

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

TERÄSMATERIAALIEN VIRUMINEN JA SEN LASKENTAMENETELMÄT

CREEP OF STEEL MATERIALS AND ITS CALCULATION METHODS

Lappeenrannassa 24.4.2021

Antti Jormalainen

Tarkastaja TkT Antti Ahola

Ohjaajat TkT Antti Ahola, Professori Timo Björk

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energijärjestelmät
LUT Kone

Antti Jormalainen

Teräsmateriaalien viruminen ja sen laskentamenetelmät

Kandidaatintyö

2021

48 sivua, 19 kuvaa, 1 taulukko ja 1 liite

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Ohjaajat: TkT Antti Ahola, Professori Timo Björk

Hakusanat: viruminen, laskentamenetelmät, kuormalujat teräkset

Tässä kandidaatintyössä tehtiin kirjallisuuskatsaus virumiseen ilmiönä ja siihen, miten viruminen voidaan ottaa laskennallisesti huomioon. Lisäksi tehtiin lyhyt katsaus siihen, miten virumista voidaan kontrolloida esimerkiksi materiaalivalinnoilla.

Viruminen ilmenee yleensä hyvin hitaana plastisena muodonmuutoksena, kun kappaletta kuormitetaan materiaalin sulamislämpötilaan nähden korkeissa lämpötiloissa. Virumismekanismeja on useita, mutta diffuusion rooli on merkittävä niissä kaikissa. Diffuusio voi auttaa dislokaatioita ohittamaan esteen tai atomit voivat liikkua raerajalta toiselle sen avulla. Yleensä suunnittelussa pyritään siihen, että virumismurtuma ei tapahdu komponentin suunnitellun eliniän aikana tai virumisvenymä ei ylitä tiettyä raja-arvoa. Tässä työssä käsiteltiin kirjallisuudessa paljon esillä olevia parametrisiä laskentamalleja, joiden avulla voidaan laskea murtumaan kuluva aika, sekä muutama uudempi malli, joiden avulla voidaan luoda kokonainen virumiskäyrä. Metallisten materiaalin virumiskestävyyttä voidaan kasvattaa esimerkiksi lisäämällä suuren atomikoon seosaineita, jotka vastustavat dislokaatioiden liikettä. Pieni raekoko ja korkea sulamislämpötila parantavat myös materiaalin kestävyyttä virumista vastaan.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Antti Jormalainen

Creep of steel materials and its calculation methods

Bachelor's thesis

2021

48 pages, 19 figures, 1 table and 1 appendix

Examiner: D. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Supervisors: D. Sc. (Tech.) Antti Ahola, Prof. Timo Björk

Keywords: creep, life prediction, creep resistant steel

This bachelor's thesis was carried out as a literature review to examine creep phenomenon and how it can be taken into account mathematically. In addition, a short review on how creep can be controlled, for example by material choices was conducted.

Creep is usually defined as very slow plastic deformation when a component is loaded in relatively high temperature compared to its melting point. There are several creep mechanisms, but diffusion is a very important concept in all of them. Diffusion helps dislocations climb to other slip planes if they encounter an obstacle. Atoms can also move from one grain boundary to another by diffusion. Creep rupture should not occur during the lifetime of the component or creep strain should stay under a certain limit. This bachelor's thesis presents some of the most popular parametric methods to predict creep rupture time and a few newer methods that can be used to recreate the whole creep curve. Creep resistance of metallic materials can be increased by, for example using alloying elements that have a large atomic size thus preventing dislocation movement. Large grain size and high melting point also improve creep resistance.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO.....	6
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Tutkimuksen tausta	8
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus.....	8
1.3 Tutkimusmenetelmä.....	9
2 TEORIA.....	10
2.1 Viruminen ilmiönä.....	13
2.2 Virumismekanismit.....	14
2.2.1 Diffuusiomekanismit	15
2.2.2 Dislokaatiomekanismit	18
2.3 Virumismurtuma	19
2.4 Virumiskoe.....	20
3 LASKENTAMENETELMÄT	22
3.1 Parametriset laskentamenetelmät.....	25
3.1.1 Larson-Miller	25
3.1.2 Orr-Sherby-Dorn	27
3.1.3 Manson-Haferd	29
3.1.4 Venäläiset mallit 1 ja 2	31
3.1.5 Pienimmän sitoutumisen malli	31
3.2 Virumiskäyrän ennustaminen	32
3.2.1 Theta-projektio	32
3.2.2 Wilshiren menetelmät.....	34
4 VIRUMISEN HALLITSEMINEN.....	36
4.1 Virumista kestävät materiaalit	37
4.2 Muita huomioonotettavia asioita	39
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	41
LÄHTEET	45

LIITTEET

Liite 1: Esimerkki Larson-Miller parametrin käytöstä

SYMBOLILUETTELO

A	Materiaalikohtainen vakio [-]
a	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit) [-]
B	Materiaali- ja mekanismikohtainen vakio [-]
b	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit) [-]
C_{LM}	Larson-Miller-vakio [-]
C_{OSD}	Orr-Sherby-Dorn-vakio [-]
c	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit) [-]
D_L	Diffuusiokerroin [m^2/s]
D_{GB}	Diffuusiokerroin [m^2/s]
d	Raekoko [μm]
d	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit) [-]
E	Kimmomoduuli [MPa]
f	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit) [-]
g	Virumismallin vakio (Pienimmän sitoutumisen malli) [-]
K_1	Raageometriasta riippuva vakio [-]
K_2	Raageometriasta ja virumismekanismista riippuva vakio [-]
k_1, k_2, k_3	Virumismallin vakio (Wilshiren mallit) [-]
k	Boltzmannin vakio [J/K]
m	Eksponentti [-]
n	Jännityseksponentti [-]
P_{LM}	Larson-Miller-parametri [-]
P_{MH}	Manson-Haferd-parametri [-]
P_{OSD}	Orr-Sherby-Dorn-parametri [-]
Q	Aktivaatioenergia [kJ/mol]
R	Kaasuvakio [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
T	Lämpötila [K]
T_a	Vakio [K]
t	Aika [h]
t_a	Vakio [h]

t_r, t_{rup}, t_f	Murtoaika [h]
u, v, w	Virumismallin vakio (Wilshiren mallit) [-]
δ	Raerajan leveys [μm]
ε_0	Välitön venymä [%]
ε_C	Virumisvenymä [%]
$\dot{\varepsilon}$	Virumisnopeus [1/h]
σ	Jännitys [MPa]
σ_{TS}	Murtolujuus [MPa]
θ	Theta-parametri [-]
Ω	Vakanssin tilavuus [cm^3/mol]

1 JOHDANTO

Yleensä insinöörisovelluksissa oletetaan rakenteen toimivan materiaalin kimmoisella alueella eli myötörajan alittavilla jännityksillä. Tämä on hyvä lähtökohta huoneenlämpötilassa toimiville rakenteille ja laitteille, mutta korkean lämpötilan sovelluksissa on kuitenkin otettava huomioon materiaalin viruminen. Virumisesta johtuvaa venymää voi tapahtua, kun lämpötila on materiaalin sulamislämpötilaan nähden suhteellisen korkea ja kappale on jännityksessä. Viruminen on tyypillisesti hyvin pitkän aikavälin ilmiö, eikä sen etenemistä voi havaita paljain silmin. Tämän lisäksi haasteita aiheuttaa myös se, että viruminen voi johtaa plastisiin muodonmuutoksiin jo hyvin pienillä, myötörajan alittavilla jännityksillä. (Miekk-oja et al. 1986, s. 734.) Näin ollen viruminen on keskeinen mitoituskriteeri esimerkiksi prosessi-, energia- ja ilmailuteollisuuden sovelluksissa, joissa lämpötilat ovat suuria ja laitteiden elinikävaatimukset ovat pitkiä, jopa useita kymmeniä vuosia. Hyvä ymmärrys materiaalien virumisesta mahdollistaa esimerkiksi turvallisempien ja energiatehokkaampien laitteiden kehittämisen (Boyle & Spence 1983, s. 1–4).

1.1 Tutkimuksen tausta

Viruminen on aikariippuvainen ilmiö ja vaurio voi syntyä jopa kymmenien vuosien kuluessa, joten kokeellista aineenkoetusta ei voida suorittaa täysin tosimaailmaa vastaavassa ympäristössä. Tästä syystä virumisen laskentaan on kehitetty useita erilaisia laskentamenetelmiä, joiden tarkoituksena on ekstrapoloida lyhyen aikavälin tutkimusdataa sopimaan pitkän aikavälin kohteeseen. (Miekk-oja et al. 1986, s. 741.) Näitä laskentamenetelmiä on kehitetty jo vuosikymmeniä ja vaikuttaa sille, että yksikään menetelmä ei ole saavuttanut vakiintunutta asemaa. Työ tehdään LUT-yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolle.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutustuttaa lukija virumiseen ilmiöön ja esitellä miten viruminen voidaan ottaa huomioon rakenteen suunnittelussa käymällä läpi yleisempiä laskentamenetelmiä. Lisäksi menetelmiä vertaillaan lyhyesti, etsitään niiden pääparametrit ja selvitetään, miten parametrit voidaan saada selville kokeellisesti. Lopuksi tutustutaan mitä

eri tapoja virumisen hallintaan on olemassa. Työn on tarkoitus vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä viruminen on?
- Mitä menetelmiä virumisen laskentaan on?
- Miten kyseisiä menetelmiä käytetään ja minkälaisia kokeita tarvitaan?
- Miten virumista voidaan estää?

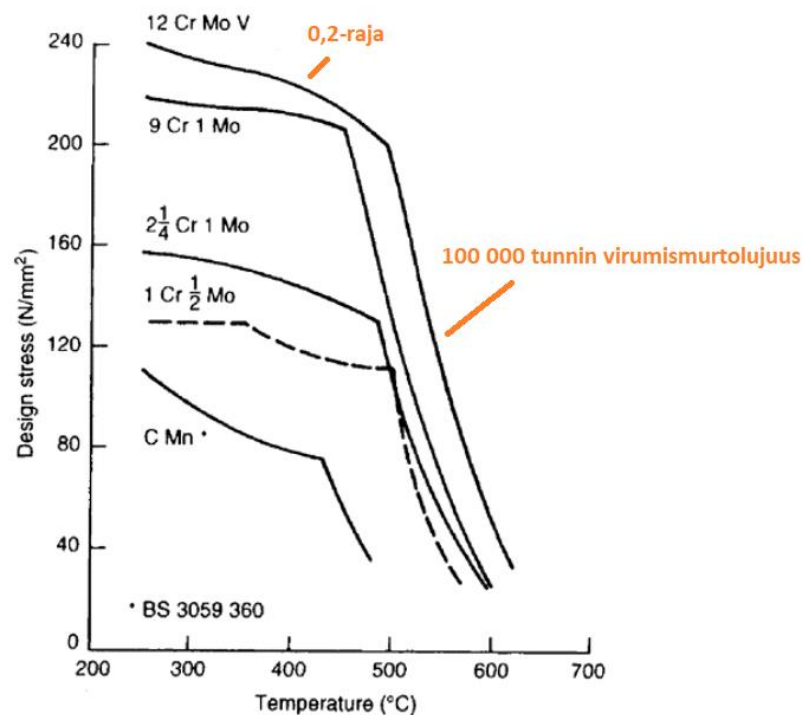
Työssä pidättäydytään kontinuumimekaniikassa ja insinööritasoisessa ajattelussa, eikä lähdetä etsimään uusia materiaalimallinnuskeinoja virumiselle.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Tämä kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, sillä tarkoituksena on tehdä laaja katsaus virumisilmiöön ja sen insinöörilähtöiseen laskentaan. Ohjaajien antamien aineistojen lisäksi tietoa haetaan muun muassa LUT-yliopiston Primo-tietokannasta, Elsevierin Scopus-tietokannasta ja Springerin tietokannoista. Lisäksi työssä käytetään LUT-yliopiston tiedekirjaston kokoelmissa olevaa materiaalitekniikan kirjallisuutta, mikäli vallitseva pandemiatilanne sen mahdollistaa. Orientoivaan tiedonhakuun käytetään Google Scholar -palvelua. Tietoa haetaan muun muassa hakusanoilla creep, creep life prediction, material science, high temperature steel, creep resistant steel. Lisäksi laskentamenetelmiä haetaan niiden omilla nimillä. Käytetään sopivissa tilanteissa fraasihakua ja hakusanoja yhdistetään tietokantojen operaattoreilla. Virumisilmiötä käsittelevä kirjallisuus on pääsääntöisesti melko vanhaa, joten siinä esitetyt asiat pyritään tarkistamaan uudemmissa lähteistä. Laskentamenetelmien käsittelyyn pyritään etsimään mahdollisimman uutta tietoa vertaisarvioituista tieteellisistä julkaisuista.

