

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

AKSIAALIVUOSÄHKÖMOOTTORIN VALURUNGON VÄSYMISTARKASTELU

Lappeenrannassa 3.2.2011

Mikko Piispanen

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO	3
1.1 Työn tavoitteet ja rajaus.....	4
2 MATERIAALIN VÄSYMINEN.....	5
2.1 Lineaarielastinen murtumismekaniikka.....	7
2.2 Jännitys-kestoikä-käyrästöjen käyttö.....	9
2.3 Valetun alumiinin lujuusominaisuudet	11
3 KÄYTETYT MENETELMÄT.....	14
3.1 Elementtimenetelmä	15
3.2 Kuormitus syklien määrittäminen.....	16
3.3 Jännitys-kestoikä-käyrään perustuva kestoiän arviointi	18
3.4 Särönkasvumalleihin perustuva kestoiän arviointi	19
4 TULOSTEN TARKASTELU.....	21
4.1 Elementtimenetelmä	21
4.2 Jännitys-kestoikä-käyrä	22
4.3 Lineaarielastinen murtumismekaniikka.....	22
5 YHTEENVETO.....	24
LÄHDELUETTELO	25

LIITTEET

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A_m	Magneetin pinta-ala [mm^2]
$A_{50\text{ mm}}$	Venymä [%]
a	Särön pituus [mm]
B	Magneettivuontiheys [Vs/m^2]
B_f	Palmgren-Minerin menetelmällä laskettu ekvivalentti kuormitusten lukumäärä
E	Kimmokerroin [N/mm^2]
$F_{kuormitettu}$	Suurin aksiaalikuorma [N]
F_{lepo}	Pienin aksiaalikuorma [N]
K_f	Lovetun ja sileän kappaleen väsymiskestävyyksien suhde
K_t	Jännityksen konsentraatiokerroin
K	Jännityksen intensiivisyyskerroin [$\text{Nmm}^{-2} \text{ m}^{0,5}$]
N	Jännityssyklien lukumäärä
N_{ff}	Kestoikä tietyllä syklien lukumäärällä
N_j	Syklien lukumäärä
m_1	Jännitys-kestoikä-käyrän käänteinen kulmakerroin, kun $N < 5 \times 10^6$
m_2	Jännitys-kestoikä-käyrän käänteinen kulmakerroin, kun $5 \times 10^6 < N < 10^8$
n	da/dN - käyrän kulmakerroin
r	Loven pyöristyssäde [mm]
R	Jännityssuhde
$R_{p0,2}$	Venymisraja [N/mm^2]
R_m	Murtolujuus [N/mm^2]
S_f	Väsymisraja [N/mm^2]
S_{max}	Rakenteen maksimijännitys [N/mm^2]
S_{min}	Rakenteen minimijännitys [N/mm^2]
S_{nim}	Rakenteen nimellinen jännitys [N/mm^2]
T_{range}	Vääntömomentin vaihteluväli [Nm]
T_{mean}	Keskimääräinen vääntömomentti [Nm]

q	Loviherkkyysluku
X	Huokosen leveys [m]
Y	Huokosen syvyys [m]

Kreikkalaiset aakkoset

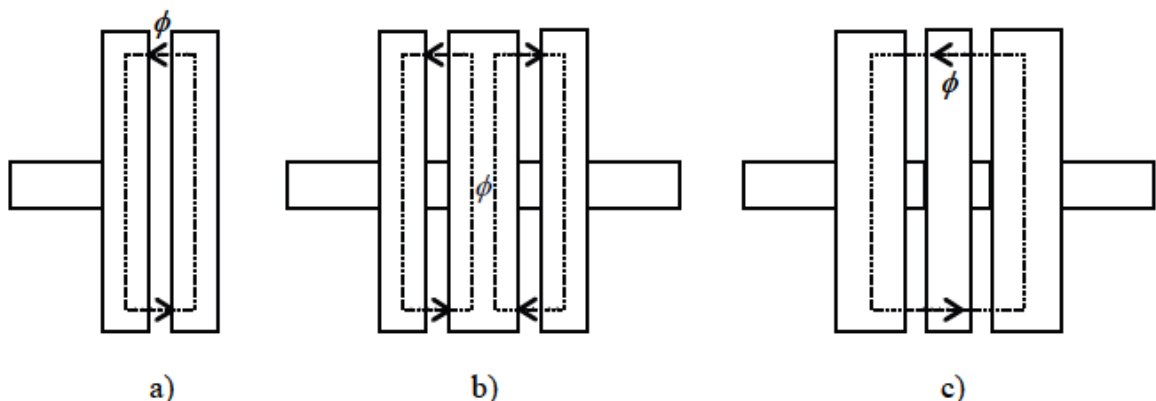
α	Vakio, mikä kuvaa särön ja kappaleen geometrisia ominaisuuksia
γFf	Materiaaliominaisuuksien epävarmuutta kuvaava kerroin
γMf	Kuormitusolosuhteiden epävarmuutta kuvaava kerroin
$\Delta\sigma_C$	Väsymislukka [N/mm^2]
$\Delta\sigma_i$	Paikallinen maksimijännitys [N/mm^2]
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
σ_{ar}	Ekvivalentti, keskijännityksetön kuormitus [N/mm^2]
σ_{local}	Paikallinen jännitys [N/mm^2]
φ	Magneettivuo

Lyhenneluettelo

EPFM	Elastis-plastinen murtumismekaniikka (Elastic Plastic Fracture Mechanics)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
HBS	Brinellin kovuus (Hardness Brinell)
LEFM	Lineaaris-elastinen murtumismekaniikka (Linear Elastic Fracture Mechanics)
S-N	Jännitys-kestoikä (Stress-Life)

1 JOHDANTO

Aksiaalivuosiähkömoottorissa aktiiviosat eli staattori ja roottori sijoittuvat aksiaalisuunnassa peräkkäin. Tämä tarkoittaa, että magneettivuo kulkee akselin suuntaisesti, aktiiviosien läpi. Aksiaalivuosiähkömoottorin aktiiviosien lukumäärä ja sijoitustapa vaihtelevat moottorityypin mukaan. Yleisimmät moottorityypit voivat koostua kuvan 1 mukaisesti joko yhdestä staattorista - ja roottorista, kahdesta staattorista ja yhdestä roottorista tai kahdesta roottorista ja yhdestä staattorista. Yleinen tapa on sijoittaa roottori kahden staattorin väliin. Kahden roottorin sijoittaminen staattorin molemmille puolille on taas harvinaisempaa mm. mekaanisen toteutuksen haastavuudesta johtuen. Kuvassa 1 on esitetty magneettivuon kulkureitti nuolilla ja magneettivuo symbolilla ϕ . (Valtonen 2007, s. 11-14.)



Kuva 1. Aksiaalivuosiähkömoottorin aktiiviosien eri järjestelytavat (Valtonen 2007, s. 12).

Aksiaalivuoteknologialla saavutetaan usein merkittävä pituusmitan säästö ja vääntömomentti verrattuna perinteisiin koneisiin, jolloin se soveltuu moniin käyttökohteisiin joissa tilaa moottorille on vähän (Valtonen 2007, s. 11-14). Suuri käyttömomentti mahdollistaa käytön ns. suoravetoisissa sovelluksissa, joissa moottori on asennettu suoraan käyttöakselille, eikä vaihdelaatikkoa tai muuta välitystä tarvita. Aksiaalivuosiähkömoottoreita käytetään monissa teollisissa sovelluksissa, kuten pumpeissa, puhaltimissa ja kompressoreissa (Valtonen 2007, s. 11-14). Aksiaalivuotekologia

voidaan nähdä nousevana trendinä, sillä viimeaikoina sen käyttö on lisääntynyt erilaisissa hybridisovelluksissa, kuten henkilöautoissa ja raskaissa työkoneissa.

