

## **Suurlujuusterästen jauhekaarihitsaus**

Konetekniikka  
Kandidaatintutkielma

Frans Salminen

6.5.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu  
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

**Tutkinto-ohjelma, oppiaine:** Konetekniikka

**Tekijä:** Frans Salminen

**Otsikko:** Suurlujuusterästen jauhekaarihitsaus

**Ohjaaja:** Yliopisto-opettaja Timo Kemppainen

**Sivumäärä:** 28 sivua

**Päivämäärä:** 6.5.2026

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, miten suurlujuusterästen jauhekaarihitsaus eroaa normaalilujien rakenneterästen jauhekaarihitsauksesta. Tämän selvittämiseksi tehtiin kirjallisuuskatsaus, jossa selvitettiin teräksen lujuuden vaikutusta hitsattavuuteen sekä lämmöntuontiin. Työssä käydään myös läpi jauhekaarihitsauksen sekä suurlujuusterästen perusteet.

Suurlujuusteräs on laaja käsite, jota ei ole tarkkaan määritelty. Työssä tarkastellaan erityisesti HSLA-teräs laatua. Suurlujuusteräokset kehittyvät jatkuvasti ja tutkielmassa käsitellään lujempiakin teräksiä, joita tullaan käyttämään tulevaisuudessa entistä enemmän. Jauhekaarihitsauksella saavutetaan suuri hitsausaineentuotto, jonka takia jauhekaarihitsaus on erittäin tehokas tapa hitsata suurlujuusteräksiä. Suurlujuusteräksiä hitsatessa on kuitenkin myös haasteita, joita käsitellään tässä tutkielmassa.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksien mukaan suurlujuusterästen hitsaaminen jauhekaarella on haasteellisempaa verrattuna normaalilujisiin rakenneteräksiin. Suurlujuusteräksiä hitsatessa täytyy hitsausparametrien kanssa olla todella tarkkana. Pienetkin poikkeumat parametreissa vaikuttavat huomattavasti lämmöntuontiin. Lämmöntuonnilla on suuret vaikutukset muutosvyöhykkeen pehmenemiseen, minkä vaikutukset näkyvät hitsausliitosten lujuudessa.

Tutkielman tulokset osoittavat onnistuneen hitsausprosessin vaativan jäähtymisajan  $t_{8/5}$  tarkkaa hallintaa toivotun mikrorakenteen säilyttämiseksi, sekä hitsausjauheen huolellista valintaa vetyhalkeamariskin minimoimiseksi.

**Avainsanat:** jauhekaarihitsaus, suurlujuusteräs

## **Sisällysluettelo**

<b>Merkinnät ja lyhenteet</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Jauhekaarihitsaus</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Hitsausaineet</b>	<b>10</b>
2.1.1 Hitsausjauheet	11
2.1.2 Hitsauslangat	12
2.1.3 Metallijauheet	13
2.1.4 Hitsausnauhat	13
<b>2.2 Hitsausparametrit</b>	<b>13</b>
2.2.1 Hitsausvirta	14
2.2.2 Kaarijännite	15
2.2.3 Hitsausnopeus	15
2.2.4 Hitsausenergia	15
2.2.5 Vapaalangan pituus	16
2.2.6 Napaisuus	16
<b>2.3 Lämmöntuonti ja jäähtyminen</b>	<b>17</b>
<b>3 Teräkset</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Suurlujuusteräket</b>	<b>18</b>
<b>3.2 HSLA-teräket</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Offshore-teräket</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Ultralujat teräket</b>	<b>20</b>
<b>4 Suurlujuusterästen hitsaus</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Hitsausvirheet</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Suurlujuusterästen hitsattavuus</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Suurlujuusteräksiä hitsatessa käytettävät lisäaineet</b>	<b>23</b>
<b>4.4 Metallurgia</b>	<b>23</b>
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>25</b>
<b>Lähteet</b>	<b>27</b>

## **Merkinnät ja lyhenteet**

E	Hitsausenergia
H	lämmöntuonti hitsiin (kJ/mm <sup>2</sup> )
I	Virta (A)
S	Hitsausnopeus (mm/min)
V	jännite (V)
v	Hitsaus nopeus (mm/s)
μ	terminen hyötysuhde
t <sub>8/5</sub>	Jäähdytysaika 800 °C-500 °C
AC	Alternating Current, vaihtovirta
AHSS	Advanced High Strength Steel, kehittyneisyuurlojuusteräs
BI	Basicity Index, emäksisyysindeksi
CGHAZ	Coarse Grained Heat Affected Zone, karkearakeinen muutosvyöhyke
DCEN	Direct Current Electrode Negative, tasavirta (elektrodi negatiivinen)
DCEP	Direct Current Electrode Positive, tasavirta (elektrodi positiivinen)
QT	Quenched and Tempered, nuorutus
HAZ	Heat affective Zone, muutosvyöhyke
SAW	Submerged Arc Welding, jauhekaarihitsaus
HSLA	High Strength Low Alloy steel, matalaseosteinen suurlujuusteräs
HSS	High Strength Steel, suurlujuusteräs
ICCGHAZ	Intercritically Reheated Coarse Grained Heat Affected Zone, interkriittisesti uudelleenlämmennyt karkearakeinen muutosvyöhyke

ICHAZ	Intercritical Heat Affected Zone, osittain austenoitunut muutosvyöhyke
TCMP	Thermo-Mechanical Controlled Processing, termomekaaninen valssaus
UHSS	Ultra High Strength Steel, ultralujuusteräs

## 1 Johdanto

Konepaja- ja teräsrakenneteollisuus pyrkii jatkuvasti parantamaan rakenteiden keveyttä, kestävyyttä ja energiatehokkuutta. Keskiössä tässä kehityksessä ovat suurlujuusteräkset, joiden avulla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä painossa tinkimättä rakenteiden kantokyvystä. Erityisesti offshore-, kuljetusväline- ja telakkateollisuudessa suurlujuusterästen käyttö on vakiintunut menetelmäksi optimoida materiaalikustannuksia ja pienentää lopputuotteen hiilijalanjälkeä. [1]

Materiaalien lujuuden kasvaessa haasteeksi muodostuu niiden hitsattavuus ja liitosten mekaaniset ominaisuudet. Suurlujuusterästen hitsaus vaatii tarkkaa lämmöntonin hallintaa, jotta teräksen valmistusprosessissa saavutetut mikrorakenteet eivät heikkene hitsauksen muutosvyöhykkeellä (HAZ). Erityisesti offshore- ja telakkateollisuudessa teräsrakenteiden liitoksilta ei ainoastaan vaadita suurta lujuutta, vaan myös suurta iskusitkeyttä matalissa lämpötiloissa. [1]

Jauhekaarihitsaus on yksi käytetyimmistä hitsausmenetelmistä pitkien ja massiivisten liitosten valmistuksessa. Menetelmän suurimpia vahvuuksia ovat suuri tuottavuus, hyvä hitsin laatu ja prosessin vakaus. Prosessin vakaus johtuu jauheen alla palavasta valokaaresta, jonka seurauksena hitsausprosessi on myös turvallinen.

Jauhekaarihitsaus on hyvin perinteinen menetelmä, mutta terästen kehittyminen yhä lujemmiksi pakottaa myös jauhekaarihitausprosessin kehittämistä. Sen soveltaminen uusille yhä lujemmille teräksille vaatii syvällistä ymmärrystä, keskeisten hitsausparametrien sekä lisäaineiden vaikutuksesta hitsin mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. [2]

Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella suurlujuusterästen jauhekaarihitsauksen erityispiirteitä ja haasteita. Työssä syvennytään jauhekaarihitsausprosessiin sekä siinä käytettäviin hitsauslisäaineisiin ja keskeisten hitsausparametrien vaikutukseen hitsin laatutekijöihin. Lisäksi tutkielmassa käsitellään eri suurlujuusteräslajien, kuten offshore- ja HSLA-terästen, hitsattavuutta sekä suurlujuusteräksissä tapahtuvia metallurgisia muutoksia. Työn tavoitteena on antaa kokonaisvaltainen kuva siitä, miten jauhekaarihitsauksella voidaan hitsata vaativia suurlujuusteräsrakenteita varmistaen liitosten kestävyys haastavissakin olosuhteissa.

