista kappaleeseen, jolloin sen kuumuokattavuus paranee. Kuitenkin mangaanin käyttöä on rajoitettava alle prosentin pitoisuuksiin, sillä sen jälkeen materiaalin sitkeysominaisuudet ja hitsattavuus heikkenevät. [4]

Nikkelin päätehtävä on austeniitin stabiloiminen, mutta se parantaa myös iskusitkeyttä teräksessä. Matalilla nikkelipitoisuuksilla nikkeli madaltaa A3 lämpötilaa ja hiilen läsnäollessa A1 lämpötilaa. Nikkeli hidastaa esieutektoidisen ferriitin ja perliitin muodostumista, jolloin sammutuksessa vältetään näiden faasien muodostuminen ja saadaan aikaiseksi martensiittinen rakenne. Nikkeli parantaa teräksen matalan lämpötilan iskusitkeyttä alentamalla transitiolämpötilaa, jolloin teräs murtuu matalissa lämpötiloissa hauraan sijaan sitkeästi. [2]

Kromi lisää teräksen lujuutta ja sitkeyttä muodostamalla kovia ja lujia kromikarbideja rakenteeseen. Suurilla seosmäärillä kromi kuitenkin madaltaa teräksen lujuutta, koska se stabiloii ferriittiä. Kromi myös lisää teräksen karkenevuutta. Vahvana karbidi ja nitridimuodostajana kromi kasvattaa teräksen kulumiskesto-ominaisuuksia ja estää austeniitin rakkeenkasvua. Kromilla on myös vaarana synnyttää päästöhaaurautta teräkseen, jolloin sen

sitkeys heikkenee sitkeä-hauras-murtuman transitiolämpötilan kohotessa. Seostus molybdeenin kanssa lieventää kuitenkin kromiseosteisen teräksen päästöaurautta. Tästä huolimatta kromiseosteisilla teräksillä on vältettävä päästössä 375-575:een lämpötila-alueita. Kromia käytetään myös sen korroosiota estävän vaikutuksen ansiosta, johtuen ilmatiiviistä oksidikerroksesta, jonka se muodostaa teräksen pinnalle. [4]

Molybdeeni hidastaa perliitin muodostumista, mutta ei vaikuta bainiitin muodostumiseen. Sillä on nikkelin kanssa samankaltainen vaikutus iskusitkeyden parantamisessa. Hitsauksen yhteydessä molybdeeniseosteiseen teräkseen muodostuu asiakulaarinen ferriittinen rakenne martensiittisen ja jäännösausteniittisen rakenteen sijaan. Lisäksi karbidien määrä vähenee hitsauksessa. [4]

Kalsiumia käytetään teräksen työstettävyyden lisäämiseen, jolloin se ei muodosta pitkää lastua koneistuksessa. Lisäksi se myös sitoo rikkiä ja happea estäen haitallisten sulkeumien muodostumista. Lopuksi on esitetty 2 taulukko 1 erilaisten suurlujuusterästen kemiallisista koostumuksista. [4]

**Taulukko 1:** Erilaisten suurlujuusterästen koostumukset [6]

Teräs	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
QT	0.137	0.28	1.39	0.013	0.0013	0.061	0.005	0.002
QT	0.165	0.302	0.87	0.010	0.0017	0.074	-	0.001
QT	0.14	0.30	1.13	-	-	0.034	-	-
QT	0.17	0.349	1.207	0.019	0.013	0.011	-	-
TMCP	0.049	0.17	1.86	0.08	0.004	0.025	0.005	-
TMCP	0.10	0.5	2.10	0.02	0.01	0.015	-	-
DQ	0.083	0.183	1.070	0.008	0.004	0.027	-	-
Teräs	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	
QT	0.062	0.02	0.029	0.022	0.066	0.002	0.001	
QT	0.46	-	0.48	0.011	0.97	-	0.05	
QT	0.30	0.01	0.167	0.01	0.04	0.009	0.011	
QT	0.147	0.136	0.136	-	0.242	0.027	0.008	
TMCP	-	-	0.008	0.081	-	0.092	0.009	
TMCP	-	-	-	-	-	-	-	
DQ	-	-	-	0.002	-	0.034	0.011	

Teräksen koostumuksen vaikutusta hitsattavuuteen voidaan arvioida sen hiiliekvivalenttiarvolla numeerisesti. Hiiliekvivalenttiarvosta kerrotaan lisää hitsaukseen paneutuissa kappaleissa.

## 2.4 Mekaaniset Ominaisuudet

Suurlujuusterästen mekaaniset ominaisuudet riippuvat luonnollisesti käytetystä valmistusmenetelmästä ja teräksen koostumuksesta. Taulukossa 2 on esitetty joukko eri valmistusmenetelmillä valmistetuista teräksistä ja niiden mekaanisista ominaisuuksista. Mekaanisia ominaisuuksia ovat myötölujuus, murtolujuus, murtovenymä ja iskutkeys tietyssä lämpötilassa. [4]

**Taulukko 2:** Erilaisten suurlujuusterästen mekaaniset ominaisuudet. Vasemmalta oikealle myötölujuus, vetomurtolujuus, murtovenymä ja iskutkeys. [6]

Teräs	$\sigma_y$ (Mpa)	UTS(Mpa)	$\epsilon_{A5}$ (%)	E(J)
QT	793	835	16.3	103(-40)
QT	942	998	15	40(-40)
QT	791	836	17	166(-40)
QT	819	868	-	-
TMCP	761	821	20	98(-20)
TMCP	>700	>750	10	>40(-40)
DQ	>900	930-1200	>8	>27(-40)

Taulukosta 2 voidaan havaita, että teräksillä on suhteellisen samankaltaisia ominaisuuksia valmistusmenetelmästä riippumatta. Kuitenkin esimerkiksi suorakarkaistuilla teräksillä (DQ) on huomattavasti pienempi murtovenymä ja iskutkeys, kuin termomekaanisesti valssatuilla teräksillä (TMCP) ja nuorrutusteräksillä (QT). Tämä saattaa johtua esimerkiksi suorakarkaistujen terästen suuremmasta raekoosta.

### 3. SUURLUJUUSTERÄSTEN HITSAUS

Hitsausprosessissa materiaali sulaa paikallisesti ja jäähtyy hyvin nopeasti, jolloin kahden erillisen kappaleen välille muodostuu niitä yhdistävä hitsaussauma. Liitoskohtaan syntyy sulaa ainetta, joka jäähmettyessään muodostaa varsinaisen sauman. Hitsauksessa tuotettu lämpö johtuu myös hitsattavaan rakenteeseen ja saattaa muuttaa sen mikrorakennetta merkittävästi. Käytännössä hitsaus onkin siis valamisen ja lämpökäsittelyn yhdistelmä, joten tietoa on syytä olla molemmista riittävästi. Terästen hitsauksessa on otettava huomioon teräksen valmistusmenetelmä, mekaaniset ominaisuudet, kemiallinen koostumus sekä valmistettavan kappaleen lopulliset dimensiot. [29]

On oltava hyvin huolellinen oikean hitsausmenetelmän, hitsausparametrien ja hitsauksessa käytettävien lisäaineiden valinnassa. Tavoitteena on saada aikaan liitetty rakenne, jonka lujuusominaisuudet ovat vähintäänkin liitettävien materiaalien tasoa. Pahimmassa tapauksessa heikosti valmistellulla hitsausprosessilla hitsaussauma murtuu rasituksessa tai sitä ei muodostu lainkaan hitsattavien kappaleiden välille. Lisäksi kappaleeseen saattaa muodostua hitsauksen yhteydessä erilaisia hitsausvirheitä, jotka saattavat mitätöidä kaiken hitsauksesta saatavan mahdollisen hyödyn. Suurlujuusterästen tapauksessa on siis ratkaistava erilaisia ongelmakohtia, joita kyseisille teräksille esiintyy hitsauksessa. [29]

#### 3.1 Suurlujuusterästen hitsauksen ominaispiirteet

Suurlujuusteräksiä hitsattaessa on huomioitava materiaalin käyttökohde, kappaleen dimensiot, ja kappaleen seosainekoostumus. Suurlujuusterästen tapauksessa materiaalin mekaanisten ominaisuuksien säilyminen hitsauksen jälkeen on erittäin tärkeää, sillä sovelluskohteet ovat sellaisia, missä tavanomaisia teräksiä ei tyypillisesti voida käyttää, koska rakenteeseen vaikuttavat voimat ja jännitykset ovat huomattavasti suurempia. Toisaalta suurlujuusterästen käyttö mahdollistaa myös pienemmät materiaalikulutukset esimerkiksi ohuemman ainepaksuuden muodossa. Verrattuna tavanomaisiin rakenneteräksiin suurlujuusterästen mikrorakenne saattaa koostua esimerkiksi monifaasirakenteista tai tekstuurillisista rakenteista, jolloin sulan materiaalin lisääminen saumaan muuttaa pohjamateriaalin ominaisuuksia merkittävästi. [22]

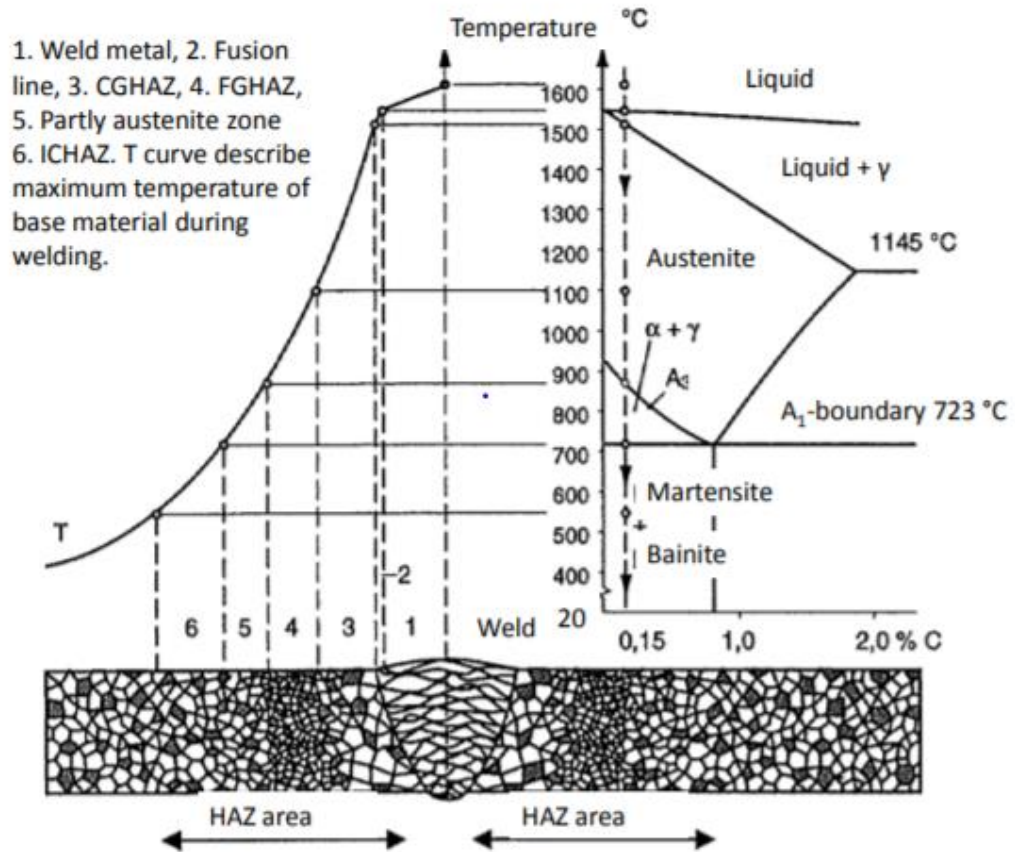
Käyttökohteesta riippumatta suurlujuusteräsrakenteen hitsaus on suoritettava aina siten, että hitsaussauma ei koskaan heikennä rakenteelta haluttuja lujuusominaisuuksia. Hitsauksessa syntynyt muutosvyöhyke eli HAZ (heat affected zone) riippuu hyvin pitkälti



liitettävien teräksen koostumuksesta, hitsauslämmöstä ja kappaleen dimensioista. Tästä syystä hitsattavan teräksen valmistusmenetelmä ja koostumus on tunnettava hyvin tarkasti, jolloin siihen voidaan soveltaa oikeanlaista hitsausmenetelmää oikeilla parametreilla. [4]