Aksiaalivuosisähkömoottoreiden käyttökohteissa esiintyy usein vaihtelevaa kuormitusta, johtuen mm. käyttökohteen syklisestä tehontarpeesta. Vaihtelevaa kuormitusta voivat aiheuttaa myös termomekaaniset tekijät, kuten perusaineen jatkuva lämpeneminen ja jäähtyminen, mikä aiheuttaa lämpöväsymistä ja muutoksia materiaalien lujuusominaisuuksissa. Jos kuormitusten vaihtelu ja syklien tiheys ovat tarpeeksi merkittäviä, staattinen lujuustarkastelu ei riitä ja on tärkeää tutkia myös materiaalin väsymiskestävyyttä.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

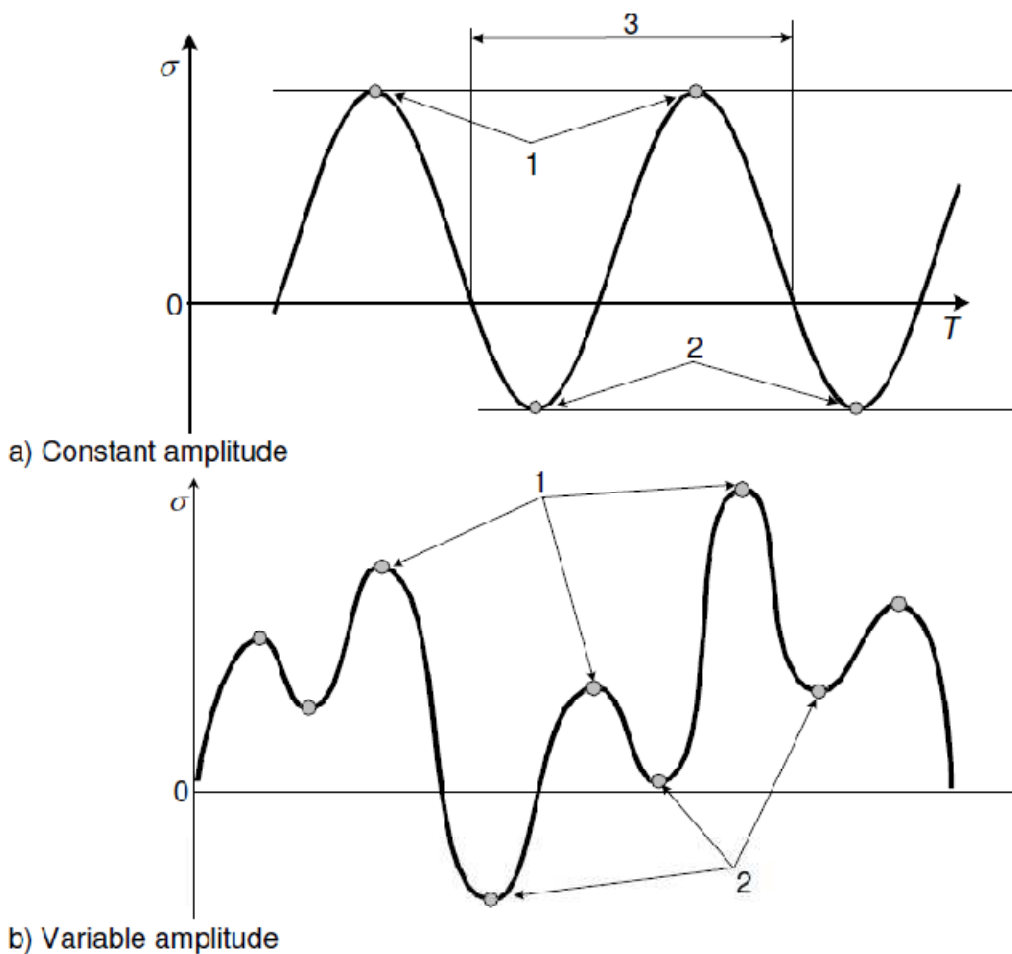
Työssä tutkitaan kohdeyrityksen suunnitteleman aksiaalivuosisähkömoottorin alumiinisen valurungon väsymiskestävyyttä tyypillisessä käyttökohteessa, huomioiden sähkömagneetiikan aiheuttamat kuormitukset. Saatujen tulosten avulla halutaan optimoida valurungon rakennetta ja määrittää rungolle kestoikäarvio.

Valurungosta rakennetaan elementtimalli kaupallisella ohjelmistolla, missä esikäsittelijänä käytetään FEMAP v10.1-ohjelmistoa ja ratkaisijana Nx Nastran-ohjelmistoa. Elementtimenetelmän avulla halutaan löytää rakenteen jännityskeskittymät ja suurimmat venymät. Kestoikää arvioidaan aiheeseen liittyvien standardien suosittelimilla menetelmillä. Lähtöarvoina käytetään kirjallisuudesta saatuja perusmateriaalin ominaisuuksia ja kuormituksia.

Tässä työssä ei tutkita rungon ominaisvärähtelytaajuuksia eikä perehdytä tarkasti staattiseen kestävyyseseen. Myös lämpötilavaihteluiden aiheuttamat termomekaaniset ilmiöt jätetään huomioimatta.

2 MATERIAALIN VÄSYMINEN

Materiaalin väsymisellä tarkoitetaan vaihtelevasta kuormituksesta johtuvaa perusaineen murtumista. Vaihteleva kuormitus aiheuttaa perusaineeseen syklisen jännitystilän, mikä voi olla jatkuva- tai vaihteleva-amplitudista ja ilmetä tykytys- tai vaihtojännityksenä. (Dowling 1998, s. 360.) Esimerkkikuvaajat jatkuva- ja vaihteleva- amplitudisista jännitystiloista on esitetty kuvassa 2, missä pysty akseli kuvaa jännitystä ja vaaka- akseli aikaa.



Kuva 2. Jatkuva- ja vaihtuva-amplitudiset jännityskuvaajat (EN-1999-1-3 2007, s. 26).

Eri amplitudi- ja keskijännitystapauksia kuvataan jännityssuhteella R , mikä voidaan laskea kaavalla 1.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad (1)$$

Kaavassa 1 S_{max} on maksimijännitys ja S_{min} on minimijännitys. Vaihtuva-amplitudiset jännitystilat ovat yleisiä käytännönsovelluksissa, missä kuormat ovat vaihtelevia suuruudeltaan ja esiintymisväliltään. Jatkuva-amplitudinen jännitystila on sen sijaan idealisoitu tilanne, mitä käytetään esimerkiksi laboratorio-oloissa suoritettavissa väsymiskestävyystesteissä. (Dowling 1998, s. 368-370.) Usein väsymislujuuslaskennassa vaihtuva-amplitudista kuormaa pyritään idealisoimaan jatkuva- amplitudiseksi, laskennan helpottamiseksi. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi Palmgren-Minerin säännöksi kutsuttua menetelmää. (Dowling 1998, s. 402- 404.)

Yleinen tapa materiaalin väsymisen alkamiselle on särön ydintyminen paikalliseen jännitys- tai venymäkeskittymään. Tällainen keskittymä sijaitsee normaalisti materiaalin pinnalla olevassa epäjatkuvuuskohdassa, kuten terävässä nurkassa, halkeamassa, huokosessa tai nystyrässä. Paikallinen jännityskeskittymä johtaa materiaalin paikalliseen plastisoitumiseen eli olotilassa pysyvään muodonmuutokseen. Jännitys- tai venymäkeskittymiin johtavat epäjatkuvuuskohdat syntyvät yleisesti joko kappaleen geometriasta (esimerkiksi terävät kulmat ja kappaleen ainevahvuuden vaihtelu) tai perusmateriaalin tuotannossa syntyvistä virheistä, joita ovat esimerkiksi huono pinnanlaatu, koneistusvirheet ja valukappaleiden huokoisuus. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 48-51.)

