

Aapo Puikkonen

WAAM-MENETELMÄLLÄ VALMISTETTUJEN RAKENTEIDEN VÄSYMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Aapo Puikkonen: WAAM-menetelmällä valmistettujen rakenteiden väsyminen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2025

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan WAAM-menetelmällä (engl. Wire arch additive manufacturing) valmistettujen rakenteiden väsymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. WAAM on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa materiaalia lisätään kerros kerrallaan hitsaamalla. Hitsausmenetelmänä toimii yleensä MIG- (engl. Metal inert gas) tai MAG-hitsaus (engl. Metal active gas). Menetelmä mahdollistaa monimutkaisten muotojen valmistamisen pienellä materiaalihukalla, mutta hitsaus heikentää rakenteen väsymislujutta verrattuna yleisiin konerakennuksissa käytettyihin teräsrakenteisiin.

Väsyminen on rakenteen murtumista ajan suhteen muuttuvan kuormituksen alaisena ja on arvioitu 50 % koneiden ja laitteiden vaurioista syntyvän siitä. Väsymisen osalta tässä työssä tarkastellaan erityisesti väsymisen murtumismekaniikkaa ja hitsausvirheitä. Väsymismurtumat alkavat yleensä hitsausvirheistä, joita ovat erilaiset makro- ja mikrorakenteelliset virheet.

Väsymisen analysoinnissa hyödynnettiin väsytykskokeen, mikrorakenteen kuvauksen ja särön kasvun kokeiden tuloksia. Kokeellisia tuloksia verrattiin saman materiaalin laskennalliseen väsymislajuuden tulokseen, jonka perusteella pystyttiin toteamaan rakenteen väsymislajuuden laskevan. Mikrorakenteen kuvauksen perusteella viimeisenä hitsatun rakenteen faasit vastustavat heikommin väsymismurtuman etenemistä, joten näillä väsymislajuus on alhaisempi.

Väsymislajuutta voidaan parantaa erilaisilla jälkikäsittelyillä. Esimerkiksi koneistuksella pystytään parantamaan pinnanlaatua ja mikrorakennetta pystytään parantamaan erilaisilla lämpökäsittelyillä. Työn tuloksina voidaan todeta WAAM-menetelmän käytön vaikuttavan väsymislajuuteen ja se tulee huomioida kyseisten rakenteiden suunnittelussa. Aiheeseen liittyviä lisätutkimuksia tulisi tehdä hitsausparametrien, mikrorakenteen ja väsymisen välisistä yhteyksistä.

Avainsanat: Ainetta lisäävä valmistus, väsyminen, WAAM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT-4-Turbo

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty työn tiivistelmän rakenteen ja sisällön määrittämisessä.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tiivistelmä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HITSAUS	3
2.1 Hitsauksen lämpövyöhykkeet	3
2.2 Mikrorakenteen muodostuminen.....	5
3. VÄSYMINEEN.....	7
3.1 Väsymisen murtumismekaniikka.....	7
3.2 Hitsausvirheet ja väsyminen	9
3.3 Väsymislaskenta.....	10
4. WAAM-MENETELMÄ	12
4.1 Menetelmän edut ja haitat.....	12
4.2 MIG/MAG-pohjainen laitteisto ja sen toimintaperiaate.....	12
5. VÄSYMISEN ANALYSOINTI.....	14
5.1 Kokeellisia tuloksia	14
5.1.1 Väsytykskoe ja mikrorakenteen kuvaus	14
5.1.2 Särön kasvun koe	16
5.2 Valmistuksen vaikutus väsymislajuuteen	18
5.3 Väsymislajuuden parantaminen	19
6. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

AM	engl. Additive manufacturing, ainetta lisäävä valmistus
DED	engl. Direct energy deposition, Suora energian lisäys ainetta lisäävässä valmistuksessa
GMAW	engl. Gas metal arc welding, hitsaus MIG/MAG-laitteistolla
GTAW	engl. Gas tungsten arc welding, hitsaus TIG-laitteistolla
HAZ	engl. Heat affected zone, muutosvyöhyke
HCF	engl. High cycle fatigue, jännitysväsyminen
LCF	engl. Low cycle fatigue, myötöväsyminen
MIG	engl. Metal inert gas, kaarihitsausmenetelmä inertillä suojakaasulla
MAG	engl. Metal active gas, kaarihitsausmenetelmä aktiivisella suojakaasulla
PAW	engl. Plasma arc welding, Plasmahitsaus
TIG	engl. Tungsten inert gas, kaarihitsausmenetelmä inertillä suojakaasulla ja käsin syötettävällä hitsauslisäaineella
WAAM	engl. Wire arc additive manufacturing, hitsauslangan suorakerrostus valokaaren avulla

Merkinnät

a	Särön pituus
a_0	Alkusärön pituus
a_c	Kriittinen särön pituus
C	Materiaalia riippuvainen vakio
\bar{C}	Vaihtolujuudesta ja vakioista k riippuvainen vakio
K	SN-käyrän jyrkkyydestä riippuva vakio
m	Kokeellinen vakio
N	Väsytyskuormitusten lukumäärä
N_∞	Vaihtolujuutta vastaava väsytyssyklarimäärä
R_m	Murtolujuus
R_s	Jännityssuhde
σ_a	Jännitysamplitudi
σ_w	Vaihtolujuus
ΔK	Jännitysintensiiteettikerroin
ΔK_{kriitt}	Kriittinen jännitysintensiiteettikerroin

1. JOHDANTO

Ainetta lisäävä valmistus (AM, engl. Additive manufacturing) on nykyaikainen menetelmä tuottaa kappaleita. Niissä materiaalia lisätään kerros kerrallaan saavuttaen lopullinen haluttu kolmiulotteinen muoto, joka on valmistamisen näkökulmasta päinvastainen yleisesti käytössä oleviin ainetta poistaviin ja muovaaviin menetelmiin nähden. AM-menetelmät ovat yleisesti käytössä eri sovelluksissa konepajateollisuudessa, mutta niitä hyödynnetään myös esimerkiksi lääketieteessä ja arkkitehtuurissa (SFS 52900 2021, s. 5). WAAM (engl. Wire arc additive manufacturing) on hitsaamiseen perustuva ainetta lisäävä valmistusmenetelmä. Menetelmässä hitsataan materiaali kerros kerrallaan. Kuvassa 1 on esitelty WAAM:illa valmistettu moottorin tukikappale. Menetelmä soveltuu hyvin geometrialta monimutkaisten kappaleiden valmistamiseen.



Kuva 1. WAAM:illa valmistettu moottorin tukikappale (Hantula J 2021)

Väsyminen on rakenneosan murtumista ajan suhteen muuttuvassa kuormituksessa. On arvioitu, että 50 % kaikista koneiden ja laitteiden vaurioista aiheutuu väsymisestä. Väsymisen laskentamenetelmät ovat kehittyneet paljon siitä aiheutuneiden onnettomuuksien

tutkinnan seurauksena. (Salmi & Pajunen 2010, s. 353) Väsymiseen vaikuttaa moni eri tekijä kuten kappaleen geometria, pinnanlaatu, mikrorakenne ja kuormitustyyppi.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan WAAM-menetelmällä valmistettujen rakenteiden väsymistä. WAAM-rakenteiden väsymislujuus on olennainen ominaisuus, koska hitsatut rakenteet ovat yleisesti alttiita väsyttävälle kuormituksille. Työn tutkimuskysymys on: miten WAAM-menetelmällä valmistaminen vaikuttaa väsymiseen? Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuuskatsaus, jolla pyritään vastaamaan tutkimuskysymykseen olemassa olevien tutkimusten pohjalta. Työssä selvitetään valmistusmenetelmän vaikutusta mikrorakenteeseen ja sen avulla arvioidaan väsymiskäyttäytymistä.

Tarkemmin sanoen tutkielmassa käsitellään keskeisimpinä teorioina hitsaamista, väsymistä ja WAAM-menetelmää. Erityinen painotus on hitsaamisen mikrorakenteessa, hitsausvirheissä ja väsymisen murtumismekaniikassa. Materiaalien osalta rajaudutaan niukkaseosteisiin teräksiin ja hitsausmenetelmien osalta MIG/MAG-hitsaukseen (engl. Metal inert gas, engl. Metal active gas). Teoria osuuksien jälkeen esitetään kokeellisia tuloksia, joiden pohjalta tehdään päätelmät WAAM-menetelmällä valmistettujen rakenteiden väsymisestä. Työssä esiteltävät väsymistä mittaavat kokeelliset tulokset ovat väsytyksoe ja särön kasvun koe. Lopuksi esitetään väsymislujuutta parantavia menetelmiä ja yhteenvedossa kootaan työssä käsiteltävät aiheet ja keskeiset tulokset.