### **3.2 Muutokset mikrorakenteessa**

Muutosvyöhyke tarkoittaa hitsaussauman ympärillä olevaa aluetta sauman lähistöllä, jossa materiaali ei ole sulanut, mutta sen mikrorakenne ja sitä kautta ominaisuudet ovat muuttuneet hitsauksessa tuodun korkean lämmön ja nopean jäähtymisen myötä. Muutosvyöhykkeen koko ja mikrorakennemuutokset riippuvat hitsattavan materiaalin mikrorakenteesta ja tuodusta lämpö määrästä. Hitsin geometrialla on myös rooli muutosvyöhykkeen muodostumisessa. Muutosvyöhyke voidaan jakaa neljään pienempään muutosvyöhykkeeseen. Hitsaussauman läheisyydessä liitoskohdasta ulospäin löytyy karkearakeinen muutosvyöhyke CGHAZ (coarse-grained heat affected zone), jonka jälkeen tulee hienorakeinen muutosvyöhyke FGHAZ (fine-grained heat affected zone). Tämän jälkeen tulevat välikriittinen muutosvyöhyke ICHAZ (intercritical heat affected zone) ja alikriittinen muutosvyöhyke SCHAZ (subcritical heat affected zone). Erilaiset muutosvyöhykkeet yhdistettynä maksimi hitsauslämpötilaan on esitetty kuvassa alla. [22]



**Kuva 4:** Hitsauksessa syntynyt lämpömuutosvyöhyke.[6]

Heikoimpana osana hitsauksessa syntynyttä muutosvyöhykettä voidaan pitää karkeara-keista muutosvyöhykettä, jonka osuus koko muutosvyöhykkeestä on pidettävä mahdollisimman vähäisenä. Suurikokoiset rakeet alentavat paikallisesti materiaalin lujuutta ja saumaan saattaa syntyä haitallisia jäännösjännityksiä. On lisäksi huomioitava, että hitsauksen aikana syntynyt muutosvyöhyke saattaa olla hyvinkin laajalla rakenteessa, mikäli käytetty lämpö on ollut riittävän suuri. [22]

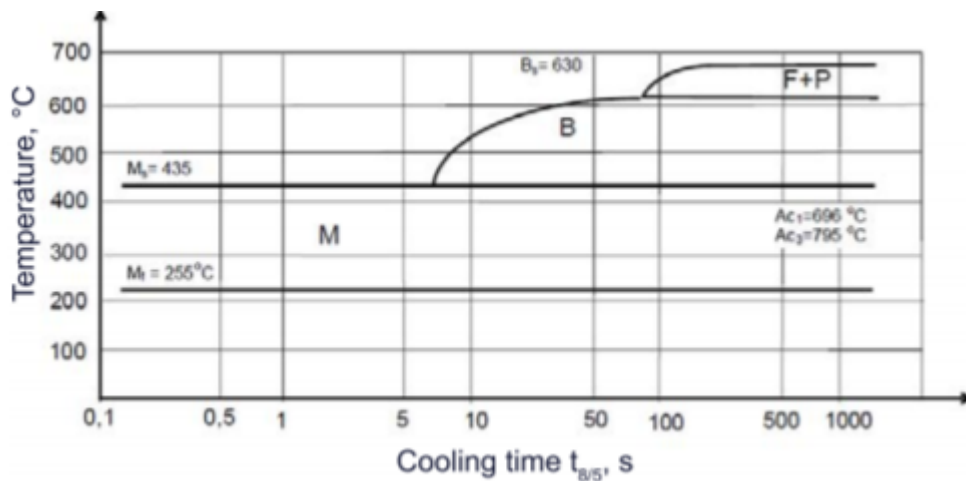
Hitsauksen yhteydessä liitoskohta siis sulaa paikallisesti ja siihen tuodaan liitosta yhdistävä täyteaine. Lopuksi sula jäähmettyy liitokseksi lämmön siirtyessä ympäröivään rakenteeseen. Alkuperäisen mikrorakenteen saavuttaminen hitsauksen jälkeen ei välttämättä ole edes mahdollista, mikäli siihen on valmistuksen aikana muokattu tekstuuri.

### 3.3 Lämmöntuonti ja jäähtyminen

Kaikkia hitsaussaumaan ja lämpövaikutusalueeseen syntyviä mikrorakennemuutoksia hitsausprosessissa ajaa prosessin aikana syntynyt lämpö  $Q$  ja prosessin jälkeinen jäähtyminen  $\Delta t(8/5)$ . Lämmön vaikutuksesta hitsaussaumaan saadaan sulaa materiaalia,

joka mahdollistaa lopullisen liitoksen. Kuitenkin sulan jäähtyessä lämpö johtuu saumakohdan ympäristöön, jolloin se aiheuttaa lähiympäristöön diffuusion ajamia mikrorakennemuutoksia (lämpövaikutusalue). Lopullinen mikrorakennemuutos lämpövaikutusalueella riippuu jäähtymiseen kuluneesta ajasta eli sauman jäähtymisnopeudesta. Lisäksi hitsattavan materiaalin koostumuksella voidaan vaikuttaa sen käyttäytymiseen jäähtymisessä. [8]

Jäähtymisaikaa mitataan  $\Delta t(8/5)$  arvolla. Arvo kertoo ajan, jossa lämpötila hitsausaumalla ja sitä ympäröivällä lämpövaikutusalueella laskee 800 asteesta 500 asteeseen (celsius). Lämpötilaväli on erityisen tärkeä teräksiä hitsattaessa, koska kaikki faasimuutokset tapahtuvat juurikin tuolla lämpötila-alueella. Arvoa voidaan hyödyntää eri materiaalien CCT käyrillä, jolloin nähdään millaisia mikrorakenteita lopulliseen saumaan, syntyy eri jäähtymisajoilla. [8]



**Kuva 5:** Weldox 1100 suurlujuusteräksen hitsauksen CCT käyrä. [8]

Kuvan Weldox 1100 on suhteellisen helposti hitsattava nuorrutusteräs, jonka mikrorakenne on siis martensiittis-bainiittinen. Hyödyntäen CCT käyrää voidaan päätellä, että lähelle alkuperäistä mikrorakennetta päästään teräksen ollessa lämpötila-alueella 600-400 ja jäähtymisajan ollessa 5-50 sekuntia. [8]

Lämmöntuontia ja jäähtymisaikaa voidaan hallita hitsausmenetelmästä riippuvilla hitsausparametreilla, jolloin halutulle teräkselle saadaan mikrorakenteeltaan suotuisa hitsausauma. Esimerkiksi bainiittisen mikrorakenteen synnyttämiseen tarvitaan suhteellisen tarkat lämpötilan ja jäähtymisajan arvot. Parametrien lisäksi hitsattavaa kappaletta voidaan myös esilämmittää, jäähtymisajan kasvattamiseksi. Lisäksi hitsauslisäaineilla on oma osuutensa lopulliseen mikrorakenteeseen. [8]

### 3.4 Hitsausmenetelmät

Hitsausmenetelmiä on ajan saatossa kehitetty useita erilaisia ja niitä tulee jatkossa varmasti lisää. Tässä työssä käsiteltäviä kaarihitsausmenetelmiä ovat puikko-, MIG-, TIG hitsaus. Tämän lisäksi on olemassa jauhekaarihitsaus ja CMT-hitsaus, jotka soveltuvat paremmin valmistavaan hitsaukseen. Kaarihitsausmenetelmien lisäksi on olemassa moderneja laserhitsausmenetelmiä.

Kaarihitsauksen ideana on synnyttää paikallinen voimakas valokaari, joka sulattaa hitsattavan materiaalin valokaaren vaikutusalueella. Mikäli hitsauksen yhteydessä käytetään lisäaineita, valokaari sulattaa myös sen ja sula lisäaine sekoittuu sulaan hitsattavaan materiaaliin. Lämmöntuonti kaarihitsausmenetelmissä määritellään

$$Q = \eta * E,$$

missä  $\eta$  on hitsausmenetelmän hyötysuhde ja  $E$  on syntynyt lämpö millimetriä kohden. Tämä taas määritellään

$$E = \frac{U * I * 60}{v * 100} \frac{kJ}{mm'}$$

jossa  $U(V)$  on jännite,  $I(A)$  sähkövirta ja  $v$  hitsausnopeus (mm/min). [23]

Hyötysuhde on menetelmästä riippuvainen ja sen suuruus kertoo epäsuorasti menetelmän tarkkuudesta lämmöntuonnin kannalta. Korkeampi hyötysuhde mahdollistaa tarkemman arvon tuodulle lämmölle, jolloin haluttu mikrorakenne on helpompi saavuttaa. Alla on esitetty kaarihitsausmenetelmien eri hyötysuhteita. [24]

Welding Process	Typical Deposition Efficiency Range (%)
FCAW-G (Gas-shielded)	80-88
FCAW-S (Self-shielded)	72-78
GMAW (MIG)	96-98
GTAW (TIG)	92-96
SAW	96-98*
SMAW (Stick)	50-55

*\*Values do not account for flux consumption, only wire.*

**Kuva 6:** Erilaisten kaarihitsausmenetelmien hyötysuhteita [24]

Puikkohitsaus (MMAW) on yleisin ja yksinkertaisin kaarihitsauksen muoto. Puikkohitsauksessa hyödynnetään sytytysaineella päällystettyä lisäainepuikkoa. Iskeytyessään

hitsattavaan materiaaliin sytytysaine syttyy ja synnyttää puikon kärkeen valokaaren, joka siirtää sulan lisäaineen puikon kärjestä sulaan hitsattavaan materiaaliin. Modernit puikkohitsauslaitteistot ovat pienikokoisia ja helposti vaihdettavat lisäainepuikot mahdollistavat nopeat työskentelyajat kohteissa, jossa hitsattava materiaali vaihtuu. Tämän takia puikkohitsaus onkin käytetyin kaarihitsausmenetelmä korjaushitsauksessa. Suurlujuusteräksiäkin voidaan hitsata puikolla, mutta lämmöntonin huono säädettävyyys tekee siitä haastavaa. [9]