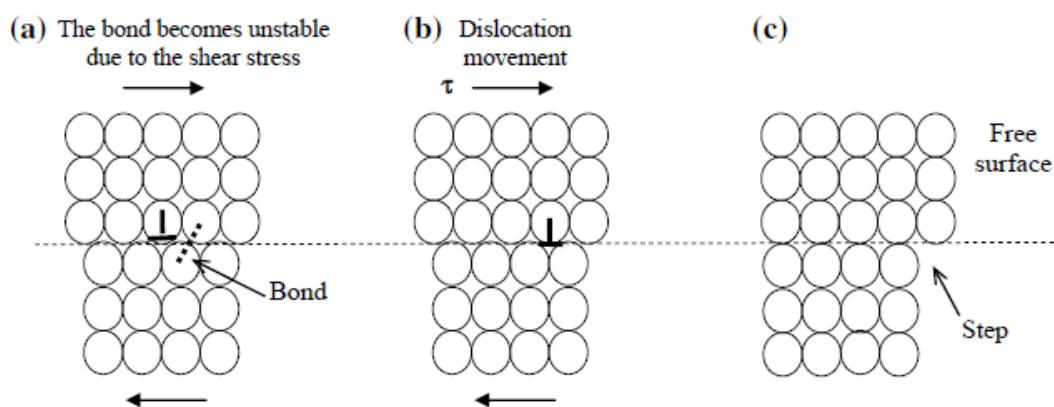
2 TEORIA

Korkeat lämpötilat vaikuttavat teräsmateriaaleihin usealla eri tavalla. Keskeisimpiä ilmiöitä ovat muun muassa lujuuden aleneminen, muokkauslujittumisen hidastuminen ja plastisen muodonmuutoksen muuttuminen aikariippuvaiseksi. (González-Velázquez 2020, s. 226; Miekk-oja et al. 1986, s. 105.) Viruminen onkin perinteisesti määritelty aikariippuvaisena plastisena muodonmuutoksena vakiojännityksellä korkeassa lämpötilassa (Kassner 2009). Kuvassa 1 on esitetty miten lämpötila vaikuttaa eri terästen lujuusominaisuuksiin sekä niiden 100 000 tunnin virumismurtolujuus. Koska viruminen on käytännössä hidasta plastista muodonmuutosta, on oleellista tuntea plastiseen muodonmuutokseen vaikuttavia tekijöitä. Erityisesti käsitteet dislokaatio, diffuusio ja siihen liittyvä vakanssi ovat keskeisiä asioita virumisen ymmärtämisessä.



Kuva 1. Lämpötilan vaikutus eräiden terästen lujuusominaisuuksiin ja niiden 100 000 tunnin virumismurtolujuus. (Mukaiillen: Llewellyn & Hudd 1998, s. 356.)

Dislokaatioilla on keskeinen osa teräsmateriaalien lujuus- ja sitkeysominaisuuksissa. Plastinen muodonmuutos on yksinkertaistettuna dislokaatioiden liikettä hilassa, jota materiaalissa vaikuttava jännitys saa aikaan. Dislokaatioiden osallisuuteen plastisessa muodonmuutoksessa päätyivät Taylor, Orowan ja Polanyi vuonna 1934 Volterran aikaisempaan työhön pohjautuen. (González-Velázquez 2020, s. 87.) Kuvassa 2 on havainnollistettu särmädislokaation liikettä vaakasuoralla liukutasolla.



Kuva 2. Särmädislokaation liike liukutasolla leikkausjännityksen vaikutuksesta (González-Velázquez 2020, s. 88.)

Materiaalin lujuus riippuu siis siitä, kuinka hyvin dislokaatioiden liike voidaan estää. Dislokaatioiden liikettä rajoittavat muun muassa raerajat, toiset dislokaatiot, vieraat atomit, erkaumat ja niin kutsutut Cottrellin pilvet. Dislokaatioiden vaikutus toisiin dislokaatioihin on tärkeä ilmiö muokkauslujittumisessa, jolla vuorostaan on keskeinen rooli virumisessa. Muokkauslujittuminen tarkoittaa materiaalin plastista muovaamista, jonka takia sen lujuus kasvaa ja sitkeys pienenee. Dislokaatiot liukuvat useilla risteävillä liukutasoilla ja törmäävät toisiinsa. Tämä saa aikaan nykämää, jotka lukitsevat osan dislokaatiosta paikalleen. Tämä näkyy vuorostaan lujuuden nousuna. Kun jännitys on tarpeeksi suuri, syntyy uusia dislokaatioita esimerkiksi niin kutsutun Frank-Read-ilmion kautta ja sitä kautta lisääntynyt dislokaatioiden määrä vaikeuttaa dislokaatioiden liikettä entisestään. Lukittautumisen lisäksi dislokaatiot voivat pinoutua esteen eteen, esimerkiksi raerajoille, kasvattaen lujuutta edelleen. Dislokaatio voi päästä esteestä ohi, mikäli jännitys on tarpeeksi suuri. (González-Velázquez 2020, s. 104–108; Valorinta 1993, s. 52–53.) Lämpötilalla on myös suuri vaikutus, sillä korkean lämpötilan tuoma termien energia helpottaa dislokaatioiden

liikkumista. Tämä on yksi syy elpymismekanismien rinnalla, miksi muokkauslujittuminen hidastuu lämpötilan noustessa. (Miekk-oja et al. 1986, s. 65–106.) Pienillä jännityksilläkin voi siis tapahtua paljon dislokaatioiden liikkumista, jos lämpöenergiaa tuodaan tarpeeksi.

Lämpötilalla on erityisen suuri merkitys diffuusiassa, joka tarkoittaa atomien siirtymistä hilassa hilapaikalta toiselle. Virumisen kannalta tärkein diffuusiomekanismi on vakanssimekanismi. Vakanssimekanismissa vakanssin, eli tyhjän hilapaikan, viereinen atomi täyttää vakanssin, jättäen entiselle paikalleen uuden vakanssin. Vakanssidiffuusio mahdollistaa dislokaatioiden kiipeämisen, näin dislokaatio voi kiivetä esteen yli toiselle liukutasolle. Lämpötilalla on suuri merkitys diffuusiolle, sillä atomi tarvitsee liikkumiseen aktivaatioenergiaa, joka saadaan atomin lämpöliikkeestä. Vakanssien määrää materiaalissa nostavat muun muassa plastinen muodonmuutos, korkea lämpötila ja neutronipommitus. (Miekk-oja et al. 1986, s. 45–46 ja s. 54–55.) Tästä syystä viruminen on huomioonotettava ilmiö esimerkiksi ydinvoimalaitossovelluksissa.

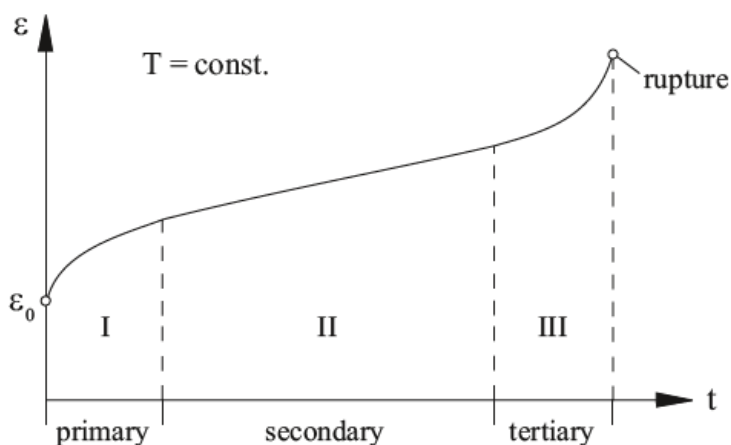
Toinen virumisilmiössä tärkeä käsite on metallimateriaalin elpyminen. Plastinen muodonmuutos sitoo materiaaliin energiaa, joka pyrkii vapautumaan. Huoneenlämpötilassa materiaali on yleensä stabiili, mutta korkea lämpötila mahdollistaa materiaalin palautumisen aikaisempaan tilaan. Matalammilla lämpötiloilla elpyminen tapahtuu toipumisena, jossa dislokaatiot pyrkivät mahdollisimman pienen energian tilaan. Dislokaatiot uudelleenjärjestyvät esimerkiksi kiipeämällä diffuusion avulla toisille liukutasoille ja osa niistä annihiloituu, eli tuhoutuu. Toipuminen laukaisee materiaalissa olevia sisäisiä jännityksiä, mutta ei vaikuta esimerkiksi lujuusominaisuuksiin. Korkeammilla lämpötiloilla eniten muokatuista kohdista alkaen tapahtuu uudelleenkiteytymistä, joka jatkuu rakeenkasvuna. Uudelleenkiteytymisessä materiaalin ominaisuudet palautuvat. (Valorinta 1993, s. 54–58.)

Korkea lämpötila on kuitenkin hyvin suhteellinen käsite, joten on mielekkäämpää käyttää absoluuttisen lämpötilan sijasta homologista lämpötila-asteikkoa, joka ilmaisee lämpötilan materiaalin sulamislämpötilan suhteen. Virumisen ajatellaan olevan keskeinen ilmiö, kun lämpötilat ovat lähteestä riippuen noin yli 40 % materiaalin sulamislämpötilasta. (Evans & Wilshire 1985, s. 4.) Tätä samaa lämpötilan raja-arvoa käytetään kuuma- ja kylmämuokkauksen erottamiseen ja se on myös karkeasti uudelleen kristallisoitumisen

rajalämpötilä. (González-Velázquez 2020, s. 226; Valorinta 1993, s. 56.) Samoin kuin sulamislämpötilä, myös lujuus on materiaaliikohtaista. Näin ollen myös jännitykset ajatellaan usein suhteellisina jakamalla jännitys materiaalin kimmo- tai liukumoduulilla. (Evans & Wilshire 1985, s. 3.) Näin kun jatkossa puhutaan korkeista lämpötiloista ja jännityksistä, tarkoitetaan sillä materiaaliominaisuuksiin nähden suhteellisen korkeita arvoja.

