

Arttu Juhani Moisio

HITSATTUJEN TERÄSRAKENTEIDEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN ARVIOIMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tammikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Arttu Juhani Moisio: Hitsattujen teräsrakenteiden väsymiskestävyyden arvioiminen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Tammikuu 2024

Väsyminen on merkittävin syy koneiden ja laitteiden vaurioitumiseen, erityisesti hitsaamalla valmistetuissa rakenteissa, ja siten sen huomioiminen koneiden ja laitteiden suunnittelussa on erityisen tärkeää. Siksi väsymistarkasteluun onkin kehitetty useita eri menetelmiä, joiden kaikkien tavoitteena on arvioida tarkasteltavan yksityiskohtan elinikää sille määritetyillä kuormitustapauksilla mahdollisimman tarkasti. Tässä työssä tutkitaan kolmen perinteisen väsymislaskennan (engl. High Cycle Fatigue, HCF) menetelmän, nimelliseen, geometriseen ja teholliseen lovijännitykseen perustuvien menetelmien, soveltuvuutta hitsattujen rakenteiden eliniän määrittämiseen. Eurokoodi 3 osa 9 käsittelee teräsrakenteiden väsymistä, mutta sisältää vain nimelliseen ja geometriseen jännitykseen perustuvat menetelmät.

Työn teoriaosuus jakautuu kahteen lukuun, luvussa kaksi käsitellään väsymistä ilmiönä ja luvussa kolme väsymislaskentamenetelmiä. Luku neljä on vertailuosuus, jossa arvioidaan useista tutkimuksista koottujen havaintojen perusteella näiden menetelmien soveltuvuutta koneensuunnitteluun liittyvien todellisten rakenteiden eliniän arvioimiseen. Tätä arvioidessa on otettu huomioon menetelmien tarkkuus, niiden rajoitukset ja monikäyttöisyys. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Tutkielman perusteella tehollisen lovijännityksen menetelmä antaa tarkimpia arvioita tarkasteltavan hitsisauman eliniälle. Kuitenkin tehokkaimpaan ja laajimpaan väsymistarkasteluun soveltuu parhaiten useiden menetelmien yhdistäminen. Tällöin itse rakenteen kestäminen tarkastetaan nimellisjännityksen tai geometrisen jännityksen avulla, ja samalla etsitään mahdolliset kriittiset kohdat liitoksista joiden elinikä arvioidaan teholliseen lovijännitykseen perustuvalla menetelmällä. Tutkielmassa tuli ilmi ristiriitoja eri tutkimuksissa käytettyjen parametrien välillä, mikä korostaa tulevan Eurokoodin päivityksen tarpeellisuutta. Lisäksi nykyisessä Eurokoodissa ei ole ohjeistusta tehollisen lovijännityksen eikä elementtimenetelmän (engl. Finite Element Method, FEM) käyttöön suunnitteluprosessissa, vaikka useiden tutkimusten perusteella niillä saadaan tarkimpia laskentatuloksia.

Avainsanat: ENS, geometrinen jännitys, nimellisjännitys, tehollinen lovijännitys, väsyminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VÄSYMINEN.....	3
3. VÄSYMISLASKENTA	5
3.1 Nimellisjännitys	5
3.2 Geometrinen jännitys	6
3.3 Tehollinen lovijännitys	9
4. MENETELMIEN VERTAILU JA POHDINTA	11
5. YHTEENVETO.....	15
LÄHTEET	16

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ENS	Effective Notch Stress, Tehollinen lovijännitys
FAT-luokka	Fatigue Amplitude Time class, väsymisloukka
FEM	Finite Element Method, äärellisten elementtien menetelmä
FE	Finite Element, äärellinen elementti
HCF	High Cycle Fatigue, jännitysväsyminen
HSS	Hot Spot Stress, geometrinen jännitys
LCF	Low Cycle Fatigue, myötöväsyminen
PSH	Principal Stress Hypothesis, pääjännityshypoteesi
D	Minerin summa
K	Jännitysintensiiteettikerroin
$Y_{(x)}$	Osittainen varmuuskerroin
N	Syklimäärä
r	Säde
$\Delta\sigma_{R,d}$	S-N käyrän jännitysresistanssi
σ_{hs}	Geometrinen jännitys
$\Delta\sigma_{S,d}$	Jännitysamplitudi
t	Paksuus

1. JOHDANTO

Koneille ja niiden komponenteilla on kaikilla kriittinen vaatimus: niiden on oltava riittävän kestäviä. Joidenkin komponenttien kohdalla riittävä kestävyys voidaan saavuttaa sillä, ettei käyttötapauksissa murtolujuutta tai murtovenymää ylitetä määritetyllä varmuudella, tai ettei niistä synny pysyviä muodonmuutoksia. Usein kuitenkin komponentit ovat jatkuvan, syklisen rasituksen alaisena, ja suunnitteluprosessissa on otettava huomioon myös mahdollinen väsymisestä aiheutuva hajoaminen. Salmen ja Pajusen (2010 s. 353) toteavat, että monet kantavien rakenteiden vaurioista ja onnettomuuksista aiheutuvat väsymisestä. Heidän mukaansa yleinen arvio on, että yli 50 % koneiden ja laitteiden mekaanisista vaurioista aiheutuu väsymisestä.

Eryteisesti hitsatuille rakenteille väsymisen arvioiminen on tärkeää, sillä hitsisauman virheet sekä sen geometrian aiheuttamat jännityskonsentraatiot altistavat rakenteen särön kasvamiselle (Lippold 2014, s. 299). Maddoxin (1991) mukaan useiden tutkimusten mukaan hitsatut rakenteet ovat huomattavasti alttiimpia väsymiselle, kuin vastaavat hitsaamattomat, samasta materiaalista yhtenä kappaleena valmistetut rakenteet (Zamzami & Susmel 2018). Eryteisesti kun rakenne valmistetaan korkealujuusisesta teräksestä hitsisaumojen väsymistarkastelu on tärkeää, sillä näiden hitsattujen rakenteiden väsymisen kestävyys on usein sama, kuin vastaavan matalamman lujuuden teräksellä toteutetun rakenteen (Braun et al. 2022, s. 1).