Varsinaista suojakaasua ei käytetä puikkohitsauksessa muodostuvan kuonakerroksen ansiosta. Kuonakerros syntyy, kun puikon hitsauspuikon päällysteenä oleva karbonaateista ja silikaateista koostuva juoksute sulaa ja höyrystyy hitsauksen aikana. Juoksutekaasut nousevat sulan pinnalle puskien epäpuhtauksia ja ympäröivää ilmaa pois sulasta, jolloin hapettuminen estyy. Juoksutemateriaalit ovat varsinaista hitsausmateriaalia kevyempiä, joten jäähtyessään nestemäinen juoksute muodostaa kiinteän kuonakerroksen sauman päälle ja mahdollistaa sauman kiinteytymisen suojatusti. Menetelmän haittapuolina on laatuun liittyvät ongelmat, joita ovat erilaiset hitsausvirheet kuten huokoisuus, huono sekoittuvuus, matala tunkeuma ja murtumat. Hitsausvirheitä puikkohitsauksessa esiintyy varsinkin aloittelijoilla, koska laitteisto on huomattavasti riippuvaisempi käyttäjästä kuin MIG ja TIG laitteistot. Esimerkiksi hitsausnopeus riippuu käyttäjän taidoista kuljettaa elektrodia sauman suunnan lisäksi myös puikon suunnassa, koska elektrodi kuluu hitsauksen aikana. [9],[30]

MIG-hitsauksessa (Metal inert gas) hyödynnetään lisäainelankaa, jonka syöttönopeutta voidaan säätää. Lisäksi langansyöttölaitteistoon on integroitu kaasunsyöttö, josta syötetään suojakaasua hitsauksen yhteydessä saumakohtaan. Suojakaasu voi olla täysin inerttiä kuten argonia, jolloin puhutaan varsinaisesta MIG hitsauksesta tai se voi sisältää aktiivisia komponentteja kuten hiilidioksidia, jolloin kyseessä on MAG hitsaus. Aktiivisen kaasun ideana on parantaa valokaaren stabiilisuutta ja lisätä tunkeumaa, mikä lankahitsauksessa on usein ongelmana hitsattaessa teräksiä. [10]

MIG hitsauksen etuina on suuret hitsausnopeudet ja puikkohitsausta tarkemmat lämmöntonniarvot sekä menetelmän helppous. Langansyöttökoneisto mahdollistaa tasaisen lisäaineen tuonnin hitsaussaumaan, jolloin käyttäjän tarvitsee huolehtia vain liikkeestä sauman suuntaan. Haittapuolia menetelmässä on rajattu määrä lisäaineita ja lisäainelangan vaihto aika. Lisäksi laitteistot ovat suurikokoisia ja painavia. Laitteisto on myös puikkohitsauslaitteistoa huomattavasti kalliimpi. MIG-laitteisto soveltuukin parhaiten valmistavaan hitsaukseen konepajaolosuhteissa, jolloin menetelmän käyttö on kustannustehokas. Se on myös helposti automatisoitavissa. Menetelmän soveltuvuus korjaushitsaukseen määrittää hyvin pitkälti työskentelykohde. Esimerkiksi korkeat ja ahtaat

tilat voivat olla haastavia, koska painavaa laitteistoa ei helposti saada paikalle. Toinen ongelma syntyy tuulisissa olosuhteissa, kuten ulkona. Tällöin suojakaasu kulkeutuu pois hitsattavasta kohteesta tuulen vaikutuksesta. [10]

TIG-hitsaus (tungsten inert gas) on kaarihitsausprosessi, jossa hyödynnetään suojakaasua ja volframielektrodia, joka ei kulu hitsauksen yhteydessä. Sen sijaan lisäaine tuodaan hitsattavaan kohteeseen lisäainepuikolla, jota käyttäjä syöttää toisella kädellä valokaareen. TIG-hitsaus voidaan myös suorittaa ilman lisäaineita, jolloin liitos muodostuu pelkkien liitosmateriaalien sulasta. Menetelmää hyödynnetään usein vaativimmissa hitsauksissa (lämpöherkät-seokset ja ohuet levyrakenteet), koska sen lämmöntuontiarvot ovat kaarihitsauslaitteistossa kaikkein tarkimmat. [11]

Menetelmä mahdollistaa hyvin laadukkaita hitsaussaumoja, mikäli hitsaaja osaa asiansa, mutta menetelmä on suhteellisen vaikea opetella. Lisäksi menetelmä on huomattavasti hitaampi kuin muut kaarihitsausmenetelmät, joten sitä tulisi hyödyntää vain tarvittaessa. Usein TIG hitsausta hyödynnetään ruostumattomien terästen sekä alumiinin hitsauksessa vaativissa kohteissa. Suojakaasun käytön takia menetelmä ei sovi tuulisiin olosuhteisiin, mutta toisaalta näin tarkkoja hitsauksia suoritetaan usein vain kontrolloiduissa tiloissa kuten konepajalla tai sisätiloissa. Korjaushitsauksiin menetelmä soveltuu, mikäli kohde saadaan suojattua tuulelta ja menetelmän synnyttämä tarkkuus ja laatu kumoavat sen hitauden aiheuttamat kustannukset. [11]

Kaarihitsausmenetelmien lisäksi on olemassa myös lukuisia muita menetelmiä, joista suurlujuusteräksille soveltuvim on laserhitsaus. Laserhitsaus suoritetaan kohdistamalla fokusoitu suurenerginen lasersäde hitsattavaan kohteeseen. Pienen vaikutusalueen ja suuren energiatiheyden ansiosta lämpövaikutusalue saadaan minimoitua lähes täysin ja lämmöntuonti voidaan optimoida hyvinkin tarkasti. Tämä mahdollistaa käytännössä liitoksen hitsaamisen siten, että hitsattava materiaali ei juurikaan eroa hitsisaumasta mikrorakenteeltaan tai ominaisuuksiltaan. Laserlaitteistot ovat suhteellisen suurikokoisia ja lähes aina automatisoituja. [25]

Laserhitsaus ei kuitenkaan sovellu järkevästi hyvin korjaushitsausmenetelmäksi johtuen laitteiston asettamisesta vaatimuksista käyttöympäristöön. Laserlaitteistot ovat usein CNC ohjattuja ja tilavuuksiltaan rajattuja yksikköjä, joten ensinnäkin korjattavan kappaleen koko on rajoitettu. Lisäksi laitteistoa ei välttämättä saada mahtumaan, mikäli korjattava komponentti on osa jotain suurempaa rakennetta (esimerkiksi särö paineastian seinämässä). Lopuksi on myös huomautettava, että korjaushitsausvaurio voi olla hyvinkin monimutkai-

nen muodoltaan, joten laserin liikeradan ohjelmoiminen on myös monimutkaista ja hidasta. Toisaalta laserlaitteistojen kehittyessä on mahdollista, että niitä saatetaan tulevaisuudessa hyödyntää suurlujuusterästen korjaushitsauksessa. [25]

### 3.5 Hitsausparametrit

Hitsausparametrit ovat hitsausmenetelmästä ja hitsaajasta riippuvaisia parametrejä, joita muuttamalla voidaan vaikuttaa hitsauksen laatuun lämmöntuonnin ja jäähtymisen kautta. Esimeriksi kappaleen esilämmitys ei ole hitsausparametri, vaikka se vaikuttaakin kappaleen jäähtymisaikaan hitsauksessa, koska se ei ole riippuvainen käytettävästä hitsausmenetelmästä. Lähtökohtaisesti hitsausparametrien tarkoituksella on muodostaa hitsi, jonka koko, muoto ja tunkeuma ovat vaatimusten mukaiset. Näitä kolmea ominaisuutta voidaan säätää viidellä pääparametrilla, joita ovat virta, valokaaren pituus, hitsauskulma, liike ja hitsausnopeus. Moderneilla lankakonelaitteistoilla hitsausparametrit voidaan säätää suoraan, mikäli materiaali ja sen paksuus tunnetaan. Muussa tapauksessa parametrien määrittämisessä hyödynnetään menetelmäkoikeita. [13]

Hitsausvirta (I) pääsääntöisesti määrittää hitsin koon ja tunkeuman, kun hitsausnopeus on vakio. Virran suuruus voidaan määrittää valmistajan antamista taulukkoarvoista tai se voidaan määrittää tekemällä testihitsauksia vastaavaan materiaaliin kuin hitsattava materiaali. Liian suuri hitsausvirta saattaa aiheuttaa roiskeita hitsattavan kappaleen pinnalle ja toisaalta liian pieni virta ei välttämättä sytytä elektrodiakaan puikkohitsauksessa. Virta määritetään lankakoneilla säätämällä langan syöttönopeutta. Puikkohitsauksessa virtaa säädetään epäsuorasti jännityksen avulla. [13]

Valokaaren pituus on valokaaren etäisyys hitsattavasta kappaleesta. Lähellä oleva valokaari vie suuremman lämpömäärän hitsattavaan kappaleeseen ja suurempi etäisyys tuottaa vähemmän lämpöä mutta saattaa aiheuttaa roiskeita. Usein nyrkkisääntönä puikkohitsauksessa puikon paksuus määrittää sen etäisyyden hitsattavasta pinnasta. Lankakoneella hitsattaessa etäisyyden on oltava suurempi, koska sen vaikutus on keskiteyempi. Pahimmassa tapauksessa liian lähellä oleva valokaari polttaa lankakoneella kappaleeseen reiän. [13]

Hitsauskulmia on kaksi erilaista. Työkulmalla tarkoitetaan kappaleen ja hitsaustyökalun välistä kulmaa ja liikekulmalla tarkoitetaan hitsaustyökalun ja liikesuunnan välistä kulmaa. Lämmöntuonti on aina suurimmillaan työkulman ollessa 90 astetta, jolloin kyseessä on päittäisliitos. Usein liikekulmaa muutetaan työkulmasta muutamia asteita, jolloin muodostunut sula nähdään paremmin hitsauksen yhteydessä. [13]

Liikeparametrilla tarkoitetaan hitsarin käden liikettä hitsauksessa. Esimerkiksi jotkin saumat vaativat sauman levittämistä, joka saadaan aikaan hitsaustyökalun sivuttaisliikkeellä. Samalla saadaan myös vaikutus lämmöntuontiin ja tunkeumaan, koska sivuttaisliike rytmittää hitsausta, jolloin lopputulos on tasaisempi kuin suoraviivaisessa liikkeessä. [13]

Viimeisenä on hitsausnopeus, joka on lämmöntuonnin kannalta hyvinkin merkittävä. Hitsausnopeudella tarkoitetaan valokaaren liikenopeutta työsuunnassa. Liian suuri liikenopeus saa aikaan pienen hitsin huonolla tunkeumalla, kun taas liian hidas hitsausnopeus saa aikaan liian leveän hitsin ja liikaa lämpöä työkappaleelle. [13]