Materiaalin väsymisprosessissa särön ydintymistä seuraa mikrosärönkasvuksi kutsuttu vaihe. Materiaalin mikrotasolla tarkasteltaessa mikrosärön syntymisessä jännitys- tai venymäkeskittymän johdosta plastisoituneella alueella esiintyy liukutasojen leikkaussuuntaista liikettä toistensa suhteen. Liukutasojen liikkeen jatkuessa syntyy mikrosäröjä. Näitä hyvin pieniä säröjä voi syntyä useita ja ne kasvavat normaalisti muutaman rakeen pituisiksi, maksimileikkausjännityskalvon suuntaan. Myös materiaalissa mahdollisesti olevat epäjatkuvuuskohdat, kuten erilaiset lovet ja huokokset voivat toimia valmiina mikrosäröinä materiaalin väsymisessä. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 54-55.)

Mikrosäröt yhdistyvät normaalisti yhdeksi tai useammaksi suuremmaksi säröksi, makrosärönkasvuksi kutsutussa särönkasvuvaiheessa. Makrosärö muodostuu, jos mikrosäröjen kasvu jatkuu tarpeeksi pitkälle. Joskus mikrosäröjen kasvu voi tosin

pysähtyäkin, jos ne esimerkiksi kasvavat pois jännityskeskittymä-alueelta. Makrosäröt kasvavat normaalisti maksimivetojännityskalvon suuntaan ja syklisen kuormituksen jatkuessa ne jatkavat kasvuaan, kunnes materiaalin jäljellä oleva ehjä poikkipinta pienenee niin paljon, että äkillinen poikkipinnan murtuminen tapahtuu. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 53-55.)

2.1 Lineaarielastinen murtumismekaniikka

Särönkasvusta on saatavilla paljon kirjallisuustutkimusta ja sitä varten on kehitetty malleja, millä pyritään ennustamaan särönkasvun suuntaa ja nopeutta. Tätä tieteenalaa kutsutaan murtumismekaniikaksi. Eräs yleisesti käytetty malli murtumismekaniikassa on lineaarielastinen murtumismekaniikka (LEFM), missä materiaalin oletetaan käyttäytyvän pääasiassa lineaari-elastisesti väsymisprosessin aikana. LEFM:in käytölle on joitakin perusrajoitteita kuten vaikuttavan nimellisen jännityksen suhde materiaalin murtorajaan ja plastisen alueen koko suhteessa alkusärön pituuteen. Jos LEFM:iä ei voida kyseisten rajoitteiden takia soveltaa, on yleisesti käytetty särönkasvumalli elastis-plastinen murtumismekaniikka (EPFM). EPFM:ää käytetään erityisesti silloin, kun alkusärö on hyvin pieni ja vaikuttava nimellinen pääjännitys suuri. LEFM:in käytön soveltuvuutta voidaan arvioida kaavalla 2, minkä avulla voidaan laskea pienen alkusärön raja-arvo. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 123, 166.)

$$a_{small} \approx \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta S_f} \right)^2 \quad (2)$$

Kaavassa 2 ΔK_{th} on jännitysintensiteettikertoimen kynnyisarvo, minkä alapuolella särönkasvua ei oleteta esiintyvän ja ΔS_f on väsymisrajan vaihteluväli, mikä on kaksinkertainen verrattuna materiaalin väsymisrajaan S_f .

Murtumismekaniikassa on kolme perusmoodia, millä särön voidaan olettaa kasvavan. Särön kasvu voi esiintyä näiden moodien yksittäisinä tai yhdistelmätapauksina. Ensimmäinen moodi eli avautumismoodi, esiintyy yleisimmin, kun taas muut moodit eli liukumis- ja repimismoodi toimivat usein lähinnä sekundäärisinä tekijöinä särön kasvussa. Murtumismekaniikan malleissa arvioidaan särön koon, nimellijännityksen ja geometrian yhteisvaikutusta särön kasvuun. Näitä muuttujia kuvataan kertoimella nimeltä

jännitysintensiiteettikerroin, K . Jännitysintensiiteettikertoimen määrittämisessä materiaalin oletetaan käyttäytyvän lineaaris-elastisesti, Hooken lain mukaisesti. (Dowling., 1998, s. 290.) Jännitysintensiiteettikertoimen ja materiaalin myötörajan avulla voidaan kuvata paikallista plastisen alueen kokoa särön pohjassa (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 133). Perusmateriaalin oletetaan kestävän olemassa olevan särön aiheuttama plastinen alue, kunnes K saavuttaa kriittisen arvonsa, missä materiaali murtuu hauraasti. K :n kriittistä arvoa kutsutaan kriittiseksi jännitysintensiiteettikertoimeksi, K_c . K muodostetaan yleisesti kaavalla 3. (Dowling 1998, s. 290.)

$$K = S_{nim} \sqrt{\pi a} \alpha \quad (3)$$

kaavassa 3 S_{nim} on rakenteen nimellisjännitys ilman säröä, a on särön pituus ja α on yksikötön vakio, mikä kuvaa särön ja kappaleen geometrisia ominaisuuksia. Joillekin yleisille kuormitustapauksille ja geometrioille on valmiita käyrästäjä K :n arvoille. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 126-129.)

Jännitysintensiiteettikertoimen avulla voidaan arvioida plastisen alueen kokoa ja kappaleen särönkasvunopeutta. Yleinen tapa tähän on Parisin, Gomezin ja Andersonin kaava, mikä kuvaa jännitysintensiiteettikertoimen vaikutusta särönkasvunopeuteen.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (4)$$

Kaavassa 4 n on da/dN - käyrän kulmakerroin ja ΔK on jännitysintensiiteettikertoimen vaihteluväli. Kaava on muodostettu logaritmisesta da/dN - ΔK - käyrän perusteella. Tällaisia käyriä muodostetaan särönkasvudatan perusteella, mikä on hankittu jatkuva-amplitudisissa väsymistesteissä, käyttäen terävän särön omaavia testikappaleita. Parisin yhtälöä käytetään kuvaamaan da/dN - ΔK - käyrän keskivaiheen lineaarista riippuvuutta, mitä kutsutaan Paris alueeksi tai II-alueeksi. II-alue kuvaa vakaata makrosärön kasvua. Muita käyrältä havaittavia alueita ovat alueet I ja III. Alue I:n alapuolella ei esiinny huomattavaa särönkasvua, tämän alueen raja-arvona pidetään jännitysintensiiteettikertoimen kynnysarvoa ΔK_{th} . Alue III kuvaa epästabiilia, nopeaa särönkasvua, mikä johtaa materiaalin poikki-pinnan murtumiseen. Raja-arvo III-alueen särönkasvulle on kriittinen

jännitysintensiiteettikerroin K_c . (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s.142-145.)
 Tyypillinen $da/dN - \Delta K$ - käyrän on esitetty kuvassa 5.

Kuten aikaisemmin mainittu, jos alkusärö on hyvin pieni ja nimellisjännitys suuri, ei LEFM:n käyttö anna välttämättä luotettavia tuloksia. Kirjallisuudessa todetaan, että pienillä säröillä ja suurilla nimellisillä jännitystasoilla särön kasvu voi olla hyvinkin nopeaa myös pienillä jännitysintensiiteettikertoimen arvoilla, vastoin Parisin yhtälöä. Pienen särön ja nimellisjännityksen suhdetta voidaan arvioida kaavalla 2. K_{th} :n alapuolella tapahtuva särönkasvu on yleisesti mikrorakenteen hallitsemaa ja siksi epälineaarista. Särönkasvun jatkuessa pienikokoinen särö kasvaa suuremmaksi, jolloin särönkasvunopeus asettuu usein lineaariseksi, noudattaen Parisin yhtälöä. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 165-167.)