Tässä kandidaatintutkielmassa käsitellään hitsattujen teräsrakenteiden väsymistä ja niiden väsymisenkestävyyden arvioimista eri menetelmillä. Tutkimuksessa keskitytään perinteiseen väsymislaskentaan eli jännitysväsymislaskentaan (*HCF, High Cycle Fatigue*) ja esimerkiksi myötöväsymislaskentaa (*LCF, Low Cycle Fatigue*) ei käsitellä. Rajaus on tehty siksi, että myötöväsymislaskennan menetelmät eivät ole vertailtavissa jännitysväsymislaskentaan, sillä niitä ei voida soveltaa samoille tilanteille. Väsymistarkastelun menetelmistä keskitytään kolmeen Wöhlerin käyriin perustuvaan menetelmään, nimellisjännitykseen, geometriseen jännitykseen sekä tehollisen lovijännitykseen. Särönkasvun laskentaan tai kokeellisiin menetelmiin tutkielmassa ei perehdytä. Työn tavoitteena on selvittää eri menetelmien soveltuvuutta väsymismitoitukseen. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja sen tutkimuskysymys on: miten eri jännitysväsymistarkastelumetodit soveltuvat hitsattujen rakenteiden eliniän arvioimiseen?

Työn toisessa luvussa esitellään väsyminen ilmiönä. Luvussa kolme käydään läpi väsymislaskentaan liittyvää teoriaa aiemmin mainittujen kolmen menetelmän osalta. Luvussa neljä aiempien tutkimusten tulosten perusteella arvioidaan menetelmien soveltuvuutta. Viimeinen luku on tutkielman yhteenveto.

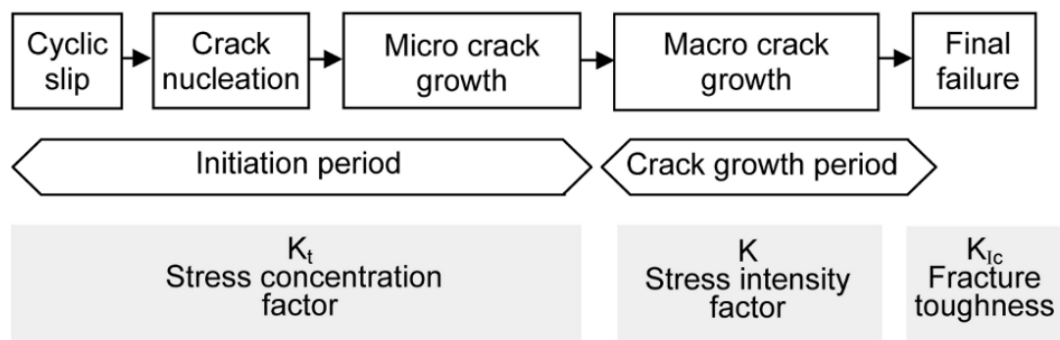
2. VÄSYMINEN

Väsymisellä tarkoitetaan materiaalin ominaisuuksien muutosta vaihtelevan kuormituksen seurauksena (Bathias & Pineau 2010, s. 6). Kappaleen hajoaminen väsymisen seurauksena voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen (Bathias & Pineau 2010, s. 70):

- Särön ydintyminen
- Särön kasvu
- Nopea särön kasvu ja murtuminen

Salmi ja Pajunen (2010, s. 355) jakavat särönkasvun vain särön ydintymiseen ja kasvuun. Kyseistä eroa jaottelussa mahdollisesti selittää lopullisen nopean särönkasvun ja murtumisen pieni osuus kappaleen eliniästä. Kuvassa 1 on esitettyinä väsymisen vaiheet.

Väsymisvaurio alkaa yleensä syntyä mikroskooppisesta materiaaliviasta. Kappaleen eliniän alussa nämä mikroskooppiset materiaaliviat yhdistyvät, lopulta muodostaen makroskooppisen särön. Tätä säröä kutsutaan alkusäröksi, ja sen syntymistä särön ydintymiseksi. (Salmi & Pajunen 2010, s. 355) Matalilla jännityksillä rakenteissa, joissa ei ole valmiiksi säröjä tai muita virheitä, suurin osa eliniästä koostuu särön ydintymisestä. Hitsatuissa rakenteissa kuitenkin voidaan aina olettaa ilmenevän joko virheitä, tai sauman geometriasta aiheutuvia jännityskonsentraatioita, jolloin suurin osa hitsatun rakenteen väsymisestä koostuu särön kasvusta. (Lippold 2014, s. 299) Salmen ja Pajusen (2010, s. 355) mukaan kriteerinä alkusärölle voidaan pitää sitä, että se on paljain silmin havaittavissa. Käytännössä se tarkoittaa noin 0,1 mm pituista säröä.



Kuva 1. Väsymisvaurion vaiheet (Schijve 2009, s. 15).

Väsyvän kappaleen yksityiskohdan elinikää usein kuvataan S-N-käyrällä (Myös Wöhler-käyrä tai Wöhlerin S-N-käyrä). S-N-käyrä ottaa huomioon sekä särön ydintymis- että kasvuvaiheen (Lippold 2014, s. 298). Tämä on seurausta siitä, että S-N-käyrät ovat kokeellisesti väsymistesteillä määritettyjä (Salmi & Pajunen 2010, s. 359). S-N-käyrät tyyppillisesti esitetään log-log-asteikolla, ne määritetään erikseen tarkasteltavalle yksityiskohdalle ja ovat materiaalista riippuvia. S-N-käyrät ovat määritetty erikseen erilaisille rakenteen yksityiskohdille ja ne ovat materiaalista riippuvaisia. (Hobbacher 2016, s. 42) S-N käyriin perustuvissa menetelmissä käytetään tätä käyrää vastaavaa väsymislukkaa, eli FAT-lukkaa (*Fatigue Amplitude Time -luokka, jossa x on jännitysamplitudi*). Väsymislukkaan merkinnän numero, esimerkiksi FAT36, tarkoittaa jännitysamplitudia megapascalleina, jota rakenne kestää kaksi miljoonaa sykliä. Väsymislukkaan määrittämisessä kestämisellä on varmuus, joka Hobbacherin (2016) mukaan on vähintään 95 %. Tämä Väsymislukkaan käyttäminen on vakiintunut tapa toteuttaa hitsatun rakenteen väsymistarkastelu, ja Eurokoodi 3 käsittelee vain S-N-käyriin perustuvien menetelmien käyttämisen (SFS-EN 1993-1-9).