Tekoälytyökalua (Google Gemini) on hyödynnetty tämän tutkielman tekemisessä kielen huollon tukena, kääntämisen tukena sekä otsikkovaihtoehtojen ideointiin.

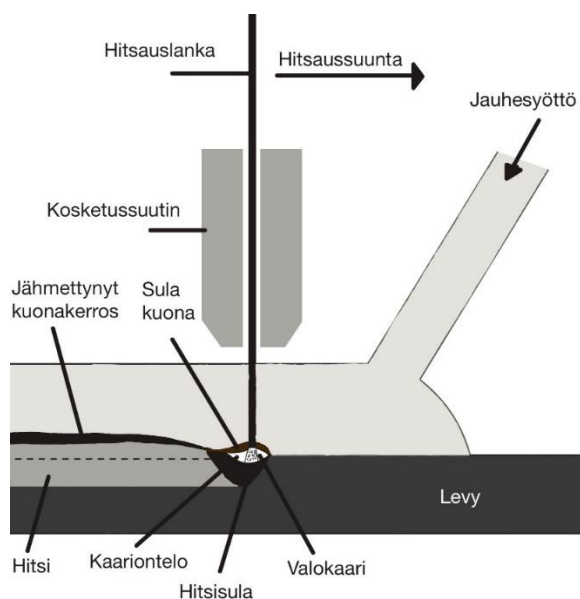
## 2 Jauhekaarihitsaus

Jauhekaarihitsaus (SAW) on yleensä mekanisoitu metallikaarihitsausmenetelmä, jossa hitsaustapahtuma on suojattu ympäröivältä ilmalta hitsausjauheen avulla.

Hitsaustapahtuman aikana valokaari palaa työkappaleen ja hitsauslangan välillä hitsausjauheen alla. Hitsausjauheesta osa sulaa hitsin päälle, mikä jähmettyessään muuttuu kiinteäksi kuonakerrokseksi. Valokaari ei ole jauhekaarihitsauksessa näkyvä, kuten monissa muissa valokaarella toimivissa hitsausprosesseissa. Valokaaren palaessa hitsausjauheen peitossa työympäristön turvallisuus on parempi verrattuna muihin prosesseihin. [2]

Hitsausprosessi aloitetaan aina valokaaren sytytyksellä. Jauhekaarihitsauksessa sytytystapoja on monia. Yleisin tapa sytyttää valokaari on ns. raapaisu-sytytys, jossa hitsauslankaa tai hitsausnauhaa syötetään ja samalla hitsauslaite laitetaan hitaasti liikkeelle. Laitteen liikkeessä hitsauslanka alkaa raapimaan työkappaleen pintaa osuessaan siihen. Tällöin valokaari syttyy ja halutut parametrit aktivoituvat. Sytytys voidaan suorittaa myös villatupon avulla, joka asetellaan työkappaleen ja langanpään väliin. Tuppo höyrystyy ja hehkuu virran kytkeytyessä, minkä seurauksena valokaari syttyy. [2]

Jauhekaarihitsauksessa käytetään lisäainelankaa, joka syötetään langansyöttölaitteen avulla. Langansyöttölaite syöttää lankaa valokaareen kosketussuuttimen läpi. Kosketussuuttimessa hitsausvirta myös johdetaan hitsauslankaan. Kosketussuutin on vapaalangan yläpuolella. Vapaalangan suositeltuna pituutena jauhekaarihitsauksessa pidetään 20–40 mm. Jauhekaarihitsauksessa käytetään myös hitsausjauhetta, josta tulee myös nimi jauhekaarihitsaus. Jauhetta syötetään jauhesäiliöstä jauhesuppiloon syöttöputken avulla. Suppilosta jauhetta syötetään hitsauslangan ympärille. Kuvassa 1 on esitetty jauhekaarihitsausprosessia. [2]



Kuva 1: Lämpileikkaus hitsaustapahtumasta, muokattu [2].

Yleisesti käytetyissä sovelluksissa työliike on mekanisoitu, mutta ei automatisoitu. Hitsausliikettä voi tehdä joko työkalu tai hitsauslaite. Eri sovellusten mukaan hitsauslaite voi olla kiinni hitsaustornin puomissa tai palkilla kulkevassa vaunussa. Hitsauslaite voi kulkea levyn päällä niin sanotussa jauhekaarihitsaustraktorissa eli omassa kulkuvaunussa. Usein hitsauslaitteisto on paikallaan ja työkalua liikutetaan esim. pyörityspöydän tai pyöritysrullaston avulla. [2]

Jauhekaarihitsaus on todella tehokkaana pidetty kaarihitsausprosessi. Kaikista lisäaineista jauhekaarihitsauksen lisäaineita käytetään noin 5–10 %. Yleisimpiä käyttökohteita jauhekaarihitsausprosessille ovat erilaiset hitsaamalla valmistettavat palkit, säiliöt sekä paksuseinäiset putket, myös telakalla käytetään jauhekaarihitsausta mm. levyjen päittäisliitoksiin sekä jäykkääjien pienaliitoksiin [2]. Se on myös tehokas ja nopea prosessi arktisten rakenteiden vaatimien tiukkojen lujuuskriteerien ja paksujen levyjen hitsaamisessa [1]. Jauhekaarihitsauksen asentorajoitteet ovat suurimmat rajoitteet hitsatessa. Sillä irtonaisen jauheen sekä suuren hitsisulan määrän takia se soveltuu yleensä ainoastaan jalkopienä ja alapienä asentoihin. Jauhekaarihitsauksella ei ole mahdollista hitsata läpi yhdeltä puolelta ilman juuritukea. Yhdeltä puolelta

läpihitsausta juurituen avulla käytetään usein telakoilla. Telakoilla on yleistä käyttää myös monilankaprosesseja yhdeltä puolelta hitsattaessa [2].

Tandem-hitsaus on yleinen tapa lisätä hitsin tuottavuutta. Se on tehokkaampaa verrattuna yhdellä langalla hitsaamiseen. Kahdesta eri virtalähteestä ja langansyöttölaitteesta muodostuva yhdistelmä, jossa valokaaret voivat palaa omassa tai samassa kaariontelossa saman kuonakerroksen alla [2]. Yleisesti etummaisessa virtalähteessä käytetään tasavirtaa ja toisessa virtalähteessä pulssitettua vaihtovirtaa. Tandem hitsauksessa haasteita luovat useammat parametrit kuten pulssien kestot sekä kahden hitsauslangan välinen etäisyys [3].

Kaksoislankahitsauksessa hitsausvirta johdetaan molemmille langoille samasta virtalähteestä. Langansyöttölaite on myös erilainen verrattuna normaaliin, sillä sama langansyöttölaite syöttää molempia lankoja kaksireikäisen kosketussuuttimen läpi. Kaksoislankahitsauksessa käytetään usein ohuempia lankoja verrattuna normaaliin jauhekaarhitsaukseen sekä tandem-hitsaukseen. Kaksoislankahitsauksessa langat ovat hyvin lähekkäin noin 4–8 mm:n päässä toisistaan. Lankojen ollessa ohuita, saavutetaan suurempi virtatiheys ( $A/mm^2$ ). Yhdellä langalla hitsatessa saavutetaan esimerkiksi 600 A virralla ja 4 mm:n langalla  $48 A/mm^2$  virtatiheys ja kaksoislangalla lankojen ollessa 2 mm, samalla virralla saavutetaan  $95 A/mm^2$  virtatiheys. Ohuet langat sulavat nopeammin, jolloin hitsiaineentuotto on noin 20–40 % suurempi kuin yhdellä langalla hitsatessa. Kaksoislankahitsaus soveltuu parhaiten suurella nopeudella pienten alapienahitsien hitsaukseen. [2]

## 2.1 Hitsausaineet

Hitsausaineita on jauhekaarhitsauksessa useita. Yleisimpiä ovat hitsauslisäaine eli hitsauslanka sekä hitsausjauhe. Hitsauksessa voidaan käyttää myös metallijauhetta tai hitsausnauhaa. Aineiden valinnassa tärkeintä on huomioida langan ja jauheen yhdistelmä sekä niiden soveltuvuus hitsattavaan teräkseen. Hitsausaineilla on suuri vaikutus hitsin onnistumiseen, joten niiden valitseminen oikein on tärkeää. [2]

### 2.1.1 Hitsausjauheet

Hitsausjauheita on useita erilaisia ja kaikkiin kohteisiin ei ole olemassa yhtä tiettyä ja erinomaisesti soveltuvaa jauhetta. Eri kohteisiin tarvitaan erilaisia jauheita ja jauheen valintaan vaikuttaa myös käytettävä lanka tai nauha [2]. Taulukossa 1 on esitetty hitsausjauheen tehtäviä.