2. HITSAUS

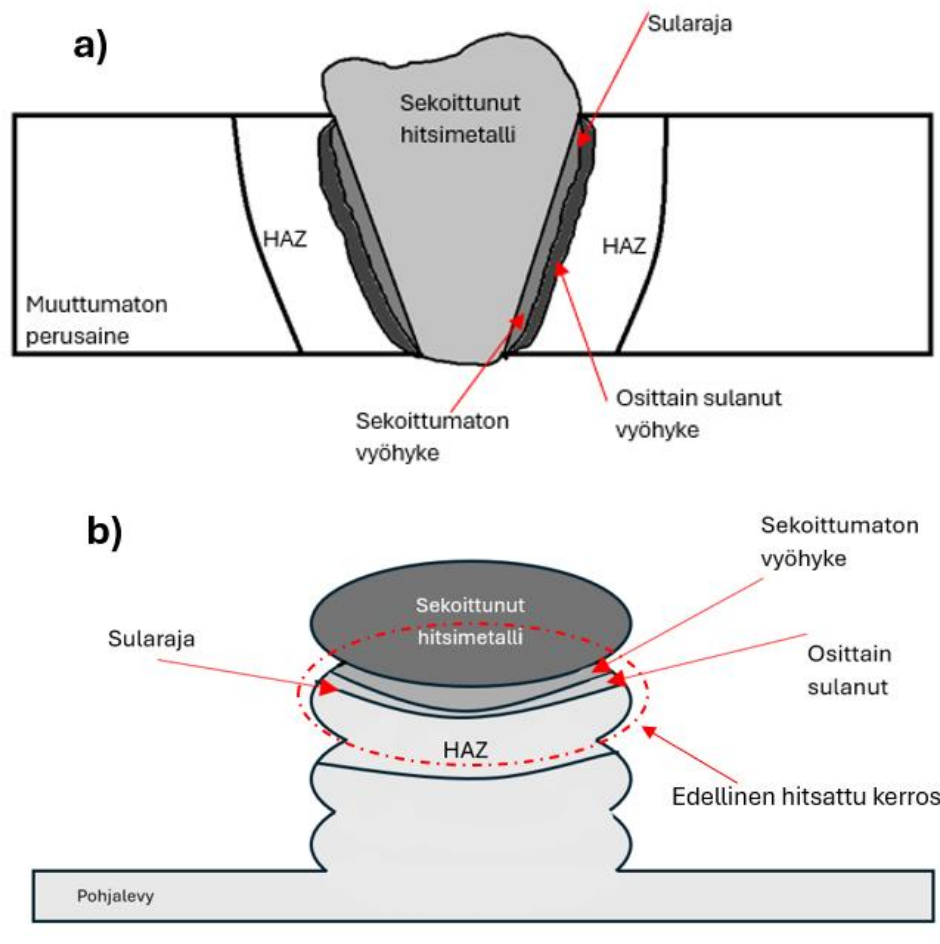
Hitsaus on osien liittämistä toisiinsa lämmön avulla siten, että rakenne muodostaa jatkuvan yhteyden. Hitsausta kutsutaan myös liitoshitsaukseksi silloin kun kappaleet liitetään toisiinsa. Liitettävien kappaleiden materiaali voi olla esimerkiksi metallia, keraamia tai muovia. Hitsaamalla voidaan myös pinnoittaa kappaleita, jolloin käytetään termiä päällehitsaus. (Lukkari 1997, s. 11)

Hitsaus on suosittu tapa liittää kappaleita toisiinsa, koska sillä saadaan valmistettua tiiviitä liitoksia ilman erillisiä liitososia. Hitsausprosessi pystytään helposti automatisoimaan. Hitsausliitos ei ole kuitenkaan helposti purettavissa ja prosessin aiheuttama lämpö aiheuttaa materiaaliin mikrorakenteellisia muutoksia ja jäännösjännityksiä.

Hitsausaine koostuu hitsauslisäaineesta ja -apuaaineesta. Hitsauslisäaine on liitettävien pintojen välille sulatettava aine, jota on esimerkiksi hitsauslangat ja -puikot. Hitsatun lisäaineen sulamispiste tulee olla suunnilleen sama kuin perusaineen sulamispiste. Hitsausapuaaine taas mahdollistaa ja helpottaa hitsausta. Kaarihitsauksessa apuaaineena toimii suojakaasu ja jauhekaarihitsauksessa hitsausjauhe. Puikkohitsauksessa apuaaine on päällystetty hitsauslisäaineen päälle. (Lukkari 1997, s. 11; s. 28)

2.1 Hitsauksen lämpövyöhykkeet

Hitsaus synnyttää voimakkaan lämpösyklin materiaalissa. Kaarihitsauksessa sulan metallipisaran lämpötila valokaareissa on 2000–2500 °C ja hitsaussula on kuumimmillaan noin 2000 °C. Hitsauksen liitokseen tuoma lämpö sulattaa hitsauksen lisäaineen lisäksi perusainetta. Kuvassa 2 a) on esitelty hitsausliitokseen tuotu hitsauslisäaine ja hitsauslämmön aiheuttama eri hitsausvyöhykkeiden syntyminen. (Lukkari et al. 2016, s. 66) Vastaavanlaiset lämpövyöhykkeet syntyvät ohutseinäiseen kappaleeseen WAAM:lla valmistaessa kuva b) mukaisesti. Tässä tapauksessa ohutseinäisyydellä tarkoitetaan sulatetun hitsauslisäaineen paksuista seinämää.

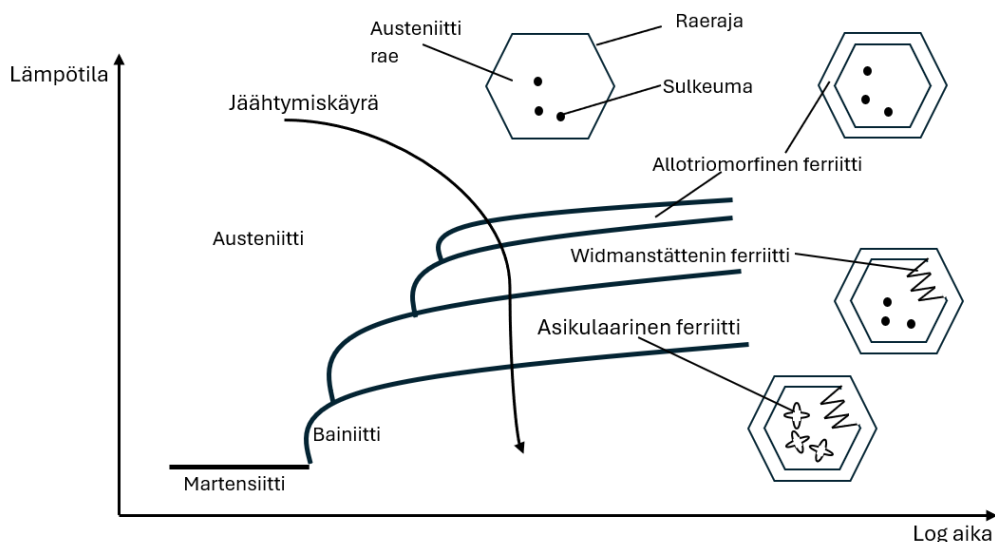


Kuva 2. a) Hitsausliitoksen vyöhykkeet (mukaan kuvaa 5.6. Lukkari et al. 2016, s. 67)
b) WAAM:illa hitsatun rakenteen vyöhykkeet

Kuvassa 2 a) keskelle syntyy hitsauslisäaineen luoma vyöhyke eli sekoittunut hitsimetalli. Sekoittumattomalla vyöhykkeellä perusaine on sulanut, mutta se ei ole sekoittunut hitsin lisäaineen kanssa. Vyöhyke on noin 1–2 mm leveä ja sen mikrorakenne ja ominaisuudet määräytyvät perusaineen koostumuksen mukaan. Hitsin jäähmettyminen alkaa sularajalta. Se on sekoittuneesta hitsimetallista ulommaisina raja, jossa perusaine on täysin sulanut. Osittain sulaneella vyöhykkeellä perusaine sulaa enää osittain. Puhtailla metalleilla alue on kapea ja seosmetalleilla laajempi. Muutosvyöhyke eli HAZ (engl. Heat affected zone) on alue, jossa perusaineeseen tulee lämmön vaikutuksesta muutoksia mikrorakenteeseen. Tämä vyöhyke on yleensä hyvin laaja ja sillä suuri merkitys hitsausliitoksen käytettävyyteen ja ominaisuuksiin. (Lukkari et al. 2016, s. 68) WAAM:illa valmistessa vyöhykkeiden laajuudet eroavat, koska geometria on erilainen liitoshitsaukseen verrattuna.