Vaikka väsyminen aiheuttaakin erityisesti hitsatuissa rakenteissa vaurioita, ei sen tarkastelu välttämättä ole aina tarpeen. Hobbacher (2016 s. 7) määrittelee seuraavat tilanteet, joissa teräsrakenteen väsymismitoitusta ei yleensä tarvita:

- Suurin nimellinen jännitys syklimäärälle $N \leq 2 * 10^6$ on $\Delta\sigma_{S,d} \leq \frac{36 \text{ MPa}}{\gamma_M}$, jossa osittainen varmuuskerroin γ_m saadaan sopivasta standardista, joka käsittelee tarkasteltavana olevan rakenteen tai laitteen suunnittelua.
- Minerin summa $D = \sum \frac{n_i}{N_i}$, jossa n_i on kuormitustapauksen i syklimäärä käyttöajan aikana ja N_i kuormitustapauksen i hajoamiseen tarvittava syklimäärä, on vähemmän tai yhtä suuri kuin $D = 0,5$ laskiessa väsymislukalla FAT36.
- Tarkasteltavalle yksityiskohdalle on määritetty vakio amplitudin väsymisraja $\Delta\sigma_{R,L}$ ja kaikki suunnitellut jännitysamplitudit ovat alle oletetun tai määritetyn varmuuskerroin huomioiden, eli $\Delta\sigma_{S,d} \leq \frac{\Delta\sigma_{R,L}}{\gamma_M}$.
- Tarkasteltavana on särö, jossa kaikki suunnitellut jännitysintensiteettikertoimet ovat alle oletetun tai määritetyn särönkasvurajan ΔK_{th} , joka on teräkselle $\Delta K_{th} = 2.8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, eli $\Delta K_{S,d} \leq \frac{\Delta K_{th}}{\gamma_M}$.

3. VÄSYMISLASKENTA

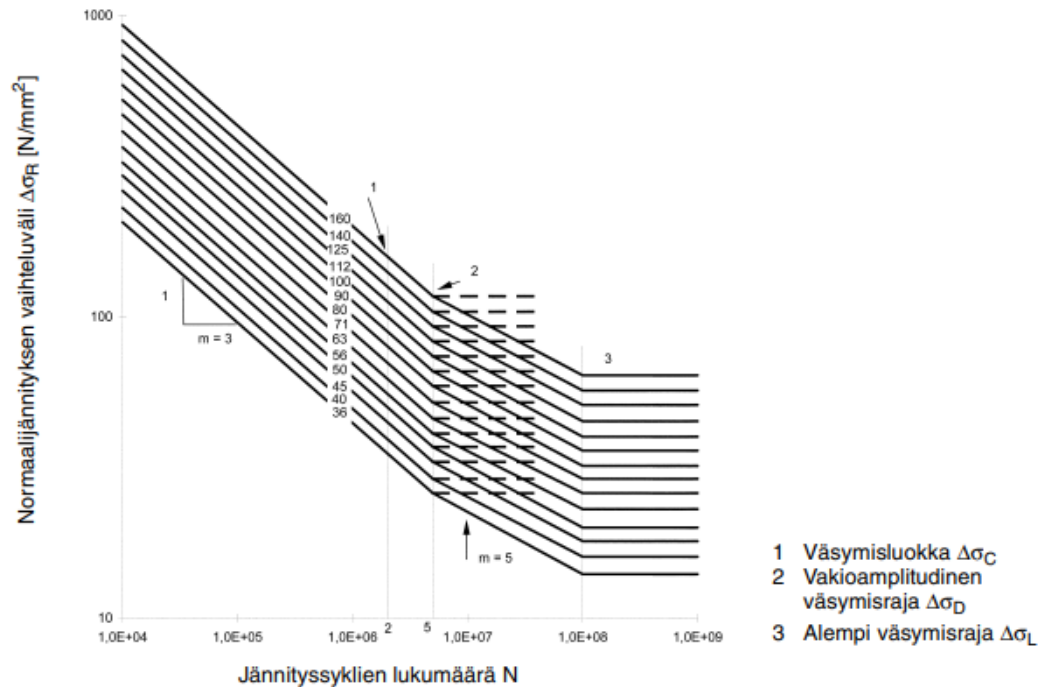
S-N-käyrään perustuvaan väsymisen arvioimiseen tarvitaan jännitysvaihteluväli, jossa karakteristinen jännitysspektri $\Delta\sigma_{i,S,k}$ on kerrottu osittaisella varmuuskertoimella γ_F , Wöhlerin S-N käyrään perustuva jännitysresistanssi $\Delta\sigma_{R,d}$, jossa karakteristinen jännitys jakauma $\Delta\sigma_{R,k}$ on jaettu osittaisella varmuuskertoimella γ_M . Sopiva karakteristinen jännitys jakauma on yksityiskohdalle määritettyä S-N-käyrää vastaava väsymisluokka, joka voi ottaa huomioon myös muita kyseisen hitsisauman väsymiseen vaikuttavia tekijöitä, kuten sauman jälkikäsitely. Tällöin eliniäksi sykleinä saadaan $N_{calc} = 2 * 10^6 * \left(\frac{\Delta\sigma_{R,d}}{\Delta\sigma_{S,d}}\right)^m$, jossa m on S-N-käyrän kulmakerroin. (Hobbacher 2016) Tätä kaavaa käytetään kaikissa kolmessa työssä käsitellyssä menetelmässä eliniän laskemiseen, kun jännitysspektri on määritetty.

Eliniän arvioimiseen käytettävä väsymisluokka on tarkasteltavan yksityiskohtan ja materiaalin lisäksi riippuvainen suunnittelujännityksen määrittelyyn käytetystä menetelmästä. Nimellisjännityksen ja geometrisen jännityksen menetelmiä käytettäessä väsymisluokalle käytetään väsymistesteissä määritettyjä arvoja, joita on saatavilla kirjallisuudesta, esimerkiksi Eurokoodi 3 osa 9 (SFS-EN 1993-1-9) ja Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (Hobbacher 2016). Nämä väsymisluokat kuvaavat tiettyä hajoamisen todennäköisyyttä, ja niiden voidaan olettaa antavan vähintään 95 prosentin todennäköisyyden ehjänä pysymiselle.