2.1 Viruminen ilmiönä

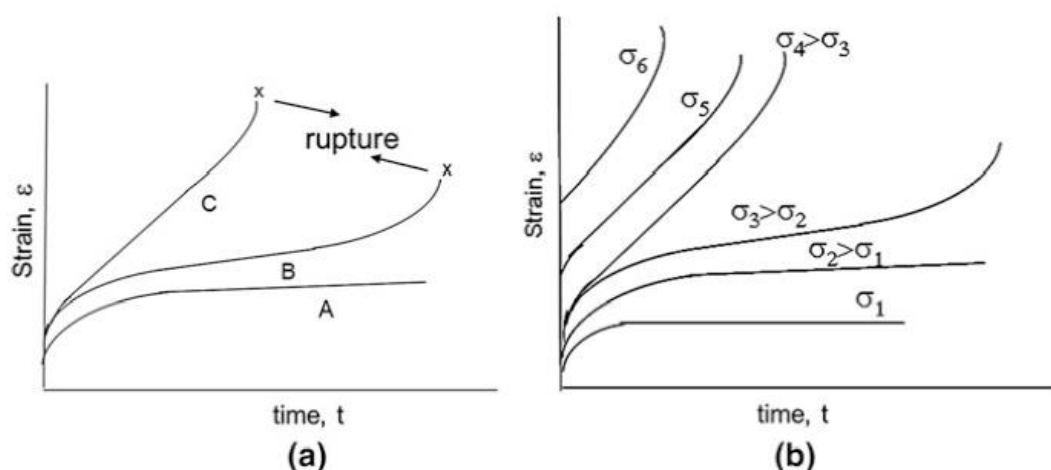
Kun koekappaletta rasitetaan vakiokuormalla vakio- ϵ -lämpötilassa, joka ylittää aikaisemmin mainitun raja-arvon, voidaan viruminen esittää kuvan 3 mukaan niin kutsutulla virumiskäyrällä. Virumiskäyrä esittää venymän ajan funktiona ja siitä voidaan havaita kolme eri vaihetta.



Kuva 3. Idealisoitu virumiskäyrä, jossa näkyy primääri-, sekundääri-, tertiäärivaiheet sekä virumismurtuma (Betten 2008, s. 51).

Primäärivaihe eli ohimenevä vaihe alkaa koekappaleeseen kohdistetun voiman aiheuttamasta välittömästä venymästä ϵ_0 . Virumisnopeus on aluksi suuri, mutta tasoittuu kohti minimiarvoa muokkauslujittumisen edetessä (González-Velázquez 2020, s. 227–229; Miekkoja et al. 1986, s. 734–735). Sekundäärivaiheessa virumisnopeus pysyy suurin piirtein vakiona, koska muokkauslujittuminen ja aiemmin mainitut palautumisprosessit pysyvät tasapainossa (Evans & Wilshire 1985, s. 4–5; González-Velázquez 2020, s. 228). Kolmannessa vaiheessa palautumisprosessit, kuten uudelleenkiteytyminen, kuroutuminen ja

raerajoille muodostuvat onkalot kasvattavat virumisnopeutta ja johtavat lopulta kappaleen murtumiseen ajanhetkellä t_r . (Miekk-oja et al. 1986, s. 739–740; González-Velázquez 2020, s. 228; Evans & Wilshire 1985, s. 15–21.) Kuvassa 3 esitetty virumiskäyrä on vain havainnollistava ja todellisuudessa eri vaiheet voivat ovat vaikeammin eroteltavissa. Matalilla lämpötiloilla eli karkeasti alle 30 % sulamislämpötilasta, toisessa vaiheessa virumisvenymä lähestyy vakioarvoa eli viruminen ei johda murtumaan asti. Korkeilla jännityksillä tai lämpötiloilla toinen vaihe voi olla hyvin lyhyt ja virumismurtuma saavutetaan nopeasti. Lämpötilan ja jännityksen vaikutusta virumiskäyrään on havainnollistettu kuvassa 4. (Evans & Wilshire 1985, s. 4–5.) Todellisissa rakenteissa toinen vaihe on useimmiten pisin ja komponenttien mitoittaminen tehdään sen vuoksi sekundäärivaiheen perusteella.

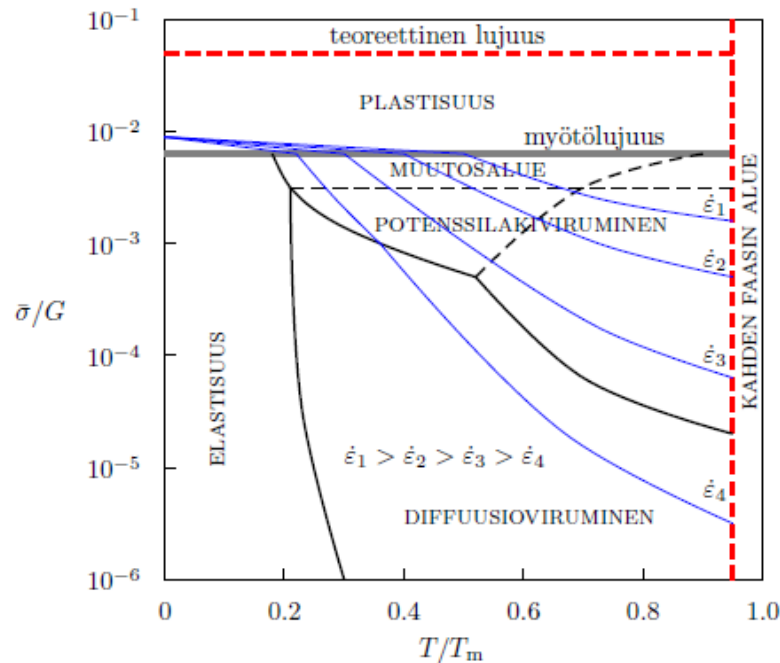


Kuva 4. Lämpötilan (a) ja jännityksen (b) vaikutus virumiskäyrään. (Pelleg 2013, s. 263.)

2.2 Virumismekanismit

Virumismekanismit voidaan jakaa diffuusio- ja dislokaatiomekanismeihin. Tämä jako ei kuitenkaan ole tarkasti rajattu, sillä myös dislokaatiomekanismit ovat vahvasti riippuvaisia diffuusiosta. (Pelleg 2017, s. 11–13.) Dominoiva mekanismi tietyllä jännitys-lämpötilakombinaatiolla tai toisen vaiheen virumisnopeudella voidaan katsoa materiaalikohtaisesta muodonmuutosmekanismikartasta, josta esimerkki on esitetty kuvassa 4. (Holmström 2010, s. 18.) Mekanismikartassa vaaka-akselilla on homologinen lämpötila ja pystyakselilla jännitys joko kimmo- tai liukumoduulin suhteen. (Boyle & Spence 1983, s. 11–12; Evans & Wilshire 1985, s. 12–13; Kauppila et al. 2017, s. 424–425.) Kuvassa olevilla

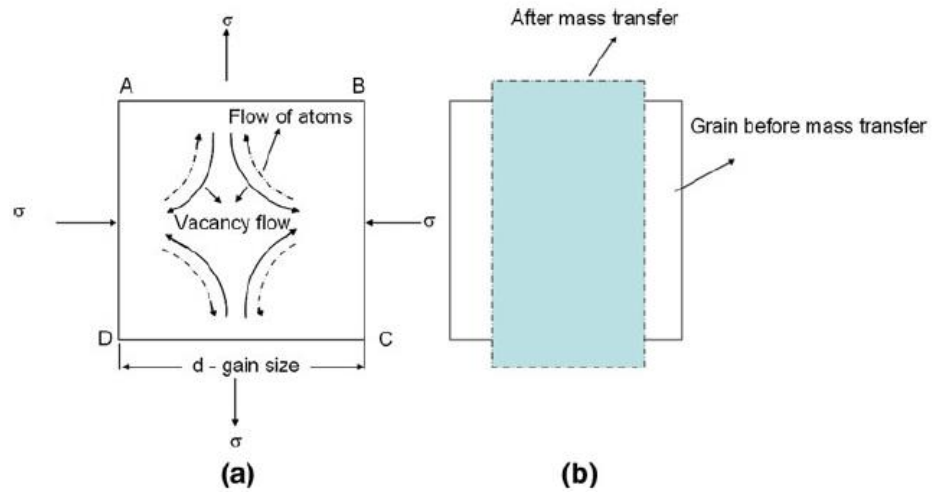
rajaviivoilla ajatellaan kahden mekanismin vaikuttavan virumiseen yhtä paljon (Evans & Wilshire 1985, s. 13). On olemassa myös kolmiulotteisia mekanismikarttoja, jotka ottavat huomioon myös raekoon, mutta kuvan 5 mukaiset kartat ovat selvästi yleisempiä.



Kuva 5. Idealisoitu kuva muodonmuutosmekanismikartasta. Vaaka-akselilla on homologinen lämpötila ja pystyakselilla tässä tapauksessa von Mises -jännitys normalisoituna liukumoduulin suhteen. (Kauppila et al. 2017.)

2.2.1 Diffuusiomekanismit

Kun atomien diffuusio tapahtuu hilan läpi, puhutaan niin kutsutusta Nabarro-Herring-virumisesta. Nabarro-Herring-virumisessa raerajat toimivat vakanssien lähteinä ja kaivoina. Atomit liikkuvat rearajoilta toisille hilan läpi, jolloin kide venyy jännityksen suunnassa. (Pelleg 2017, s. 26–30.) Kuvassa 6 on esitetty havainnollistava kuva Nabarro-Herring-virumisesta.



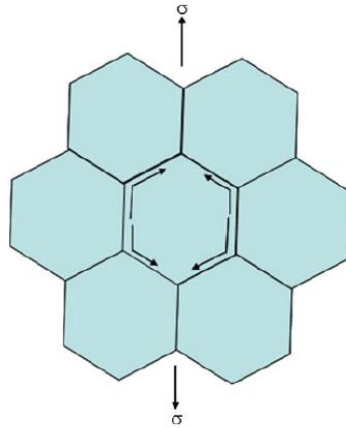
Kuva 6. Nabarro-Herring-virumisen periaate. Atomit liikkuvat raerajoilta toisille hilan läpi. Vakanssit puolestaan liikkuvat vastakkaiseen suuntaan. Kide venyy jännityksen suuntaan, mikä ilmenee koko kappaleen muodonmuutoksena. (Pelleg 2017, s. 26.)

Nabarro-Herring-mekanismin dominoivaa toisen vaiheen virumisnopeutta voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä (Evans & Wilshire 1985, s. 8).

$$\dot{\varepsilon} = K_1 \cdot \frac{\sigma \Omega}{RT} \cdot \frac{D_L}{d^2} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 K_1 on raegeometriasta riippuva vakio, σ on jännitys, Ω on vakanssin tilavuus, R on kaasuvakio, T on lämpötila, d on raekoko ja D_L on diffuusiokerroin, joka pitää sisällään aktivaatioenergian. Aktivaatioenergian on todettu olevan Nabarro-Herring-virumisessa hyvin lähellä itsediffuusion aktivaatioenergiaa. (Evans & Wilshire 1985, s. 8–12.)

Toinen diffuusiomekanismi on Coble-viruminen, jota tapahtuu matalammilla lämpötiloilla. Coble-virumisessa diffuusio tapahtuu raerajoja pitkin kuvassa 7 esitetyllä tavalla. (Evans & Wilshire 1985, s. 8.)



Kuva 7. Coble-virumisen periaate. Atomien diffuusio tapahtuu raerajoja pitkin, jolloin materiaali venyy jännityksen suuntaan. (Pelleg 2017, s. 36).