2.2 Mikrorakenteen muodostuminen

Hitsauksessa syntyvä lämpösykli sulattaa hitsauslisäaineen ja sen jähmettyessä siihen syntyy aluksi austeniittinen rakenne (Kou 2003, p. 232). Terästen mikrorakenteeseen kuuluu allotropia eli niissä voi esiintyä eri kidemuotoja ja faaseja riippuen lämpötilasta. Lämpötilan laskiessa austeniitti alkaa hajoamaan eri faaseiksi. Jatkuvan jäähtymisen käyrällä voidaan selvittää mikrorakenteeseen syntyvät faasit jäähtymisnopeuden perusteella. (William D 2020, pp. 310–311). Kuvassa 3 on esitetty hitsatun niukkahiilisen teräksen jatkuvan jäähtymisen käyrä. Heksagonaalinen muoto kuvaa austeniittiraetta, jonka raerajoille ja sulkeumiin alkaa muodostua eri faaseja rakenteen jäähtyessä. Sulkeuma on metallisulaan jäävä epäpuhtauspartikkeli.



Kuva 3. Hitsatun niukkahiilisen teräksen jatkuvan jäähtymisen käyrä (mukaillen kuvaa 9.21. Kou 2003, p. 232)

Tarkastellessa tarkemmin austeniitin jäähtymistä kuvan 3 mukaisen jäähtymiskäyrän mukaan, sen raerajoille alkaa syntymään allotriomorfista ferriittiä. Jäähtymisen edelleen jatkuessa raerajoille alkaa myös muodostua Widmanstättenin ferriittiä, joka on rakenteeltaan neulasmaista. Rakeeseen syntyneet sulkeumat muodostavat satunnaisesti orientoitunutta neulasmaista asikulaarista ferriittiä. Polygonaalisen ferriitin muodostuminen on myös mahdollista. Ferriittifaasien muodostumisen jälkeen loppurakenteeseen muodostuu perliittiä, joka koostuu ferriitti ja sementiitti lamelleista. Suurilla jäähtymisnopeuksilla

rakenteeseen muodostuu martensiittia ja bainiittia. (Kou 2003, pp. 232–233; William et al. 2020, p. 311)

Syntyvien ferriitti faasien osuudet määräytyvät useasta eri tekijästä: seosaineiden määrä, jäähtymisnopeus, hitsauksessa vaikuttavan hapen määrä ja austeniitin raekoko. Seosaineiden määrän kasvattaminen, austeniitin raekoon suurentaminen ja hapen määrän vähentäminen siirtävät kuvan 3 faasien syntymisen rajoja oikealle. Tämän myötä mahdollisuudet martensiitin ja bainiitin muodostumiselle kasvavat. Jäähtymisnopeuden hidastaminen siirtää jäähtymiskäyrää kuvassa 3 oikealle, jonka seurauksena erityisesti allotriomorfisen ja Widmanstätenin ferriitin määrä rakenteessa kasvaa. (Kou 2003, pp. 234–236)

Syntyvien faasien osuudet vaikuttavat suoraan hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin. Asikulaarisen ferriitin määrän kasvu parantaa materiaalin sitkeyttä. Hienorakeinen raerakenne ja asikulaarinen ferriitti muodostaa mikrorakenteen, joka vastustaa voimakkaasti murtumissäröjen etenemistä rakenteessa. Allotriomorfinen ferriitti, Widmanstätenin ferriitti, bainiitti ja martensiitti alentavat materiaalin sitkeyttä ja heikentävät sen kykyä vastustaa murtumissäröjen etenemistä. (Kou 2003, pp. 238–239)

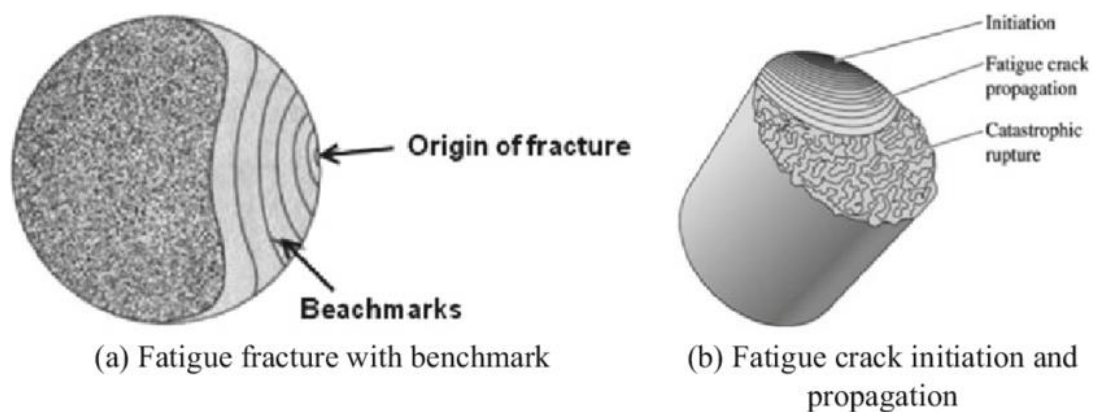
3. VÄSYMINEEN

Dynaamisessa eli ajan suhteen muuttuvassa rasituksessa rakenteeseen aiheutuu kumuloituvia mikroaurioita. Mikroaurioiden eteneminen voi johtaa rakenteen murtumiseen. Tätä ilmiötä kutsutaan väsymiseksi. Mikroaurioiden etenemiseen vaikuttaa merkittävästi kappaleen valmistusprosessi, pinnanlaatu, kappaleen muoto ja pintaan tehty käsittely. (Salmi & Pajunen 2010, s. 353)

3.1 Väsymisen murtumismekaniikka

Väsymisen murtumismekanismi voidaan jaotella ydintymiseen ja murtuman etenemiseen kohti lopullista murtumaa. Väsymissärö ydintyy materiaalin epäjatkuvuuskohtiin tai sen mikrorakenteellisiin vikoihin. Etenemisessä murtopintaan syntyy etenemisjälkiä. Yksi etenemisjälki voi syntyä yhdestä väsymissyklistä, mutta varsinkin pienillä amplitudeilla yksi etenemisjälki voi edustaa montaa sykliä. (Kuokkala 2005, s. 122–130)

Kuvassa 4 on esitetty väsymisen aiheuttama särön ydintyminen ja eteneminen lopulliseen rakenteen murtumiseen. Aluksi särö ydintyy kappaleen pintaan, jonka jälkeen se etenee muodostaen etenemisjälkiä. Etenemisjäljet ovat muodoltaan aaltomaisia ja samansuuntaisia. Kun murtuma on kasvanut riittävän suureksi, tapahtuu lopullinen nopea murtuminen.



Kuva 4. Väsymisen ydintyminen ja eteneminen (Kumbhalkar 2018 p. 41)

Makroskooppisesti tarkastellessa särön ydintyminen on täysin elastista eli palautuvaa muodonmuutosta, koska jännitysamplitudi on tyypillisesti pienempi kuin materiaalin myötölujuus. Mikrotasolla jotkin monirakeisen metallin rakeista muokkautuu plastisesti,

vaikka makrotasolla muodonmuutos olisi elastista. Tämän myötä särön on mahdollista kasvaa ja edetä. (Kuokkala 2005, s. 122–130)

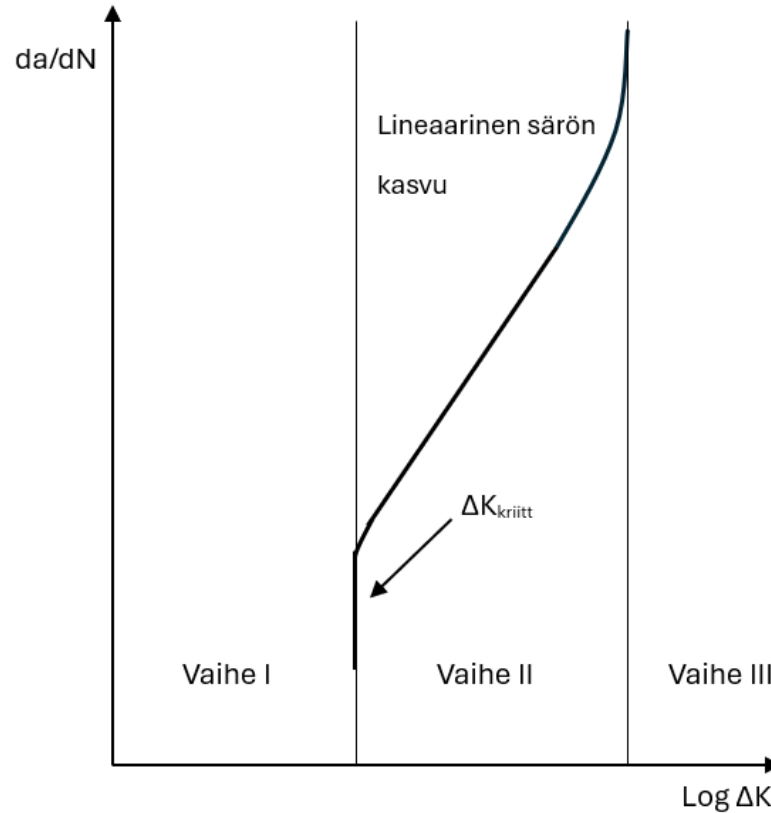
Murtuman etenemisnopeuden määrittäminen on hyödyllistä, koska sen avulla voidaan päätellä materiaalin väsymisikä annetulla kuormitusamplitudilla. Väsymisiällä tarkoitetaan murtumiseen tarvittavaa kuormitusyhtälön määrää. Parisin yhtälöllä voidaan esittää väsymismurtuman pituuden kasvunopeus väsymisen aikana