3.1 Nimellisjännitys

Tarkasteltaessa väsymistä nimellisjännityksen avulla, jätetään hitsisauman geometrian paikallisia jännityksiä nostava vaikutus huomioimatta, mutta otetaan kuitenkin huomioon kappaleen makrogeometrisen muoto liitoksen läheisyydessä (Hobbacher 2016 s. 15). Näiden makrogeometristen yksityiskohtien jännitystä kasvattava vaikutus voi sisältyä valmiiksi yksityiskohtan S-N käyrään. Jos näin ei kuitenkaan ole, pitää nimellisjännitystä korjata jännityskonsentraatiokertoimella (Hobbacher 2016, s. 16–17; SFS-EN 1993-1-9, s. 14). Eurokoodi 3 määrittää nimellisjännityksen laskettavaksi potentiaalisen väsymisvärön kasvukohdassa. Yksinkertaisille rakenteille kuten taivutetulle palkille, nimellisjännitys voidaan laskea esimerkiksi palkkiteoriolla. Monimutkaisempien rakenteiden kohdalla yksinkertaisella lujuusopin teoriolla ei pystytä laskemaan nimellisjännitystä tehokkaasti, jolloin elementtimenetelmään perustuvia laskentaohjelmistoja (*Finite Element*

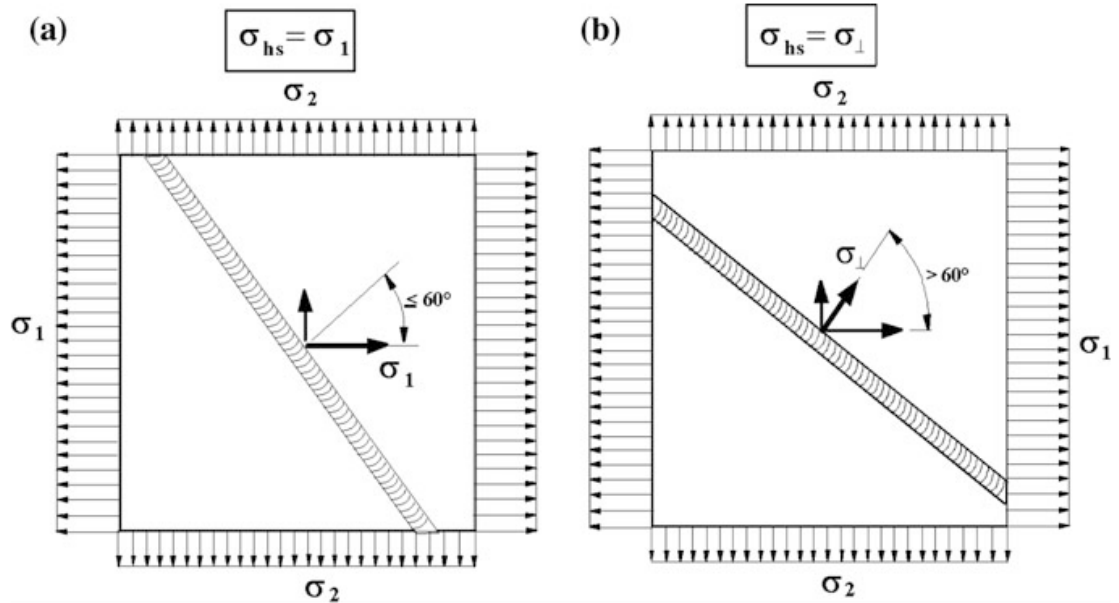
Method, FEM) voidaan käyttää nimellisjännityksen määrittämiseen. Kuvassa 2 on esitettyä S-N käyrät teräkselle nimellisjännityksellä tehtävään laskentaan.



Kuva 2 Väsymislujuuden käyrät normaalijännitysten vaihteluvälille (SFS-EN 1993-1-9 s. 15)

3.2 Geometrinen jännitys

Geometrinen jännitys (*Hot Spot Stress, HSS*) sisältää kaikki rakenteen alueellisia jännityksiä kasvattavat vaikutukset lukuun ottamatta itse hitsisauman vaikutusta. HSS sopii käytettäväksi silloin, kun nimellisjännityksen määrittäminen tarkasteltavan yksityiskohdan läheisyydessä ei ole mahdollista tai se tuottaisi liian epätarkkoja tuloksia. Hitsisauhalle geometrisen jännityksen määrittämiseen voidaan käyttää niin mittaamista venymäliuskoilla kuin elementtimenetelmää. Laskemiseen suositellaan käytettävän sitä pääjännitystä, joka on lähimpänä kohtisuoraa hitsisaumaan nähden kuvan 3 mukaisesti. Geometrinen jännitys saadaan laskettua mitatuista tai simuloituista arvoista ekstrapoloimalla jännitys hitsin juuresta sen läheisyydestä saaduista arvoista, tai lineaarisoinnalla jännitys paksuuden läpi hitsin juureen. (Hobbacher 2016 s. 19) Jännitystä ei voida lukea suoraan hitsinjuuresta, sillä hitsin paikallisen geometrian jännitystä kasvattavat vaikutukset on otettu huomioon rakenteelle määritetyssä väsymisloukassa. Geometrisen jännityksen ekstrapolointiin on kehitetty useita menetelmiä, keskeisimpänä lineaarinen ja kvadraattinen ekstrapolointi.

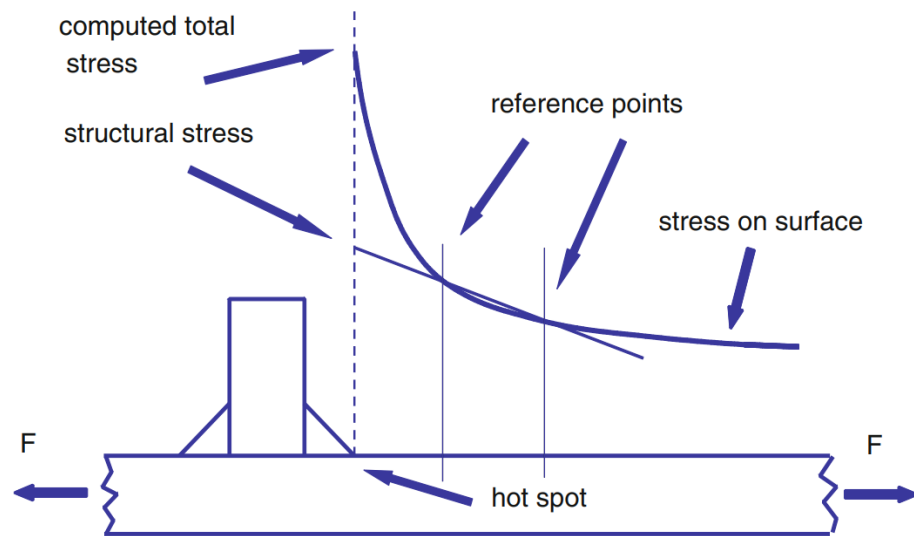


Kuva 3 Geometrisen jännityksen määrittäminen, kun pääjännitys on alle 60 asteen kulmassa kohtisuorasta, ja kun kulma on suurempi (Hobacher 2016, s. 20)