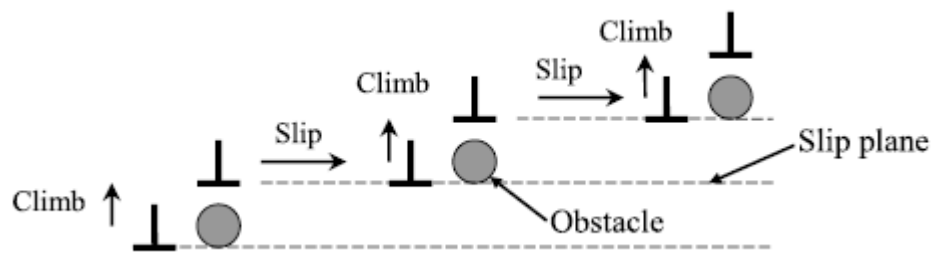
Coble-virumisessa toisen vaiheen virumisnopeutta voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä (Evans & Wilshire 1985, s. 8).

$$\dot{\varepsilon} = K_2 \cdot \frac{\delta \sigma \Omega}{RT} \cdot \frac{D_{gb}}{d^3} \quad (2)$$

Kaavassa 2 K_2 on vakio, δ on raerajan leveys, D_{gb} diffuusiokerroin, joka tässäkin tapauksessa pitää sisällään aktivaatioenergian. Coble-virumisessa aktivaatioenergia on karkeasti puolet Nabarro-Herring-virumisen aktivaatioenergiasta, mistä nimenomaan johtuu se, että Coble-viruminen dominoi alhaisemmillä lämpötiloilla. Muut muuttujat ovat samat kuin yhtälössä 1. (Evans & Wilshire 1985, s. 12.) Huomattavaa on, että reakokokomponentti saa arvon kolme, mikä tarkoittaa, että Coble-viruminen riippuu huomattavasti enemmän raekoosta kuin Nabarro-Herring-viruminen. Suurempi raekoko siis pienentää virumisnopeutta (Pelleg 2017, s. 38).

2.2.2 Dislokaatiomekanismit

Korkeilla jännityksillä viruminen tapahtuu dislokaatioiden liukumisena. Dislokaatiot liukuvat tavallisessa plastisessa muodonmuutoksessa liukutasoilla niin kuin aikaisemmin on kerrottu. Korkeissa lämpötiloissa, myötölujuuden alittavilla jännityksillä virumista kuvataan niin kutsutulla potenssilailalla (eng. Power-law creep). Potenssilakialueella dislokaatiot liukuvat liukutasoilla, mutta pysähtyvät kohdatessaan jonkin esteen. Lämpöenergia kuitenkin mahdollistaa dislokaatioiden kiipeämisen toiselle liukutasolle diffuusion avulla, niin kuin aikaisemmin on kerrottu. Tämä mahdollistaa dislokaatioiden liikkeen etenemisen ja plastisen muodonmuutoksen jatkumisen. (González-Velázquez 2020, s. 234–235; Pelleg 2013, s. 288–291.) Kuvassa 8 on esitetty havainnollistava kuva dislokaation kiipeämisestä sen kohdatessa esteen liukutasolla.



Kuva 8. Havainnollistava kuva dislokaatioiden kiipeämisestä toiselle liukutasolle (González-Velázquez 2020, s. 235).

Kun dislokaatioiden kiipeäminen on dominoiva virumismekanismi, voidaan toisen vaiheen virumisnopeus kuvata seuraavan yhtälön avulla, joka on yhdistelmä Nortonin ja Arrheniuksen laeista. (Kassner 2009, s. 11.)

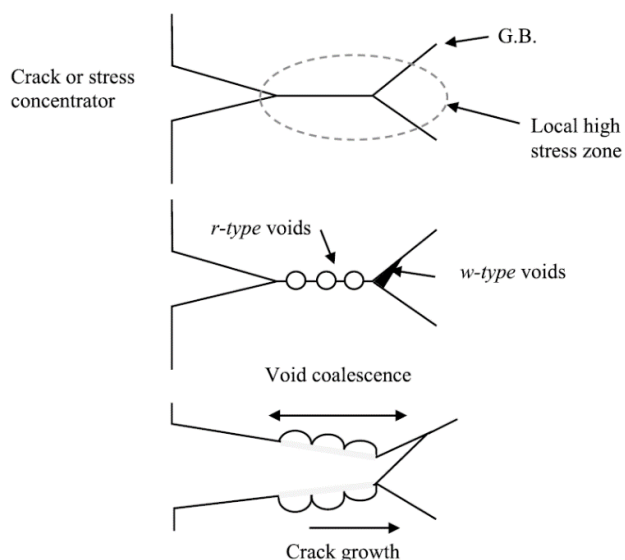
$$\dot{\epsilon} = A \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \cdot e^{\left(\frac{-Q}{kT}\right)} \quad (3)$$

Kaavassa 3 A on vakio, E on kimmomoduuli, k on Boltzmannin vakio, e on Neperin luku ja n on jännityksen eksponentti. Kyseinen kaava kirjoitetaan monesti myös ilman normalisoitua jännitystä ja yleisellä kaasuvakiolla Boltzmannin vakion sijaan. Jännityksen normalisointi kimmo- tai liukumoduulilla kuitenkin parantaa yhtälön sopivuutta mittausdataan. (Kassner 2009, s. 11–18.) Jännityksen eksponentin arvot ovat materiaalikohtaisia, mutta yleensä yli kolme. Joillakin metalliseoksilla eksponentin lukuarvo voi nousta useisiin kymmeneen.

(Evans & Wilshire 1985, s. 10–11.) Monesti puhutaan 5-potenssilaista (eng. Five-power-law creep), sillä monille materiaaleille, erityisesti puhtaille metalleille potenssin arvo on lähellä arvoa viisi. Suurilla jännityksillä potenssin lukuarvo lähtee nousemaan nopeasti. Tällöin puhutaan niin sanotusta power law breakdown -alueesta (PLB) jota kuvassa 4 kuvastaa muutosalue. (Kassner 2009, s. 13.) Kassner (2009, s. 21) kertoo, että PLB-alueen virumismekanismista ei ole yksimielisyyttä.

2.3 Virumismurtuma

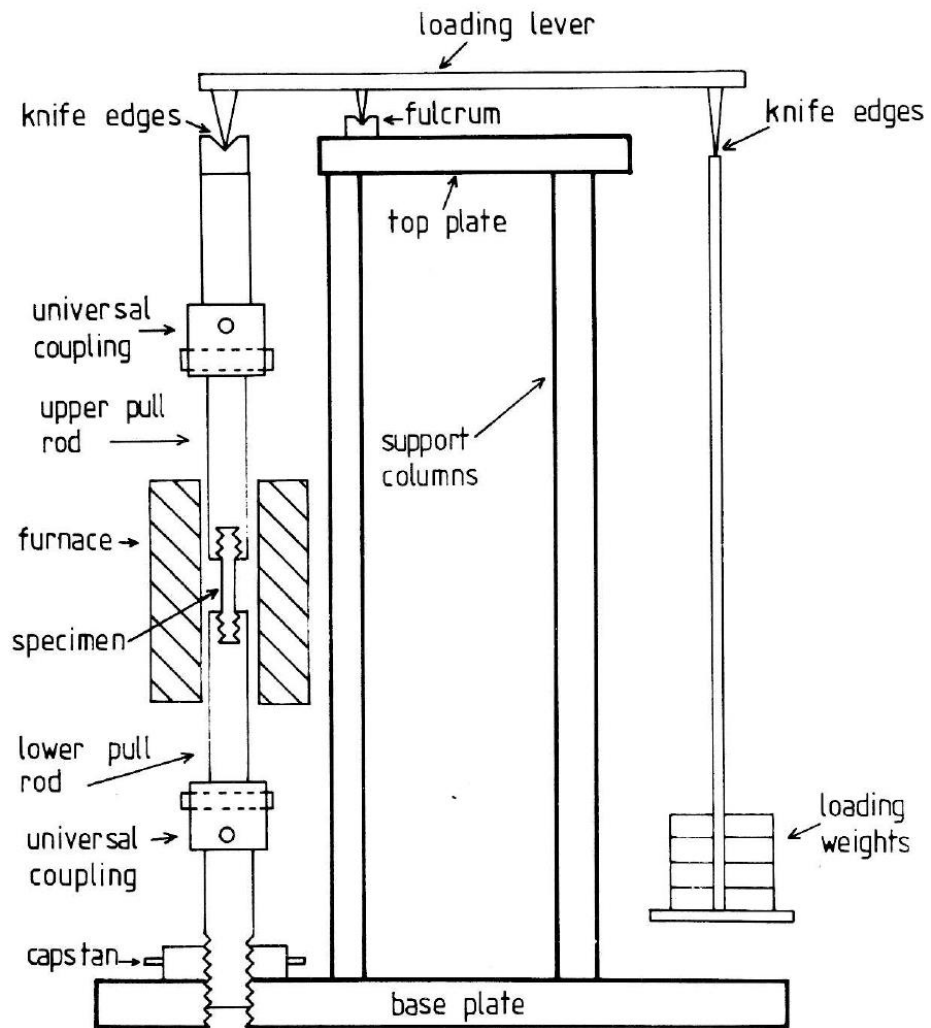
Virumisvaurion alkaminen määrittää toisen ja kolmannen vaiheen rajakohdan virumiskäyrällä. Virumismurtuma tapahtuu yleensä raerajoilla ja se on raerajaliukumisen ja raerajakavitaation yhdistelmä. Raerajojen liukumisessa rajat erkanevat toisistaan muodostaen niiden väliin kiilamaisia, niin kutsuttuja w-tyypin voideja (eng. wedge). Vakanssien keskittyminen raerajoille puolestaan aiheuttaa pyöreitä niin kutsuttuja r-tyypin voideja (eng. round). Voidien määrän ja koon ollessa riittävän suuri, ne yhdistyvät ja aiheuttavat raerajan murtumisen. Kuvassa 9 on esitetty, miten virumismurtuma etenee pintavirheen aiheuttaman jännityskonsentraation seurauksena. (González-Velázquez 2020, s. 236–240.)



Kuva 9. Virumismurtuman eteneminen loven pohjalla. Viruminen johtaa raerajoilla voidien muodostumiseen, jotka yhdistyvät aiheuttaen murtuman. (González-Velázquez 2020, s. 239.)

2.4 Virumiskoe

Aikaisemmin kuvassa 3 esitetty virumiskäyrä saadaan aikaa virumiskokeella. Yleisin virumiskoe on vetokoe, jossa ympyräpoikkileikkauksella olevaa vetosauvaa vedetään vakiokuormalla tietyssä lämpötilassa. Vakiokuormalla suoritettava koe on teknisesti helpoin toteuttaa ja onkin siten yleisin menetelmä. (Evans & Wilshire 1985, s. 38; Holmström 2010, s. 28.) Koekappaleta venytetään vipuvarren päähän asetetuilla painoilla, jolloin kuormitus pysyy vakiona koko kokeen ajan. Keskeyttämättömässä kokeessa koekappale sijaitsee uunin sisällä, jossa se pidetään vakiolämpötilassa ja sen venymää mitataan jatkuvasti ekstensometrillä. Tällaisella virumiskokeella saadaan aikaan virumiskäyrä, josta voidaan määrittää esimerkiksi toisen vaiheen virumisnopeus. Tämä on mitoituksen kannalta keskeinen tieto. Virumiskokeella voidaan määrittää myös virumismurtoon kuluva aika, johon monet laskentamenetelmät perustuvat. Virumismurtoajan määrittämiseen tähtäävät kokeet voivat kestää 10 000 tuntia, mutta jopa 100 000 tunnin kertaluokan kokeet ovat mahdollisia, etenkin silloin kun määritetään koko virumiskäyrää. (González-Velázquez 2020, s. 227; Evans & Wilshire 1985, s. 41.) Tarkemmat tiedot virumiskokeen suorittamisesta ja siihen kuuluvien laitteiden vaatimukset löytyvät esimerkiksi standardista SFS-EN ISO 204. Kuvassa 10 on esitetty esimerkki virumiskoelaitteistosta.



Kuva 10. Virumisvetokoealaite, jossa koekappaletta venytetään vipuvarren päähän asetuilla painoilla. Koekappale on kiinnitetty uunin sisään. (Evans & Wilshire 1985, s. 39.)