Taulukko 1

Hitsaus jauheen tehtävät

valokaaren suojaaminen ympäröivältä ilmalta
valokaaren vakavoittaminen
parantaa syttymistä
seostaa hitsiainetta seosaineilla
kaaritilan ionisointi
huokosten syntymisen ehkäisy [1].

Jauheet luokitellaan valmistustavan perusteella kolmeen eri tyyppiin sulatetut, agglomeroidut sekä kahden edellä mainitun sekoitus [4]. Yleisimmin käytetty jauhetyyppi on agglomeroitu jauhe. Sen nimi juontaa juurensa valmistustavasta, jossa hienojakoiset mineraalit ja seosaineet sekoitetaan nestemäisen sidosaineen kanssa [1]. Agglomeroidut jauheet valmistetaan sekoittamalla jauheet kuivina ja sitomalla ne kalium- tai natriumsilikaattiliuoksilla yhteen. Tämän jälkeen agglomeroitu seos rakeistetaan, kuivataan alle 750 °C:een lämpötilassa, murskataan ja seulotaan. Näiden jauheiden valmistus vaatii muita valmistustapoja vähemmän energiaa [5].

Hitsausjauheita on erilaisille lanka ja jauhe yhdistelmiin sekä eri käyttötarkoituksiin useita. Jokainen jauhe omaa omat ominaisuutensa. Jauheiden valmistusmateriaali vaikuttaa paljon niiden ominaisuuksiin. Jauheissa käytetään raaka-aineena pääasiassa erilaisia emäksiä sekä oksideja [1]. Luokittelu jauheiden välillä voidaan tehdä myös seosaineiden perusteella. Tällöin jauheet jaetaan neutraaleihin, aktiivisiin sekä seostaviin jauheisiin. Neutraaleita jauheita käytetään usein monipalkohitsaukseen rajoittamattomilla levynpaksuuksilla. Ne eivät muuta merkittävästi hitsin koostumusta, mikä takaa tasaisen laadun. Neutraaleissa jauheissa käytetään usein seosaineina piitä

sekä mangaania. Aktiiviset jauheet on suunniteltu lisäämään hitsin deoksidantteja, kuten sinkkiä ja mangaania. Ne parantavat erityisesti hitsin ulkonäköä ja huokoisuuden kestoa. Aktiivisia jauheita voidaan käyttää yhdellä palolla hitsatessa sekä monipalkohitsauksessa. Seostavia jauheita käytetään erityisesti pinnoitushitsauksessa. Niiden avulla lisätään mm. hiiltä, kromia, piitä sekä mangaania hitsiin. Seostavia jauheita käytettäessä kaarijännitteen hallinta on erityisen tärkeää [4].

Jauheet voidaan jakaa myös niiden emäksisyyden mukaan. Tällöin happamat jauheet luokitellaan Emäksisyysindeksissä (BI)  $< 1,0$ . Happamilla jauheilla on erinomainen hitsattavuus, mutta huono iskutkeys matalissa lämpötiloissa. Neutraalit jauheet luokitellaan BI  $1,0-1,5$ . Neutraalit jauheet ovat hyvä kompromissi hitsattavuuden ja sitkeyden välillä. Emäksiset jauheet luokitellaan BI  $> 1,5$ . Näillä jauheilla on matala happipitoisuus, mikä takaa hyvän iskutkeyden ja särönkestävyyden [4]. Suurempi emäksisyys johtaa kuitenkin juoksevampaan kuonaan ja siten jauheen alhaisempaan virrankantokykyyn, mikä vaikuttaa tuottavuuteen. Tämän seurauksena tulisi käyttää mahdollisimman alhaisen emäksisyyden jauheita, joilla kuitenkin saavutettaisiin vaaditut iskutkeysarvot [1].

### 2.1.2 Hitsauslangat

Hitsauslanka on käytetyin lisäaine jauhekaarihitsauksessa. Langansyöttölaite syöttää hitsauslankaa valokaareen kosketussuuttimen läpi. Hitsauslankojen käytetyimmät halkaisijat ovat 2 mm ja 6 mm välissä. Hitsauslankoja on umpi- ja täytelankoja. Täytelankojen käyttö on kuitenkin vähäistä. Useat niukkaseosteiset sekä seostamattomat langat ovat kuparoituja [2]. Hitsauslangoille ja lanka-jauheyhdistelmille on oma standardinsa SFS-EN ISO 14171 [6]. Standardi luokittelee langat kemiallisten koostumusten mukaan, sekä myös lanka- ja jauheyhdistelmät niiden tuottaman hitsiaineen mekaanisten ominaisuuksien perusteella. Jauhekaarihitsauksessa käytettävien lankojen kirjain tunnus on S. Käytetyin laatu seostamattomien terästen hitsauksessa Suomessa on S1 [2].

Hitsauslangan merkitys hitsausprosessissa on iso. Langan halkaisija sekä tyyppi ovat tärkeimpiä muuttujia hitsausprosessissa. Langan halkaisijan kasvaessa hitsipalko

levenee ja tunkeumasyvyyks pienenee. Suuri halkaisija hitsauslankoja käytetään usein nostamaan sulamistehoa. [1]

### 2.1.3 Metallijauheet

Hitsiaineentuottoa jauhekaarihitsauksessa voidaan kasvattaa metallijauheen avulla. Metallijauheen syöttämisen railoon voi tehdä kahdella eri tavalla, jauhe voidaan syöttää railoon ennen hitsauspäätä tai hitsauspään ympärille. Jauhetta syötettäessä hitsauspään ympärille kulkeutuu se railoon tarttumalla magneettisesti lankaan. Metallijauhetta käytettäessä tarvitaan erillinen lisävarusteena saatava syöttölaite. Jauhekaarihitsauksessa metallijauhetta voidaan käyttää, koska kaarienergia riittää sulattamaan kylmän lisäaineen. Hitsin tunkeuma pienenee metallijauhetta käytettäessä, sillä osa hitsausenergiasta menee metallijauheen sulattamiseen. [2]

### 2.1.4 Hitsausnauhat

Hitsausnauhoilla hitsatessa ei käytetä hitsauslankaa ollenkaan. Hitsauslanka korvataan nauhalla, ja prosessi voidaan toteuttaa samalla laitteistolla. Ainoastaan lankahitsauspää tarvitaan lisävarusteena laitteistoon, kun hitsataan nauhalla langan sijasta. Hitsausnauhalla hitsaaminen eroaa langalla hitsaamisesta, sillä valokaari liikkuu edestakaisin nauhan reunasta reunaan, eikä pala samassa kohdassa koko aikaa. Yleisin nauhan koko on 0,5 x 60 mm. Nauhahitsausta käytetään usein terästen päällehitsaukseen. Näin voidaan mm. estää korroosiota, käyttämällä korroosion kestävä lisäainetta. Etuina nauhalla hitsatessa on pienempi ja tasaisempi tunkeuma, pienempi sekoittuminen, tasaisempi ja sileämpi pinta sekä suurempi hitsiaineentuotto. [2]

## 2.2 Hitsausparametrit

Jauhekaarihitsauksessa on monia prosessiparametreja. Hitsauslisäaineet ja hitsausapuaineet ovat tietysti tärkeitä, ja prosessiparametrit myös muokataan aina näihin sopiviksi. Keskeisimmät prosessiparametrit ovat kaarijännite, hitsausvirta, vapaalangan pituus, hitsausnopeus sekä langansyöttönopeus. Useammalla langalla hitsatessa ns. monilankaprosesseissa parametrina on myös lankojen välinen etäisyys

sekä niiden kulma hitsattavaan kappaleeseen nähden [4]. Parametrien optimointi auttaa myös pienentämään kustannuksia. Palon leveys sekä ylimääräinen kupu joudutaan hiomaan pois, mikä aiheuttaa lisää työtä ja tuottaa lisää kustannuksia [7].