Hobbacherin (2016) mukaan lineaarisesti ja kvadraattisesti ekstrapoloidessa FEM:in avulla elementtikoon tulee olla korkeintaan $0,4t$, jossa t on materiaalinpaksuus. Lineaaraisesti ekstrapoloidessa jännitykset mitataan kahdesta pisteestä, $0,4t$ ja $1,0t$ etäisyydeltä hitsin rajaviivalta. Tällöin geometrisen jännityksen saadaan kaavalla

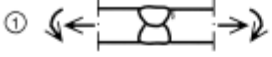
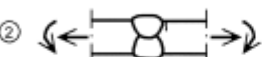
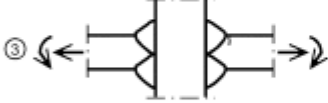



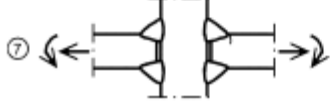
$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t}.$$

Kvadraattisesti ekstrapoloidessa jännitykset mitataan kolmesta pisteestä, jotka ovat $0.4t$, $0.9t$ ja $1.4t$ etäisyydellä rajaviivasta, ja geometrisen jännityksen laskemiseen käytetään kaavaa $\sigma_{hs} = 2.52\sigma_{0.4t} - 2.24\sigma_{0.9t} + 0.72\sigma_{1.4t}$. Kuvassa 4 on esitettyä geometrisen jännityksen ekstrapolointi hitsin rajaviivassa.



Kuva 4 HSS määrittäminen hitsin rajaviivassa (Hobbacher 2016, s. 19)

Kun HSS avulla määritetään hitsin elinikää, tarvitaan määritetyn geometrisen jännityksen lisäksi tilanteeseen sopiva FAT-luokka. Tämä S-N käyrä on riippuvainen materiaalista, liitoksen yksityiskohdista, sekä hitsauksen laadusta. (Radaj, D, Sonsino, C M, Friche, W, 2006) Kuvassa 5 on esitettyinä eräiden rakenneyksityiskohtien väsymisloukkia geometrista jännitystä käytettäessä.

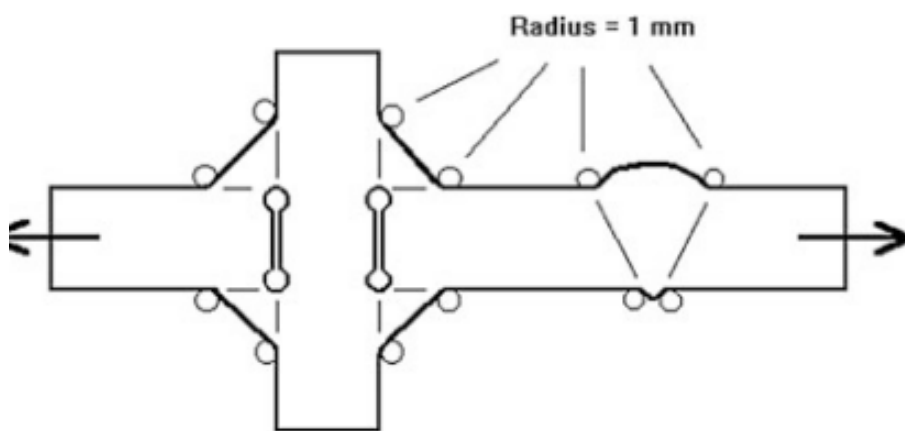
Väsymisluokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
112		1) Läpihitsattu päittäisliitos.	1) — Kaikki hitsit hiotaan levyn pinnan tasoon nuolen suunnassa. — Käytetään aloitus- ja lopetus-paloja, jotka poistetaan myöhemmin, levyn reunojen tulee olla tasaisia jännitysten suunnassa. — Hitsataan molemmilta puolilta, NDT- tarkastus. — Huono sovitus, ks. Huom. 1.
100		2) Läpihitsattu päittäisliitos.	2) — Hitsin pinta ei ole levyn pinnan tasossa. — Käytetään aloitus- ja lopetus-paloja, jotka poistetaan myöhemmin, levyn reunojen tulee olla tasaisia jännitysten suunnassa. — Hitsataan molemmilta puolilta. — Huono sovitus, ks. Huom. 1.
100		3) Ristinmuotoinen liitos, jossa on täysin läpihitsatut K-päittäishitsit.	3) — Levyn ja hitsin välinen kulma hitsin rajaviivan kohdalla $\leq 60^\circ$. — Huono sovitus, ks. Huom. 1.
100		4) Kuormaa kantamattomat pienahitsit.	4) — Levyn ja hitsin välinen kulma hitsin rajaviivan kohdalla $\leq 60^\circ$. — Ks. myös Huom. 2.
100		5) Konsolien päät, pituusjäykisteiden päät.	5) — Levyn ja hitsin välinen kulma hitsin rajaviivan kohdalla $\leq 60^\circ$. — Ks. myös Huom. 2.
100		6) Peitelevyn päät ja vastaavat liitokset.	6) — Levyn ja hitsin välinen kulma hitsin rajaviivan kohdalla $\leq 60^\circ$. — Ks. myös Huom. 2.
90		7) Ristiliitokset, joissa on kuormaa kantavat hitsit.	7) — Levyn ja hitsin välinen kulma hitsin rajaviivan kohdalla $\leq 60^\circ$. — Huono sovitus, ks. Huom. 1. — Ks. myös Huom. 2.

Kuva 5 Geometriseen jännitykseen perustuvan menetelmän yhteydessä käytettävät väsymisluokat (SFS-EN 1993-1-9 s. 40)

3.3 Tehollinen lovijännitys

Tehollinen lovijännitys (*Effective Notch Stress, ENS*) on jännitys hitsin rajaviivalla olevalla lovella. Tämä jännitys ottaa huomioon hitsisauman geometrian paikalliset vaikutukset jännityksiin. Menetelmä vaatii elementtimenetelmän käyttöä ja hitsisauman geometrian mallintamista riittävällä tarkkuudella. Tehollisen lovijännityksen käyttö väsymisen arvioimisessa rajoittuu hitsisauman rajaviivoihin syntyvien murtumien tarkasteluun. (Hobbacher 2016, s. 27)

ENS menetelmää käytettäessä materiaalipaksuuksille $t \geq 5$ mm käytetään sauman rajaviivan pyöristysten säteenä $r = 1,00$ mm (Hobbacher 2016, s. 27–28). Alle 5 mm materiaalipaksuuksille käytetään sädettä $r = 0,05$ mm. Tämän hitsisauman geometriaan tehty pyöritys kuvaa jännitysherkkää hitsisauman rajaviivaa, johon syntyy jännityskonsentraatioita (Rother & Rudolph 2011, s. 183). Kuvassa 6 on esitettyä hitsin geometrian ja pyöristysten mallinnus.