3 LASKENTAMENETELMÄT

Insinöörisovelluksissa viruminen pyritään pitämään hallinnassa joko siten, että virumismurtumaa ei tapahdu komponentin tai laitteen suunnitellun eliniän aikana. Tai siten, että virumisvenymä pysyy tietyn raja-arvon alla, kun käyttölämpötila ja -jännitys ovat tiedossa. Siten virumisen aiheuttama venymä ei esimerkiksi aiheuta ei-haluttuja kontakteja tai lukkiutumisia. Virumisraja ilmoittaa sen jännityksen, joka saa aikaan tietyn sekundäärialueen virumisnopeuden. Virumismurtoraja tai virumismurtolujuus vuorostaan ilmoittaa suurimman jännityksen, jonka materiaali kestää tietyssä lämpötilassa, kun kestoikä on joko 10 000, 100 000 tai 200 000 tuntia. (Miekk-oja et al. 1986, s. 742–744.) Esimerkiksi eurooppalaisessa painelaiteteräs-standardissa on taulukoitu eri materiaalien virumisominaisuuksien, kuten virumismurtorajojen arvoja (SFS-EN 10028-2 2017, s. 16–21).

Pitkään käytössä olleista materiaaleista on olemassa paljon pitkänajan tietoa niiden virumisominaisuuksista, mutta erityisesti uusista materiaaleista ei ole olemassa kunnollista kokeellista dataa tai sitä on olemassa vain pienellä lämpötila- tai jännitysalueella. Tämä on yksi syy sille, kalliiden ja aikaa vievien virumiskokeiden lisäksi, että virumlaskentaan on kehitetty useita erilaisia malleja, joiden tarkoituksena on ennustaa kappaleen pitkän aikavälin virumiskäyttäytymistä lyhyen aikavälin testeihin perustuen. (Abdallah et al. 2014, s. 3372.)

Työn laajuuden kohtuullisena pitämisen vuoksi tässä työssä esitellään vain yleisimpiä kirjallisuudesta löytyviä laskentamenetelmiä. Tulevat laskentamenetelmät on valittu standardista SFS-EN 13445 ja Abdallahin et al. (2014) laskentamenetelmiä vertailevasta tutkimuksesta. Työssä käytetään muun muassa Abdallahin et al. (2014) käyttämää jakoa parametriin ja koko virumiskäyrän ennustaviin menetelmiin, koska kyseinen jako on selkeä ja helposti ymmärrettävä.

Insinöörisovelluksissa virumiskäyrän toinen vaihe voidaan kuvata jännityksen, ajan ja lämpötilan funktioiden tulona seuraavasti.

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma)f_2(t)f_3(T) \quad (4)$$

Kaavassa 4 ε_c on virumisvenymä, $f_1(\sigma)$, $f_2(t)$, $f_3(T)$ ovat jännityksestä, ajasta ja lämpötilasta riippuvia funktioita (Boyle & Spence 1983, s. 12–13; Kauppila et al. 2017, s. 425–427.) Usein kuitenkin puhutaan virumisnopeudesta eli yhtälön 4 ensimmäisestä aikaderivaatasta. Sekundäärisessä virumisessa jännitys otetaan useimmiten huomioon potenssilaililla, joka usein nimetään Nortonin laiksi (Evans & Wilshire 1985, s. 10).

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n \quad (5)$$

Kaavassa 5 $\dot{\varepsilon}$ on virumisnopeus, A on materiaalikohtainen vakio, σ on jännitys ja n on mekanismikohtainen jännitysekspONENTTI, jonka arvo on diffuusiovirumisessa yksi ja vastaavasti dislokaatiovirumisessa yleensä yli kolme. Lämpötilariippuvuus otetaan mukaan Arrhenius-yhtälöllä seuraavasti (Abdallah et al. 2014 s. 3373; Evans & Wilshire 1985 s. 11).

$$\dot{\varepsilon} = B \cdot \sigma^n \cdot e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \quad (6)$$

Kaavassa 6 B on materiaali- ja virumismekanismikohtainen vakio, Q on aktivaatioenergia, R kaasuvakio ja T on absoluuttinen lämpötila. Aktivaatioenergia Q pienenee lämpötilan noustessa ja vastaavasti jännitysekspONENTTI n kasvaa jännityksen noustessa. Aktivaatioenergian ja jännitysekspONENTIN vaikean ennustettavuuden takia potenssilakia ei voida käyttää suoraan kestoajan selvittämiseen lyhyen ajan testeihin perustuen. (Abdallah et al. 2018, s. 117–119.) Malli toimii kohtuullisesti vain puhtaille metalleille, joten sitä ei voida käyttää monimutkaisten metalliseosten virumiskäyttäytymisen arviointiin.

Monkman-Grant-malli toimii hyvin yksinkertaisessa mitoituksessa. Mallin mukaan minimi virumisnopeuden ja murtoajan tulo on vakio, joka on sama huolimatta lämpötilasta tai jännityksestä ja se voidaan esittää seuraavasti. (Abdallah et al. 2018 s. 126–28; Kauppila et al. 2017, s. 435; Pelleg 2013 s. 329–332.)

$$C_{MG} = \dot{\epsilon}^m \cdot t_f \quad (7)$$

Kaavassa 7 C_{MG} on Monkman-Grant-vakio, $\dot{\epsilon}$ on minimi virumisnopeus ja t_f on virumismurtoaika, m on eksponentti, jonka arvo on hyvin lähellä lukua yksi, joten se voidaan jättää insinöörisovelluksissa huomioimatta. (Kauppila et al. 2017. s. 435.) Tämän menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus. Murtoajan selvittämiseksi ainoa tarvittava tieto on minimivirumisnopeus, joka saadaan selville lyhyelläkin testillä. (Pelleg 2017, s. 170–171.)

Jos käyttöolosuhteet muuttuvat kappaleen käytön aikana, voidaan kappaleen elinikä laskea esimerkiksi vauriosumman avulla seuraavasti (Boyle & Spence 1983, s. 277).

$$R = \sum_{i=1}^q \left(\frac{t_i}{t_{Ri}} \right) \quad (8)$$

Kaavassa 8 q on kuormitustapausten lukumäärä, t_i on aika, jonka kappale on kuormitustilanteessa i ja t_{Ri} on murtumaan kuluva aika kuormitustilanteessa i . Murtuma tapahtuu, kun R on yksi. Jos väsymisen ja virumisen oletetaan olevan toisistaan riippumattomia, voidaan kaava 8 yhdistää Palmgren-Miner-vauriosumman kanssa. Näin voidaan helposti yhdistää virumis- ja väsymisvaurio. (Boyle & Spence 1983, s. 277.) Virumisen kannalta kriittisimmät kohdat ovat erilaiset jännityskonsentraatiot. Laskennassa tulisi SFS-EN 13445-3 (2017, s. 622–623) standardin mukaan käyttää suurinta jännitystä, joko primääri tai sekundaarijännityksiä.

3.1 Parametriset laskentamenetelmät

Laskennan yksinkertaistamiseksi on kehitetty useita murtoaikaan pohjautuvia parametrisia menetelmiä, jotka yhdistävät murtoaajan ja lämpötilan yhdeksi parametriksi seuraavasti. (Mehta et al. 2016, s. 592; Abdallah, Perkins & Arnold. 2018, s. 117; Nikitin & Rybnikov 2018, s. 379; Liang et al. 2020, s. 2.)

$$P(\sigma) = f(T, t_r) \quad (9)$$

Kaavassa 9 P on jännityksestä riippuva parametri, f on lämpötilan ja ajan funktio. (Mehta et al. 2016, s. 592; Abdallah et al. 2018, s. 117; Nikitin & Rybnikov 2018, s. 379.) Parametrin arvot voidaan ilmoittaa jännityksen polynomifunktiona, joten yksittäisistä mittauspisteistä lasketuista parametrin arvoista voidaan luoda yksi käyrä esimerkiksi pienimmän neliösumman periaatteella. (Liang et al. 2020, s. 2.) Tästä suunnittelukäyrästä voidaan laskea esimerkiksi suurin jännitys, jonka kappale kestää tietyssä lämpötilassa tarvittavalla kestoajalla. Parametrisia malleja käytetään yleensä korkeintaan kolminkertaiseen ekstrapolointiin, joten niiden käyttöalue rajautuu riippuen siitä, minkälaisesta lähtödatasta käyrä on muodostettu (Liang et al. 2020, s. 2).

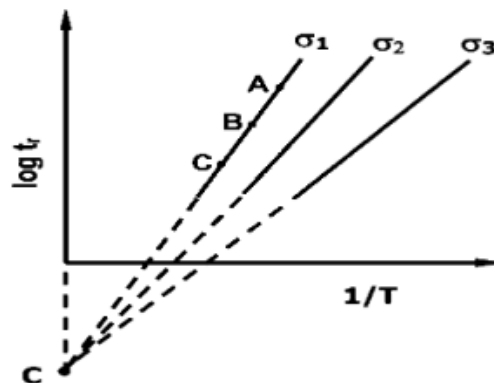
Seuraavissa alaluvuissa on esitetty hiukan tarkemmin yleisimpiä parametrisia laskentamenetelmiä, erityisesti Larson-Miller, Manson-Haferd ja Orr-Sherby-Dorn parametrit, sekä muutama yleinen virumiskäyrän ennustamiseen käytetty malli. Tulevissa alaluvuissa esiteltyjen materiaalivakioiden arvoja yleisimmille materiaaleille löytyy esimerkiksi painelaiteteräksien standardista sekä useista tieteellisistä julkaisuista. (SFS-EN 13445-3 2017, s. 7–8).

3.1.1 Larson-Miller

Yleisin kirjallisuudessa esiintyvä parametrinen laskentamalli on 1950-luvulla kehitetty ja tekijöidensä F.R. Larsonin ja J. Millerin mukaan nimetty Larson-Miller-parametri, joka on yleisimmin esitetty seuraavasti. (1952, ks. Liang et al. 2020, s. 2; Nikitin & Rybnikov 2018, s. 379.)

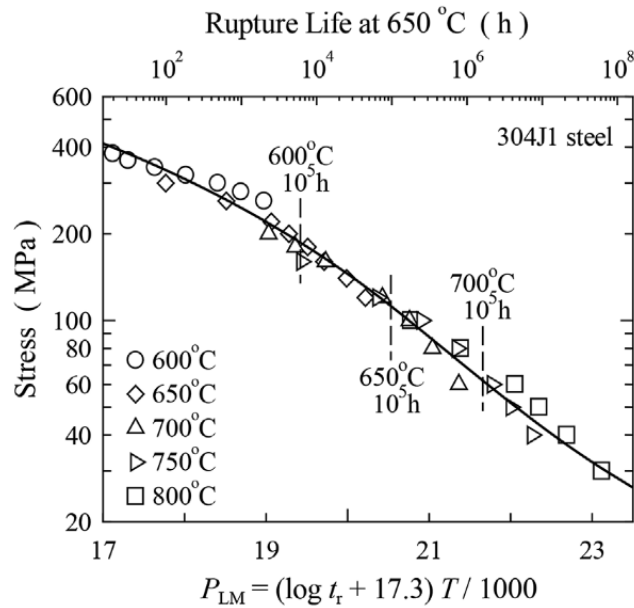
$$P_{LM} = T \cdot (C_{LM} + \log t_r) \quad (10)$$

Kaavassa 10 P_{LM} on Larson-Miller-parametri, T on absoluuttinen lämpötila kelvineinä, C_{LM} Larson-Miller-vakio ja t_r on virumismurtoaika tunteina. Alun perin on esitetty, että Larson-Miller-vakio on kaikille materiaaleille lukuarvoltaan 20. Yllä oleva yhtälö esitetäänkin monessa lähteessä niin, että vakion paikalla käytetään suoraan tätä lukua. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, vaan vakion on myöhemmin todettu olevan materiaalikohtainen. (Nikitin & Rybnikov 2018, s. 380–381.) C_{LM} voidaan määrittää kuvaajasta, jossa vaaka-akselilla on lämpötilan käänteisluku ja pystyakselilla murtoaajan kymmenkantainen logaritmi. Kun tähän kuvaan sijoitetaan murtoaikoja eri jännityksen arvoilla ja oletetaan niiden käyttäytyvän kuvaajassa lineaarisesti, leikkaavat kaikki mittauspisteiden läpi piirretyt suorat pystyakselin Larson-Miller-vakion kohdalla. (Maruyama et al. 2018, s. 94.) Suorat eivät kuitenkaan aina konvergoitu yhtä pistettä kohti, joten vakion määrittäminen on käytännössä hankalaa (Mehta et al. 2016, s. 592). Kuvassa 11 on havainnollistettu, miten Larson-Miller-vakio voidaan määrittää graafisesti.