### **3.6 Lisäaineet**

Hitsattaessa suurlujuusteräksiä hitsauslisäaineita on tarjolla useita erilaisia ja ne voidaan luokitella niiden lujuuksien perusteella alilujiksi, saman lujuisiksi ja ylilujiksi lisäaineiksi. Luonnollisesti kyseessä on lisäaineen lujuus verrattuna hitsattavan materiaalin lujuuteen. Teräsvalmistajat usein suosittellevat alilujia lisäaineita, kun hitsattava kohde ei ole huomattavan rasituksen alaisena. Alla olevassa taulukossa on esitelty erilaisia hitsauslisäaineita SSAB:n Strenx teräksille. Vihreällä merkityt lisäaineet kertovat lisäaineen soveltuvuudesta matalan jännityksen kohteisiin ja keltaisella merkityt soveltuvuudesta korkean rasituksen kohteisiin rakenteessa. On kuitenkin huomioitavaa, että ylilujat lisäaineet saattavat kasvattaa riskiä hauraaseen murtumaan rakenteessa, johtuen sen synnyttämisestä jäännösjännityksistä. Yleensä ylilujaa hitsiä käytetäänkin vain materiaalin pinnassa eli hitsin viimeisimmissä palkokerroksissa. [14], [15]



**Taulukko 3: Suositellut hitsauslisäaineet EN standardiluokittain Strenx teräksille. [15]**

Welding consumables, EN class							
		$R_{p0.2}$ [MPa]					
Recommended strength of consumables for highly stressed joints	Strenx 700*, 100, 100XF	900	MMA EN ISO 18275 (-A) E 89X	SAW (solid wire/- flux combinations) EN ISO 26304 (-A) S 89X	MAG (solid wire) EN ISO 16834 (-A) G 89X	MAG (all types of tubular cored wires) EN ISO 18276 (-A) T 89X	TIG EN ISO 16834 (-A) W 89X
		800	EN ISO 18275 (-A) E 79X	EN ISO 26304 (-A) S 79X	EN ISO 16834 (-A) G 79X	EN ISO 18276 (-A) T 79X	EN ISO 16834 (-A) W 79X
Recommended strength of consumables for other joints	Strenx 110XF Strenx 900 – 1300, MC, PLUS, CR grades	700	EN ISO 18275 (-A) E 69X	EN ISO 26304 (-A) S 69X	EN ISO 16834 (-A) G 69X	EN ISO 18276 (-A) T 69X	EN ISO 16834 (-A) W 69X
		600	EN ISO 18275 (-A) E 62X	EN ISO 26304 (-A) S 62X	EN ISO 16834 (-A) G 62X	EN ISO 18276 (-A) T 62X	EN ISO 16834 (-A) W 62X
		500	EN ISO 18275 (-A) E 55X EN ISO 2560 E 50X	EN ISO 26304 (-A) S 55 X EN ISO 14171 (-A) S 50X	EN ISO 16834 (-A) G 55 X EN ISO 14341 (-A) G 50X	EN ISO 18276 (-A) T 55X EN ISO 17632 (-A) T 50X	EN ISO 16834 (-A) W 55X EN ISO 636 (-A) W 50X
		400	EN ISO 2560 E 46X EN ISO 2560 E 42X	EN ISO 14171 (-A) S 46X EN ISO 14171 (-A) S 42X	EN ISO 14341 (-A) G 46X EN ISO 14341 (-A) G 42X	EN ISO 17632 (-A) T 46X EN ISO 17632 (-A) T 42X	EN ISO 636 (-A) W 46X EN ISO 636 (-A) W 42X

\* Including MC, PLUS, CR grades

Alilujan lisäaineen käyttö nostaa myös hitsausnaaman lujuutta, sen sekoitussa pohjamateriaaliin. Lisäksi sitkeämmät alilujat lisäaineet vähentävät jäännösjännityksiä hitsausnaamassa ja vetyurtuman riskiä. On myös huomattu, että alilujan lisäaineen hitseillä saadaan huomattavasti alemmat jäännösjännitykset kuin saman lujuisella lisäaineella, joka johtaa korkeimpiin vetomurtolujuuksiin. Aliluja lisäaine laskee myös hitsauskohteen esilämmityksen tarvetta, mikä vähentää riskiä kylmähalkeiluun. Erilaisten lisäaineiden hyödyt ja haitat on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4: Erilujisten lisäaineiden hyödyt ja haitat. [14], [15], [16]**

Lisäainetyyppi	Piirteet	Edut	Haitat
Aliluja	-Myötölujuus on hitsattavaa materiaalia matalampi -Käytetään matalan jännityksen kohteissa -Hitsin lujuus voi kasvaa merkittävästi sen sekoitussa suurlujuusteräkseen	- Vähentää jäännösjännityksiä -Jäykkyys kasvaa hitsauskohdassa -Vaatii vähemmän esilämmitystä -Vähentää vetyurtuman riskiä	-Pienempi lujuus kuin hitsattavalla materiaalilla -Vähemmän seostettu kuin hitsattava materiaali
Samanlujuinen	-Sama myötölujuus kuin hitsattavalla materiaalilla -Käytetään korkean rasituksen kohdissa	-Suurempi lujuus -Suurempi kuorman kantokyky	-Suuremmat jäännösjännitykset kuin alilujalla lisäaineella
Yliluja	-Korkeampi myötölujuus kuin hitsattavalla materiaalilla	-Suurin lujuus -Suurin kuorman kantokyky	-Riski hauraaseen murtumaan

	-Käytetään pinta-hitsinä.		-Ei niin kustannus-tehokasta -Korkeat jäännös-jännitykset liitok- sessa
--	---------------------------	--	-------------------------------------------------------------------------------

Korjaushitsauksessa lisäaineen käytön määrittää hitsattava materiaali, vaurion laatu ja sen sijainti kohteessa.

### 3.7 Hitsausvirheet

Hitsausvirheiksi kutsutaan ilmiöitä hitsissä, jotka eivät ole toivottuja halutun lopputuloksen kannalta. Usein hitsausvirheet johtuvat virheellisistä hitsausparametreista ja niiden vaikutukset saattavat esimerkiksi kantavilla rakenteilla olla jopa kohtalokkaita. Hitsausvirheiden ehkäisyn kannalta on tärkeää, että hitsaukset tehdään aina ammattilaisen suorittamana ja ne tarkastetaan riittävällä tarkkuudella pätevän tarkastajan toimesta. Etenkin väsymiskuormituksen alaisissa rakenteissa hitsausvirheet on minimoitava, koska virhe toimii geometrisena epäjatkuvuuskohtana materiaalissa aiheuttaen jännityshuipun kuormituskäyrälle. Riittävä määrä jännityshuippuja saa aikaan särön ydintymisen hitsausvirheeseen ja johtaa lopulta murtumaan. SFS 3052 standardin mukaan hitsausvirhe on epäjatkuvuus hitsissä tai poikkeama sen muodossa. Hitsausvirheet on standardissa luokiteltu kuuteen pääryhmään, joita ovat halkeamat, ontelot, sulkeumat, liittymisvirheet, muoto- ja mittavirheet ja muut virheet. Virheiden tarkastuksessa voidaan hyödyntää erilaisia NDT menetelmiä. [17]

Halkeamat ovat yleensä teräväkärkisiä ja kapeita murtumia materiaalin tai hitsaus-  
sauman pinnalla. Materiaaliin halkeamat voivat hitsauksessa syntyä jäähtymisen, korkean lämpötilan ja jännityksen vaikutuksesta. Lisäksi on myös huomioitava edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutukset. Hitsaussauman halkeamat jaetaan SFS-EN ISO 6520-1 liitteessä A halkeaman syntymisajankohdan mukaan hitsauksessa. Näistä oleellisimpia ovat kaksi eri mekanismien ajavaa halkeamaa, jotka ovat kuuma ja kylmähalkeama. [17]

Kuumahalkeama on yleensä hitsin keskilinjalla kulkeva pitkittäinen jännityshalkeama, joka syntyy korkeassa lämpötilassa hitsin jähmettyessä. Se voi esiintyä sularajalla tai muutosvyöhykkeellä. Jos kuumahalkeama avautuu hitsin pinnalle, sen murtopinta voidaan havaita silmämääräisesti, mutta sisäiset kuumahalkeamat voidaan havaita vain NDT-menetelmillä kuten ultraäänellä tai röntgenlaitteistolla. [17]

Kuumahalkeilun syntyminen materiaalista riippuu metallurgisista tekijöistä, kuten koostumuksesta, mikrorakenteesta tai hitsiaineen jähmettymisalueesta. Lisäksi myös geometriset tekijät (palon leveys/syvyyssuhde) ja jännitystekijät kuten ainepaksuus ja jäykkyys vaikuttavat kuumahalkeiluun. Terästen hitsausstandardi SFS-EN 1011-2 hyödyntää The Welding Institutun kehittämää herkkyytlukua UCS kuumahalkeilutaipumuksen arvioinnissa. Luku lasketaan hitsiaineen kemiallisesta koostumuksesta kaavalla [17]

$$UCS = 230\%C + 190\%S + 75\%P + 45\%Nb - 12,3\%Si - 5,4Mn\% - 1$$

Kaava koostuu hitsiaineeseen seostettujen aineiden massaprosenteista, joille on annettu painokerroin sen kuumahalkeilua edistävien ominaisuuksien mukaisesti. Hiili (karkeavuus) ja rikki (murtumia aiheuttavat sulfittiyhdisteet hitsauksessa) lisäävät merkittävästi taipumusta kuumahalkeiluun, joten niiden painokertoimet ovat luonnollisesti suurimmat.

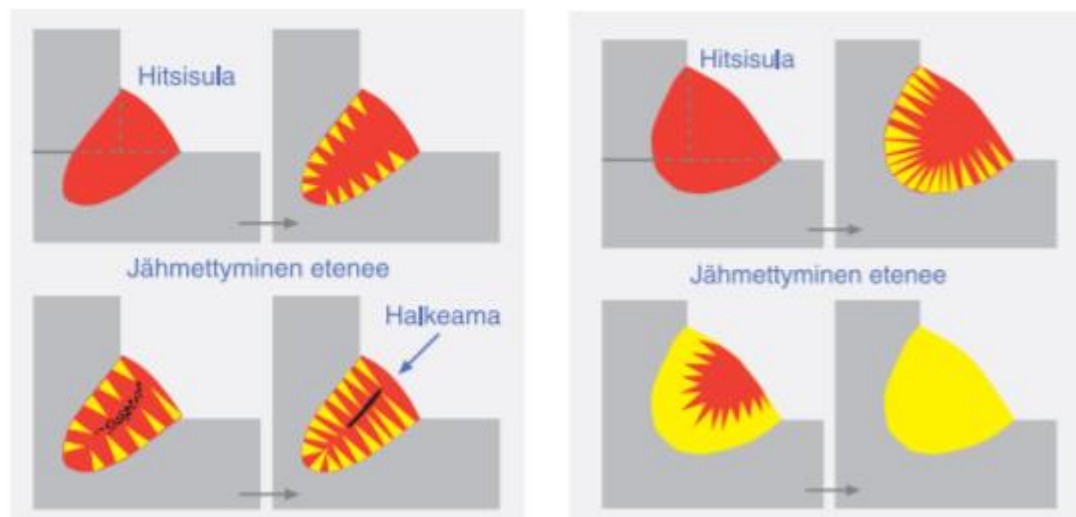
UCS luvun perusteella voidaan arvioida seuraavasti:

UCS =< 10: Hyvä kuumahalkeilun kestävyys

UCS = 10-30: Kasvava kuumahalkeilutaipumus kun hitsin leveys/syvyyssuhde on pieni

UCS => 30: Huono kuumahalkeilun kestävyys

Mikäli UCS on välillä 10-30 on hitsin geometriaan kiinnitettävä huomiota merkittävästi.