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

jossa a on särön koko, N väsymisyhtälön määrää, vakio C riippuu materiaalista ja jännityssuhteesta R_s , ΔK on jännitysintensiiviteettikerroin ja m kokeellinen vakio. Jännityssuhde on minimi- ja maksimijännityksen välinen suhde. Parisin yhtälö voidaan esittää logaritmisesti

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m * \log(\Delta K) + \log(C), \quad (2)$$

joka vastaa suoran yhtälöä logaritmisessa koordinaatistossa kuvan 5 mukaisesti. Parisin yhtälö pätee vain logaritmisessa koordinaatistossa suoralla osalla eli alueella II. (Kuokkala 2005, s. 130)



Kuva 5. Murtuman etenemisnopeus eri jännitysintensiiteettikertoimella ja jännityssuhteella (mukaillen Lukkari et al. 2016, s. 94)

Kuvasta 5 voidaan päätellä murtuman aluksi etenevän nopeasti vaiheessa I. Vaiheessa II särö etenee nopeudella da/dN . Lopussa vaiheessa III väsyminen johtaa nopeaan murtumiseen. Jos jännitysintensiiteettikertoimen arvo ei ylitä kriittistä jännitysintensiiteettikertoiminta ΔK_{kriitt} , murtuma ei lähde etenemään. Parisin yhtälöä integroimalla saadaan murtumaan johtava väsytyssyklien määrä

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m}, \quad (3)$$

jossa a_c on kriittinen särön pituus ja a_0 alkusärön pituus. (Lukkari et al. 2016, s. 94)

3.2 Hitsausvirheet ja väsyminen

Hitsaaminen aiheuttaa virheitä rakenteeseen. Hitsausvirheet toimivat väsymisen ydintymiskohtina, joista väsymisen alkusäröt syntyvät. Väsymisen näkökulmasta vikojen merkitys riippuu niiden koosta, terävyydestä ja orientaatiosta kuormitukseen nähden. Jos

hitsausvirhe on riittävän suuri, ei ydintymisen vaihetta synny vaan väsymissärön eteneminen siirtyy suoraan lineaarisen kasvun vaiheeseen (kuva 5, vaihe II). Virheiden määrään ja kokoon vaikuttaa hitsausparametrit ja hitsausprosessi. Tyypillisiä hitsausvirheitä ovat liitosvirheet, reunahaavat, säröt, halkeamat, huokoisuus, kuonasulkeumat, epätasainen sulaminen ja riittämätön tunkeuma. (Singh R 2016, p. 280)

Reunahaava on uurre hitsaussauman reunassa ja se on hyvin todennäköinen väsymisen ydintymiskohta. Halkeamat taas voidaan jaotella kylmä- ja kuumahalkeamiin. Kylmähalkeamia esiintyy jäähtyneessä hitsisulassa ja muutosvyöhykkeessä, ja ne syntyvät raerajoille ja rakeiden yli. Niiden syntyyn vaikuttaa voimakkaasti materiaaliin liukeneva vedyn määrä, murtuma-alttiit mikrorakenteet ja jäännösjännityksen suuruus. Kuumahalkeamia syntyy, kun hitsisulan jähmettyessä siihen siirtyy epäpuhauksia. Erilaiset lineaariset halkeamat ovat merkittäviä epäjatkuvuuskohtia, hyvin todennäköisiä väsymisen ydintymiskohtia ja väsymisen alkusäröjä. (Singh R 2016, p. 283)

Rakenteeseen syntyy huokoisia, kun kaasua ja epäpuhauksia liukenee metallisulaan. Huokoisia voi syntyä myös hitsattujen kerrosten välille. Huokoiset ovat geometrialtaan pyöreitä, jonka takia niillä ei ole yleensä suurta merkitystä väsymisen kannalta. Kuitenkin rakenteen pintaan syntyvät huokoiset ovat todennäköisiä väsymisen ydintymiskohtia. Kuonasulkeumassa ei epämetallista ainetta kerääntyy metallisulaan tai hitsin pinnalle. Rakenteen sisään jäävä kuona toimii merkittävänä väsymisen ydintymiskohtana. (Singh R 2016, pp. 281–282)

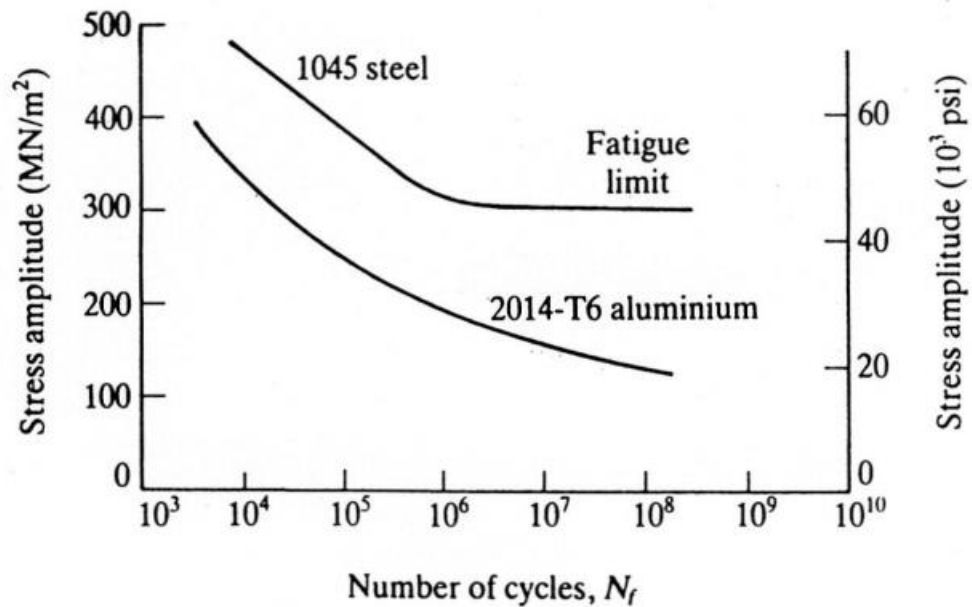
Epätasaisessa sulamisessa kaikki hitsin pinnat eivät sula riittävästi, jolloin hitsiin syntyy heikkoja kohtia. Nämä kohdat ovat otollisia väsymisen ydintymiskohtia. Jos taas tunkeuma ei ole riittävää, jää hitsiin sulamattomia kohtia. Sulamattoman kohdan ja hitsin väliin juuren puolelle jää lovi, josta väsyminen pääsee ydintymään. (Singh R 2016, pp. 281–282)

3.3 Väsymislaskenta

Väsymislaskenta voidaan jaotella jännitysväsymiseen (HCF, engl. High cycle fatigue) ja myötöväsymiseen (LCF, engl. Low cycle fatigue). Jännitysväsyminen käsittelee väsymistä noin kymmenestä tuhannesta syklistä eteenpäin ja myötöväsyminen alle kymmentuhannen syklin väsymistä. (Salmi & Pajunen 2010, s.355)

Materiaalille voidaan piirtää SN-käyrä, jota kutsutaan myös Wöhler-käyräksi. Siitä saadaan selville materiaaliin kestoikä eri jännityksillä. Vaihtolujuus on kohta käyrässä, jossa

alkaa tasainen alue. Kuvassa 6 on esitetty SN-käyrä 1045-teräkselle ja 2014-T6-alumiinille. Kuvan perusteella alumiinilla ei ole selkeätä vaihtolujuutta, mutta kyseisellä teräksellä se on noin 300 MPa 10^6 syklin kohdalla. Yleisesti teräksillä väsymisraja on 10^5 – 10^6 syklin välillä. (Kuokkala 2005, s. 122–123)



Kuva 6. SN-käyrä alumiinille ja teräkselle (Kuokkala 2005, s. 122–123)

Terästen vaihtolujuus on arvioitu olevan noin puolet murtolujuudesta, kun murtolujuus on alle 1 400 MPa. Tuhatta jännityssykliä vastaava väsymislujuus on karkeasti noin 90 % murtolujuudesta. Näiden tulosten perusteella voidaan muodostaa lauseke jännityssykliden ja väsymislujuuden välille

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{1.6218R_m} \right)^{-11.75}, \quad (4)$$

jossa σ_a on jännitysamplitudi ja R_m murtolujuus. (Salmi & Pajunen 2010, s. 360–361)