Kuva 11. Larson-Miller-vakion määrittäminen graafisesti (Mehta et al. 2016, s. 592).

Kun vakio C_{LM} on saatu selville, voidaan laskea mittauspisteille Larson-Miller-parametrin arvot ja sijoittaa ne kuvaajaan, jossa vaaka-akselilla on Larson-Miller-parametri ja pystyakselilla jännitys. Kuvaan sovitetaan käyrä, jonka avulla voidaan määrittää mittauspisteiden ulkopuolelta joko suurin lämpötila, jännitys tai murtoaika, kun kaksi näistä on tiedossa. Kuvassa 12 on esimerkki Larson-Miller-käyrästä eräälle ruostumattomalle teräkselle. (Mehta et al. 2016, s. 594–595.)



Kuva 12. Larson-Miller-kuvaaja 304J1 ruostumattomalle teräkselle. Larson-Miller-vakion arvo on 17.3. (Maruyama et al. 2018, s. 94.)

Larson-Miller-menetelmän suurin ongelma on siinä esiintyvä vakio. Tyypillisesti Larson-Miller-menetelmän käyttö yliarvioi kappaleen kestoiän. Menetelmää on tutkittu paljon ja siihen on esitetty useita muutosehdotuksia. Vakion korvaaminen lämpötila- tai jännitysriippuvaisella arvolla on todettu olevan parempi vaihtoehto, sillä se siirtää kestoiän konservatiiviselle puolelle. (Nikitin & Rybnikov 2018, s. 382 ja s. 384; Ghatak & Robi 2016, s. 581.) Kestoiän yliarvioiminen on luonnollisesti turvallisuuden ja taloudellisten seikkojen kannalta epätoivottavaa. Esimerkki Larson-Miller-parametrin käytöstä kestoiän selvittämiseen on esitetty liitteessä 1. Sama esimerkki näyttää myös kuinka suuri vaikutus lämpötilalla on kestoikään.

3.1.2 Orr-Sherby-Dorn

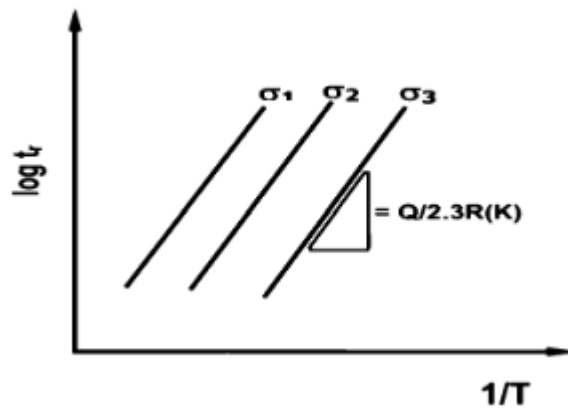
Orr-Sherby-Dorn-parametri on muunnos Larson-Miller-parametrin ja se voidaan esittää seuraavasti. (Orr, Sherby, Dorn 1954; ks. Mehta et al. 2016, s. 592; Abdallah et al. 2014, s. 3375.)

$$P_{OSD} = \log t_r - \frac{C_{OSD}}{T} \quad (11)$$

Kaavassa 11 P_{OSD} on Orr-Sherby-Dorn-parametri, T on absoluuttinen lämpötila kelvineinä, C_{OSD} on Orr-Sherby-Dorn-vakio ja t_r on virumismurtoaika tunteina. Vakio C_{OSD} voidaan määrittää seuraavasti. (Abdallah et al. 2014, s. 3375; Mehta et al. 2016, s. 592.)

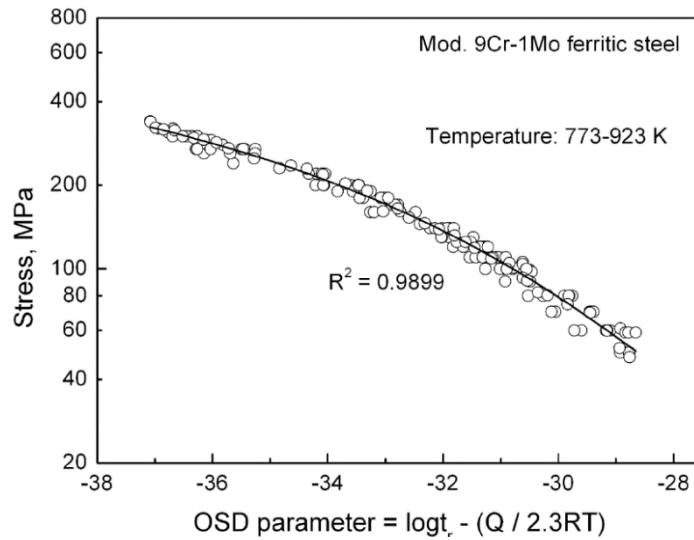
$$C_{OSD} = \frac{Q}{2.3R} \quad (12)$$

Kaavassa 12 Q on aktivaatioenergia ja R on kaasuvakio. (Abdallah et al. 2014, s. 3375; Mehta et al. 2016, s. 592; Pelleg 2017, s. 176.) Vakio C_{OSD} määritetään hyvin samalla tavalla kuin Larson-Miller-vakio. Murtoaikoja sijoitetaan saamaan kuvaajaan, mutta yhteisen leikkauspisteen sijaan määritetäänkin suorien kulmakertoimien keskiarvo. Eli käytännössä määritetään aktivaatioenergian arvo. Tätä on havainnollistettu kuvassa 13. (Mehta et al. 2016, s. 592–593.)



Kuva 13. Orr-Sherby-Dorn-vakion määrittäminen kuvaajasta. (Mehta et al. 2016, s. 593.)

Kun vakio on määritetty, voidaan kaavan 11 avulla luoda yksi käyrä, josta voidaan määrittää joko suurin lämpötila, jännitys tai kestoikä, kun kaksi näistä on tiedossa. Esimerkki Orr-Sherby-Dorn-käyrästä eräälle ferriittiselle teräkselle on esitetty kuvassa 14.



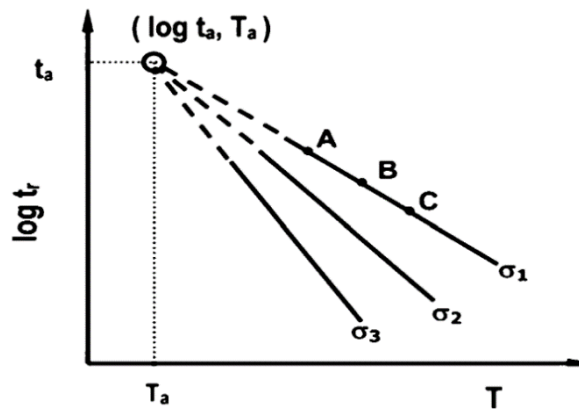
Kuva 14. Orr-Sherby-Dorn-käyrä eräälle ferriittiselle teräkselle. Vaaka-akselilla OSD-parametri ja pystyakselilla kappaleeseen vaikuttava jännitys. (Srinivasan et al. 2012, s. 44.)

3.1.3 Manson-Haferd

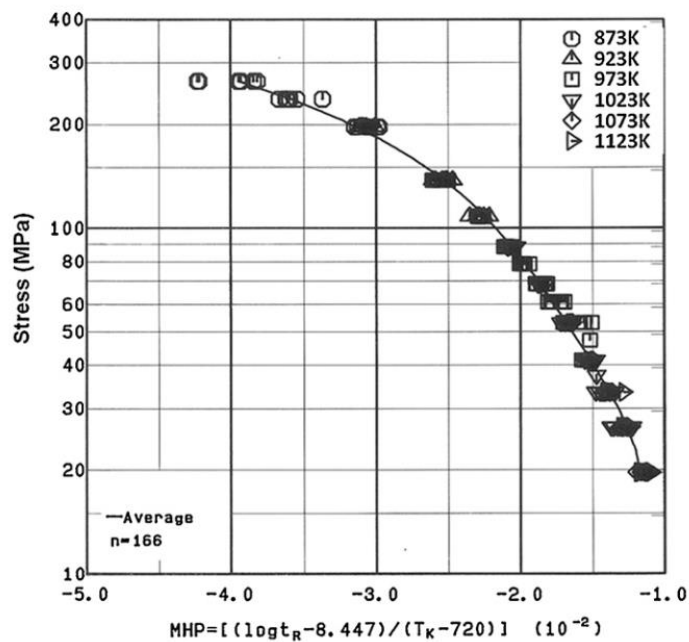
Manson-Haferd-menetelmä on myös kehitetty korjaamaan Larson-Miller-menetelmän rajoituksia erityisesti liittyen lukuarvon 20 käyttämiseen yleisenä vakiona. Menetelmä on kuitenkin johdettu samasta potenssilaista kuin Larson-Miller-parametri. Manson-Haferd-parametri voidaan esittää seuraavasti. (Manson & Haferd 1953; ks. Mehta et al. 2016, s. 592–593; Abdallah et al. 2014, s. 3374.)

$$P_{MH} = \frac{\log_{10} t - \log_{10} t_a}{T - T_a} \quad (13)$$

Kaavassa 13 P_{MH} on Manson-Haferd-parametri, t on murtoaika tai aika tiettyyn venymään tunteina ja T on absoluuttinen lämpötila kelvineinä. T_a ja t_a ovat vakioita, jotka voidaan määrittää esimerkiksi kuvaajasta, jossa vaaka-akselilla on lämpötila ja pystyakselilla on murtoaajan kymmenkantainen logaritmi. Tähän kuvaajaan sijoitetaan eri olosuhteissa saatuja murtoaikojen arvoja ja oletetaan niiden sijoittuvan suorille, jotka konvergoituvat tiettyä pistettä kohti. Tästä pisteestä voidaan lukea graafisesti arvot vakioille T_a ja t_a . (Abdallah et al. 2014, s. 3374; Pelleg 2017, s. 176.) Tämän jälkeen voidaan luoda vastaavanlainen käyrä kuin aikaisemminkin materiaalin kestoiän selvittämiseen. Kuvassa 15 on esimerkki vakioiden määrittämisestä ja kuvassa 16 Manson-Haferd-käyrästä.



Kuva 15. Manson-Haferd-vakioiden määrittäminen graafisesti. (Mehta et al. 2016, s.593.)



Kuva 16. Esimerkki Manson-Haferd-käyrästä 316H ruostumattomalle teräkselle (Whittaker, Evans & Wilshire. 2012, s. 147).

Myös Manson-Haferd-menetelmässä ongelmana on vakioiden määrittäminen. Todellisuudessa mittausdata ei välttämättä konvergoi yhtä pistettä kohti, jolloin vakioiden lukuarvot ovat vain keskimääräisiä arvoja. (Mehta et al. 2016, s. 593.) Vakioilla ei myöskään ole mitään fysikaalista perustaa, mikä heikentää sen uskottavuutta. Toisaalta kahden vakion määrittäminen mittausdatasta yhden sijaan voi parantaa mallin toimivuutta. (Abdallah et al. 2014, s. 3374.)