**Kuva 7:** Palon geometrian vaikutus kuumahalkeiluun [17]

Kuten kuvasta huomataan, kuumahalkeilu liittyy hitseihin, joissa hitsipalko on kapea ja tunkeuma syvä. Tällöin sulan jähmettyminen tapahtuu korostetusti sularajoilta kohti pa-

lon keskilinjaa. Nyt on mahdollista, että hitsin keskilinjalle suotautuu epäpuhtauksia jäähmettymisen loppuvaiheessa. Kun palko jäähmettyy entisestään siihen alkaa syntyä jännityksiä, jotka otollisessa tilanteessa synnyttävät repeämisen heikentyneelle keskilinjalle, jossa on vielä osittain sulaa. Leveällä palolla jäähmettyminen on suuntautunut enemmän palon yläosaan, jolloin heikkoa keskilinjaa ja kuumahalkeilua ei välttämättä synny niin helposti. [17]

Puikkohitsauksessa kuumahalkeilu on suhteellisen harvinaista, mutta MIG/MAG hitsauksessa niitä voi esiintyä. Tämä johtuu suuremmasta kuljetusnopeudesta, joka vaikuttaa hitsisulan muotoon ja jäähmettymisen suuntaan. Kuumahalkeilua voidaan välttää valitsemalla hitsausarvot materiaali huomioiden, jolloin hitsin geometria on halutunlainen esimerkiksi mustan teräksen leveys/syvyys suhde tulisi olla noin 1, mutta ruostumattomalle teräkselle sen on oltava yli 1,5. Geometriaan voidaan myös vaikuttaa laskemalla hitsausnopeutta ja suunnittelemalla hitsaus jännityksen minimoiden. [17]

Kylmähalkeilu eli vetyhalkeama on vedyn aiheuttama halkeama, joka voi syntyä jännityksen vaikutuksesta hitsauksessa syntyneeseen karkeavyöhykkeeseen. Kylmähalkeilua voi syntyä myös huoneenlämpötilassa hyvinkin pitkän ajan kuluttua hitsauksesta. Usein vetyhalkeamia syntyy karkeneviin teräksiin, joissa syntyy martensiittia hitsauksen yhteydessä. Myös suurlujuusteräokset ovat alttiita vetymurtumille. Vetyhalkeaman syntyminen vaatii usean tekijän, joita ovat hauras mikrorakenne, hitsiin liennut vety ja riittävä jännitys hitsissä. [17]

Teräksen kemiallisesta koostumuksesta laskettava SFS-EN 1011 standardin mukainen hiiliekvivalenttiarvo

$$CE = C\% + Mn/6\% + (Cr + Mo + V)/5\% + (Ni + Cu)/15\%$$

kuvaa teräksen karkenevuutta ja epäsuorasti vetyhalkeilutaipumusta sekä siten materiaalin hitsattavuutta. CE luvun perusteella voidaan arvioida materiaalin hitsattavuutta seuraavasti:

CE <0,4%: ei vaadi hitsattavan materiaalin esikuumennusta

CE 0,4-0,5%: yleensä ei esikuumennusta ohuilla aineilla, mutta esikuumennus paksuilla aineilla

CE: >0,5% esikuumennus ja niukkavetyiset lisäaineet, mahdollisesti jälkikuumennus

Vety pääsee hitsauksessa teräkseen hitsauslisäaineiden vetyä sisältävien yhdisteiden hajotessa valokaareissa. Näitä lähteitä ovat kosteus ja vetyä sisältävät yhdisteet puikon

sytytysaineessa. Korjaushitsauksessa usein ulkoiset epäpuhtaudet ovat merkittävä tekijä vetyhalkeaman syntymisessä. SFS-EN 1011-2 Luokittelee hitsiaineen vetypitoisuudet HD ferriittisille teräksille seuraavasti.

Runsas A: >15 ml/100g Rutiili ja selluloosapäällysteiset puikot.

Keski B: > 10-15 ml/100g Emäspäällysteiset puikot ja täytelangat

Matala C: >5-10 ml/100g Emäspäällysteiset puikot ja täytelangat

Erittäin matala D: 3-5 ml/100g Emäspäällysteiset puikot, täytelangat, umpilangat ja TIG-langat.

Matalin E: <3 ml/100g Erillinen arviointi, vaatii myös suojakaasun ja atmosfäärin kosteuden huomioimisen

Esikumennus on yleisin keino vetyhalkeilun torjumisessa ja tarvittavan esikumennuksen määrittämiseen voidaan hyödyntää SFS-EN 1011-2 standardin esikumennuskäyriä, jotka perustuvat hiiliekvivalenttiin, lämmöntuontiin, vetypitoisuuteen ja levynpaksuuteen. [17]

Esikumennusta voidaan myös mallintaa kaavalla

$$T_p = 697CET + 160 * \tanh(t/35) + 62HD^{0,35} + (53CET - 32) * Q - 328(^{\circ}C),$$

$$T_p = \text{esikumennuslämpötila } (^{\circ}C),$$

$$CET = C\% + (Mn + Mo)/10\% + (Cr + Cu)/20\% + Ni/40\%,$$

$\tanh$  = hyperbolinen tangentti

t = levynpaksuus mm,

HD = hitsiaineen vetypitoisuus ml/100g,

Q = Lämmöntuonti (kJ/mm)

Mikäli esikumennusta ei voida tehdä, niin voidaan käyttää ruostumattomia austeniittisia hitsilisäaineita. Tämä johtuu vedyn liukoisuudesta austeniittiseen teräkseen, joka on huomattavasti suurempi kuin ferriittisillä teräksillä. Tällöin vety jää hitsiaineeseen eikä siirry hauraalle muutosvyöhykkeelle. Yleisesti vetyhalkeaman syitä ovat siis, korkeat hiili ja seosainepitoisuudet perusaineessa, niukkaseostainen lisäaine, liian pieni lämmöntuonti, matala esikumennus ja jännityksiä lisäävät railomuodot. Vetyhalkeilua voidaan estää käyttämällä matalan hiiliekvivalentin teräksiä, käyttämällä niukkavetyistä hitsausprosessia/lisäaineita, pitämällä lisäaineet kuivina, hitsauskohteen huolellisella puhdistuksella, riittävän suurella ja sallitulla lämmöntuonnilla, alilujilla lisäaineilla, austeniittisilla lisäaineilla, esikumennuksella ja vaadittaessa jälkilämpökäsittelyllä. [17]

Muut hitsausvirheet eli ontelot, kraaterihalkeamat ja dimensiovirheet liittyvät enemmän hitsausprosessin onnistumiseen eli hitsaajan taitoihin eikä juurikaan hitsattavan teräksen metallurgiaan. Näitä voidaan ehkäistä onnistuneella hitsaussuunnittelulla sekä hitsaajan riittäväällä perehdytyksellä kuten hitsausluokkien suorittamisella. [17]

## 4. SUURLUJUUSTERÄSTEN KORJAUSHITSAUS

Korjaushitsaus on hitsausprosessi, jossa valmista ja usein jonkin aikaa käytettyä komponenttia entisöidään hitsauksen avulla. Tämä voi tarkoittaa uusien komponenttien liittämistä aikaisempaan (nostokoukut ja vahvikerakenteet) tai vaurioiden kuten säröjen tai murtumien korjaamista täytehitsaamalla särö tai uusimalla murtunut kohta liitoshitsauksella. Korjaushitsausta voidaan tehdä esimerkiksi tuotannon primäärivaiheissa valuvirheiden korjauksessa tai tuotteen käyttövaiheessa korjaamaan aikaisemman käytön aiheuttamia vaurioita. Tässä työssä keskitytään enemmän käyttövaiheessa syntyviin vaurioihin, koska primäärituotannossa korjaushitsaus on enemmänkin valmistavaa hitsausta. Vaurion korjaushitsausprosessi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, joita ovat tunnistusvaihe, esityöstövaihe, hitsausvaihe ja tarkastusvaihe.

### 4.1 Eroavaisuudet valmistavaan hitsaukseen

Korjaushitsauksen erot valmistavaan hitsaukseen riippuvat merkittävästi korjattavan vaurion laadusta ja korjattavan kappaleen dimensioista. Käytön aikana altistunut väsymiskulutukselle säröytynyt hammasratas on suhteellisen helppo poistaa käyttöympäristöstään, jolloin korjaus voidaan suorittaa hitsaukselle suotuisimmissa olosuhteissa, kuten konepajalla. Toisena ääripäänä on taas suhteellisen suurten komponenttien korjaus, jolloin ne on korjattava paikan päällä hyvinkin vaihtelevissa ja jopa haasteellisissa olosuhteissa. Esimerkiksi öljynporauslautan vedenalaiset tukirakenteet tai suurten kiinteiden teollisuuskoneiden rakenteet kuten kivihiilimylyn seinämät ovat tällaisia rakenteita. [33]

Oleellisin ero valmistavaan hitsaukseen onkin hitsausympäristö ja sen aiheuttamat rajoitteet. Ympäristö voi esimerkiksi altistaa hitsauskohteen erilaisille hitsausvirheille, kuten kylmähalkeilulle läsnä olevan kosteuden ja epäpuhtauksien vaikutuksesta. Toisaalta ympäristö voi myös rajoittaa käytettävää hitsausmenetelmää. Esimerkiksi ahtaissa ja korkeissa kohteissa MIG- TIG- tai laser laitteistoja ei yksinkertaisesti saada mahtumaan työskentelypaikalle, jolloin hitsaus suoritetaan usein puikolla sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Puikkohitsaus taas menetelmänä on suhteellisen haastava suurlujuusteräksiä hitsattaessa, kun lämmöntuontia ja jäähtymistä halutaan optimoida. [33]

Sijaintiin liittyvät rajoitukset usein myös rajoittavat mahdollisuuksia automatisoida korjaushitsausta merkittävästi, jolloin riski inhimillisiin virheisiin kasvaa. Toinen automaatiota rajoittava tekijä korjaushitsauksessa on useat ja vaihtelevat työvaiheet, jolloin niiden

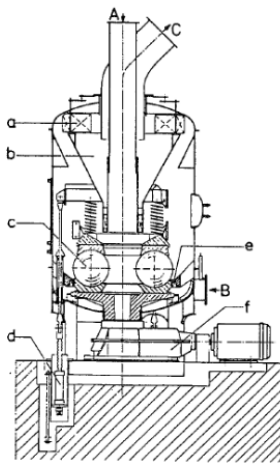
ohjelmoiminen robotille olisi suhteellisen työlästä, varsinkin jos korjattavia kohteita on useita. Tämä taas vähentää automaatiosta saatavaa hyötyä kustannustehokkuuden las-  
kiessa. [27]