Yleiset parametrit jauhekaarihitsausprosessissa esitetty taulukossa 2.

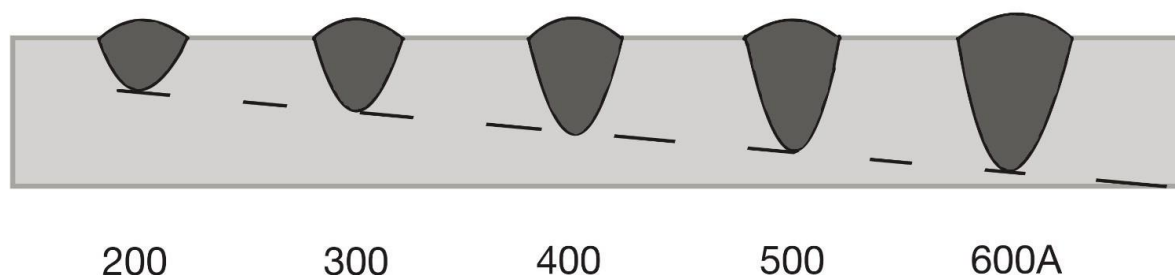
Taulukko 2

Yleiset hitsausparametrit jauhekaarihitsauksessa

hitsausvirta: 300–1200 A
kaarijännite: 25–40 V
Tuottavuus: 5–10 kg/h
hitsausnopeus: 0,5–3,0 m/min [1].

### 2.2.1 Hitsausvirta

Hitsausvirralle verrannollisia ovat tunkeutumissyvyys sekä lisääaineista irtoavan materiaalin määrä. Virralla on myös suora vaikutus sulavan metallin määrään hitsattavassa kappaleessa. Liian suuri virta aiheuttaa lisääainelangan kulutusta luomalla hitsiin suuren kuvun. Liian alhainen virta aiheuttaa taas ongelmia valokaaren vakauteen [1]. Jokaiselle langan halkaisijalle on omat kuormitettavuusalueensa, eli virralla on asetettu enimmäis- ja vähimmäisvirta. Hitsausvirta (A) on yleensä noin 100–200 kertaa langanhalkaisija (mm) [2]. Hitsausvirran vaikutus hitsin muotoon on esitetty kuvassa 2.



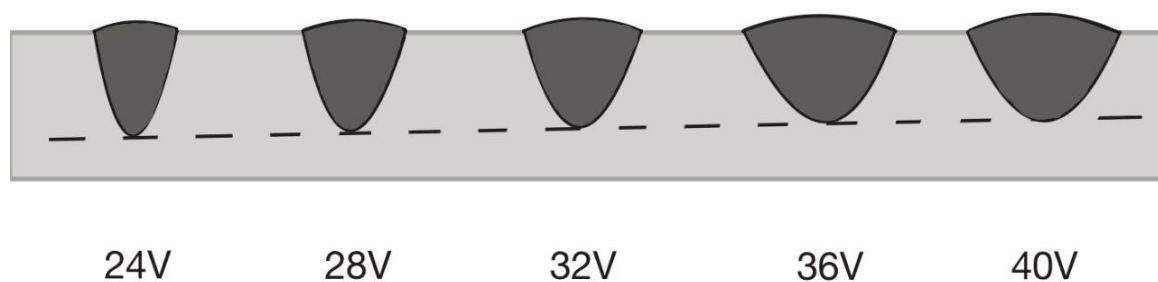
Kuva 2. Hitsausvirran vaikutus tunkeutumissyvyyteen, muokattu [1].

### 2.2.2 Kaarijännite

Kaarijännitteellä on vaikutus valokaarenpituuteen, hitsausaineen ominaisuuksiin ja sen kulutukseen. Kaarijännitteen nostamisen suurin vaikutus on hitsipalon leveyden kasvu.

Jännitteen noustessa valokaari pitenee, joten perusaineen sekä lisäaineen sulattamiseen käytetään enemmän lämpöä, minkä seurauksena seosainetta pääsee sekoittumaan enemmän hitsattavaan materiaaliin ja siten kuluu myös enemmän lankaa. Liian matala tai korkea jännite saattaa aiheuttaa epäjatkuvuutta hitsiin.

Hitsipalon profiilin muutos eri jännitteillä on esitetty kuvassa 2. [1]



Kuva 2. Kaarijännitteen vaikutus tunkeumaan, muokattu [1].

### 2.2.3 Hitsausnopeus

Hitsausnopeuden vaikutus näkyy suoraan hitsin tunkeumassa sekä leveydessä. Mitä enemmän nopeutta kasvatetaan, kärsii hitsin leveys ja tunkeuman syvyys, koska hitsausenergia pienenee. Nopeuden ollessa liian alhainen ei tunkeuma pääse riittävän isoksi, sillä hitsisula estää valokaaren tunkeutumista [2].

### 2.2.4 Hitsausenergia

Kaarihitsauksessa käytetty energia eli hitsausenergia ilmoitetaan yleensä hitsin pituusyksikköä kohti. Jauhekaarihitsauksessa hitsausenergia vaikuttaa lämmöntuontiin. Hitsausenergia on jauhekaarihitsauksessa todella lähellä lämmöntuonnin kanssa samaa arvoa, sillä jauhekaarihitsauksen terminen hyötysuhde on teoreettisesti 1,0, jota ei todellisuudessa aivan saavuteta. Hitsausenergia voidaan laskea kaavasta (SFS-EN 1011-2). Hitsausenergia (kJ/cm) lasketaan yhtälön 1 avulla. [8]

$$E = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (1)$$

missä U on jännite (V), I on hitsausvirta (A) ja v on hitsausnopeus (cm/min) [8].

### 2.2.5 Vapaalangan pituus

Vapaalangan pituudella tarkoitetaan etäisyyttä, jonka virta kulkee valokaaren syttymiskohdasta hitsauslangan kärkeen. Vapaalangan pituutta voidaan mitata myös kosketussuuttimen kärjestä työkappaleen pintaan [1]. Vapaalangan pituus normaalisti jauhekaarihitsauksessa on noin 20–40 mm eli maksimissaan 10 kertaa langan halkaisija. Pidentämällä vapaalankaa saadaan lankaa esikuumennettua enemmän. Lanka sulaa siis nopeammin, mitä pidempi vapaalanka on. Pitkällä vapaalangalla pystytään nostattamaan hitsiaineen tuottoa noin 20-50 % [2]. Vapaalangan pituus voi kuitenkin aiheuttaa virranlaskua kosketussuuttimen ja valokaaren välillä. Tämä aiheuttaa tunkeuman pienenemistä, minkä vuoksi pitkä vapaalanka voi johtaa epätoivottuun lopputulokseen. Vapaalangan pituuden kasvattaminen on hyvä tapa lisätä tuottavuutta, jos tunkeumalla ei ole suurta merkitystä [1].

### 2.2.6 Napaisuus

Yhdellä langalla jauhekaarihitsatessa napaisuus vaikuttaa yleisesti hitsisulan muotoon. Tasavirta plusnavasta (DCEP) kasvattaa tunkeuman syvyyttä, sillä lämmönkehitys lisääntyy siirtyvässä pisarassa. Lisäainetta siirtyy kuitenkin vähemmän tasavirralla plusnavasta hitsatessa kuin tasavirralla miinusnavasta (DCEN). Miinusnavalla tasavirralla hitsatessa kasvattaa se tuottoa, sillä siirtyvän materiaalin määrä on suurempi, mutta valokaaresta tulee epävakaampi [1]. Miinusnavasta hitsatessa huokoisuustaipumus on suurempaa kuin plusnavasta hitsatessa. Se soveltuu kuitenkin hyvin päällehitsaukseen [2]. Tasavirtaa käytetään useimmissa jauhekaarihitsauksen sovelluksissa. Monilanka hitsauksessa napaisuudella on tärkeä parametri, sillä hitsaus palko muodostuu monen elektrodin vaikutuksesta. Tällöin ensimmäinen lanka on usein DCEP ja toinen lanka vaihtovirtaa (AC) [1]. Ensimmäinen lanka tasavirralla antaa suuren tunkeuman ja toinen lanka vaihtovirralla antaa leveyttä hitsipalolle [2].