Kirjallisuudessa esiintyvä Goldhoff-Sherby-menetelmä on hyvin samankaltainen Manson-Haferd-menetelmän kanssa. Erona on, että vakiot määritetään käyttämällä lämpötilan käänteislukua, jolloin myös yhtälössä 12 lämpötilat merkitään käänteislukuina. Tämä johtaa siihen, että lopullinen suunnittelukäyrä on muodoltaan hiukan erilainen. (Abdallah et al. 2014, s. 3375-3376.)

3.1.4 Venäläiset mallit 1 ja 2

Erityisesti englanninkielisessä kirjallisuudessa venäläisiin malleihin viitataan neuvostoliittolaisina malleina (eng. Soviet model). Venäläisiä malleja on kaksi ja ne voidaan esittää seuraavasti. (Abdallah et al. 2014, s. 3376.)

$$\log_{10} t = a + b \log_{10} T + c \log_{10} \sigma + \frac{d}{T} + \frac{f\sigma}{T} \quad (14)$$

$$\log_{10} t = a + b \log_{10} T + c \log_{10} \left(\frac{\sigma}{T}\right) + \frac{d\sigma}{T} + \frac{f}{T} \quad (15)$$

Kaavoissa 14 ja 15 a, b, c, d ja f ovat mittausdataan sovitettavia vakioita. T, t ja σ ovat lämpötila, aika ja jännitys. (Abdallah et al. 2014, s. 3376.)

3.1.5 Pienimmän sitoutumisen malli

Pienimmän sitoutumisen mallin tarkoitus on olla joustava ja yhdistää useita parametrisia malleja niin, että yhteenkään parametriseen malliin ei sitouduta, vaan valitaan parhaiten sopiva (Boyle & Spence 1983, s. 261). Pienenimmän sitoutumisen malli ilmoitetaan kirjallisuudessa seuraavasti. (Abdallah et al. 2014, s. 3376.)

$$\log_{10} t = a + b \log_{10} \sigma + c \cdot \sigma + d \cdot \sigma^2 + f \cdot T + \frac{g}{T} \quad (16)$$

Kaavassa 16 a, b, c, d, f, g ovat mittausdatasta määritettäviä vakioita. t, σ ja T ovat aika, jännitys ja lämpötila. Toimintaperiaate ja ominaisuudet ovat venäläisten mallien kaltaisia. (Abdallah et al. 2014, s. 3376.)

3.2 Virumiskäyrän ennustaminen

Parametristen mallien lisäksi on olemassa malleja, joiden avulla voidaan ennustaa koko virumiskäyrä. Virumiskäyrän muodon tietäminen mahdollistaa esimerkiksi tiettyyn venymään kuluvan ajan määrittämisen, mikä on hyödyllistä, kun mitoituksessa kriittistä on kappaleen murtumisen sijasta venymän määrä. Erityisesti ilmailuteollisuudessa komponentit vaihdetaan ennen murtumaa. (Abdallah et al. 2014, s. 3371.)

Monissa insinöörisovelluksissa virumisolosuhteet eivät kuitenkaan pysy vakiona, vaan usein lämpötila ja jännitystaso vaihtelevat käytön aikana. Näin ollen virumiskäyräkään ei pysy samanlaisena kuin aikaisemmin kuvassa 2 on esitelty, vaan sen muoto muuttuu siinä pisteessä, kun olosuhteet muuttuvat. (Harrison, Whittaker & Gray 2018, s. 222.) Edellä esitellyt parametriset laskentamenetelmät toimivat vain yksinkertaisissa tilanteissa, mikä rajaa niiden käytettävyyttä huomattavasti.

Monimutkaisemmat rakenteet tai kuormitustilanteet vaativat tarkempaa elementtimenetelmään perustuvaa analyysia (eng. finite element analysis, FEA). FE-analyysiin tarvitaan tietoa materiaalin virumiskäyrästä eri olosuhteissa ja sopiva lujittumismalli, jolla otetaan huomioon kuormitusolosuhteiden muutokset virumiskäyrään. (Harrison et al. 2018, s. 222; Evans & Wilshire 1985, s. 237.) Tämän lisäksi monet virumista kestävä materiaalit eivät ole ominaisuuksiltaan lineaarisia, joten tällöin on myös turvauduttava elementtimenetelmään. (Evans & Wilshire 1985, s. 237). Seuraavissa alaluvuissa on esitelty muutamia virumiskäyrän ennustamismenetelmiä Abdallahin et al. (2014) tutkimukseen perustuen.

3.2.1 Theta-projektio

Evans ja Wilshire ovat kehittäneet niin kutsutun theta-projektioimenetelmän, jota muun muassa Evans on kehittänyt edelleen. (Evans & Wilshire 1985, s.204; Abdallah et al. 2014, s. 3378.) Theta-projektion avulla voidaan luoda kokonainen virumiskäyrä eli ilmoittaa venymä ajan suhteen. Menetelmän ajatuksena on, että virumiskäyrä tietyssä lämpötilassa ja jännityksessä voidaan siirtää toisiin lämpötiloihin tai jännityksiin käyttämällä θ -parametreja. (Baldan & Tascioglu 2008, s. 4593.) Yksinkertaisimmillaan mallissa käytetään neljää θ -parametria. Neljän parametrin käyttäminen ei kuitenkaan kuvasta todellista virumiskäyrää hyvin pienillä venymillä, joten mallia on kehitetty edelleen esimerkiksi sellaiseksi, joka

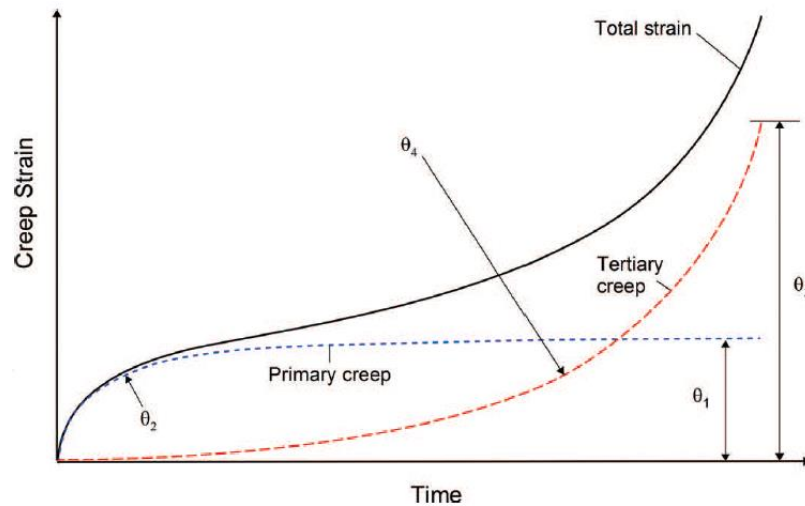
käyttää kuutta θ -parametria. Neliparametrinen versio theta-projektiosta voidaan esittää seuraavasti. (Baldan & Tascioglu 2008, s. 4595; Abdallah et al. 2014, s. 3378.)

$$\varepsilon = \theta_1[1 - \exp(-\theta_2 t)] + \theta_3[\exp(\theta_4 t) - 1] \quad (17)$$

Kaavassa 17 ε on venymä ja t on aika. Parametrit θ_1 ja θ_3 määrittävät virumiskäyrän primääri ja tertiääri alueet ja parametrit θ_2 ja θ_4 määrittävät käyrän muodot. Kun parametrien lämpötila- ja jännitysriippuvuus saadaan selville, voidaan käyrää muokata vastaamaan haluttua lämpötilaa ja jännitysarvoja. θ -parametrien arvot voidaan määrittää seuraavasti (Baldan & Tascioglu 2008, s. 4594; Evans & Wilshire 1985, s. 205.)

$$\log_{10} \theta_i = a_i + b_i \sigma + c_i T + d_i \sigma T \quad (18)$$

Kaavassa 18 a_i, b_i, c_i, d_i ovat vakioita, σ on jännitys ja T on lämpötila. Parametrien vaikutus virumiskäyrään voidaan nähdä kuvasta 17.



Kuva 17. Neliparametrinisen theta-projektion parametrien vaikutus virumiskäyrään (Harrison et al. 2018, s. 225).

3.2.2 Wilshiren menetelmät

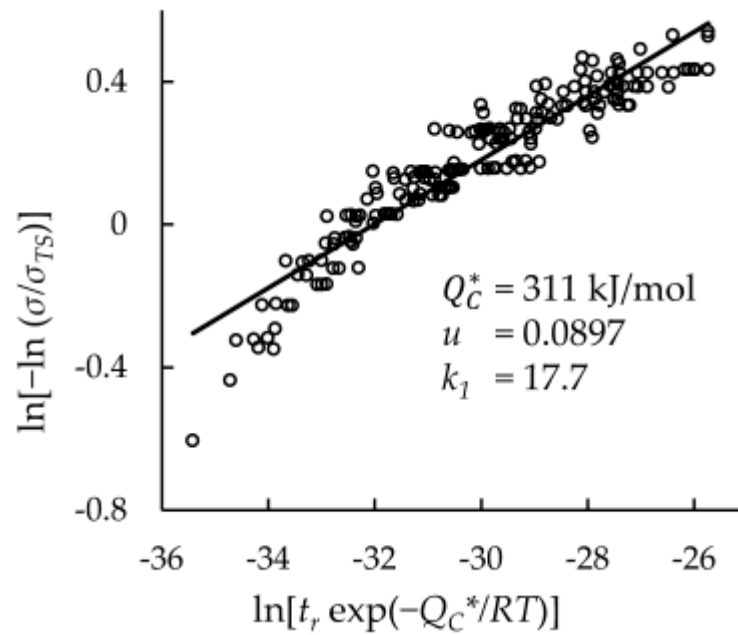
Wilshiren ja Battenboughin kehittämää malleja on kolme ja niillä voidaan laskea murtoaika, venymä tai aika, joka kuluu tiettyyn venymään riippuen käytetystä kaavasta. Mallit pohjautuvat potenssi- ja Monkman-Grantin lakiin ja ne voidaan esittää seuraavasti. (Wilshire & Battenbough 2007, s. 165.)

$$\frac{\sigma}{\sigma_{TS}} = \exp\left(-k_1 \left[t_f \exp\left(-\frac{Q_c^*}{RT}\right)\right]^u\right) \quad (19)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{TS}} = \exp\left(-k_2 \left[\dot{\epsilon}_m \exp\left(-\frac{Q_c^*}{RT}\right)\right]^v\right) \quad (20)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{TS}} = \exp\left(-k_3 \left[t_\epsilon \exp\left(-\frac{Q_c^*}{RT}\right)\right]^w\right) \quad (21)$$

Kaavoissa 19, 20 ja 21 σ on jännitys, σ_{TS} on murtolujuus tietyssä lämpötilassa, Q_c^* on aktivaatioenergia, R on kaasuvakio ja T on lämpötila. Aktivaatioenergia kaavan 17 tapauksessa määritetään kuvaajasta, jossa murtoajan logaritmi ilmoitetaan lämpötilan käänteisarvon suhteen. Tästä kuvaajaan sovitetaan suoria mittausdataan perustuen. Aktivaatioenergia voidaan laskea kulmakertoimien keskiarvon perusteella kertomalla niiden luonnollinen logaritmi kaasuvakiolla. Vakiot k_1, k_2, k_3, u, v, w ovat myös mittausdatasta määritettäviä vakioita. Esimerkiksi kaavan 19 vakiot k_1 ja u voidaan määrittää kuvan 18 tavalla. Vakio k_1 on pysty akselin leikkauspisteen eksponentti ja u on suoran kulmakerroin. Kaavojen 20 ja 21 vakiot ja aktivaatioenergia määritetään samaan tapaan, mutta murtoajan sijasta käytetään virumisnopeutta tai tiettyyn venymään kuluvaa aikaa. (Cedro, Garcia & Render 2018, s. 4.)