2.2 Jännitys-kestoikä-käyrästäöjen käyttö

Yleinen tapa ennustaa kappaleen kestoikä on jännitys-kestoikä- eli S-N - käyrästäöjen käyttö. S-N - käyrästäöt ovat väsymiskokeilla aikaansaatuja kuvaajia, mitkä kertovat koekappaleen kestäjän kuormitusvaihtelujen lukumäärän tietyllä jännitysamplitudilla ja keskijännityksellä. S-N - käyrästäöistä on usein havaittavissa rasitusyökkien lukumäärä N, minkä jälkeen koekappaleen kestoikä ei enää juurikaan muutu jännitysamplitudin laskiessa. Tätä raja-arvoa kutsutaan materiaalin väsymisrajaksi, mikä vaihtelee materiaalin ominaisuuksista riippuen. Materiaalille voidaan muodostaa S-N - käyrä myös analyttisesti. (Dowling 1998, s.363.) Materiaalin väsymisraja vaihtelee eri amplitudeilla ja keskijännityksillä. Kappaleen geometria ja siten erilaiset epäjatkuvuuskohdat, kuten lovet, kolot ja pyöritykset vaikuttavat tutkimusten mukaan merkittävästi materiaalin väsymiskestävyteen. Jännityksen keskittymistä kappaleessa olevaan epäjatkuvuuskohtaan kuvataan jännityksenkonsentraatiokertoimella K_t . K_t muodostuu nimellis- ja paikallisjännityksen suhteesta kaavan 5 mukaisesti.

$$K_t = \frac{S_{max}}{S_{nim}} \quad (5)$$

Kaavassa 5 S_{nim} on rakenteen nimellinen jännitys ja S_{max} rakenteen maksimijännitys. K_t -kerroin ei kuvaa suoraan materiaalin käyttäytymistä väsyttävän kuorman alla, sillä lovetujen kappaleiden väsymiskestävyys riippuu myös muista tekijöistä, kuten

pinnanlaadusta, materiaalin lujuusarvoista ja jännitystasosta. Kerroin, mikä ottaa huomioon kaikki materiaalin väsymiseen vaikuttavat tekijät on K_f , mikä muodostetaan kaavalla 6. (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 196-197.)

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (6)$$

Loviherkkyysluku q kuvaa perusmateriaalin loviherkkyyttä. Loviherkkyysluku muodostetaan kaavalla 7 (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 197).

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{p}/r} \quad (7)$$

Kaavassa 7 r on loven juuren säde ja p on materiaaliriippuvainen vakio (Fatemi, Fuchs, Stephens & Stephens 2001, s. 197). Suurin osa eri materiaalien S-N - käyristä on muodostettu testiolosuhteissa, missä keskijännitys on nolla. Tutkimusten mukaan keskijännityksellä voi kuitenkin olla suuri vaikutus kappaleen kestoikään. Keskijännityksen mahdollinen vaikutus täytyy ottaa huomioon, kun väsymistarkastelussa hyödynnetään S-N - käyrästä, missä jännityssuhde on nolla. Keskijännityksen vaikutusta voidaan arvioida erinäisillä kaavoilla, laskemalla tapaukselle ekvivalentti kuormitus. Alumiiniseoksille tähän tarkoitukseen on yleisesti parhaaksi todettu Smith-Watson-Topper - yhtälö, mikä on esitetty kaavassa 8. (Dowling 1998, s. 388-394.)

$$\sigma_{ar} = S_{max} \sqrt{\frac{1-R}{2}} \quad (8)$$

Kaavassa 8 S_{max} on maksimijännitys ja R on jännityssuhde. Muuttuva-amplitudisen kuormituksen vaikutusta väsymiskestävyyteen voidaan arvioida Palmgren-Minerin säännöllä. Tässä menetelmässä kuormituskäyrästä lasketaan kestoikä yksittäisille jännitysamplitudeille. Yksittäiset kestoajat yhdistetään Palmgren-Minerin yhtälöllä, mikä on esitetty kaavassa 9. (Dowling 1998, s. 402-403.)

$$B_f = \frac{1}{\left[\sum \frac{N_j}{N_{fj}} \right]} \quad (9)$$

Kaavassa 9 N_j on syklien lukumäärä ja N_{fj} on kappaleen elinikä kyseisellä N_j :n arvolla. Yksittäiset kestoajat lasketaan S-N - käyrästöiden perusteella.

Jos kuormitushistorian vaihtelu hyvin epäsäännöllistä, voi Palmgren-Minerin yhtälön soveltaminen olla vaikeaa, sillä yksittäisten kierrosten määrittäminen on haastavaa. Tällöin syklien laskemiseen käytetään yleisesti rainflow-analyysiä. Rainflow-analyysissä kuormitushistoria idealisoidaan jatkuva-amplitudisiksi kuormitustapauksiksi. Menetelmällä voidaan analysoida jännitys-, venymä- ja kuormitushistorioita. Kuormitukset yhdistetään rainflow-analyysin jälkeen Palmgren-Minerin yhtälöllä. (Dowling 1998, s. 404-408.) Eurokoodi 9 suosittelee rainflow-analyysin ja Palmgren-Minerin menetelmän käyttöä vaihteleva-amplitudisille kuormille (EN-1999-1-3 2007, s. 17).

2.3 Valetun alumiinin lujuusominaisuudet

Valetulla alumiinilla tiedetään yleisesti olevan huono kestävyys väsymistä vastaan verrattuna esimerkiksi tyypillisiin rakenneteräksiin. Valualumiini on kuitenkin keveytensä vuoksi yleinen konstruktio materiaali esimerkiksi auto- ja lentokoneteollisuudessa, mm. sen mahdollistamien polttoainesäätöjen vuoksi. Valetun alumiinin väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. materiaalin lujuusarvot ja valuprosessin kappaleeseen aiheuttamat virheet. (Gao, Lee, Lindley & Yi 2004, s. 559–560.)

Yksi dominoivimmista ilmiöistä, mikä vaikuttaa valetun alumiinin väsymiskestävyyteen, on materiaalin huokoisuus. Monissa tutkimuksissa on osoitettu, että valetulla alumiinilla mikrosäröjen kasvun alkaminen on todennäköistä kappaleen pinnalla tai sen läheisyydessä olevista mikrohuokosista. Tutkimukset osoittavat myös että särön kasvun alkupaikka on todennäköisintä kappaleen pinnalla sijaitsevalle suurikokoiselle huokoselle. (Gao, Lee, Lindley & Yi 2004, s. 570.) Eräs tutkimus osoittaa, että mikrosäröt ydintyvät valetun alumiinin huokosiin lähes poikkeuksetta, jännitystasosta riippumatta. Tosin vain korkeilla jännitystasoilla särönkasvu jatkuu säännöllisesti aiheuttaen murtumisen. Matalilla jännitystasoilla särönkasvu todetaan olevan epäsäännöllisempää pysähtyvän usein raerajoille. (Buffiere et al. 2001, s. 115.)

Eurokoodi 9 jakaa valetut alumiinikappaleet väsymisluokkiin huokosten koon mukaan, taulukon 1 mukaisesti. Taulukoidut arvot kuvaavat suurinta huokosen kokoa.

Taulukko 1. Huokosen koon vaikutus valukappaleen väsymisluokkaan (EN-1999-3-1 2007, s.78)

Väsymisluokka ($N_c = 2 \times 10^6$)	71	50	40	32	25
Suurin huokosen koko (mm)	0,2	0,5	0,9	1,5	2,0

Työssä oletetaan suurimmaksi huokosen halkaisijaksi 2 [mm], koska se on standardin mukaisesti normaali arvo, mikä saavutetaan ilman erikoismenetelmiä. Makroskooppinen valupinnan tarkastelu tukee tätä oletusta.

Työssä käytetyn alumiiniseoksen kemiallinen koostumus ja lujuusominaisuudet on esitetty taulukoissa 2 ja 3, mainitussa järjestyksessä.

Taulukko 2. Alumiiniseoksen kemiallinen koostumus (SFS-EN 1706, s. 18).

Seosaineryhmä (%)										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
9,0...11,0	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	0,20...0,45 (0,25...0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15

Taulukko 3. Hiekkavaluseosten erillään valettujen koesauvojen mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 1706, s. 20).