### 2.3 Lämmöntuonti ja jäähtyminen

Lämmöntuonti on yksi keskeisimmistä prosessiparametreista johdetuista suureista jauhekaarihitsauksessa. Etenkin suurlujuusteräksillä ja sen vaikutus hitsaustuloksiin on merkittävä. Hitsauksen mikrorakenne määräytyy pitkälti lämpösyklin mukaan, mikä riippuu suurimmilta osin lämmöntuonnista, levyn paksuudesta sekä esilämmityksestä ja hitsauksen jälkeisestä lämpökäsittelystä [3]. Alhaisena lämmöntuonnin rajana pidetään 0,5 kJ/mm tai jopa vähemmän. Ultralujuusterästen hitsauksessa lämmöntuonnin on oltava erittäin alhainen. Valmistajilla on suositukset terästen sallimaan lämmöntuontiin, jota tulee noudattaa terästen ominaisuuksien säilymiseksi [9]. Lämmöntuonti voidaan laskea monilankahitsauksessa yhtälön 2 avulla.

$$H = \frac{60 \mu \sum_1^n (V * I)}{1000 * S} \quad (2)$$

missä  $\mu$  on prosessin terminen hyötysuhde, joka riippuu hitsausmenetelmästä,  $V$  on jännite (V),  $n$  on hitsauslankojen lukumäärä,  $I$  on hitsausvirta (A) ja  $S$  on hitsausnopeus (mm/min) [1].

Jäähdytysaikaa kuvataan usein  $t_{8/5}$ , joka kuvaa jäähdytysaikaa 800 °C:sta 500 °C:seen. Kyseisellä lämpötilavälillä tapahtuu merkittävimmät mikrorakenteelliset muutokset [8]. Jäähtymisaika voidaan joko mitata termoelementeillä tai laskea teoreettisesti [1]. Jäähtymisnopeuden ollessa liian suuri, muodostuu martensiittista mikrorakennetta ja hitsi haurastuu osittain tai jopa kokonaan. Martensiitin muodostuminen on ongelma etenkin teräksillä joiden hiilipitoisuus on suuri [10].

### 3 Teräkset

Teräs on yksi maailman käytetyimmistä materiaaleista sen muovattavuuden, kestävyuden sekä muihin materiaaleihin verrattuna edullisen hinnan vuoksi. Se on seos, joka koostuu pääasiassa raudasta ja alle kahdesta prosentista hiiltä. Kevytrakenteiden ja -komponenttien tarve on kasvanut vuosien saatossa, mikä on kasvattanut teräksen kysyntää. Terästen valmistusprosessit ovat kehittyneet paljon vuosien saatossa, mikä on johtanut terästen kehitykseen. Teräksiä jaotellaan lujuusominaisuuksien perusteella ns. normaalilujiin teräksiin, suurlujuusteräksiin (HSS) sekä ultralujiin teräksiin (UHSS) [11].

#### 3.1 Suurlujuusteräkset

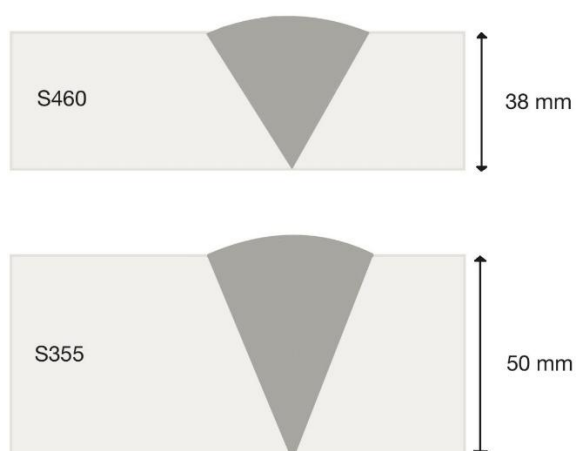
Tavanomaiset suurlujuusteräkset koostuvat pääasiassa ferriittisistä mikrorakenteista, mikä tarkoittaa, ettei niissä ole useista eri faaseista koostuvia monimutkaisia mikrorakenteita [11]. Tavanomaisten suurlujuusterästen murtolujuus rajoittuu noin 550 MPa:iin. Suurlujuusteräkset voidaan kuitenkin jakaa kahteen eri luokkaan eli tavanomaisiin ja kehittyneisiin suurlujuusteräksiin (AHSS), joiden myötölujuus on yli 550 MPa. Tarkkaan ei ole kuitenkaan määritetty lujuusrajoja suurlujuusteräksille [8]. Suurlujuusterästen suurimmat hyödyt ovat tuotantoprosessin kustannusten ja keston alentaminen, koneiden ja ajoneuvojen tehokkuuden ja suorituskyvyn parantaminen sekä ympäristövaikutusten vähentäminen. Suurlujuusterästen kysynnän odotetaan kasvavan näiden etujen takia tulevaisuudessa entistä enemmän. [12].

Yleisimmät suurlujuusteräkset, joiden myötölujuus on yli 355 MPa, ovat termomekaanisesti prosessoitu teräs (TMCP) ja karkaistu teräs (QT). TMCP-teräksillä ja QT-teräksillä on samat mekaaniset ominaisuudet, mutta TMCP-teräksen hiiliekvivalentti on pienempi. Hiiliekvivalenttitaso korreloi suoraan teräksen hitsattavuuden kanssa. Alhaisemmalla hiiliekvivalenttitaso teräksillä on paremmat hitsattavuusominaisuudet [1]. QT-teräksiin lisätään usein suuria määriä seosaineita, jotka lisäävät teräksen karkaisukykyä, mutta tekevät hitsauksesta haastavaa [13].

### 3.2 HSLA-teräkset

HSLA-teräkset ovat matalaseosteisia suurlujuusteräksiä. Näitä teräksiä on kehitetty jo useiden vuosien ajan, ja kehitystyön seurauksena on saavutettu korkea vetolujuus sekä sitkeys. HSLA-teräkset luokitellaan vähähiiliseksi teräksi. Niiden suuri lujuus perustuu pieniin seosainelisäyksiin, jotka saavat aikaan erkaumakarkaisua tai rakenteen hienontumista termomekaanisen prosessoinnin seurauksena [14]. HSLA-terästen erikoisuutena on raekoon pienenemisen vaikutus lujuuteen ja sitkeyteen, sillä raekoon pienentäminen kasvattaa samanaikaisesti sitkeyttä ja lujuutta. Normaalisti terästen sitkeys heikkenee niiden lujuuden kasvaessa [15].

HSLA-terästen laaja käyttö perustuu niiden erinomaisen lujuuden, sitkeyden ja hitsattavuuden yhdistelmään. HSLA-teräksiä hyödynnetään tästä syystä monilla eri teollisuuden aloilla, kuten laivanrakennuksessa, offshore-rakenteissa sekä auto- ja kuljetusväline-teollisuudessa. Erityisesti raskaissa työkoneissa, kuten nostureissa, trukeissa sekä maatalouskoneiden alustarakenteissa HSLA-teräkset ovat tärkeässä asemassa. Niiden käyttö mahdollistaa huomattavasti kevyempien ja sirompien rakenteiden valmistamisen tinkimättä rakenteellisesta eheydestä. Massan väheneminen parantaa rakenteiden kustannustehokkuutta ja energiatehokkuutta, mikä tekee niistä hyvän vaihtoehdon perinteisille hiiliteräksille myös rakennus- ja putkistotekniikassa. Teräksen lujuuden vaikutus levynpaksuuksiin ja hitsiainemäärään on esitetty kuvassa 3.1. [14]



Kuva 3. Teräksen lujuuden vaikutus levynpaksuuteen ja hitsiainemäärään, muokattu [8].