4. WAAM-MENETELMÄ

Langan suorakerrostus (WAAM) on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa metallilankaa kerrostetaan käyttämällä valokaaresta saatavaa energiaa. Syntyvän kappaleen muoto saadaan valmistettua liikuttamalla materiaalilähteen päätä robotilla. (Rathee & Srivastava 2024, p. 26)

WAAM luokituu suoralla energian lisäyksellä (DED, engl. Direct energy deposition) tapahtuviin ainetta lisääviin menetelmiin. Syötettävänä materiaalina toimii metallilanka, joka hitsataan kerroksittain halutun rakenteen valmistamiseksi. Hitsaus voidaan toteuttaa MIG- tai MAG-hitsauksena eli GMAW-menetelmänä (engl. Gas metal arc welding.), TIG-hitsauksena (engl. Tungsten inert gas) GTAW-menetelmänä (engl. Gas tungsten arc welding), plasman avulla PAW (engl. Plasma arc welding) tai näiden hybridimenetelmänä. Hitsausmenetelmistä yleisin on MAG/MAG-hitsaus, koska siinä langansyöttö on tasaista ja sillä voidaan valmistaa isompia kappaleita verrattuna muihin menetelmiin. (Rathee & Srivastava 2024, pp. 56–56) Hitsauslisäaine on varastoitu kelalle, jonka ansiosta sen riittävyys on muita menetelmiä parempi.

4.1 Menetelmän edut ja haitat

Materiaalia poistaviin valmistusmenetelmiin nähden WAAM:n etu on pienempi käytetyn materiaalin määrä. Hukkamateriaalia ei juurikaan synny prosessin aikana. WAAM on tehokas tapa valmistaa ohutseinäisiä kappaleita; sen valmistusnopeuden on arvioitu olevan noin 50–130 g/min. Työstökoneisiin nähden laitteisto on yksinkertainen, koska se vaatii vain hitsauspäisen robotin ja työalustan. (Rathee & Srivastava 2024, p. 28).

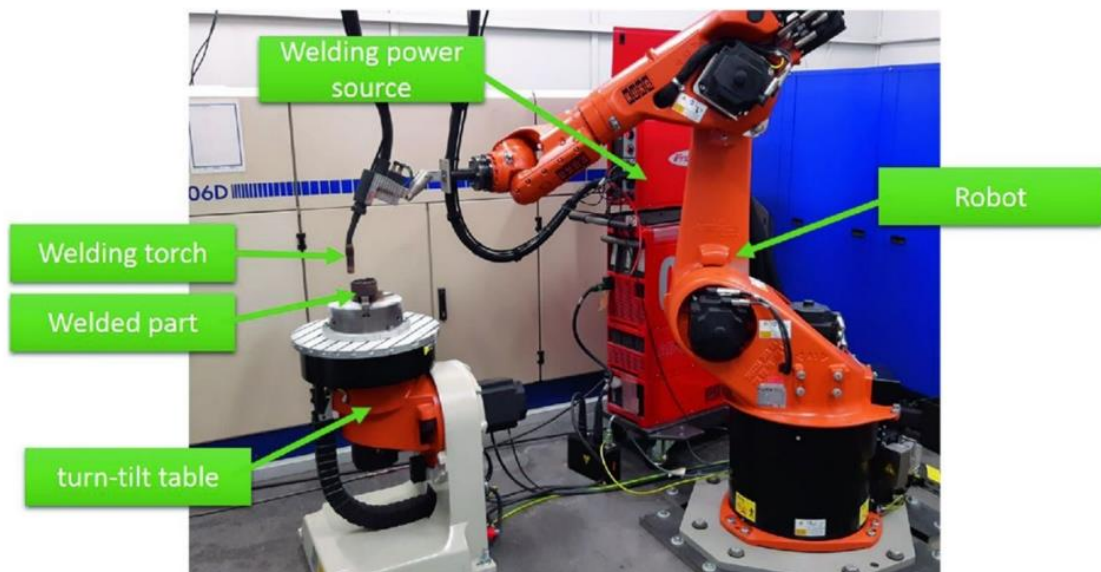
Menetelmän haitat liittyvät pääasiallisesti valmistetun kappaleen ominaisuuksiin. Suuri lämmön tuonti ja jäännösjännitykset aiheuttavat poikkeamia kappaleiden muodoissa ja mitoissa. Kappaleen pinta on hyvin aaltoileva, jonka myötä usein pintojen koneistamista vaaditaan asetettujen vaatimusten täyttämiseksi. Valmistuksen aikana rakenne kokee monta lämpösykliä, jolla on merkittävä vaikutus raekokoon, mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Rakenteeseen syntyy herkästi mikrorakenteellisia vikoja kuten huokoisuutta ja murtumia raerajoilla. (Rathee & Srivastava 2024, pp. 28–31)

4.2 MIG/MAG-pohjainen laitteisto ja sen toimintaperiaate

MIG/MAG-hitsaus toteutetaan laitteistolla, jossa hitsauslisäainetta syötetään automaattisesti hitsauspistoolin kärjestä. Jännitelähteellä luodaan lankaa sulattava valokaari.

Maadoitusleuat on kytketty työkappaleeseen, jolloin virtapiiri sulkeutuu ja sulattava valo-kaari syntyy. Hitsauspistoolista syötetään suojakaasua, joka suojaa sulaa metallia ympäristön kaasuilta ja epäpuhtauksilta. Suojakaasuna käytetään MIG-hitsauksessa inerttiä kaasua, kuten argonia tai heliumia. MAG-hitsaus käyttää aktiivista kaasua, esimerkiksi hiilidioksidia. (Rathee & Srivastava 2024, p. 57)

Kuvassa 7 on MIG-pohjainen WAAM-laitteisto. Erot perinteiseen hitsaukseen on hitsauspistoolin päätä ohjaava robotti ja kääntyvä alusta, johon maadoitus on kytketty (Rathee & Srivastava 2024, p. 57).



Kuva 7. WAAM-laitteisto MIG-hitsauksella (Treutler et al. 2024 p. 248)

Valmistaminen tapahtuu hitsaamalla yksi kerros kerrallaan. Ennen siirtymistä seuraavaan kerrokseen joudutaan odottamaan edellisen kerroksen jähmettymistä. Seinämäpaksuuteen vaikuttavat käytetyn hitsauslangan paksuus ja muut prosessin parametrit. Kun haluttu muoto on saavutettu, kappale voi vaatia jälkikäsittelyä leikkaamisen irti pohjalevystä, mahdollisia lämpökäsittelyjä ja pintojen koneistamista.

5. VÄSYMISEN ANALYSOINTI

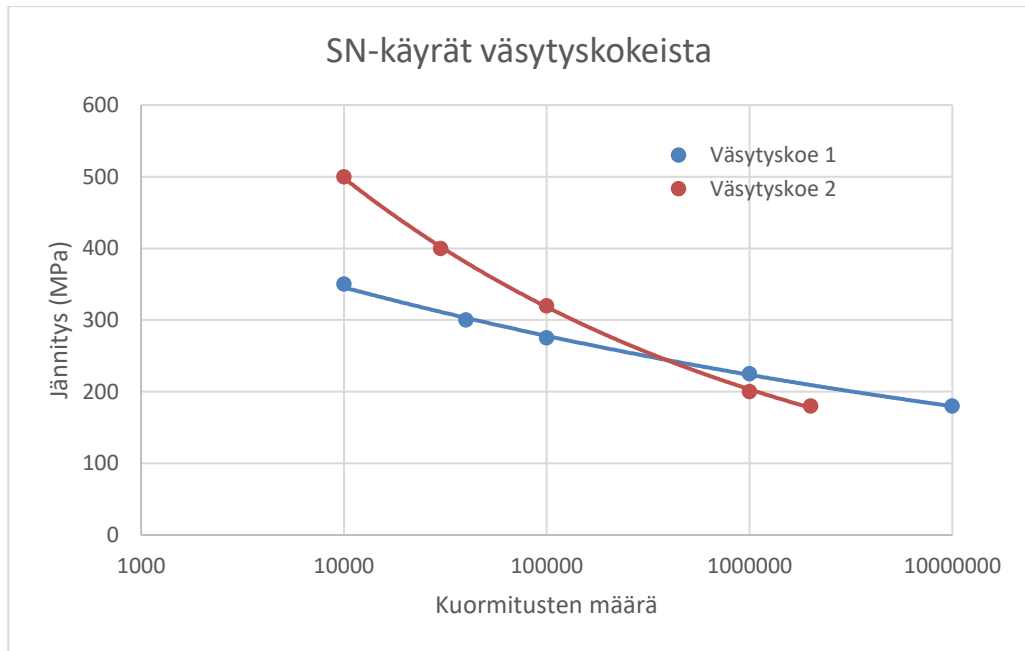
5.1 Kokeellisia tuloksia

5.1.1 Väsytykskoe ja mikrorakenteen kuvaus

WAAM:illa valmistetun teräksen väsymistä on tutkittu väsytykskokeella ja mikrorakennetta röntgenkristallografian avulla. Esimerkkitutkimuksessa hitsaus toteutettiin MIG-hitsauksena 1,2 mm:n paksuisella ER70S-6-hitsauslangalla, jonka hiilipitoisuus on 0,07 %. Valmistetun kappaleen pinnat koneistettiin tasaisesti saavuttaen 2,5 mm:n seinämepaksuus. Rakenteesta leikattiin pysty- ja vaakatasoisia näytteitä kipinätyöstöllä, joille tehtiin väsytykskokeita. (Ayan & Kahraman 2022, pp. 3–4)