Tila	Murtolujuus R_m MPa min.	Venymisraja $R_{p0,2}$ MPa min.	Venymä $A_{50\text{ mm}}$ % min.	Brinellin kovuus HBS min.
F	150	80	2	50
T6	220	180	1	75

Seoksen väsymisraja vaihtelee välillä 80 - 110 [MPa]. Tulos on saatu suorittamalla väsymiskoe taivutusväsytykskokeena, jännitysjaksojen lukumäärällä 50×10^6 , jännityssuhteella $R = -1$ (SFS-EN 1706, s.20). Tätä väsymisrajaa ei kuitenkaan käytetä hyväksi tässä työssä, vaan rungon kestoikä määritetään väsymisluokan avulla.

3 KÄYTETYT MENETELMÄT

Moottorin valurunkoon vaikuttavat hallitsevana sähkömagneettiset voimat, joista tärkeimmät ovat vääntömomentti ja roottorin pinnassa olevien kestopagneettien ja staattorin välinen magneettinen vetovoima. kestopagneettien ja staattorin välistä vetovoimaa kutsutaan tässä työssä aksiaalivoimaksi. Aksiaalivoima riippuu magneetin pinta-alasta ja magneettivuontiheydestä. Aksiaalivoima voidaan laskea yhtä napaa kohden kaavalla 10. (Gieras, Kamper & Wang 2004, s. 175.)

$$F = \frac{B^2 A_m}{2u_0} \quad (10)$$

Kaavassa 10 B on magneettivuontiheys, A_m on magneetin pinta-ala ja u_0 on tyhjiön permeabiliteetti, mikä on yksikötön vakio. Koska kyseessä on kestopagneettimoottori, magneettivuontiheys ei tipu nollaan vaikka moottorin virta olisi nolla. Kestopagneettien ja staattorin välillä on aina magneettinen vetovoima, jolloin B :n voidaan olettaa koostuvan kahdesta komponentista; sähkövirran indusoimasta magneettivuosta B_1 ja kestopagneetin ja staattorin välillä lepotilassakin vaikuttavasta magneettivuosta B_2 , kaavan 11 mukaisesti. (Valtonen 2010.)

$$F = \frac{(B_1+B_2)^2 A_m}{2u_0} \quad (11)$$

Sähkövirran aiheuttama magneettivuontiheys B_1 vaihtelee eri sähkövirran I arvoilla, moottorin vääntömomentin mukaan, kun taas B_2 pysyy vakiona. Magneettivuontiheyden tarkka määrittäminen eri sähkövirran tai vääntömomentin arvoilla on vaikeaa ja voidaan olettaa, että saatujen tulosten vaihtelu olisi lähellä staattista kuormitustilannetta. Tämä johtuu siitä, että B_1 :n osuus kokonaismagneettivuosta on suhteellisen pieni ja sen vaihtelu eri sähkövirran arvoilla ei ole merkittävää. Merkittävä muutos aksiaalivoimassa voidaan kuitenkin olettaa tapahtuvan, kun sähkövirta tippuu nollaan, sillä silloin sähkövirran aiheuttama magneettivuon tiheys tippuu nollaan. Tästä johtuen aksiaalivoiman määrittämisessä oletetaan, että magneettivuontiheys on vakio, kun käämissä kulkee virta ja

että sen arvo muuttuu vasta virran tippuessa noltaan. Virran taas voidaan olettaa muuttuvan lineaarisesti vääntömomentin mukaan. (Valtonen 2010.)

Magneettivuontiheytenä käytetään $B = 1$ [Vs/m²], kun moottori on kuormitettuna ja käämissä kulkee virta. Kuormittamattomassa tapauksessa taas käytetään $B = 0,8$ [Vs/m²]. Näillä oletuksilla aksiaalivoimat voidaan laskea, käyttäen kaavaa 10.

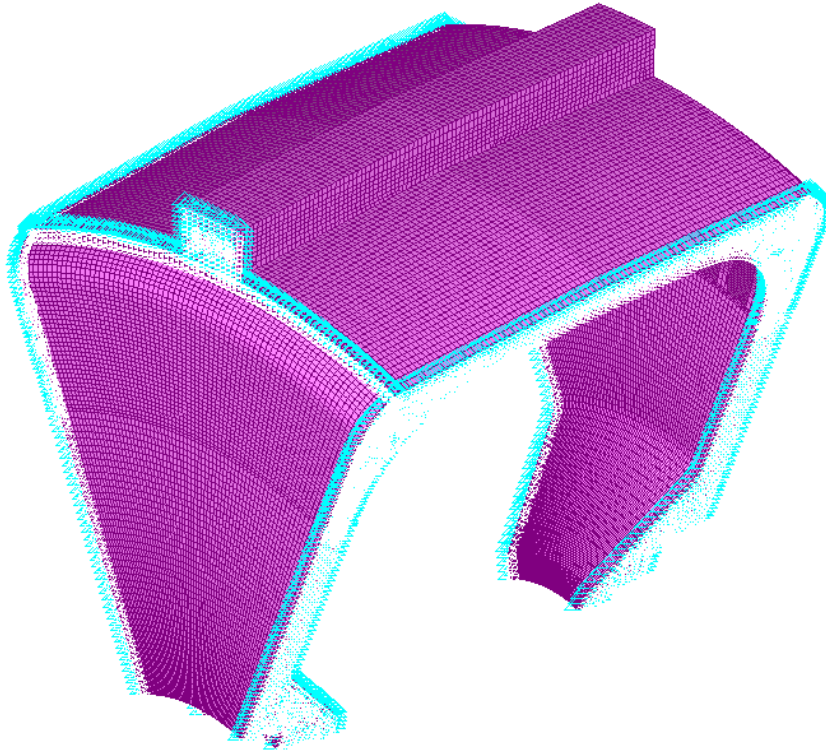
Staattori on kiinnitetty moottorin runkoon, joten magneettien vetovoima vaikuttaa siihen staattorin kiinnityskohdasta. Runkoon vaikuttavien voimien esiintymisväli ja suunta määritetään käyttökohteesta mitatun momenttikäyrän avulla. Momenttikäyrälle suoritetaan rainflow-analyysi, minkä avulla määritetään vääntömomenttisyklit ja niiden lukumäärä. Vääntömomenttisykliden avulla määritetään aksiaalivoimasyklit ja niiden lukumäärä.

3.1 Elementtimenetelmä

Elementtianalyysissä käytetään FEMAP- ohjelmaa esi- ja jälkikäsitteilyyn ja Nx Nastran - ohjelmaa mallin ratkaisuun. Moottorirungon 3D-mallia käytetään apuna elementtimallin luomisessa. Materiaalin oletetaan käyttäytyvän lineaarielastisesti, joten elementtianalyysi suoritetaan staattisella lineaarielastisella mallilla. Moottorirunko ja kiinnityskorvakkeet mallinnetaan 8-solmuisilla tilavuuselementeillä ja jäähdytysrivat 4-solmuisilla laattaelementeillä.

Kiinnityskorvakkeiden pultit mallinnetaan sijoittamalla reikien sisäpinnoille ristikkäisiä palkkielementtejä, joiden kimmokerroin E on korkea verrattuna muuhun malliin. Kuormitukset asetetaan vaikuttamaan staattorin kiinnityspisteisiin.

Aksiaalista symmetriaa hyödyntäen elementtimalli rakennetaan mallintamalla moottorirungosta kahdeksasosalohko. Symmetrian hyödyntäminen mahdollistaa tiheen verkotuksen käytön ilman, että elementtien lukumäärä kasvaisi liikaa. On kuitenkin muistettava, että runko ei ole todellisuudessa täysin aksiaalisesti symmetrinen, sillä kiinnityskorvakkeet eivät sijoitu täysin symmetrisesti koko moottorirungon kehälle.



Kuva 3. Moottorin kahdeksasosasektorin elementtimalli ja reunaehdot.

Vapausasteiden määrittystä varten mallille luodaan sylinterikoordinaatisto. Lohkon rajoittavat tasot lukitaan tangentiaalisuunnassa. Laipan kiinnitysolakkeen pystypinnan kaikki solmut lukitaan sylinterikoordinaatiston z-akselin suunnassa. Rakenne kiinnitetään jäykästi kiinnityskorvakkeen pultista. Elementtimallissa on 1277076 vapausastetta.