### 3.3 Offshore-teräkset

Offshore-teollisuudessa terästen ominaisuudet ovat todella tärkeitä, sillä valmiita tuotteita käytetään yleisesti teräksen näkökulmasta hankalissa olosuhteissa. Näitä teräksiä käytetään mm. laivoissa, öljynporauslautoilla sekä tuuliturbiinien perustuksissa. Kaikkia käyttökohteita yhdistää äärimmäiset ympäristökuormitukset ja siitä johtuva lisääntyvä mekaaninen rasitus. Näistä syistä sitkeysominaisuudet täytyvät olla määräysten mukaiset. Offshore-teräksiä valmistetaan yleisesti normalisoimalla, termomekaanisesti kontrolloidulla prosessoinnilla (TCMP). Näille TCMP-teräksille yleistä on alhainen hiilipitoisuus sekä hiiliekvivalentti. [16]

### 3.4 Ultralujat teräkset

Ultralujuusteräksillä viitataan yleensä teräslajien ryhmään, jonka ominaisuudet vaihtelevat laajasti. Erilaisissa sovelluksissa tarvitaan erilaisia ominaisuuksia. Ultralujuusteräksiä käytetään etenkin ajoneuvoissa, silloissa, nostureissa ja pilvenpiirtäjissä niiden alhaisen painon vuoksi [11,17]. Ultralujuusteräksiksi luokitellaan yleensä teräkset, joiden myötölujuus on 900 MPa ja yli [18]. Niitä käytetään usein sovelluksissa, joissa halutaan minimoida rakenteen paino ja materiaalikustannukset. Sillä ultralujat teräkset ovat huomattavasti muita ultralujia materiaaleja halvempia, kuten titaaniseoksiin verrattuna [17].

## 4 Suurlujuusterästen hitsaus

Hitsattavuutta voidaan tarkastella monella eri tavalla. Yleisesti terästen hitsattavuus on sitä parempi, mitä vapaammin hitsausprosessi voidaan valita sekä mitä vähemmän tarvitsee tehdä esivalmisteluita tai jälkikäsitteilyä. Hitsattavuutta voidaan tarkastella perusaineen hitsattavuutena, jolloin tarkastellaan ainoastaan perusaineen ominaisuuksia. Perusaine on soveltuva hitsaukseen, kun metallista ainetta hitsatessa voidaan saada aikaan hitsausliitos, joka täyttää kaikki vaatimukset. Hitsattavuutta voidaan tarkastella myös rakenteellisena sekä valmistuksellisenä hitsattavuutena. Termi hitsattavuus on määritelty saksalaisessa DIN 8528 -standardissa. [10]

### 4.1 Hitsausvirheet

Epäjatkavuudet ja poikkeamat hitsin muodossa eli hitsausvirheet ovat epätoivottuja. Hitsausvirheitä ovat kaikki poikkeamat ihanteellisesta hitsistä, kuten halkeamat, kuonatulkeumat, huokoisuus ja vajaa hitsautumissyvyys. Usein virheet heikentävät hitsin ominaisuuksia sekä liitoksen kestävyyttä. Välttämällä hitsausvirheitä saadaan aikaan hyvän laatuista hitsejä, mutta kustannukset nousevat. Kustannusten takia usein hieman epäpuhdas hitsi kelpaa, elleivät vaatimukset edellytä toisin. Hitsausliitoksia voidaan tarkastaa eri NDT-menetelmien avulla. Silmämääräinen tarkastus on kaikista helpoin ja halvin menetelmä, missä hitsi tarkistetaan silmämääräisesti.

Tunkeumanestetarkastus perustuu virheiden etsimiseen hitsiin levitettävän nesteen avulla. Virheet ilmenevät, kun neste imeytyy pinnasta avautuviin virheisiin, josta neste tulee takaisin tarkastelevan pinnan päälle. Lisäksi hitsausvirheitä voidaan löytää magneettijauhetarkastuksen, radiografisen tarkastuksen sekä ultraäänitarkastuksen avulla. [2]

Merkittävä ongelma hitsatuissa liitoksissa ovat hitsausprosessin aikana hitsausliitokseen ja sen läheisyyteen syntyvät jäännösjännitykset. Väärin valitut hitsausparametrit voivat johtaa kuumahalkeiluun tai vedyn aiheuttamaan kylmähalkeiluun tai aiheuttaa ei toivotun jännitys jakauman, joka johtaa nopeaan murtumiseen käytön aikana [12]. Kuumahalkeilulla tarkoitetaan hitsiin syntyvää pitkittäishalkeamaa, joka syntyy hitsisulan jäähmettymisen yhteydessä korkeassa

lämpötilassa. Kylmähalkeilusta käytetään yleisemmin nimitystä vetyhalkeilu. Vetyhalkeilu tarkoittaa vedyn aiheuttamaa halkeamaa, joka syntyy vetojännitysten vaikuttamana alle 150 °C:ssa tai vasta kokonaan jäähtyneenä, jopa vuorokauden kuluttua [2].

Jäännösjännitykset ovat pääsääntöisesti ei toivottuja hitsausliitosten väsymisominaisuuksien heikkenemisen, jännityskorroosion sekä haurausmurtumariskin takia. Jäännösjännityksiä on yhteen puristavia sekä vetojäännösjännityksiä. Puristavat jäännösjännitykset ovat hitsausliitokselle toivottuja, mutta vetojäännösjännitykset eivät ole toivottuja, sillä liitoksen kestävyys pienenee vaihtelevissa kuormituksissa. Liitoksen heikkeneminen johtuu sen kokeman kokonaisjännityksen kasvusta. [19]

#### **4.2 Suurlujuusterästen hitsattavuus**

Suurlujuusterästen hitsaus on huomattavasti monimutkaisempaa kuin pienemmän myötölujuuden rakenneterästen hitsaus [9]. Etenkin vetyhalkeilu on yleistä suuren myötölujuuden teräksissä, joissa käytetään hitsauslisäaineena runsaasti seostettuja lisäaineita. Vetyhalkeilua voidaan välttää esikuumennuksen avulla. Myös karkenevuus ja erittäin suuri lujuus ovat hitsattavuuden haasteita [10]. Liiallinen lämmöntuonti kasvattaa raekokoa, joka haurastuttaa terästä. Haurastuminen johtuu karbidi- ja nitridihiukkasten liukenemisestä suuren lämmön takia, mikä johtaa niiden tehokkuuden menettämiseen raekasvun estäjinä [15]. Kuitenkin tärkein kriteeri teräslaadun hitsattavuuden arvioinnissa on teräksen hiiliekvivalentti. Hiiliekvivalentille on olemassa erilaisia määritelmiä. Sen kasvaessa teräksen hitsattavuus heikkenee. Teräksen hiilipitoisuuden vähentäminen on tehokkain tapa parantaa sen hitsattavuutta [20].

Suurlujuusteräksiä hitsatessa hitsattavuusongelmat voivat aiheutua alkuperäisen hienorakeisen mikrorakenteen epäsuotuisista muutoksista. Lämpövyöhykkeen alueella voi esiintyä paljon sekä karkaistuja että pehmenneitä alueita [21]. Vähähiilisten terästen hitsaus on vaativampaa kuin perinteisten rakenneterästen, koska hitsien on jäädyttävä nopeasti vetolujuuksien menetyksen välttämiseksi. Tämä on päinvastaista kuin perinteisissä rakenneteräksissä, joissa hitsin nopea jäähtyminen voi aiheuttaa karkaisua ja sitkeyden vähenemistä [17].