Kuva 6 ENS-menetelmän mukaiset pyöristykset tarkasteltavissa hitseissä (Hobbacher s. 27)

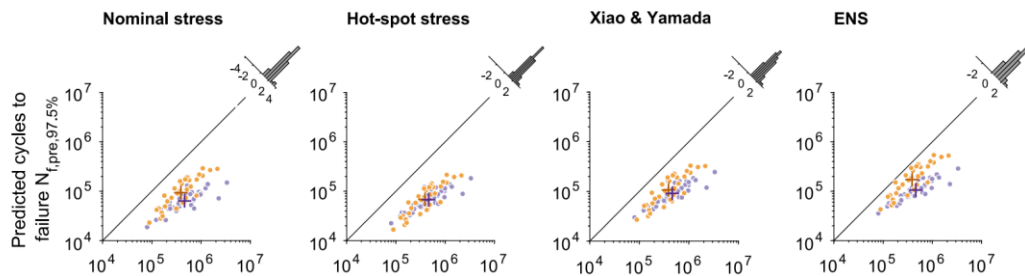
Elementtimenetelmää käytettäessä ja jännitystä luettaessa voidaan käyttää sekä von Misesin vertailujännitystä, että suurinta pääjännitystä. Käytetyn jännityksen mukaan tulee käyttää vastaavaa väsymisluokkaa, jotka on esitetty taulukossa 1, jossa pääjännitykselle käytetty lyhennettä PSH (*Principal Stress Hypothesis*). Taulukon väsymisluokkia vastaavien S-N käyrien kulmakerroin on $m = 3$.

Taulukko 1 väsymisluokat ENS-menetelmälle eri pyöristysten säteille, muokattu lähteestä (Sonsino 2009, s. 4)

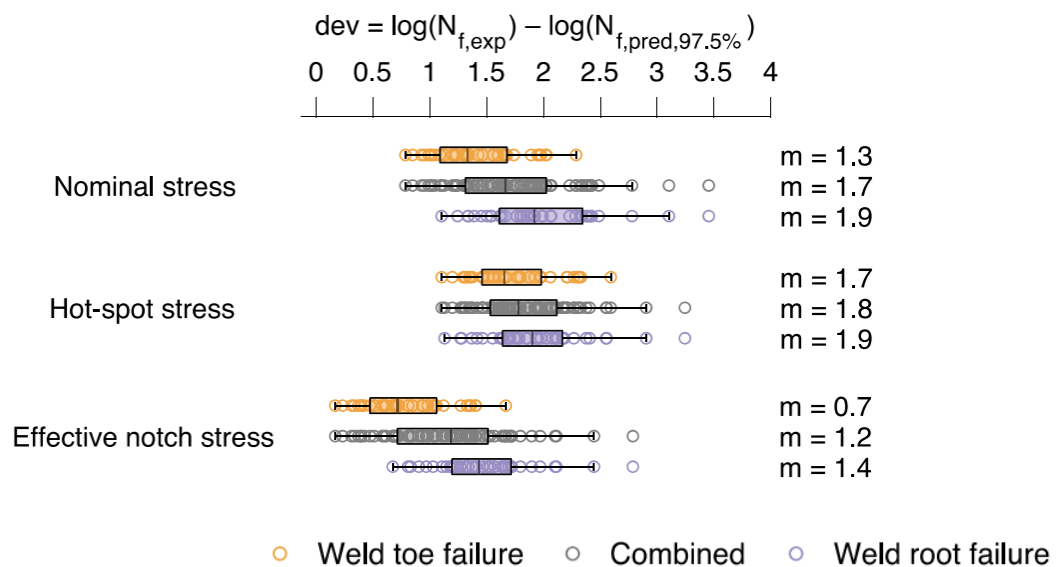
r_{ref} (mm)	1.00	1.00	0.05	0.05
Hypoteesi	PSH	Von Mises	PSH	Von Mises
Teräs	225	200	575	512

4. MENETELMIEN VERTAILU JA POHDINTA

Braun et al. (2022) tutkivat erilaisten menetelmien tarkkuutta korkealujuuksista teräksistä valmistettujen korkealaatuisten hitsiliitosten paikallisen väsymisen arviointiin. Heidän tutkimuksessaan näillä menetelmillä saatuja arvioita verrattiin testituloksiin. Tutkimuksen tulosten perusteella kaikilla kolmella menetelmällä saadaan konservatiivisia tuloksia. Kuvasta 7 on helposti havaittavissa, että nimellisjännityksellä ja geometrisellä jännityksellä saadut arviot väsymisestä ovat huomattavasti konservatiivisempia, kuin ENS-menetelmällä saadut. Kuvassa x-akseleilla on testeissä saavutettu elinikä ja y-akselilla kyseisellä menetelmällä arvioitu elinikä. Kuvasta 8 nähdään, että myös ENS-menetelmän logaritminen hajonta on huomattavasti pienempi kuin nimellisjännityksen ja geometrisen jännityksen.



Kuva 7 Testitulosten ja väsymistarkastelujen vertailu, muokattu (Braun et al. 2022, s. 9)



Kuva 8 Testitulosten ja tarkastelumenetelmien logaritminen hajonta, muokattu (Braun et al. 2022, s. 10)

Myös Pyttel et al. (2012) tutkimuksessa eri konseptien soveltamisesta pyörähdyssymmetrisen komponentin väsymisen arvioimiseen, lovijännityksellä saatiin vähemmän konservatiivisia tuloksia nimellisjännitykseen ja geometriseen jännitykseen verrattuna. Rotherin ja Rudolphin (2011) tutkimuksessa erilaisten mallien ja menetelmien soveltuvuudesta väsymistarkasteluun saatiin myös tarkempia tuloksia ENS-menetelmällä. Toisin sanoen kaikkien työssä käytettyjen näitä menetelmiä vertailevien tutkimusten perusteella lovijännitykseen perustuvilla menetelmillä saadaan tarkimpia, mutta kuitenkin konservatiivisia tuloksia.