Toisessa vastaavassa esimerkkitutkimuksessa hitsattiin MIG-hitsauksella 1.5 mm:n paksuisella hiiliteräslangalla, jonka hiilipitoisuus on 0.1 %. Kuten ensimmäisessä esimerkkitutkimuksessa, rakenteesta otettiin pysty- ja vaakasuuntaisia näytteitä. Näytteille tehtiin vastaavanlaiset väsytykskokeet kuin ensimmäisessä esimerkkitutkimuksessa. (Rautio et al. 2024, pp. 147–148)

Kuvaan 8 on koottu molempien tutkimusten väsytykskokeista tehdyt SN-käyrät. Väsytykskoe 1 on ensimmäisen tutkimuksen käyrä ja väsytykskoe 2 toisen tutkimuksen. Väsytykskokeiden tuloksissa ei ollut merkittävää eroa pysty- ja vaakasuuntaisilla näytteillä, joten kuvan 8 käyrät ovat keskiarvo näytteistä.

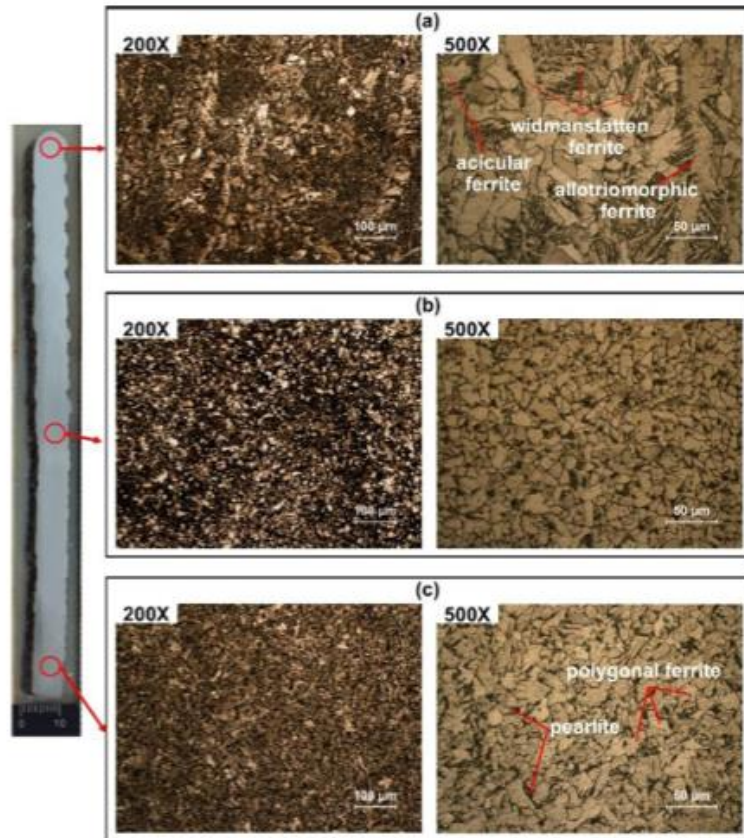


Kuva 8. SN-käyrät (mukaillen kuvaa 8. Ayan & Kahraman 2022, p. 5 ja kuvaa 4. Rautio et al. 2024, p 152)

Väsytykskokeessa 1 väsymismurtumaa ei saatu syntymään 176 MPa jännityksen tasolla ja koe lopetettiin 10^7 syklin kohdalla (Ayan & Kahraman 2022, pp. 5–6). Vastaavasti väsytykskokeessa 2 murtumaa ei esiintynyt 180 MPa jännityksellä ja koe pysäytettiin $2 \cdot 10^6$ syklin kohdalla (Rautio et al. 2024, pp. 151–152). Kuvan 8 käyrien viimeiset pisteet vastaavat näitä tuloksia.

Käyrien jyrkkyydessä on eroavaisuutta, joka voi johtua eri hitsauslangasta ja poikkeavista valmistusparametreistä. Matalilla kuormituksen määrillä väsymislujuudessa on merkittävää eroavaisuutta. Molemmissa kokeissa vaihtolujuus on arvioutu olevan noin 180 MPa.

Ensimmäisessä tutkimuksessa kuvattiin väsytykskokeissa käytetyn pystysuuntaisen näytteen faasirakennetta röntgenkristallografian avulla. Kuvaus tehtiin näytteen kolmeen eri kohtaa kuvan 9 mukaisesti. Kuva on a) rakenteen yläosasta kuvattua, kuva b) on rakenteen keskeltä kuvattua ja kuva c) on alaosasta kuvattu. Ylimpään ja alimpaan kuvaan on merkitty havaitut faasit. Rakenteesta otettiin 200- ja 500-kertaiset suurennokset. (Ayan & Kahraman 2022, p. 7)



Kuva 9. Mikrorakenne eri kohdista näytettä (Ayan & Kahraman 2022, p. 7)

Ylimpiin kerrokseen muodostuu perinteistä hitsaamista vastaava mikrorakenne, jossa esiintyy asikulaarista ferriittiä, Widmanstättenin ferriittiä ja allotriomorfista ferriittiä. Alimpiin kerrokseen muodostunut polygonaalista ferriittiä ja perliittiä, joka vastaa lämpökäsittelyn niukkahiilisen teräksen hitaassa jäähtymisessä syntynyttä mikrorakennetta. Alimpien kerrosten raerakenne on ylempiä kerroksia tasaisempaa ja hienojakoisempaa.

5.1.2 Särön kasvun koe

Kuten hitsatut rakenteet yleisesti, ovat WAAM-menetelmällä valmistetut rakenteet alttiita hitsausvirheille. Hitsausvirheistä seuraa väsymissäröjen ydintymistä ja riittävän suurilla hitsausvirheillä lähtee väsymissärö suoraan etenemään. WAAM-menetelmällä valmistessa tyypillisiä virheitä rakenteessa ovat huokoisuus ja delaminaatio (Jin W et al. 2020, p. 15). Huokoisuutta aiheuttavat langan ja alustan epäpuhtaudet, riittämätön lämmöntuonti ja roiskeet (Jin W et al. 2020, p. 15). Delaminaatio tarkoittaa hitsattujen kerrosten välistä liitosvirhettä ja sitä aiheuttaa vain osittainen kerrosten välinen sulaminen toisiinsa

(Jin W et al. 2020, p. 15). Kun kerrokset eivät sula riittävästi, niiden väliin syntyy materiaaliin epäjatkuvuuskohta, josta väsymissärö pääsee ydintymään. Kuten aiemmin on mainittu, hitsatuissa rakenteissa alkusärö on kriittinen vikatyypin väsymisen kannalta. Alkusärön tyypillinen pituus on noin 100 μm (Salmi & Pajunen 2010, s. 353).

Hitsauksessa olevaa huokoisuutta voidaan myös pitää alkusäröjen tavoin käyttäytyvinä hitsausvirheinä. Valmistuksen aiheuttama huokoisten koko on korkeintaan 100 μm (Schmauder et al. 2023, p. 126). Oletetaan että rakenteessa on 100 μm huokoinen, joka toimii alkusärönä. Koska särön koko on suuri, ydintymisen vaihe on hyvin lyhyt ja väsyminen siirtyy nopeasti suoraan särön etenemisen vaiheeseen. Näin voidaan soveltaa Parisin yhtälöä, joka pätee särön etenemisen vaiheessa.