### 4.3 Suurlujuusteräksiä hitsatessa käytettävät lisäaineet

Suurlujuusterästen hitsaus vaatii enemmän myös hitsauslisäaineilta, jotta hitseistä tulee metallurgisesti ja mekaanisesti riittävän laadukkaita. Jotta voidaan käyttää kehittyneitä suurlujuusteräksiä, on kehitettävä hitsauslisäaineita mm. hitsausjauheita ja -lankoja, jotka minivoivat diffundoituvan vedyn vaikutukset ja tuottavat hitsattuja rakenteita, joilla on riittävät lujuus- ja sitkeysominaisuudet. [22]

Lisäaine valitaan vastaamaan perusaineen lujuutta. Suurlujuusteräksiä hitsatessa suositaan matala vetyisiä ja HSLA-teräksiä hitsatessa myös matala hiilisiä lisäaineita. Tällöin saavutetaan parempi hitsattavuus, mutta lujuus hitsiin saavutetaan tarkalla mangaanin, nikkelin, kromin ja molybdeenin suhteella hitsauslangassa. Seos aineiden määrät langoissa ovat todella tarkkoja, koska hitsistä voi tulla helposti liian karkaistuva ja siten hauras [15]. Nikkelin määrän nostaminen langassa laskee hitsin maksimisitkeyttä korkeissa lämpötiloissa, mutta matalissa lämpötiloissa nikkelin suurempi määrä parantaa sitkeyttä, joka on hyödyllistä etenkin offshore-teollisuudessa [23]. Jauheen valinnassa suurlujuusteräksille otetaan huomioon jauheen emäksisyys. Emäksisillä jauheilla on parempi iskusitkeys verrattuna happamiin jauheisiin, joten suurlujuusteräksille käytetään emäksisiä jauheita [4].

### 4.4 Metallurgia

Sulassa materiaalissa tapahtuu hitsauksen aikana useita metallurgisia muutoksia; metalli sulaa ja jähmettyy sekä kuonan ja metallin välillä tapahtuu erilaisia reaktioita. Myös hitsin välittömässä läheisyydessä perusaineessa tapahtuu kiinteässä tilassa kutistumisen ja lämpösyklin aiheuttamia faasimuutoksia sekä sisäisten jännitysten kasvua. Vaikka hitsaustapahtuma itsessään on hyvin nopea niin hitsin metallurgiset ominaisuudet muuttuvat vielä hitsaustapahtuman jälkeen hitsin jäähtyessä.

Hitsausmetallurgisia ongelmia voidaan usein vähentää tai välttää kokonaan, kun ymmärretään, mitkä asiat niihin vaikuttaa hitsauksen ja hitsin jäähtymisen aikana. [10]

Muutosvyöhyke (HAZ) on alue sulan aineen ja muuttumattoman perusaineen välissä [10]. Sen koko määräytyy hitsin jäähtymisen kestosta. Lämmöntuonnin ollessa suurta, hitsi jäähtyy hitaammin, jolloin myös se jähmettyy hitaammin. Tällöin myös lämpö

johtuu kauemmas ja muutosvyöhykkeen leveys kasvaa [19]. Muutosvyöhykkeessä lämpötilat ovat liian alhaiset aiheuttamaan sulamista, mutta riittävän korkeat aiheuttaakseen materiaalien mikrorakenteen ja ominaisuuksien merkittävän muutoksen. Suurlujuusterästen lujittaminen käyttämällä erkaumakarkaisua, muokkauuskarkaisua tai muodonmuutoskarkaisua ovat tehokkaita. Näiden toimivuutta voidaan heikentää selvästi kuumentamalla muutosvyöhykettä liiallisesti hitsauksen aikana [15]. Muutosvyöhykkeen pehmeneminen aiheuttaa epävarmuutta hitsauksen laadussa. Se lisää myös todennäköisyyttä väsymismurtumille heikoimmilla alueilla. Muutosvyöhykkeen leveyteen voidaan vaikuttaa hitsausparametrien avulla [24].

Ainepaksuuksien ollessa suuria täytyy suurlujuusteräksiä hitsatessa hitsata useampi palko päällekkäin. Päälle hitsatessa uudet hitsaus kerrat aiheuttavat lisää lämpösyklejä jo muuttuneelle mikrorakenteelle sekä alempien palkojen hitsimetallille. Muutosvyöhykkeillä ominaisuudet muuttuvat jatkuvasti hitsauksen ja jäähtymisen aikana. Tärkeimpinä muutosvyöhykkeinä, joissa ominaisuuksien voidaan odottaa muuttuvan ovat, karkearakeinen CGHAZ, kriittinen ICHAZ ja kriittisesti uudelleenlämmitetty lämpövaikutusvyöhyke ICCGAZ. Kaikki nämä muutosvyöhykkeet ovat hyvin kapeita, joten niiden mikrorakenteiden ja mekaanisten ominaisuuksien tarkastelu on haastavaa. [25]

E erityisesti CGHAZ on erityisen altis haitallisille vaikutuksille, kuten raekoon karhenemiselle, martensiitti-austeniitti-konstituenttien lisääntymiselle ja hauraiden mikrorakenteiden kehittymiselle. Nämä muutokset heikentävät CGHAZ:n mikrorakenteellista eheyttä ja ominaisuuksia, tehden siitä teräsrakenteen heikoimman alueen ja vaarantaen sen yleisen käyttöluotettavuuden [26]. QT-teräksillä pienellä lämmöntonilla (1kJ/mm) kovuus nousee CGHAZ:n alueella jopa 15 %, mikä johtaa hauraiden martensiitti-bainiittirakenteiden syntyyn. TCMP-teräksillä samalla lämmöntonilla hitsin kovuus laskee 10 % [27].

## 5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa perehdyttiin suurlujuusterästen jauhekaarihitsaukseen. Tutkielman tavoitteena oli selvittää eroja suurlujuusterästen ja normaalilujien rakenneterästen jauhekaarihitsauksessa. Eroja selvitettiin hitsausprosessissa käytettävien lisäaineiden, hitsausprosessissa käytettävien parametrien sekä terästen hitsattavuuden osalta. Erityistä huomiota kiinnitettiin hitsauksen lämmöntonniin ja lisäaineiden kemiallisen koostumuksen vaikutuksista hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin.

Suurlujuusteräokset, kuten HSLA-teräokset ja AHSS-teräokset tarjoavat perinteisiin rakenneteräoksiin verrattuna korkeamman myötölujuuden, ja myös erinomaisen sitkeyden suhteessa teräoksen painoon. Niiden erinomaiset ominaisuudet perustuvat tarkkaan hallittuihin kemiallisiin koostumuksiin, mikroranteisiin sekä valmistusvaiheen lämpömekaanisiin käsittelyihin. Jauhekaarihitsauksen näkökulmasta nämä teräokset ovat vaativia, sillä valokaaren tuoma lämpöenergia voi heikentää teräosten ominaisuuksia. Tämän takia suurlujuusteräoksiä hitsatessa korostuu perusaineen ominaisuuksien säilyttäminen hitsiin asti.

Johtopäätöksinä tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, jauhekaarihitsauksen olevan tehokas hitsausprosessi suurlujuusteräoksille, kun hitsataan yksinkertaisia ja isoja kappaleita. Suurlujuusteräoksiä hitsatessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon monia asioita, jotka vaikuttavat hitsauksen lopputulokseen, kuten hitsausparametrien sekä lisäaineiden valinnan vaikutus hitsauksen lopputulokseen. Parametreja hallitsemalla voidaan hallita hitsauksen lämmöntonnia, jolla on suuret vaikutukset hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin.

Suurlujuusteräokset käyttäytyvät hitsauksessa eri tavalla verrattuna perinteisiin rakenneteräoksiin. Suurlujuusteräoksiä hitsatessa lämmöntonniin merkitys kasvaa, sillä liiallinen lämmöntonni kasvattaa hitsin jäähtymisaikaa, mikä aiheuttaa raekoonkasvua sekä pehmenemistä muutosvyöhykkeellä (HAZ). Tämä johtaa hitsin lujuuden sekä sitkeyden merkittävään alenemiseen, sillä teräoksen haluttu mikrorakenne menetetään.