Braun et al. (2022 s. 6) mukaan lovijännitykseen perustuvat menetelmät ovat yleisesti ottaen parhaiten soveltuvia väsymisen arviointiin silloin, kun väsyminen tapahtuu hitsin rajaviivoilla. Tämä johtuu siitä, että lovijännitykset ottavat huomioon hitsin geometriasta rajaviivaan syntyvät jännityskonsentraatiot. ENS-menetelmässä väsymisentarkasteluun käytettävä jännitys saadaan otettua juuri siitä pisteestä, missä se on suurimmillaan. ENS on myös hitsin juuressa tapahtuvan väsymisvaurion arvioimiseen soveltuvin menetelmä, sillä nimellisjännitys ja HSS eivät sellaisinaan voi arvioida jännityksiä hitsin juuressa. Koska tehollinen lovijännitys tutkimusten perusteella antaa tarkimpia arvioita hitsatun rakenteen eliniästä, herää kysymys siitä, miksei Eurokoodi 3 kata tätä menetelmää? (SFS-EN 1993-1-9)

Fass et al. (2023) mukaan tähän on tulossa muutos Eurokoodin tulevassa versiossa. Tämä on väsymislaskennan kannalta merkittävä muutos, sillä käyttämällä tarkempia menetelmiä vältetään liian konservatiiviselta suunnittelulta, joka voi aiheuttaa liiallista materiaalin käyttöä. Sonsino et al (2012) (s.15) mukaan, väsymisen arviointi menetelmien kehittämisen tavoitteena tulisi olla sellaisten menetelmien löytäminen, jotka soveltuvan kaikenlaisille hitsin geometrioille ja heidän mukaansa ENS on tällainen menetelmä. Tämän perusteella Eurokoodin tuleva päivitys on tarpeellinen.

Etenkin tämän tulevan lisäyksen myötä syntyy myös tarve elementtimenetelmän käytön standardoimiselle osana suunnittelu ja laskentaprosessia. Kuhlmann et al. (2021) mukaan tuleva Eurokoodi tulee myös sisältämään osan, joka käsittelee elementtimenetelmän käyttöä suunnittelussa. Rother ja Rudolph (2011) myös vertailivat erilaisten FE-mallien vaikutusta tuloksiin. Näillä tuloksilla on erityisen suurta merkitystä käytännön sovelluksien kehittämisen kannalta, sillä luomalla suoraan oikeanlaiset FE-mallit säästetään aikaa suunnitteluprosessissa, sekä varmistetaan mahdollisimman tarkat tulokset. Heidän tulostensa perusteella geometrisen jännityksen määrittämisessä kuorielementtien käyttö voi aiheuttaa suuriakin virheitä ja jopa epäkonservatiivisia tuloksia. Tämä voisi siis

pahimmillaan aiheuttaa sellaiseen suunnitteluratkaisuun päätyminen, jolla rakenne hajoaa ennen suunniteltua käyttöikä. Väsymislaskennan tulosten tulisi olla mahdollisimman tarkkoja, mutta pysyä kuitenkin konservatiivisella puolella, jotta tuloksiin voidaan luottaa. Rother ja Rudolph (2011) suosittelivatkin tilavuuselementtien käyttöä myös geometristen jännitysten määrittämiseen, mikä on pakollista tehollisen loviännityksen määrittämisessä. Tällaiset tulokset korostavat standardoinnin merkityksellisyyttä, sillä ilman yksiselitteisiä ja tarkkoja ohjeita voi laskettaessa tapahtua suuriakin virheitä. Standardoinnin tarvetta osoittaa myös se, että Rotherin ja Rudolphin (2011) tutkimuksessa käytettiin väsymislukkaa FAT225, vaikka tehollisen loviännityksen määrittämiseen käytettiin von Misesin vertailujännitystä. Tämä on ristiriidassa Sonsinon (2009 s. 4) esittämien väsymislukoiden kanssa (Taulukko 1). Heidän analyysinsä tulokset olivat kuitenkin lähellä väsymislukkaa FAT225. Fass et al. (2023) mukaan Eurokoodi 3 tulevassa versiossa tullaan käsittelemään von Misesin vertailujännityksen käyttöä ENS-menetelmässä ja myös heidän mukaansa von Misesin jännityksen kanssa tulisi käyttää väsymislukkaa FAT200.

Sekä Fass et al. (2023) että Sonsino (2009) huomauttavat ongelmasta liittyen von Misesin vertailujännityksen käyttöön erityisesti tilanteissa, joissa merkittävä osa väsymisvauriosta syntyy leikkausjännityksen seurauksena. Von Misesin vertailujännitys on määritelmänsä mukaan puhtaalle leikkausjännitykselle $\sqrt{3}$ suurempi kuin puhtaalle normaalijännitykselle. ENS-menetelmä siis antaa von Misesin vertailujännitystä käytettäessä ylikonservatiivisia tuloksia, jos tarkastelun kohteena olevan kappaleen kuormituksesta merkittävä osa on leikkausjännitystä. Tämä konservatiivisuus taas pienenee, jos väsymislukkaa korjataan ottamaan huomioon suuren leikkausjännityksen.

Valittavan menetelmän tarkkuus ei välttämättä ole ainoa syy päätyä tiettyyn laskentatapaan. HSS määrittämiseen voi olla mahdollista käyttää jo olemassa olevaa geometriaa, kun taas ENS vaatii hitsisaumojen mallintamisen. Niinpä geometrisella jännityksellä voi olla mahdollista saada nopeammin laskentatuloksia, mikä voi olla erityisen tärkeää, kun tarkasteltavaa rakennetta kehitetään iteroiden. Rotherin ja Rudolphin (2011) mukaan geometrisen jännityksen käyttöön kuitenkin liittyy epätarkkuuksia, joiden takia he ehdottavatkin HSS käyttöä kriittisten pisteiden löytämiseen tarkasteltavasta liitoksesta ja loviännitykseen perustuvien menetelmien käyttöä lopulliseen varmentamiseen näissä kohdissa. Suurien rakenteiden jokaisen hitsiliitoksen analysoiminen ENS-menetelmällä olisi hyvin työlästä ja laskennallisesti aikaa vievää. ENS-menetelmässä laskettavan loven alueelle tarvitaan suuri määrä elementtejä, joka suoraan vaikuttaa myös laskenta-aikaan. Kahden laskentatavan käyttö myös mahdollisesti auttaisi havaitsemaan laskennassa tapahtuneita inhimillisiä virheitä.