## 4.2 Korjaushitsausprosessi

Mikäli rakenne tai koneenosa altistuu käytössään mekaaniselle rasitukselle, on se myös altis mahdollisille vaurioille. Yleisimpiä korjaushitsattavia mekaanisia vaurioita ovat säröt ja halkeamat, joita syntyy rakenteen ollessa jatkuvan ja vaihtuvan jännityskuorman vaikutuksessa eli väsymiskuormituksessa. Rakenteiden mitoittaminen väsymiskuormitusta vastaan tarvittavalla luotettavuudella on hyvin haasteellista, joten pitkäaikaisessa käytössä säröjä muodostuu hyvinkin usein. Väsymisen lisäksi myös kuluminen on usein taustana korjaushitsattaville vaurioille. Yleisimpiä vaurionaiheuttavia ovat abrasiivinen, adhesiivinen-, ja eroosiokuluminen. Myös kulumisvaurioiden mahdollisuus kasvaa käyttöiän lisääntymisessä, mutta esimerkiksi adheesiokulumista voidaan ehkäistä materiaa-  
livalinnoilla, jolloin kulumissysteemiä ei synny. [32]

Korjaushitsausprosessilla pyritään siis ennakoimaan ja tarvittaessa korjaamaan pitkäai-  
kaskäytön synnyttämiä vaurioita. Prosessi on nelivaiheinen, joista ensimmäisenä on tar-  
kastusvaihe. Tarkastusvaihe voidaan esimerkiksi sisällyttää kohteen vuosihuollon yhtey-  
teen, jolloin tarkastettavalle kohteelle on helppo pääsy eikä tuotantoa tarvitse pysäyttää. Tarkastusvaiheessa rakenne tarkastetaan mahdollisten kulumis- ja väsymisvaurioiden varalta. Usein aikaisempien vuosihuoltojen perusteella voidaan tunnistaa ongelmakoh-  
tia, jolloin tarkastuksen kohdentaminen on helpompaa. Esimerkiksi kivihiilimurskaimen (Claudius Peters) sisäseinämiin ja jousikehtoon syntyy helposti säröjä murskauksen yh-  
teydessä sinkoilevista kivihiilipartikkeleista. [26]





- A Rohkohlen-Eintritt = Raw coal inlet  
 B Warmluft-Eintritt = Hot air inlet  
 C Staub-Luftgemisch-Austritt = Outlet of dustladen air  
 a Regelklappen zum Einstellen der Mahlfineinheit = Adjustable vanes to select fineness of grinding  
 b Windsichter = Air separator  
 c Mahlzone = Grinding area  
 d Hydraulische Druckvorrichtung = Hydraulic thruster  
 e Düsenring-Leitschaufel = Guide blade of nozzle ring  
 f Mühlengetriebe = Mill gear

Fig. 13.4. Peters-Mühle

Fig. 13.4. Peters-mill

### **Kuva 8:** Kivihillimyllyn piirrustukset [12]

Tarkastusvaiheessa voidaan hyödyntää NDT menetelmiä kuten tunkeumanestettä, magneettijauhetarkastusta tai ultraääntä. Kivihillimurskaimen tapauksessa myllyn sisäseinämät ja jousikehto värjättiin tunkeumanesteellä, jolloin korjausta vaativat säröt saadaan näkyviin. [26]

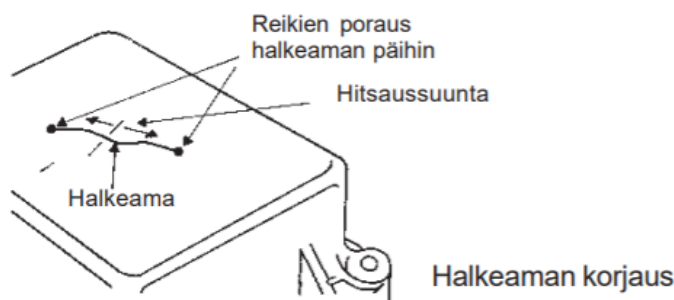


### **Kuva 9:** Värjätty särö kivihillimurskaimen sisäseinämässä (Lahtienergia kesäreviisio)

Tarkastusvaiheen jälkeen mahdollisten vaurioiden laatu arvioidaan ja mikäli ne päätetään korjata, on seuraavana vuorossa esityöstövaihe. Esityöstövaiheessa korjaushitsattava pinta valmistellaan korjaushitsausta varten. Tämä tarkoittaa pinnan ja sen lähiym-

päristön perustuksellista puhdistamista mahdollisten epäpuhtauksista johtuvien hitsausvirheiden ehkäisemiseksi. Epäpuhtaudet voidaan poistaa esimerkiksi rasvanpoistajalla ja pinnan kuivauksella. Mikäli kuivausta halutaan nopeuttaa, voidaan ylimääräinen rasvanpoistaja polttaa pois hitsausaumasta. [26]

Puhdistuksen lisäksi säröjen ydintymisestä syntyneet railot avataan esimerkiksi kulmahiomakoneella tai hiilitaltaamalla, jolloin hitsattavalle alueelle saadaan v-railo. Avauksen yhteydessä syntyneet terävät kulmat hiotaan pois uusien säröjen ydintymisen ehkäisemiseksi. Lisäksi railon päätyihin porataan pienet reiät, jolloin mahdollinen särön eteneminen pysäytetään. [28]



**Kuva 10:** Railon korjaushitsauksen esivalmistelut [28]

Esivalmistelun jälkeen voidaan aloittaa varsinainen korjaushitsaus. Halkeaman korjauksessa valuraudoilla hyödynnetään usein pufferihitsausta, jossa v-railon kylkiin päällehitataan perusmateriaalia sitkeämpi pufferikerros. Pufferihitsauksen ideana on estää hauraiden faasien syntymistä ja siirtää hitsin kutistumisesta johtuvat jännitykset sitkeään pufferikerrokseen, jolloin ne eivät vaikuta varsinaisen liitoshitsin hauraaseen muutosvyöhykkeeseen. Hitsausvaihe päättyy hitsatun sauman viimeistelyyn, jossa sen pinta tasoitetaan ja terävät kulmat hiotaan pois. [28]



Pufferikerros

Pufferikerros ja  
varsinainen liitoshitsi**Kuva 11: Pufferihitsaus [28]**

Hitsausvaiheessa on pyrittävä ehkäisemään mahdolliset hitsausvirheet, mitkä korjaushitsauksen yhteydessä ovat usein kuumahalkeilu sekä kylmähalkeilu eli vetymurtuma. Näiden ehkäisyssä on syytä tuntea korjaushitsattava teräs ja sen synnyttämät vaatimukset lämmöntonnielle ja jäähtymisajalle. Usein ongelmallisia teräksiä ovat runsashiiliset-, nuorutus-, työkalu-, jousi-, kulutus- sekä tuntemattomat teräkset. Korjaushitsauksen tapauksessa tuntemattomat teräkset ovat yleisin ongelma, koska tietoja teräslaadun koostumuksesta ei välttämättä ole saatavilla. Käytännössä kaikkia näitä teräksiä voidaan korjaushitsata ferriittisillä lisäaineilla, mikäli niille suoritetaan riittävä esilämmitys ja jälkilämpökäsittely, mutta jälkilämpökäsittelyä on harvemmin mahdollista suorittaa korjaushitsauksen yhteydessä. [28]

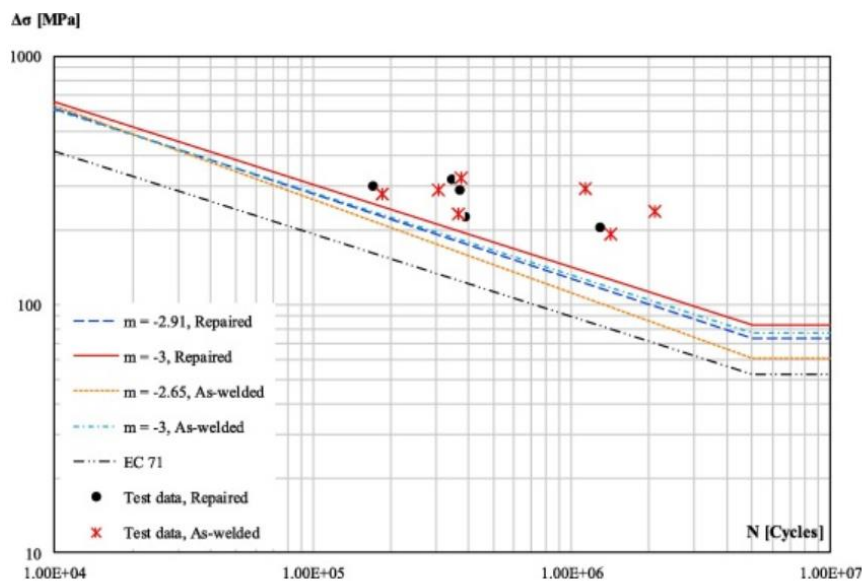
Lämpökäsittelyn sijaan korjaushitsauksessa voidaan hyödyntää austeniittisia tai nikkelipohjaisia lisäaineita, jolloin hitsauksen yhteydessä saumaan muodostuu austeniittia. Austeniitti on sitkeää, jolloin se kestää hitsin kutistumisen aiheuttamat jännitykset jäähtymisen aikana. Lisäksi vedyn liukoisuus austeniittiin on huomattavasti suurempi kuin ferriittiin, joten vety ei siirry hauraaseen muutosvyöhykkeeseen, jolloin mahdollinen kylmähalkeilu saadaan ehkäistyä. [17]

Hitausvaiheen jälkeen kohteelle suoritetaan jälkitarkastus. Jälkitarkastusvaiheen tarkoituksena on arvioida lopullisen hitsaussauman laatu ja tunnistaa mahdolliset siihen syntyneet hitsausvirheet. Kohteen vaativuuden mukaan jälkitarkastuksessa voidaan hyödyntää useita NDT menetelmiä (röntgen, ultraääni, tunkeumaneste). Mikäli virheitä löydytty, niiden laatu arvioidaan ja railo avataan uutta hitsausta varten. Kohteen vaativuus usein riippuu työskentelyalueesta ja sen vaatimuksista. Esimerkiksi ydinvoimalassa alku ja jälkitarkastusvaiheet vievät huomattavasti enemmän aikaa kuin varsinaisessa hitsausvaiheessa. [26]

### 4.3 Korjaushitsaukseen liittyvä tutkimus suurlujuusteräksille

Vaikka suurlujuusterästen hitsausta on tutkittu suhteellisen paljon, niin itse korjaushitsauksesta tietoa löytyy niukemmin. Esimerkiksi korjaushitsattujen suurlujuusteräsrakenteiden väsymiskestävyyttä on tutkittu. A. Akyel, M.H. Kolstein, sekä F.S.K. Bijlaard ovat joulukuussa 2017 julkaistussa tutkimuksessa selvittäneet kahden eri korjaushitsauspauksen väsymiskestävyyttä. Tutkimuksissa tarkasteltiin korjatun hitsaussauman väsymiskestävyyttä, sekä korjatun särön väsymiskestävyyttä. [18],[19]