Suurlujuusteräoksiä käytetään paljon matalissa lämpötiloissa esimerkiksi offshore-teollisuudessa. Erityisen matalat lämpötilat vaativat teräoksilta ja hitsausliitoksilta

enemmän. Erityisesti nikkeli on tärkeä seosaine hitsauslangassa, kun halutaan kasvattaa sitkeyttä matalissa lämpötiloissa. Langan seostuksen lisäksi hitsausjauheen ominaisuudet ovat myös tärkeitä suurlujuusterästen hitsauksessa, koska jauheen emäksisyys vaikuttaa hitsin sitkeyteen. Suurlujuusteräksiä hitsatessa käytetään emäksisiä jauheita, mikä minimoi hitsin happipitoisuuden ja optimoi iskusitkeyden.

Suurlujuusterästen jauhekaarihitsauksessa on tärkeää hallita teräksen metallurgisia muutoksia. Muutosvyöhykkeessä (HAZ) voi tapahtua vetyhalkeilua, jopa vuorokauden hitsaustapahtuman jälkeen. Tutkielmassa havaittiin lämmöntuonnilla olevan suuri vaikutus hitsin onnistumiseen. Liiallinen lämmöntuonti pidentää hitsin jäähtymisaikaa, jonka seurauksena muutosvyöhykkeen leveys kasvaa sekä teräksen raekoko kasvaa. Nämä seuraukset johtavat epävarmuuksiin valmiissa hitsissä.

Tutkielman perusteella voidaan lopuksi todeta, että suurlujuusterästen jauhekaarihitsauksen onnistuminen ei ainoastaan perustu hitsausparametreihin, eikä hitsauslisäaineiden valintaan, vaan niiden saumattomaan kokonaisuuteen.

Onnistuessaan jauhekaarihitsauksella voidaan hitsata tehokkaasti suurlujuusteräksiä, säilyttäen terästen ominaisuudet. Näitä rakenteita voidaan käyttää vaativissa ja vastuullisissa kohteissa, kuten offshore-rakenteissa, silloissa ja nostolaitteista, joissa materiaaleilta vaaditaan samalla suurta lujuutta, keveyttä ja kestävyyttä haastavissakin olosuhteissa.

## Lähteet

- [1] P. Layus, Usability of submerged arc welding (SAW) process for thick high strength steel plates for arctic shipbuilding applications, 2017, (n.d.). <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/134560/P.Layus%20A4.pdf?isAllowed=y&sequence=2> (accessed February 23, 2026).
- [2] J. Lukkari, Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus, 4th ed., Opetushallitus, Kannelmäki, 2002.
- [3] D.V. Kiran, B. Basu, A. De, Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel, (2012) 2041–2050. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.008>.
- [4] SAW Flux Types: A Guide to Submerged Arc Welding Fluxes, MIDDLE EAST Engl. (2024). [https://esab.com/mea\\_en/esab-university/blogs/saw-flux-types-guide/](https://esab.com/mea_en/esab-university/blogs/saw-flux-types-guide/) (accessed February 27, 2026).
- [5] D. Zhang, J. Zhang, S. Yang, G. Shao, Z. Liu, Element Transfer Behavior for CaF<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> Agglomerated Flux Subject in Submerged Arc Welding Process, Processes 10 (2022). <https://doi.org/10.3390/pr10091847>.
- [6] SFS-EN ISO 14171:2016, SFS Suom. Stand. (2016). <https://store.sfs.fi/fi/sfs-en-iso-14171-2016> (accessed April 28, 2026).
- [7] A. Choudhary, M. Kumar, D.R. Unune, Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel, Def. Technol. 15 (2019) 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.08.004>.
- [8] J. Lukkari, Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2A, Metallit ja niiden hitsattavuus, Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., Helsinki, 2019.
- [9] M. Pirinen, The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures, 2013. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/90470/isbn9789522654007.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed March 2, 2026).
- [10] A. Pullinen, R. Pettinen, C.-G. Lindewald, O. Kortelainen, L. Witting, Suomen hitsausteknillinen yhdistys, Hitsauksen materiaalioppi, Suomen hitsausteknillinen yhdistys, Helsinki, 2004.
- [11] M. Demeri, Advanced High-Strength Steels - Science, Technology, and Applications (2nd Edition), (2024). <https://app-knovel-com.ezproxy.utu.fi:2443/kn/resources/kt0142JIZ3/kpAHSSST02/pdf> (accessed February 9, 2026).
- [12] T. Ślęzak, Welding of S960QL High-Strength Steel by the Manual–Automated MAG Technique—A Study of Mechanical Properties, Residual Stresses and Fracture Mechanisms in the Heat-Affected Zone, Materials 17 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17235792>.
- [13] W. Huang, K. Qi, Z. Liu, L. Yang, Z. Xue, T. Li, X. Zhang, R. Li, Microstructure and mechanical properties of submerged arc welded medium-thickness Q690qE high-strength steel plate joints, High Temp. Mater. Process. 43 (2024). <https://doi.org/10.1515/htmp-2024-0033>.
- [14] W. Guo, Laser Welding of High Strength Steels, 2015. [https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54582430/FULL\\_TEXT.PDF](https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54582430/FULL_TEXT.PDF) (accessed February 21, 2026).
- [15] S. Kou, Welding metallurgy, 2nd ed, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J, 2003. <https://doi.org/10.1002/0471434027>.
- [16] M. Gáspár, J. Kovács, J. Sainio, H. Tervo, V. Javaheri, A. Kaijalainen, Physical simulation-based analysis of multipass welding in S500 shipbuilding steel, Weld. World 69 (2025) 825–836. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01908-0>.
- [17] J. Laitila, J. Larkiola, Effect of enhanced cooling on mechanical properties of a multipass welded martensitic steel, Jultika.Oulu.Fi (2019). <https://oulurepo.oulu.fi/handle/10024/25049> (accessed March 18, 2026).
- [18] D. Gospodinov, N. Ferdinandov, M. Ilieva, R. Radev, Mechanical properties of submerged arc weldments of high strength steel S960QL, (2024) 227–232. <https://doi.org/10.37904/metal.2024.4943>.

- [19] L. Keränen, Ultralujat teräkset kestävien koneiden suunnittelussa, (2025). <https://oulurepo oulu.fi/bitstream/handle/10024/53702/nbnfioulu-202412187445.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [20] Molybdenum in Irons + Steels for Clean + Green Power Generation, 2011, (n.d.). [https://www.imoa.info/download\\_files/alloy-steel/Clean\\_and\\_Green\\_Energy.pdf](https://www.imoa.info/download_files/alloy-steel/Clean_and_Green_Energy.pdf) (accessed April 20, 2026).
- [21] M. Gáspár, Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel, *Metals* 9 (2019) 1226. <https://doi.org/10.3390/met9111226>.
- [22] S. Jindal, R. Chhibber, N. Mehta, Effect of Flux Constituents and Basicity Index on Mechanical Properties and Microstructural Evolution of Submerged Arc Welded High Strength Low Alloy Steel, *Mater. Sci. Forum* 738 (2013) 242–246. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.242>.
- [23] G. Evans, The Effect of Nickel on the Microstructure and Properties of C-Mn All-weld metal Deposits, 1 (1991) 2–13.
- [24] Study on output response of submerged arc welding process, *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.* 24 (2017). <https://doi.org/10.17559/TV-20140702040319>.
- [25] H. Tervo, M. Gáspár, J. Kovács, A. Kaijalainen, V. Javaheri, J. Sainio, J. Kömi, Physical simulation of heat-affected zones in a weld metal used with 500 MPa offshore steel, 48c568f4-657b-4b33-9d26-A8692a61e38c (2025). <https://oulurepo oulu.fi/handle/10024/53766> (accessed March 18, 2026).
- [26] J. Chen, Z. Shi, X. Luo, F. Chai, T. Pan, G. Feng, C. Yang, Micro-Alloying Effects on Microstructure and Weldability of High-Strength Low-Alloy Steel: A Review, *Materials* 18 (2025) 1036. <https://doi.org/10.3390/ma18051036>.
- [27] F. Njock Bayock, P. Kah, P. Layus, V. Karkhin, Numerical and Experimental Investigation of the Heat Input Effect on the Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar Weld Joints of 690-MPa QT and TMCP Steel, *Metals* 9 (2019) 355. <https://doi.org/10.3390/met9030355>.