Hobbacher (2016 s. 7) esitti aiemmin mainitut tilanteet, jolloin väsymistarkastelua ei yleensä tarvita. Näiden kriteerien tarkastaminen voi kuitenkin olla hyvin työlästä ja esimerkiksi nimellisen jännitysamplitudin määrittäminen monimutkaisille kappaleille ja kuormitustapauksille on jopa mahdotonta ilman laskentaohjelmistoja. Tällöin herääkin kysymys: onko suunnittelutyö tehokasta, jos aikaa käytetään väsymistarkastelun tarpeellisuuden arvioimiseen, vai tulisiko kustannustehokkaan suunnittelun takaamiseksi väsymistarkastelu toteuttaa joka tapauksessa?

On huomioitavaa, ettei yksin laskentamenetelmän valitseminen takaa luotettavia tuloksia, sillä kuten Rotherin ja Rudolpin (2011) tutkimus osoitti, mallinnuksessa tehty valinta elementtityypistä voi vaikuttaa tuloksiin huomattavasti. Hitsin väsymisenkestävyyteen vaikuttaa myös esimerkiksi hitsisauman laatu ja sen jälkikäsittely, ja niiden vaikutus on pyrittävä ottamaan huomioon laskennassa esimerkiksi korjaamalla väsymisluokkaa.

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää eri jännitysväsymislaskennan menetelmien soveltuvuutta hitsattujen rakenteiden eliniän määrittämiseen. Niiden soveltuvuutta arvioitiin tutkimusten ja artikkeleiden avulla, jotka käsittelivät näiden menetelmien käyttöä. Väsymisen arvioinnin eri menetelmien välillä on vaihtelevuuksia ja kolmesta vertailusta menetelmästä tehollisen lovijännityksen menetelmällä saadaan tarkimpia, mutta kuitenkin konservatiivisia tuloksia. Vaikka menetelmät on pyritty luomaan sellaisiksi, että ne sopisivat mahdollisimman moneen tilanteeseen, ei väsyminen ole triviaalia, ja kaikissa todellisissa tapauksissa useat eri muuttujat vaikuttavat kappaleen elinikään. Väsymistä arvioitaessa on siis ennen kaikkea otettava huomioon kaikkien mahdollisten väsymiseen vaikuttavien muuttujien vaikutus.

Eurokoodi 3 kattaa väsymistarkastelumenetelmistä vain nimellisjännityksen ja geometrisen jännityksen (SFS-EN 1993-1-9). Tutkimusten osoittaman tehollisen lovijännityksen menetelmän tarkkuuden ja monikäyttöisyyden perusteella olisi kuitenkin oletettavaa, että standardin mukaisen mitoituksen voisi toteuttaa sitä käyttämällä. Tähän onkin tulossa muutos Eurokoodin tulevassa versiossa (Fass et al. 2023). Nimellisellä ja geometrisellä jännityksellä saatavat konservatiivisemmat tulokset voivat johtaa rakenteiden ylimitoittamiseen, ja siten tarpeettomaan materiaalin käyttöön, suurempiin kustannuksiin ja myös suurempaan hiilijalanjälkeen.

Vastauksena tutkimuskysymykseen siitä, miten eri väsymistarkastelumenetelmät soveltuvat hitsattujen rakenteiden eliniän arvioimiseen, voidaan tutkielmassani käytettyjen tutkimusten ja muiden kirjallisuuslähteiden perusteella todeta, että kaikki menetelmät soveltuvat omat rajoituksensa huomioiden väsymistarkasteluun. Kuitenkin mahdollisesti parhaimpaan tulokseen päästään käyttämällä geometrista jännitystä alustavaan laskentaan ja kriittisten kohtien löytämiseen, ja tehollista lovijännitystä lopulliseen varmistamiseen.

LÄHTEET

- Al Zamzami, I. & Susmel, L. (2018). On the use of hot-spot stresses, effective notch stresses and the Point Method to estimate lifetime of inclined welds subjected to uniaxial fatigue loading. Kidlington: Elvise Ltd, International Journal of Fatigue, Vol.117, pp. 432–449.
- Bathias Claude, Pineau André. (2010) Fatigue of Materials and Structures: Fundamentals. London, ISTE, 504 p.
- Braun, M., Ahola, A., Milakovic, A. & Ehlers, S. (2022) Comparison of local fatigue assessment methods for high-quality butt-welded joints made of high-strength steel. Forces in mechanics. Vol.6 Artikkel 100056.
- Fass, M., Hecht, M., Baumgartner, J. & Bauer, N. (2023). Evaluation of the Approach Based on the Maximum Principal Stress from the IIW-Recommendation for Welded Joints under Proportional, Multiaxial Stress States. Welding in the world, Vol.67, pp. 2323–2332.
- Hobbacher, A. F. (2016). Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. 2nd edition. International Institute of Welding, Springer International Publishing. 143 p.
- Kuhlmann, U., Schmidt-Rasche, C., Jörg, F., Pourostad, V., Spiegler, J. & Euler, M. (2021). Update on the revision of Eurocode 3: Evolution by improvement and harmonization. Steel construction: design and research, Vol.14, pp. 2–13.
- Lippold, J. C. (2014). Welding Metallurgy and Weldability. Newark, John Wiley & Sons, Incorporated. 401 p.
- Pajunen, S. & Salmi, T. (2010). Lujusoppi, Pressus Oy, Tampere, 462 s.
- Pyttel, B., Grawenhof, P. & Berger, C. (2012) Application of different concepts for fatigue design of welded joints in rotating components in mechanical engineering. Kidlington: Elvise Ltd, International journal of fatigue, Vol.34, pp. 35–46.
- Radaj, D., Sonsino, C.M. & Fricke, W. (2006) Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 662 p.

Rother, K. & J. Rudolph (2011). "Fatigue Assessment of Welded Structures: Practical Aspects for Stress Analysis and Fatigue Assessment: FATIGUE ASSESSMENT OF WELDED STRUCTURES." *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, Vol.34, pp. 177–204.

Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials* 2nd edition. Dordrecht, Springer Netherlands, 626 p.

SFS-EN 1993-1-9 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Teräsrakenteiden väsyminen (2006), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 42 s.

Sonsino, C. M. (2009). A consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with the reference radii $r_{ref} = 1.00$ and 0.05 mm. Berlin/Heidelberg Springer-Verlag, *Welding in the world*, Vol.53, pp. 63–75.

Sonsino, C. M., Fricke, W., de Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A. & Zhang, G. (2012). Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints- Background and applications. *International Journal of Fatigue*, Vol.34, pp. 2–16.