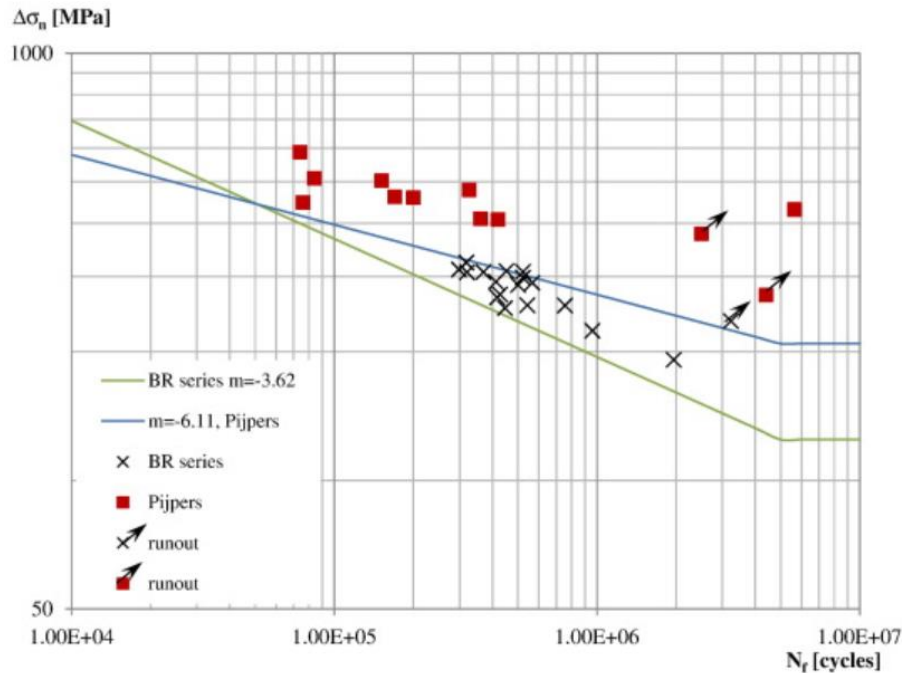
Korjatun sauman tutkimuksessa määriteltiin, että väsymiskuormituksessa vaurioituneelle hitsaussaumalle voidaan tehdä korjaushitsaus, joka eliminoi aikaisemman väsymishistorian. Näytekappaleet valmistettiin hitsaamalla v-liitoksella kaksi levyaihiota päistään yhteen. Testissä syntyneet säröt saatiin syntymään korjattuun hitsaussaumaan hyödyntämällä HiFIT-käsittelyä, joka kertoo sen vaikutuksesta eliminoida aikaisempi kuormitushistoria materiaalissa. Hifit-käsittelyssä hitsaussaumaa kuormitetaan paikallisesti korkeataajuuksisella iskukuormituksella, jolloin hitsauksessa syntyneet paikalliset jännityshuiput, kuten reunahaavat saadaan tasoitettua. Huomattiin myös, että hitsatun rakenteen väsymiskestävyyteen ei vaikuta korjaushitsauksen synnyttämän ylimääräiset lämpösyklit. [18]



**Kuva 12:** S-N käyrä, jossa verrataan korjattua hitsaussaumaa alkuperäiseen. [18]

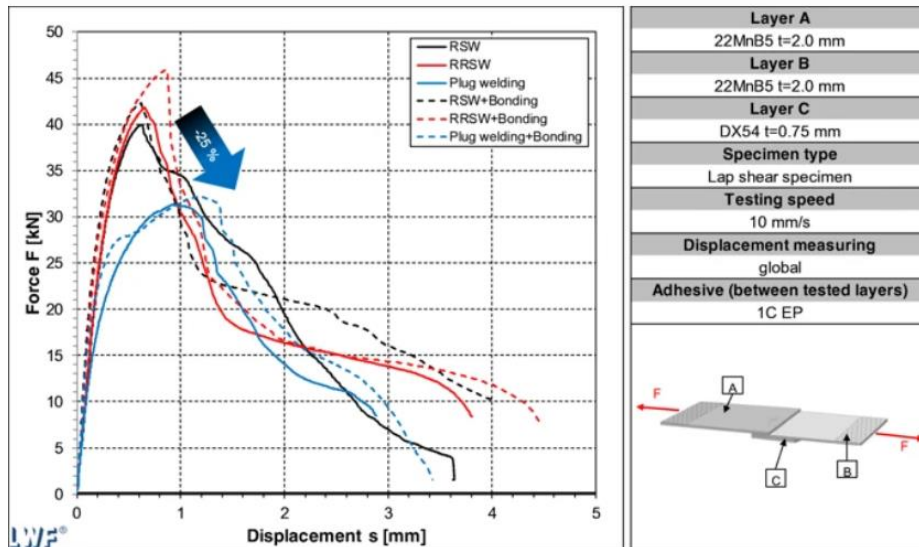
Särönkorjaustutkimuksessa huomattiin, että korjatun materiaalin väsymisominaisuudet ovat lähes samaa tasoa kuin koskemattomalla pohjamateriaalilla. Sen seurauksena voitiin myös päätellä, että korjaushitsauksen aiheuttamat mahdolliset haittavaikutukset materiaalin väsymiskestävyydelle ovat rajalliset. Päätelmien tukena oli testeissä huomattu ilmiö, jossa säröt muodostuivat poikkeuksellisesti vain korjaushitsaussauman kohdalle,

kun taas pohjamateriaalissa väsyminen alkoi näytteen reunoista. Huomattiin myös, että suurlujuusteräksillä on huomattavasti pidempi särön ydintymisaika, kuin matalamman lujuuden teräksillä. Lisäksi huomattiin esityöstön merkitys korjaushitsauksessa, sillä hitseissä, joissa päädyt oli hiottu särön ydintyminen oli siirtynyt lähemmäs näytteen keskistä. [19]



**Kuva 13:** S-N käyrä, jossa verrataan korjaushitsattua rakennetta (vihreä) alkuperäiseen (sininen). X pisteet ovat vihreän suoran muodostamiseen käytetyt mittapisteet. Punaiset neliot ovat alkuperäisen materiaalin väsytykskoikeissa saadut mittapisteet, joita on käytetty sinisen suoran muodostamiseen. [19]

Väsymisen lisäksi myös muita korjaushitsattujen rakenteiden mekaanisia ominaisuuksia on tutkittu esimerkiksi autoteollisuudessa. Tutkimuksessa tarkasteltiin korjattujen piste- ja tulppahitsien kestävyttä leikkaus- ja vetokuormituksissa. Havaittiin, että perinteisesti autoteollisuuden korjaushitsauksessa käytetty tulppahitsi heikensi rakenteen kestävyttä leikkauskuormituksessa merkittävästi. Vastaavanlaista ilmiötä ei havaittu, kun suoritettiin korjaushitsaus valmistavassakin hitsauksessa käytetyllä pistehitsauksella. Tämä saattaa selittyä esimerkiksi tulppahitsin aikaansaamilla dimensiomuutoksilla, jolloin sisäiset jännitykset kasvavat tai termisistä vaikutuksista, koska materiaalin havaittiin pehmenevän tulppahitsatulla rakenteella. [20]



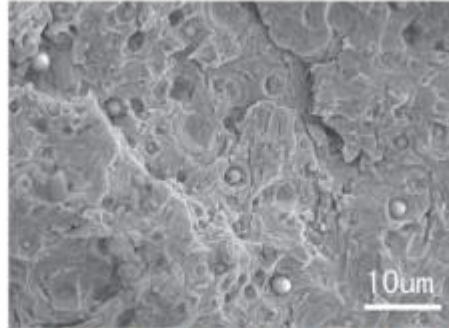
**Kuva 14:** Eri liitosmenetelmien käyttäytyminen leikkausrasituksessa. Mustalla käyrällä on alkuperäisen hitsin leikkausvoima, punaisella vastushitsillä korjattu näyte ja sinisellä tulppahitsillä korjattu näyte. Katkoviivalla merkityt näytteet ovat värien mukaiset mutta, menetelmän yhteydessä on myös adhesiivinen liimaliitos. [20]

Tutkimuksessa oli myös tutkittu hybridiliitoksen kestävyyttä lisäämällä liitokseen epoksia ennen varsinaista hitsausta. Tutkimuksessa korostuikin menetelmän valinta halutun lopputuloksen saamiseksi.

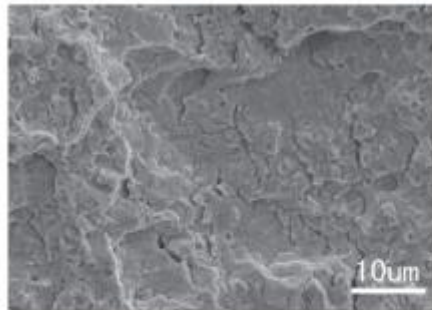
Pufferihitsin vaikutusta ja sen mekaanisia ominaisuuksia korjaushitsauksessa on tutkittu HSLA teräksille. Pufferihitsauksella tarkoitetaan alilujan hitsausaineen käyttöä korjatun railon alimmissa palkokerroksissa. 2012 huhtikuussa julkaistussa tutkimuksessa on vertailtu pohjamateriaalin, pelkällä lisäaineella korjatun ja pufferihitsauksella korjatun liitoksen mikrorakenteita, väsymiskestävyyttä ja kovuutta. Tutkimuksessa selvitettiin myös pufferikerroksen paksuuden vaikutuksia hitsausaumalle vertaamalla 4 mm ja 10 mm pufferikerroksia. [31]

Alkuperäisenä materiaalina mittauksissa käytettiin HSLA terästä, jonka mikrorakenne koostui ferriitistä, bainiitista ja perliitistä. Ilman pufferikerrosta perliitin ja bainiitin määrä väheni merkittävästi korjaussaumassa ja tilalle muodostui laatikkomaista ferriittiä. Tämän havaittiin heikentävän materiaalin kovuutta ja väsymisominaisuuksia. Ferriitin määrä kasvoi palkomäärän kasvaessa viitaten mikrorakenteen päästymiseen. Korjauksissa, jossa hyödynnettiin 4 mm pufferikerrosta havaittiin säleferriittiä, granulaarista ferriittiä, bainiittiä, perliittiä ja hieman laatikkomaista ferriittiä. Tällä pufferikerroksella havaittiin parhaimmat väsymis ja kovuusominaisuudet, jotka saavutettiin hitsauksessa muodostuneella säleferriitillä, joka pienensi lämpövaikutusalueen raekokoa ja vähensi laatik-

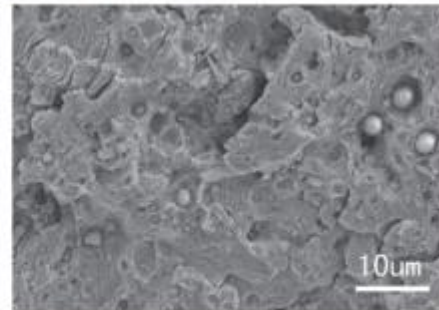
komaisen ferriitin määrää. 10 mm pufferikerroksella havaittiin jälleen laatikkomaista ferriittiä ja hieman perliittiä lämpövaikutusalueella ja sen väsymis ja kovuusominaisuudet olivat 4 mm kerrosta huonommat. [31]