3.2 Kuormitussykliä määrittäminen

Käyttökohteen kuormitushistorialle suoritetaan rainflow-analyysi, minkä avulla määritetään vääntömomenttisyklistä ja niiden lukumäärä. Vääntömomenttisykliä avulla määritetään aksiaalivoimasyklistä ja niiden lukumäärä, ottaen huomioon aikaisemmin tehdyt oletukset aksiaalivoiman ja vääntömomentin yhteydestä. Rainflow-analyysin tulokset on esitetty taulukossa 4. *KA* ilmaisee vääntömomentin keskiarvon. Taulukossa näkyvät arvot on skaalattu kertoimella joten ne eivät vastaa sellaisenaan käyttökohteen vääntömomenttiä.

Taulukko 4. Rainflow-analyysillä määritetyt keskikuormat, niiden vaihteluvälit ja syklien lukumäärät.

	Vaihtelu	147	439	731	1023	1315	1607	1899	2191	2483	2775	3067	3361
	-995	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-888	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-781	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-675	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-568	2	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	-461	12	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	-354	28	1	2	3	3	1	0	0	0	0	0	0
	-248	7	5	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0
	-141	7	3	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	-34	33	1	2	0	0	0	4	3	0	1	0	0
	73	31	0	0	0	0	1	3	2	1	0	0	0
KA	179	50	1	2	0	0	2	0	0	2	0	1	3
	286	37	4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	393	11	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	499	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	606	9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	713	12	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	820	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	926	7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1033	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1140	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1246	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1353	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1460	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1567	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1673	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1887	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Oletetaan, että aksiaalivoima pysyy maksimiarvossaan, kunnes vääntömomentti muuttuu nolaksi. Tarkastelemalla taulukon 3 syklejä, voidaan arvioida aksiaalivoimasykliä lukumäärä. Oletetaan, että jos millä tahansa taulukon 4 syklillä:

$$|T_{mean}| - \frac{T_{range}}{2} < 0 \quad (12)$$

, niin tapahtuu aksiaalivoiman kuorman vaihto. Kaavassa 12 T_{mean} on vääntömomentin keskiarvo ja T_{range} on vääntömomentin vaihteluväli. Jos vääntömomenttisykli ei aiheuta aksiaalivoimasykliä, vaikuttaa aksiaalivoima tällöin staattisesti, aiheuttaen rakenteeseen

keskijännitystä. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että vääntömomentin aiheuttama voima on hyvin pieni verrattuna aksiaalivoimaan, joten sen vaikutus voidaan todennäköisesti jättää huomioimatta.

3.3 Jännitys-kestoikä-käyrään perustuva kestoiän arviointi

Rungolle muodostetaan jännitys-kestoikä- käyrä elementtianalyysin tulosten ja Eurokoodi 9:n määrittämän väsymisluokan perusteella.

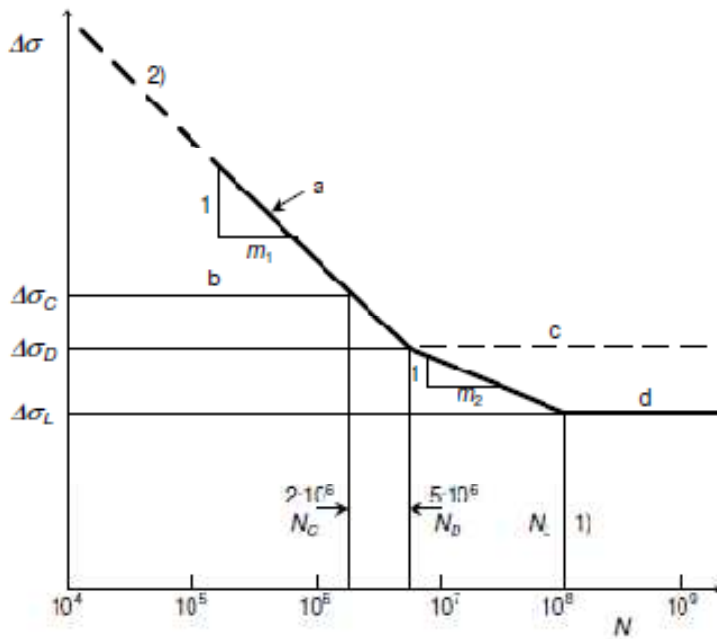
Taulukko 5. Eurokoodi 9:n määrittämät väsymisluokat valetuille alumiinirakenteille (EN-1999-1-3 2007, s. 77).

Väsymisluokka ($N_c = 2 \times 10^6$)		$N = 10^6$	$N_D = 2 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1 = m_2$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
71	7	108,9	71	40,6
50	7	76,7	50	28,6
40	7	61,4	40	22,9
32	7	49,1	32	18,3
25	7	38,4	25	14,3

Väsymisluokaksi valitaan suurimman huokosen koon perusteella $\Delta\sigma_c = 25$ [MPa]. Kappaleen elinikä lasketaan väsymisluokan, taulukon 5 ja elementtianalyysin tulosten perusteella. Oletetaan rungolle matala jännitysamplitudi, jolloin rakenteen kestoiän arvioidaan sijoittuvan $N_i = 5 \times 10^6 \dots 10^8$ kierrosta, jolloin kappaleen kestoikä lasketaan kaavalla 13. (EN-1999-1-3 2007, s. 33.)

$$N_i = 5 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma F_f \gamma M_f} \right)^{m_2} \frac{2}{5} \frac{m_2}{m_1} \quad (13)$$

Kaavassa 13 $\Delta\sigma_c$ on väsymisluokka, $\Delta\sigma_i$ paikallinen maksimijännitys ja γF_f sekä γM_f ovat materiaaliominaisuuksien ja kuormituksen epävarmuutta kuvaavia kertoimia, mainitussa järjestyksessä. Lisäksi m_2 ja m_1 ovat S-N- käyrän käänteisiä kulmakertoimia. Esimerkki S-N- käyrästä ja siihen liittyvistä vakioista on esitetty kuvassa 4. (EN-1999-1-3 2007, s. 33.)

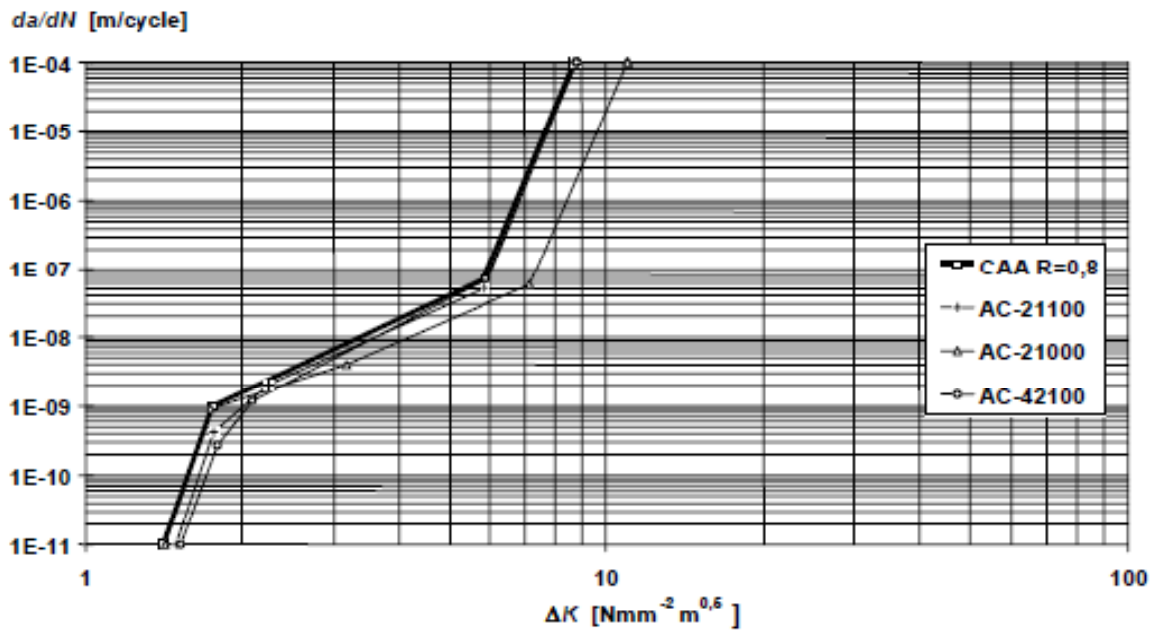


Kuva 4. Eurokoodi 9:n ohje S-N- käyrän määrittämiseen (EN-1999-1-3 2007, s. 33).