Parisin yhtälön integroidun muodon (yhtälö 3) ratkaiseminen on kuitenkin ongelmallista, koska jännitysintensiiteettikerroin riippuu särön pituudesta. Tämä voidaan ratkaista oletamalla särön olevan symmetrinen ja sen pituus on $2a$. Tämän yksinkertaistuksen avulla on johdettu tulos HCF-alueella tapahtuvalle väsymiselle:

$$N = \frac{1}{C \sigma_a^m \pi^{m/2}} \frac{(a_0 + (\sigma_a^{k-m} / (C \bar{C} \pi^{m/2} (m/2 - 1)))^{1/(m/2-1)})^{1-m/2}}{m/2 - 1}, \quad (5)$$

jossa k materiaalin SN-käyrän jyrkkyydestä riippuvainen vakio. Yleensä teräksillä k on 13,3. \bar{C} riippuu vaihtolajuudesta ja vakiosta k :

$$\bar{C} = N_{\infty} \sigma_w^k, \quad (6)$$

jossa σ_w on vaihtolajuus ja N_{∞} on sitä vastaava väsytyssyklarimäärä. Kaavan 5 mukaista tulosta kutsutaan myös integroiduksi Parisin laiksi. (Pugno et al. 2006 pp. 1336–1342)

Pariisin lakiin liittyen eräässä kokeessa ER70S-6 hitsauslangalla valmistetun kappaleen särön kasvua tutkittiin ASTM E647-standardin mukaisesti. Käytetty seinämäpaksuus oli 3 mm ja väsytyksen taajuus 20 Hz. Kappaleeseen tehtiin esisärö ja sen etenemistä tutkittiin 250 kN kuormituksella. Tuloksena saatiin Parisin yhtälön vakion C arvoksi $3,87 \cdot 10^{-14}$ ja vakion m arvoksi 3,25. (Huang et al. 2023, pp. 2–7)

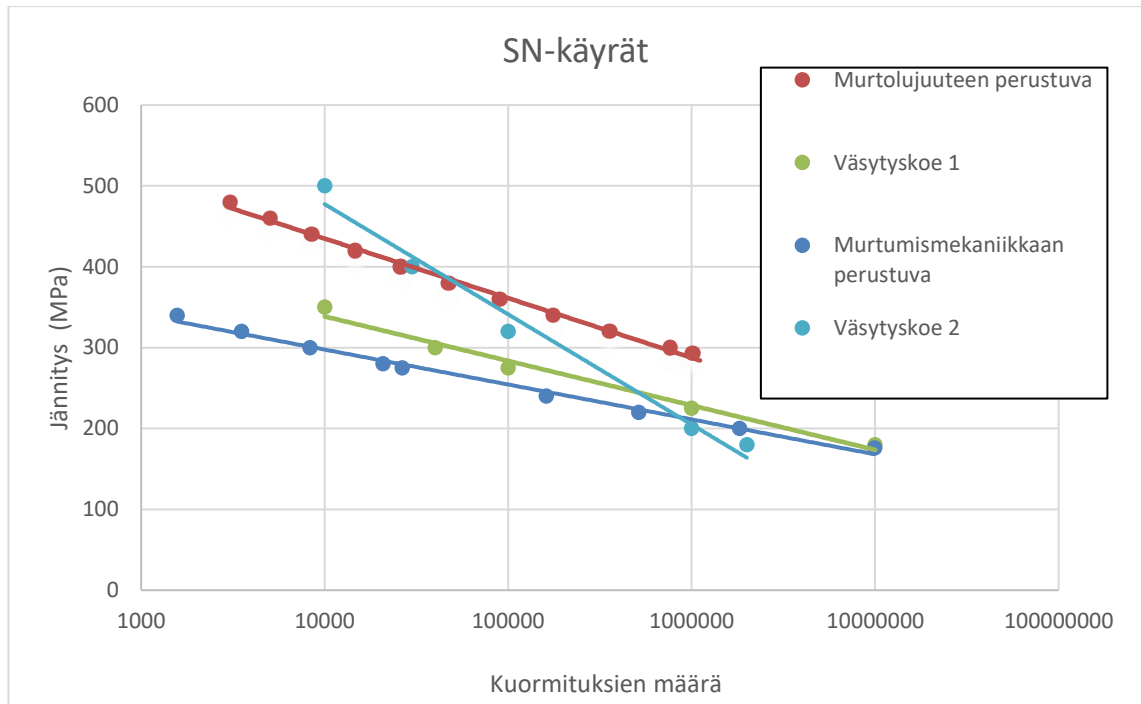
Tarkastellaan vielä aiemmin kuvattua väsymiskoe 1, jossa saatiin väsymislujuudeksi 176 MPa 10^7 syklin jälkeen. Jos sijoitetaan nämä alkuarvot ja aiemmin saadut vakiot C , m ja k yhtälöihin (5) ja (6), väsymisikä voidaan määrittää eri jännityksen arvoilla. 275 MPa jännityksellä väsymisikä on noin $2,6 \cdot 10^4$ sykliä, joka on pienempi kuin väsytykskokeessa

saatu tulos. Vaihtolujuus on kuitenkin sama kuin väsytykskoeksessa, koska väsytykskoeken tulokset toimivat lähtöarvoina.

5.2 Valmistuksen vaikutus väsymislujuuteen

Vertaillaan edellä saatuja väsytykskoeken ja särön kasvun koeken tuloksia murtolujuuteen perustuvaan laskennalliseen tulokseen. Kuvaan 10 on koottu eri menetelmillä saadut SN-käyrät. Hitsatun ER70S-6 teräksen murtolujuus samalla suojakaasupitoisuudella kuin väsytyks- ja särönkasvunkoeksessa on noin 586 MPa (The Harris product group). Murtolujuuden perusteella voidaan piirtää SN-käyrä hyödyntämällä terästen väsymistä karkeasti arvioivaa yhtälöä (kaava 4). Koska vaihtolujuus on noin puolet murtolujuudesta, käyrän viimeinen piste on 293 MPa. Tämän jälkeen käyrä jatkaisi vaakatasossa. Laskentamenetelmä perustuu vain murtolujuuteen, eikä se huomionnut mitään muita väsymiseen vaikuttavia tekijöitä.

Väsytykskoeksissa murtumaa ei havaittu noin 180 MPa jännityksellä, jonka voidaan arvioida olevan väsytykskoeksilla saatu vaihtolujuus. Väsytykskoekiden vaihtolujuuden arvo on noin 113 MPa alhaisempi verrattuna murtolujuudesta laskettuun vaihtolujuuteen. Murtumismekaniikkaan perustuvan käyrän ja ensimmäisen väsytykskoeken välillä ei ole merkittävää eroa. Toisen väsytykskoeken käyrä ensimmäistä selvästi jyrkempi ja se leikkaa murtolujuuteen perustuvan käyrän. Kuitenkin korkeammilla väsytykskuormitusten määrällä väsymislujuus eroaa vähän väsytykskoeksista 1 ja murtumismekaniikka perustuvasta koeksista. Tulosten perusteella WAAM-menetelmällä valmistetun rakenteen väsymislujuus oli alhaisempi verrattuna murtolujuuteen perustuvaan karkeaan teoreettiseen arvioon. Tämä perusteella valmistusmenetelmällä on merkittävä vaikutus väsymislujuuteen. On kuitenkin huomioitava, että murtolujuuteen perustuva arvio on hyvin karkea.



Kuva 10. Eri menetelmillä muodostetut SN-käyrät

Yleisesti voidaan todeta, että käytännön sovelluksissa WAAM:lla valmistetun kappaleen geometria on väsytykskokeen näytettä monimutkaisempia ja jännitysamplitudi ei ole vakio. Tämän takia rakenteeseen kohdistuva väsyttävä kuormitus ei ole tasaista, joka tulee huomioida kyseisten rakenteiden suunnittelussa. WAAM:lla valmistetun kappaleen yläosan, eli viimeisten hitsattujen kerrosten, rakenteen faasit vastustavat muuta rakennetta heikommin väsytyshmurtuman etenemistä, joten siellä väsymisluku on alhaisempaa. Tämä päätelmä ei näy suoraan väsytykskokeissa, koska niiden tulokset on laskettu keskimääräisistä tuloksista. Aiemmin esitetyn kuvatun mikrorakenteen perusteella pystytään kuitenkin toteamaan mikrorakenteen muuttuvan viimeisissä hitsatuissa kerroksissa ja niissä syntyvien faasien olevan heikompiä väsymisen näkökulmasta. Myös tämä tulee huomioida suunnittelussa ja välttää suurimpia väsyttäviä kuormituksia kappaleen yläosissa. Vaihtoehtoisesti voidaan mikrorakennetta muuttaa lämpökäsittelyillä.