(a) MPM region of Weld-repaired HSLA without BL



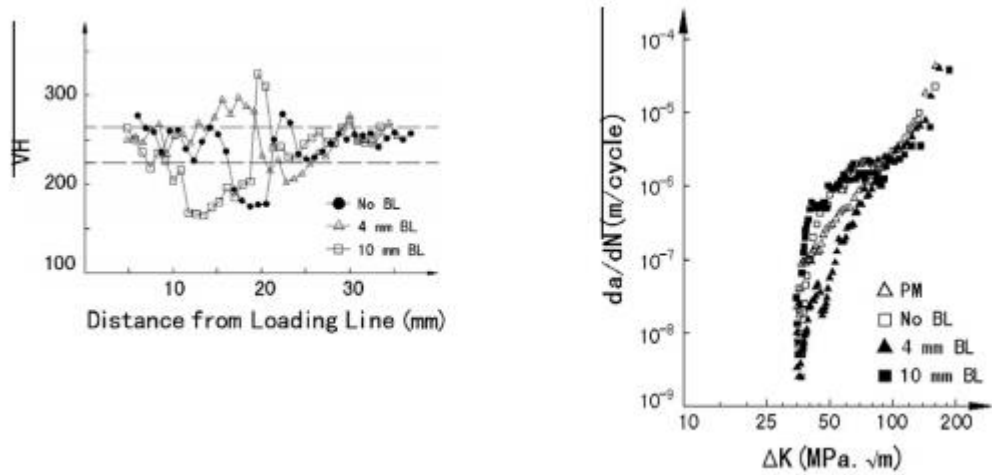
(b) BL+MPM region of Weld-repaired HSLA with 4 mm BL



(c) BL+MPM region of Weld-repaired HSLA with 10 mm BL

**Kuva 15** SEM kuvat eri menetelmillä korjatuista näytteistä a) on pelkällä lisäaineella korjattu sauma, b) 4 mm pufferikerroksella ja c) 10 mm pufferikerroksella korjattu sauma. MPM (melted parent material) tarkoittaa sulatettua pohjamateriaalia ja BL (Buffer layer) pufferikerrosta. [31]

Kuvasta 15 havaitaan pallomaisia epämetallipartikkeleja tapauksissa a) ja c), jotka heikensivät rakenteen väsymiskestävyyttä. Heikentyminen johtuu pallomaisten partikkelien aiheuttamista paikallisista jännityskeskittymistä.



**Kuva 16** Kolmen eri menetelmän kovuustarkastelu (vasemmalla) ja Parisin väsymiskäyrät. (oikealla) [31]

Kovuustarkastelusta huomataan, että pelkällä hitsauslisäaineella ja liian paksulla pufferikerroksella saatiin aikaan selkeä kovuuden alentuminen lämpövaikutusalueella. Aaleneman syyksi pääteltiin laatikkomaisen ferriitin muodostuminen. Vastaavaa mikrorakennetta ei löydetty ohuemmalla pufferikerroksella, jolla oli myös kaikista tasaisin kovuusprofiili. Väsymiskäyristä huomataan, että 4 mm pufferikerros osoittautui väsymiskestävyydeltään parhaimmaksi. [31]

Tutkimuksessa saatiin selville, että pehmeä pufferikerros ennen varsinaista hitsiä parantaa liitoksen väsymiskestävyyttä ja kovuutta, mutta liiallisissa määrin se myös heikentää rakenteen lujuutta, koska pufferikerros on perusainetta pehmeämpää. [31]



## 5. YHTEENVETO

Suurlujuusterästen käytön yleistyessä syntyy myös tarve niiden korjaushitsaamiselle. Tässä kandidaatintyössä havaittiin, että suurlujuusterästen hitsaus vaatii huomattavasti pohjatietämystä materiaalin ominaisuuksista ja teräksen mikrorakenteesta. Korjaushitsauksessa on myös huomioitava, että esimerkiksi moderneja lasermenetelmiä tai suuria hitsauslaitteistoja ei aina saada työskentelypaikalle ja esimerkiksi jälkilämpökäsittelyn mahdollisuutta ei aina ole. Tämä asettaa lisää vaatimuksia hitsaajan ammattitaidolle. Yleisimmät rakenteelliset virheet korjaushitsausprosessissa ovat kuuma- ja kylmähalkeilu.

Ensimmäistä tutkimuskysymystä käsitellessä havaittiin, että korjaushitsaus on suurlujuusteräksille mahdollista ja tarpeen vaatiessa hyödyllistä. Suurlujuusteräksiä korjattaessa on kuitenkin oltava tarkka hitsattavasta materiaalista ja sen termodynaamisesta käyttäytymisestä hitsausprosessin aikana. Pelkästään mekaanisten ominaisuuksien tunteminen ei tässä tapauksessa riitä, vaan teräksen koostumus sekä mikrorakenne on tunnettava riittävällä tasolla. Esimerkiksi HSLA-terästen tarkassa valmistusprosessissa saavutettu pieni raekoko on erittäin herkkä lämpömuutoksille, vaikka seosaineita onkin huomattavan vähän ja hiilipitoisuuden puolesta se on hyvinkin helposti hitsattavaa. Mikrorakennemuutosten lisäksi korjaushitsauksessa syntyy myös jäännösjännityksiä korjattavalle alueelle, joita ei välttämättä voida poistaa materiaalista hehkuttamalla. Pahimassa tapauksessa korjattuun kohteeseen syntyy rakennetta heikentäviä faaseja, jotka käytännössä mitätöivät korjauksen aiheuttaman hyödyn. Hitsauksen onnistuvuutta voidaan esimerkiksi ennustaa menetelmäkokeilla, jossa korjattavan materiaalin referenssikappaletta altistetaan useille hitsausmenetelmille ja lisäaineille lämmöntuontia ja jäähtymisaikaa muuttaen ennen varsinaista korjaushitsausta. Tällöin saadaan tietoa korjaushitsaukselle suotuisista menetelmistä ja hitsausparametreista, joita voidaan hyödyntää sitten varsinaisessa korjauksessa.

Toiseen tutkimuskysymykseen saatiin vastauksia ainakin väsymiskestävyyden saralta. Tutkimusten perusteella korjaushitsattu suurlujuusteräs kestää syklistä kuormitusta lähes samalla tasolla kuin alkuperäinenkin materiaali. Väsymisen aiheuttamat murtumat ja niistä syntyvät kustannukset ovat nykypäivän koneenrakennus- sekä rakennustekniikan suurimpia ongelmakohtia, koska rakenteen mitoittaminen sykliselle kuormitukselle on haastavaa. Korjaushitsausmenetelmänä pufferihitsaus on suhteellisen hyödyllinen väsymiskestävyyden parantamiseksi, mutta liiallisissa määrin se heikentää rakenteen mekaanisia ominaisuuksia.

## LÄHTEET

- [1] Kivivuori, S. (2016). Lämpökäsittelyoppi. / 2, Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille, Teknologiainfo Teknova Oy, Helsinki, 320 sivua p.
- [2] Porter, D.A., Easterling, K.E. & Sherif, M. (2008). Phase transformations in metals and alloys, 3rd ed ed. CRC ; Taylor & Francis [distributor], Boca Raton, Fla : London
- [3] <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
- [4] Pirinen, M. (2013). The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures, 543 p.
- [5] <http://www.calphad.com/iron-carbon.html>
- [6] Lund, H. (2006). Characteristics of welding of high strength steels, 55 p.
- [7] P. Salami, ... M.K. Besharati Givi, in Advances in Friction-Stir Welding and Processing, 2014
- [8] Krzysztof Madej, Robert Jachym Welding of High Strength Toughened Structural Steel S960QL
- [9] Hitsaustietoa, esabin osaamiskeskus, puikkohitsaus.  
<https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/puikkohitsaus.cfm>
- [10] Hitsaustietoa, esabin osaamiskeskus, täytelankahitsaus.  
<https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/taytelankahitsaus.cfm>
- [11] Hitsaustietoa, esabin osaamiskeskus, tig-hitsaus.  
<https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/tig-hitsaus.cfm>
- [12] <https://www.cementequipment.org/home/cement-grinding-system/roller-mills/>
- [13] [https://www.weldersuniverse.com/welding\\_parameters.html](https://www.weldersuniverse.com/welding_parameters.html)
- [14] Ruukki. 2014. Kuumavalssatut teräslevyt- ja kelat hitsaus yleistietoa 14 p. Available: <https://docplayer.fi/6290908-Www-ruukki-fi-hitsaus-yleistietoa-kuumavalssatut-teraslevyt-ja-kelat.html>
- [15] SSAB. 2018. Welding of Strenx 20 p. Available: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/strenx/ssab-strenx-welding-brochure-2018.pdf?m=20180509143920>
- [16] Masubuchi, K. & Umekuni, A. 1997. Usefulness of undermatched welds for high-strength steels. Welding research supplement, 1997: July. P. 256–263.
- [17] [https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/hitsien\\_laatu\\_ja\\_hitsausvirheet.pdf](https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf)
- [18] Fatigue strength of repaired welded connections made of very high strength steels (2018). in: Engineering Structures, pp. 28-40.

- [19] Fatigue strength of repaired cracks in base material of high strength steels (2017). in: Journal of Constructional Steel Research, pp. 374-384.
- [20] Ditter, J., Wünsche, M., Meschut, G. et al. Mechanical properties of repair welded joints for automobile body structures. Weld World 63, 237–247 (2019).
- [21] [https://www.beltfurnaces.com/doc/Engine\\_Valve\\_white\\_paper.pdf](https://www.beltfurnaces.com/doc/Engine_Valve_white_paper.pdf)
- [22] Vähäkainu, O. (2003) Hitsaajan opas: Rautaruukin teräkset.
- [23] Kou, S. (2002). Welding Metallurgy
- [24] <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/filler-metal-facts>
- [25] M. Bachmann, A. Gumenyuk, M. Rethmeier, Welding with High-power Lasers: Trends and Developments Physics Procedia, Volume 83, 2016, Pages 15-25.
- [26] Total materia tietokanta, Procedures for repair welding and surfacing, jun 2004. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=130>
- [27] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/automationrobotics/robotic-welding-issues-and-challenges>
- [28] [https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/korjaushitsaus\\_hitsausohjeita.pdf](https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/korjaushitsaus_hitsausohjeita.pdf)
- [29] Metallurgy for welders: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/metalsmaterials/metallurgy-for-welders>
- [30] Welding Flux: A shielding agent between two materials: <https://interestingengineering.com/welding-flux-a-shielding-agent-between-two-materials>
- [31] C. Zhang, X. Song, P. Lu, X. Hu, Effect of microstructure on mechanical properties in weld-repaired high strength low alloy steel, April 2012 10 p.
- [32] What are the root causes of wear in industrial machinery. <https://www.hansfordsensors.com/blog/2016/08/30/what-are-the-root-causes-of-wear-in-industrial-machinery/>
- [33] P.Salami, T. Khandani, P.Asadi, M.K. Besharati Givi, Advances in friction-Stir Welding and Processing, Friction stir welding/processing as a repair welding, December 2014.