Paremmen tiedon puutteessa kuormitusten intensiivisyyden tai lukumäärän hajonnasta, tässä työssä oletetaan että epävarmuutta kuormituksen suhteen ei esiinny. Tällöin kertoimelle γFf käytetään arvoa 1,5 (EN-1999-1-3 2007, s. 20.) Kertoimelle γMf käytetään arvoa 1, standardin suositusten mukaisesti (EN-1999-1-3 2007, s. 32).

3.4 Särönkasvumalleihin perustuva kestoiän arviointi

Särönkasvua arvioidaan taulukoidulla LEFM:in mallilla olettamalla särön ydintyvän maksimipääjännitysalueen pinnalla sijaitsevalle huokoselle. Särönkasvunopeus saadaan Eurokoodi 9:n määrittämästä särönkasvukäyrästä.



Kuva 5. Särönkasvukäyrästäjä yleisille valualumiiniseoksille (EN-1999-1-3 2007, s. 53).

Tässä työssä käytetään referenssimateriaalina seosta AC-42100, minkä koostumus on lähellä AC43000:aa. Jännityksen intensiivisyyskerroin arvioidaan taulukoidusta tapauksesta. Eräässä tutkimuksessa valualumiinin pinnalla sijaitsevasta huokosesta alkavaa särönkasvua arvioidaan olettamalla pinnalla sijaitseva huokonen alkusäröksi. Tällöin K lasketaan kaavalla 14. (Buffiere et al. 2001, s. 122.)

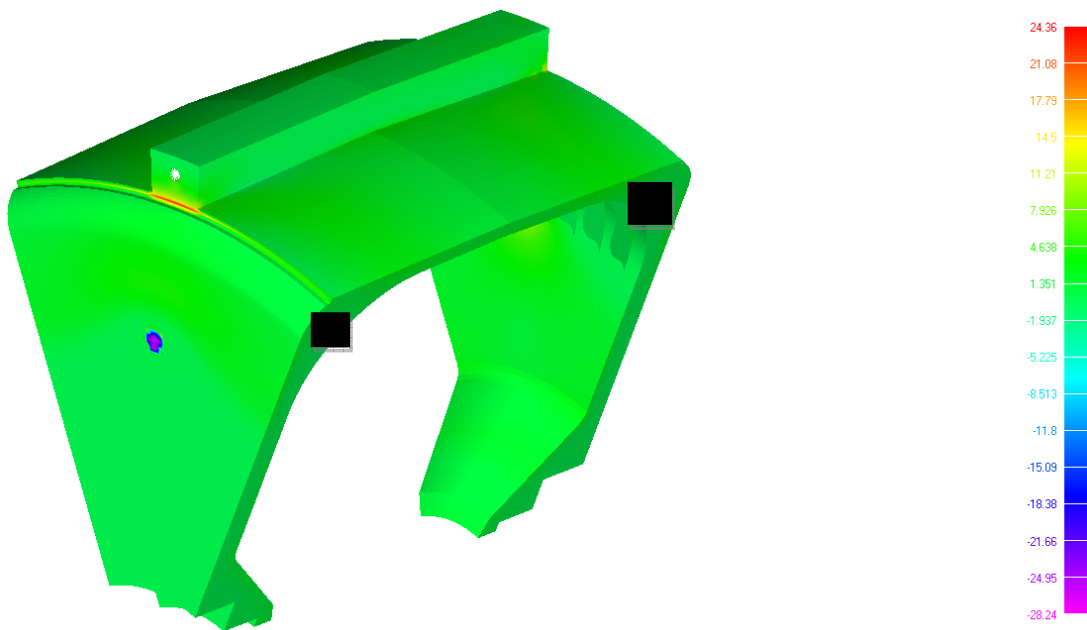
$$K = \sigma_{local} [(XY)^{1/2}]^{1/2} \quad (14)$$

Kaavassa 14 σ_{local} on paikallinen jännitys, X on huokosen leveys ja Y on huokosen syvyys (Buffiere et al. 2001, s. 122.)

4 TULOSTEN TARKASTELU

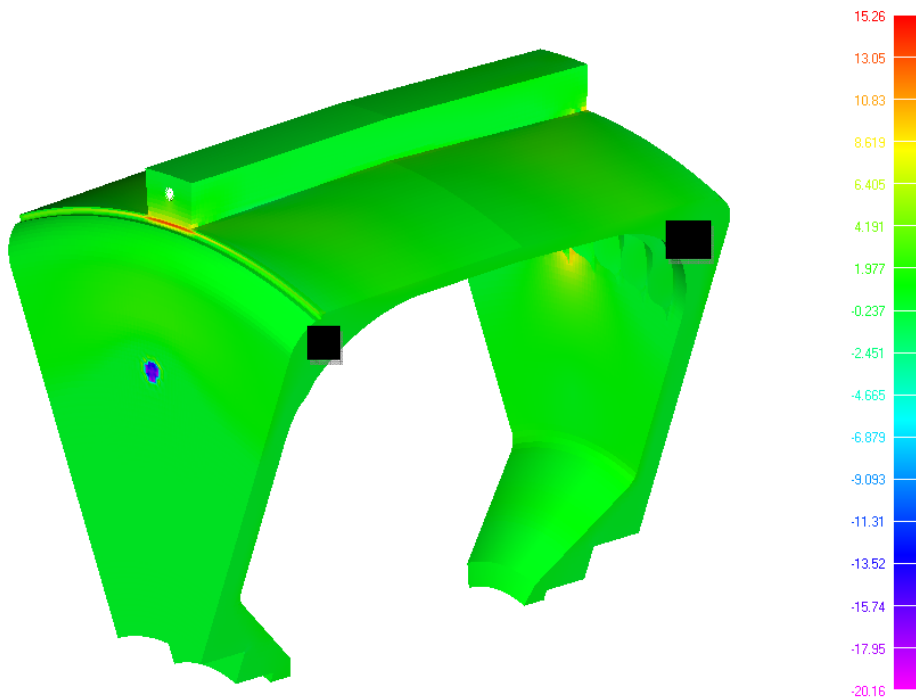
4.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmällä määritettiin moottorirungon maksimijännitykset, maksimi ja minimikuormalla. Kuormitukset laskettiin kaavalla 10, jolloin tulokseksi saatiin $F_{kuormitettu} = 3507,8$ [N] ja $F_{lepo} = 2245,0$ [N]. Tulosten tarkastelussa perehdyttiin erityisesti maksimipääjännitykseen, jonka suuruus on Eurokoodi 9:n mukaan hallitseva tekijä valetun alumiinin väsymisessä. Runko mallinnettiin ensin harvalla elementtiverkolla, jonka jälkeen verkotusta tihennettiin suurimman jännityksen alueella, joka muodostui laipallisen runkopuolikkaan olakkeeseen. Verkon tihennyksessä olakkeen pohjalle mallinnettiin 1 [mm] suuruinen pyöristyssäde, jolle sijoitettiin 4 elementtiä symmetriatason suunnassa. Kuvassa 5 on esitetty elementtianalyysin tulokset maksimiaksaalikuormalla, $F_{kuormitettu}$ ja kuvassa 6 minimiaksaalikuormalla, F_{lepo} .