5.3 Väsymislukuuden parantaminen

WAAM:lla valmistetun rakenteen väsymislukuutta voidaan parantaa tekemällä siihen erilaisia jälkikäsittelyitä. Käsittelyillä parannetaan rakenteen pinnalaatua ja vähennetään mikro- ja makrovikojen määrää rakenteessa. Tällä tavoin voidaan varmistaa, että tuote täyttää sovelluksen ja käyttöolosuhteiden mukaiset vaatimukset. (Berto & Du Plessis 2024, p. 215)

Pinnanlaatu jää hyvin epätasaiseksi valmistuksen jälkeen, joka mahdollistaa väsymisjärjestöjen etenemisen kappaleen pinnalta. Pinnan käsittelyllä pystytään parantamaan väsymisen keston lisäksi tuotteen tarkkuutta, kulumisenkestokykyä, ulkonäköä ja korroosion kestävyttä. Tähän tarkoitukseen soveltuvat jälkikäsittelyt voidaan jakaa ainetta poistaviin ja ainetta lisääviin menetelmiin. Ainetta poistavia menetelmiä ovat koneistus, jyr-sintä, hionta ja kiillotus. Lisääviä menetelmiä taas ovat kaikki pinnoitukset, joilla kappaleen pinnan väsymisenkestoa pystytään lisäämään. Lisäävien ja poistavien menetelmien lisäksi pintaa voidaan kuulapuhaltaa, jolla saadaan puristusjännitys kappaleen pintaan, samalla alentaen väsymisen keskijännitystä. (Berto & Du Plessis 2024, pp. 216–217)

WAAM-menetelmällä valmistettujen kappaleiden väsymislujouden parantamiseen liittyvät myös lämpökäsittelyt. Lämpökäsittelyllä pystytään vaikuttamaan mikrorakenteeseen ja jäännösjännityksiin. Hehkutus poistaa jäännösjännityksiä ja homogenisoi mikrorakennetta. Jäännösjännitysten poisto alentaa väsymisen keskijännitystä ja mikrorakenteen homogenisointi parantaa väsymisenkestoa-ominaisuuksia. (Berto & Du Plessis 2024, p. 217) Rakenteen raekokoa pystytään taas pienentämään normalisointi lämpökäsittelyllä. Normalisoinnissa lämpötilaa nostetaan hieman austeniitin syntymiseen vaadittavan lämpötilan yläpuolelle, jolloin mikrorakenne muuttuu täysin pienirakeiseksi austeniitiksi. Teräs jäädytetään hitaasti huoneenlämpöön, jolloin saadaan aikaan ferriitin ja perliitin muodostama pienirakeinen mikrorakenne. (Lukkari et al. 2016, s. 44)

Väsymislujuutta voidaan myös parantaa hitsauslisäaineen valinnalla. Niobi-, titaani- ja vanadiiniseosteilla lisäaineilla pystytään tehokkaasti estämään rakeenkasvu. Tämän lisäksi titaaniseostus tiivistää teräksen rakennetta ja vanadiini lisää kulumiskestävyttä. Näitä mikroseosaineita lisätään yleensä alle 1 painoprosentin verran lisäaineeseen. (Lukkari et al. 2016, s. 42–43)

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää vaikuttaako WAAM-menetelmällä valmistaminen tuotetun kappaleen väsymislujuuteen. Hitsatut rakenteet ovat alttiita väsymiselle, joten väsymislujuus on olennainen ominaisuus myös WAAM-rakenteilla. Keskeisimpinä teorioina käsiteltiin hitsauksen mikrorakenteen muutoksia, hitsausvirheitä ja väsymisen murtumismekaniikkaa. MIG/MAG-pohjaisen laitteiston toimintaperiaate kuvattiin, koska se on yleisin ratkaisu valmistuslaitteistoksi.

Väsytykskokeella saatiin arvio WAAM-menetelmällä valmistamisen vaikutuksesta väsymiseen ja mikrorakenteen kuvauksella pystyttiin selittämään väsymislujuudessa tapahtuvat muutokset. Särön kasvun kokeiden tulosten perusteella arvioitiin väsymislujuutta hyödyntämällä integroitua Parisin lakia. Lasketut väsymislujuusarviot perustuivat ainoastaan näihin kokeellisiin havaintoihin ja niihin liittyviin oletuksiin. Kun näitä tuloksia verrattiin murtolujuuteen pohjautuvaan teoreettiseen arvioon, havaittiin WAAM-rakenteiden väsymislujuuden olevan selvästi alhaisempi. On kuitenkin huomioitava, että viimeisenä hitsattujen kerrosten faasit vastustavat heikommin väsymismurtuman etenemistä. Tämän vuoksi suuret väsyttävät kuormitukset voivat käytännössä olla kriittisiä juuri näissä rakenteen osissa.

WAAM-menetelmällä valmistettujen rakenteiden väsymislujuutta pystytään parantamaan erilaisilla jälkikäsittely toimenpiteillä. Esimerkiksi lämpökäsittelyllä pystytään muokkaamaan mikrorakennetta ja näin parantamaan väsymisenkestävyyttä. Myös pintojen käsittelyllä ja hitsauslisäaineen seostuksella saadaan parannettua väsymisenkesto ominaisuuksia.

WAAM-rakenteiden väsyminen vaatii lisää tutkimustyötä. Eri hitsausparametrien, kuten hitsauslisäaineen, suojakaasun ja hitsausnopeuden, vaikutusta väsymiseen tulisi tutkia syvällisemmin. Tutkimuksien avulla pystyttäisiin tekemään parempia valmistukseen liittyviä valintoja väsymisen näkökulmasta. Mikrorakenteen ja väsymisen välille tulisi tehdä lisää tarkempia tutkimuksia, jotta voitaisiin paremmin analysoida syntyneiden faasien vaikutusta väsymiseen. Kun WAAM-rakenteiden väsymiskäyttäytyminen tunnettaisiin tarkemmin, voidaan niitä hyödyntää turvallisemmin ja luotettavammin eri sovelluksissa.

LÄHTEET

- Ayan, Y. & Kahraman, N. (2022). Bending fatigue properties of structural steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM). *Engineering science and technology, an international journal*. Vol. 35, pp. 3–7
- Berto, F. & Du Plessis, A. (2024). *Fatigue in Additive Manufactured Metals*. 1st ed. Elsevier, Amsterdam. pp. 215–217
- Hantula J. (2021). Moottorin tuen tulostaminen WAAM-tekniikalla. Vaasan ammattikorkeakoulun verkkolehti. Saatavissa (viitattu 21.3.2025): <https://energiaa.vamk.fi/artikkelit/osaaminen/moottorin-tuen-tulostus-waam-tekniikalla/>
- Huang, C., Zheng, Y., Chen, T., Ghafoori, E. & Gardner, L. (2023). Fatigue crack growth behaviour of wire arc additively manufactured steels. *International Journal of Fatigue*. Vol. 173, pp. 2–7
- Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D. & Liu, W. (2020). Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review. *Applied Sciences*. Vol. 10, no. 5, pp 15
- Kou, S. (2003) *Welding metallurgy*. 2nd ed. New York: Wiley. pp. 232–239
- Kumbhalkar, M., Bhope, D. & Vanalkar V. (2018). Finite Element Analysis of Rail Vehicle Suspension Spring for Its Fatigue Life Improvement. *Advanced Manufacturing and Materials Science*. Vol. 45. pp. 41
- Kuokkala, V. (2005). Materiaalien mekaaninen käyttäytyminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Materiaaliopin laitos, Tampere. 122–130 s.
- Lukkari, J. (1997). *Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus*. Opetushallitus, Helsinki. 11–28 s.
- Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. (2016). *Hitsauksen materiaalioppi*. Osa 1, Metallopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korroosio. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y, Helsinki. 66 s.
- Pugno, N., Ciavarella, M., Cornetti, P. & Carpinteri, A. (2006). A generalized Paris' law for fatigue crack growth. *Journal of the mechanics and physics of solids*. Vol. 54, no. pp. 71336–1342
- Rathee, S. & Srivastava, M. (2024). *Wire Arc Additive Manufacturing : Fundamental Science and Advances*. 1st ed. Vol. 1 CRC Press. p. 26
- Rautio, T., Hietala, M., Jaskari, M., Keskitalo, M. & Järvenpää, A. (2024). Fatigue Resistance Assessment of WAAM Carbon Steel. *Key Engineering Materials*. vol. 975. pp. 147–153
- Salmi, T. & Pajunen, S. (2010). *Lujuusoppi*. Pressus, Tampere. 353–361 s.
- Schmauder, S., Sajadi, F. & Kadkhodapour, J. (2023). *Quality analysis of additively manufactured metals: simulation approaches, processes, and microstructure properties*. 1st ed. Elsevier Amsterdam, Netherlands. p. 126

SFS-EN ISO 52900 (2021). Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 5–25 s.

Singh, R. (2015). Applied welding engineering: processes, codes, and standards. Second edition. Elsevier Science & Technology. pp. 280–283

The Harris product group. Technical specification sheet ER70S-6 steel carbon wire.
<https://ch-delivery.lincolnelectric.com/api/public/content/d546460cbb484c669dbc1851efb56e11?v=614441c5>

Treutler, K., Gehling, T., Scheck, M., Richter, A., Bohn, C., Ehlers, R., Rembe, C. & Westling, V. (2024). Properties oriented WAAM—microstructural and geometrical control in WAAM of low-alloy steel. *Welding in the world*. Vol. 68. no. 2. p. 248

William, D., Callister, J. & Rethwisch, DG. (2020). Callister's Materials Science and Engineering 10th Edition Global Edition. Wiley-Blackwell. pp. 307-311