Kuva 6. Kahdeksasosamallin maksimipääjännitys laipalliselle puolelle maksimikuormalla.

Elementtianalyysin mukaan suurin maksimipääjännitys maksimikuormalla sijaitsee kiinnityskorvakkeen juuressa ja on suuruudeltaan 24,46 [MPa]. Minimikuormalla maksimipääjännitys on suuruudeltaan 15,26 [MPa].



Kuva 7. Kahdeksasosamallin maksimipääjännitys laipalliselle puolelle minimikuormalla.

Momentin vaikutus jännitustasoon todettiin merkityksettömäksi verrattuna aksiaalivoimaan, joten sen vaikutus jätettiin huomioimatta.

4.2 Jännitys-kestoikä-käyrä

Olettamalla suurimmaksi huokosen kooksi 2 [mm], taulukon 1 mukaan rakenteen väsymislukka on $\Delta\sigma_c = 25$ [MPa]. Tällöin kappaleen odotettu kestoikä voidaan laskea kaavalla 13. Kestoiäksi saadaan 128072666 kuormituskertaa. Elinikä ylittää 10^8 kuormituskertaa, joten Eurokoodi 9:n mukaisesti rakenteen elinikä oletetaan ikuiseksi (EN-1999-1-3 2007, s. 33). Tässä tapauksessa ei ole tarvetta tarkastella rungon kestoikää äärellisenä laskemalla kuormitussykliä lukumäärää kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla.

4.3 Lineaarielastinen murtumismekaniikka

Jännitysintensiteettikertoimeksi saadaan maksimi- ja minimikuormalla, käyttäen kaavaa (14) $K_{max} = 1,094$ [Nmm⁻²m^{0,5}] ja $K_{min} = 0,68$ [Nmm⁻²m^{0,5}], jolloin $\Delta K = 0,41$ [Nmm⁻²m^{0,5}]. Tarkastelemalla kuvan 4 käyrää seokselle AC-42100, saadaan särönkasvun raja- arvoksi $\Delta K_{th} \sim 1,6$. $\Delta K < \Delta K_{th}$, joten tulosten perusteella kappaleen jännitysintensiteettikertoimen vaihteluväli ei aiheuta särönkasvua. Tässäkään tapauksessa

ei ole tarvetta tarkastella rungon kestoikää äärellisenä laskemalla kuormitussykliä lukumäärää kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla.

5 YHTEENVETO

Jännitys-kestoikä-käyrästään perustuvan tarkastelun perusteella moottorirungon elinikä ylittää 10^8 sykliä, jolloin se oletetaan ikuiseksi. Valetut alumiinikappaleet jaetaan väsymisluokkiin huokoisuuden perusteella, joten tarkat mittaukset materiaalissa esiintyvien huokosten halkaisijoiden määrittämiseksi ovat tarpeen tarkempien tulosten saamiseksi. Karkeiden mittausten perusteella päädyttiin väsymisluokaksi valitsemaan normaaliarvo, jolloin S-N - tarkastelulla saadut tulokset saattavat olla liian konservatiivisia.

Elementtianalyysillä saadut jännitysamplitudit vahvistettiin kahdella tarkennetulla elementtimallilla, joissa elementtiverkkoa tihennettiin erityisesti korkean jännityksen alueella. Maksimipääjännitystaso ei noussut merkittävästi tarkennuksen myötä, joten käytetty pääjännitysamplitudin arvo oletettiin tarkaksi.

Murtumismekaniikan tarkastelun perusteella jännitysintensiteetikertoimen vaihteluväli ei ylittänyt kynnysarvoa $\Delta K_{th} \sim 1,6$, jolloin rungossa ei oleteta esiintyvän särönkasvua. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että käytetty intensiteetikertoimen kaava 14, ΔK :n määrittämiseksi perustuu yksinkertaistettuun tapaukseen, mikä ei välttämättä kuvaa todellista tilannetta riittävän tarkasti. Käytetyssä murtumismekaniikan mallissa huokonen oletettiin a :n pituiseksi ja levyiseksi alkusäröksi, mikä on syklisen vetojännityksen alaisena. Menettelytapa ei kuitenkaan anna aikaisempien tutkimusten mukaan aina luotettavia tuloksia, varsinkaan alhaisilla jännitystasoilla. Parempi menettelytapa voisi olla huokosen käsittely lovena.

Tulokset viittaavat tehdyistä yksinkertaistuksista huolimatta voimakkaasti siihen, että vaikuttava jännitystaso ei aiheuta runkoon väsymistä. Tarvittavat yksinkertaistukset ja oletukset tehtiin konservatiivisilla menetelmillä, joten kestoikä voidaan olettaa ikuiseksi tarkennetuillakin menetelmillä.

LÄHDELUETTELO

J-Y. Buffiere et al., 2001. Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-Mg0.3 cast Al alloys. *Materials Science and Engineering A316*, 115-126.

Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-3 2007. Structures susceptible to fatigue.

Norman E. Dowling., 1998. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for deformation, fracture and fatigue*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall.

Ali Fatemi, Henry O. Fuchs, Ralph I. Stephens & Robert R Stephens., 2001. *Metal Fatigue in Engineering*. 2nd ed. New York: A Wiley-Interscience Publication.

Y. X. Gao, J. Z. YI, P. D. Lee & T. C. Lindley., 2004. The effect of porosity on the fatigue life of cast aluminium-silicon alloys. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 27, 559–570.

Jacek F. Gieras, Maarten J. Kamper & Rong-Jie Wang., 2004. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. London: Kluwer Academic Publishers.

Mikko Valtonen., 2007. *Performance Characteristics of an Axial-Flux Solid-Rotor-Core Induction Motor*. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology,

SFS-EN 1706 2010. Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet.

LIITTEET

Liite I. Laskutoimitukset

Aksiaalivoimien määrittäminen:

Voimat yhtä magneettia kohden:

$$F_{kuormitettu} = \frac{B^2 A_m}{2u_o} = \frac{\left(1 \left[\frac{Vs}{m^2}\right]\right)^2 * 0,008816 [m^2]}{2 * 1,2566371 * 10^{-6}} = 3507,8 [N]$$

$$F_{lepo} = \frac{B^2 A_m}{2u_o} = \frac{\left(0,8 \left[\frac{Vs}{m^2}\right]\right)^2 * 0,008816 [m^2]}{2 * 1,2566371 * 10^{-6}} = 2245,0 [N]$$

Skaalataan kuormitukset oikeaksi elementtimallin lohkolle:

$$F'_{kuormitettu} = \frac{F_{kuormitettu} * 6}{8} = 2630,8 [N]$$

$$F'_{lepo} = \frac{F_{lepo} * 6}{8} = 1683,8 [N]$$

S-N- käyrän perusteella laskettu kestoikä:

$$N_i = 5x10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma F f \gamma M f}\right)^{m_2} \frac{m_2}{5} = 5x10^6 \left(\frac{25 \left[\frac{N}{mm^2}\right] * 1}{9,2 \left[\frac{N}{mm^2}\right] * 1,5 * 1}\right)^7 * \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{7}{7}} = 128072666$$

Suurimman huokosen koon perusteella lasketut jännitysintensiteettikertoimet ja jännitysintensiteettikertoimen vaihteluväli:

$$K_{max} = \sigma_{max} [(XY)^{1/2}]^{1/2} = 24,46 \left[\frac{N}{mm^2}\right] * ((2 * 2 * 10^{-3} [m^2])^{0,5})^{0,5} = 1,094 [Nmm^{-2} m^{0,5}]$$

$$K_{min} = \sigma_{min} [(XY)^{1/2}]^{1/2} = 15,26 \left[\frac{N}{mm^2}\right] * ((2 * 2 * 10^{-3} [m^2])^{0,5})^{0,5} = 0,682 [Nmm^{-2} m^{0,5}]$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = 1,094 - 0,682 [Nmm^{-2} m^{0,5}] = 0,412 [Nmm^{-2} m^{0,5}]$$