Kuva 18. Eri murtoaikojen perusteella luotu Wilshire-käyrä, josta voidaan määrittää vakioiden arvot (Cedro et al. 2018, s. 6).

Kaavoilla 19 ja 20 voidaan laskea parametristen menetelmien tapaan murtoaika tai määrittää virumisnopeus. (Abdallah et al. 2018 s. 132.) Kun kaavan 21 vakiot k_3 ja w ilmoitetaan venymän funktiona, voidaan yhtälö muokata muotoon, joka ilmoittaa venymän ajan, jännityksen ja lämpötilan funktiona. (Abdallah et al. 2014, s. 3379–3380.) Wilshire-menetelmillä on onnistuttu ennustamaan jopa 100 000 tunnin virumismurtoaikoja 5000 tunnin virumiskokeisiin perustuen. (Whittaker et al. 2012, s 145).

4 VIRUMISEN HALLITSEMINEN

Yksinkertaisin ja itsestään selvä tapa, jolla viruminen voidaan pitää hallinnassa, on huolehtia siitä, että käyttölämpötila pysyy tarpeeksi alhaisena. Käyttölämpötilaa harvoin kuitenkaan voidaan valita, vaan sen määrittää esimerkiksi sen prosessin parametrit, jonka osana kyseinen komponentti on. Tällöin tulee valita sellainen materiaali, joka kestää hyvin virumista ja kuumia olosuhteita. Sama ongelma koskee myös jännityksiä. Jännityksiä voidaan puolestaan hallita rakenteellisilla ratkaisuilla, esimerkiksi kasvattamalla materiaalivahvuutta. Pienetkin pudotukset käyttölämpötilassa parantavat virumiskestävyttä huomattavasti.

Virumiskriittisessä kohteessa tulisi ensisijaisesti käyttää korkean sulamispisteen materiaaleja, jolloin vallitseva lämpötila ei ole materiaalin virumisalueella. Suurempi lujuus parantaa myös virumiskestävyttä. (González-Velázquez 2020, s. 240.) Abe (2014) listaa korkeisiin lämpötiloihin tarkoitettujen materiaalien lujittamismekanismeiksi liuoslujittumisen, sekä erkaumiin, dislokaatioihin ja raekokoon perustuvat lujittumismenetelmät. Esimerkiksi ferriittisten ja austeniittisten kuumalujien terästen liuoslujittamiseen käytetään molybdeenia ja volframia niiden suuren atomikoon vuoksi. Myös tyypellä on virumisominaisuuksia parantavia vaikutuksia sekä välisija-atomina että nitridien muodostajana. Erkautuskarkaisussa materiaali lujittuu, kun raerajoille ja hilaan syntyy erilaisia erkaumia, kuten karbideja ja nitridejä. Erkautuskarkaisu ja liuoslujittuminen estävät molemmat dislokaatioiden liikettä ja siten hidastavat virumista. Erkautuskarkaisuun käytetään muun muassa vanadiinia ja niobiumia. (Abe 2014, s. 255–259.) Lujuutta voidaan kasvattaa myös esimerkiksi pienentämällä raekokoa, mutta virumisen kannalta pieni raekoko on haitallista. Kuten aikaisemmin esiteltiin, reakokoeksponentti on diffuusiovirumisessa 2–3 eli suuri raekoko voi pienentää virumisnopeutta huomattavasti näiden mekanismien alueella. Tämän lisäksi raerajojen suunnalla on merkitystä. Voidit syntyvät pääosin niille raerajoille, jotka ovat suurimman jännityksen suhteen kohtisuorassa. Tämä on johtanut sellaisten kiderakenteiden valmistamiseen, missä raerajoja on vain jännityksen suuntaisesti. Tätä kehitystä voidaan viedä vielä pitemmälle ja valaa kappale yksikiteiseksi. Tätä menetelmää käytetään esimerkiksi modernien kaasuturbiinien siipien valmistuksessa. (González-Velázquez 2020, s. 240–241.)

Muita huomioonotettavia asioita korkeissa lämpötiloissa toimivissa laitteissa ovat materiaalin lämmönjohtavuus ja lämpölaajenemiskerroin. Materiaalin lämmönjohtavuus on tärkeä ominaisuus esimerkiksi lämmönvaihtimissa, mutta sillä on myös vaikutusta lämpöväsytymiseen, erityisesti silloin kun materiaalipaksuudet ovat suuria. (Barnard 2017, s. 102.)

Hapettuminen on myös usein ongelma. Hapettumiskriittisissä tilanteissa puhutaan tulenkestävistä teräksistä, kun taas virumiskriittisissä kohteissa kuumalujista teräksistä. Hapettuminen tulee olennaiseksi suuremmissa lämpötiloissa kuin viruminen. Hapettumista edesauttavat muun muassa vesihöyry, rikkipitoinen ilmakehä sekä esimerkiksi kaasuturbiineissa syntyvät pakokaasut. Yleisin tapa torjua hapettumista teräksissä on käyttää seosaineena kromia. Kromi suojaa terästä hapettumiselta muodostamalla sen pintaan kromioksidikalvon, joka estää hapettumisen syvemmälle materiaaliin. (Miekk-oja et al. 1986, s. 756–51.)

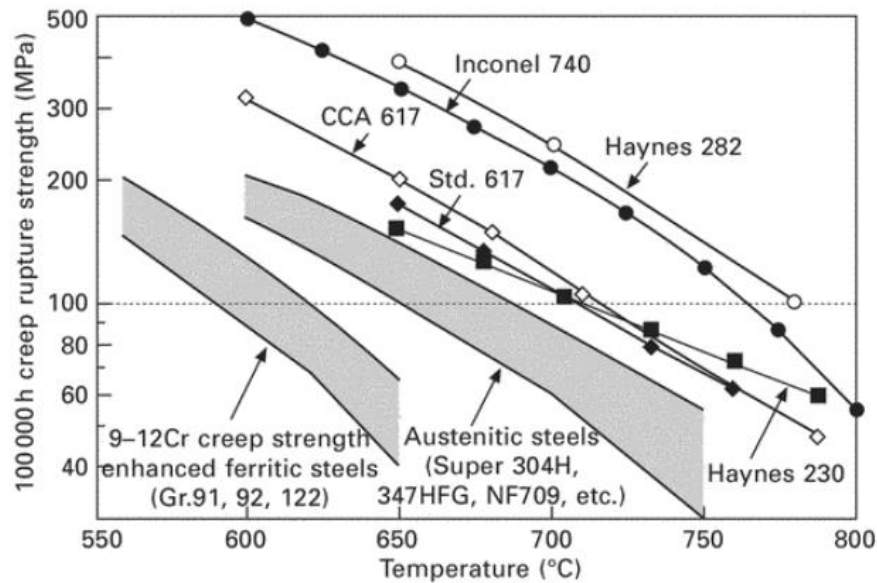
4.1 Virumista kestävä materiaalit

Useassa lähteessä virumista kestävä teräksiset jaetaan ferriittisiin/martensiittisiin ja austeniittisiin teräksiin. Ferriittiset/martensiittiset teräksiset jaetaan vielä kahteen seosaineiden määrän perusteella. Kohtuullisten mekaanisten ominaisuuksien ja korroosionkeston takia niukkaseosteisia teräksiä käytetään putkiteräksinä, esimerkiksi viileämissä olosuhteissa toimivissa komponenteissa. (Hu 2012, s. 196 ja 200–201) Myös seostamattomia teräksiä voidaan käyttää noin 400 °C asti (Miekk-oja et al. 1986, s. 754). Esimerkki seostamattomasta kuumalujasta teräksestä on P355GH (SFS-EN 10028-2 2017, s. 5).

Ferriittiset/martensiittiset teräksen ovat hyvin yleisesti käytettyjä, sillä ne ovat verrattain halpoja vähäisen seosaineiden määrän takia. Ferriittisiä teräksiä käytetään niiden pienen lämpölaajenemiskertoimen takia muun muassa sellaisissa kohteissa, jotka joutuvat käytön aikana usean lämpösyklin tai väsyttävän kuormituksen alaisiksi, kuten voimalaitoksien höyryputkissa tai turbiinien akseleissa. Ferriittisten terästen korkeimmat käyttölämpötilat ovat noin 600 °C. Yksi esimerkki usein käytetystä martensiittisestä ruostumattomasta teräksestä on P91, jonka EN-nimike on X10CrMoVNb9-1. (Abe 2014, s. 259–263.)

Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on hyvät ominaisuudet niin virumista kuin korroosiotakin vastaan (Miekk-oja et al. 1986, s. 757). Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat Fe-Cr-Ni-seoksia ja ne ovat seosaineena käytettävän nikkelin takia kalliimpia. Nikkeliä tarvitaan stabiloimaan austeniittista mikrorakennetta, sillä korkea kromipitoisuus lisää ferriitin määrää. (Miekk-oja et al. 1986, s. 455–456.) Virumiskestävyyttä parantaa austeniittisen pintakeskisen hilytyypin aiheuttama pienempi itsediffuusionopeus verrattuna ferriittisten terästen tilakeskiseen hilytyyppiin. Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on suurempi lämpölaajenemiskerroin, joten ne ovat herkempiä lämpöväsymisen aiheuttamille vaurioille. Korkea lämpölaajenemiskerroin aiheuttaa myös suurempia jäännösännityksiä, etenkin kun hitsataan yhteen erityyppisiä teräksiä. (Barnard 2017, s. 102 ja s. 113; Abe 2014, s. 259–261.) Austeniittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään yleensä yli 600 °C käyttölämpötiloissa hieman yli 700 °C asti, tai esimerkiksi selluteollisuudessa sellaisissa kohteissa, jotka ovat kosketuksissa mustalipeään. (Yin et al. 2014, s. 108.) Eräs austeniittisiä ruostumattomia teräksiä koskeva ongelma on se, että noin 450–750 °C käyttölämpötiloissa tai esimerkiksi hitsauksessa kromikarbidit erkautuvat raerajoille, jolloin riski raerajakorroosiolle nousee. Tätä voidaan kuitenkin kompensoida lisäämällä seosaineena esimerkiksi titaania tai niobiumia, jotka muodostavat karbideja kromin sijasta. (Barnard 2017, s. 103–105.) On huomattava, että yli 650 asteen lämpötiloissa on riski, että materiaaliin muodostuu hyvin haurasta sigmafaasia. Tähän vaikuttavat heikentävästi kylmämuovaaminen ja materiaalin kromiekvivalentti. (Barnard 2017, s. 108–109.) Yksi yleisesti käytetty austeniittinen ruostumaton teräs on AISI 304, eli niin kutsuttu 18:8 teräs, jonka EN-nimike on X5CrNi18-10. Monet virumista kestävät austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat muunnoksia nimenomaan tästä teräksestä.

Vielä korkeammissa lämpötiloissa on turvaututtava niin kutsuttuihin superseoksiin tai keraamisiin materiaaleihin. Superseokset voivat olla rauta-, nikkeli-, tai kobolttivaltaisia. (Miekk-oja et al. 1986, s. 760–764). Kaasuturbiineissa käytetään yleensä nikkeli-pohjaisia superseoksia ja ne kestävätkin jopa yli 900 °C lämpötiloja. Nikkelipohjaisten superseosten hyvä virumiskestävyys perustuu suureen määrään $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ -erkaumia, jotka lujittavat materiaalia lähes sulamispisteeseen asti. Kaupallisia nimiä ovat muun muassa Inconel ja Hastelloy. (Miekk-oja et al. 1986, s. 761; Abe 2014, s. 266.) Superseoksien hinnat ovat kuitenkin verrattain korkeita. Kuvassa 19 on havainnollistettu eri materiaalien 100 000 tunnin virumiskestävyyttä eri lämpötila- ja jännitystasoilla.



Kuva 19. Ferriittisten, austenittisten ja joidenkin nikkelpohjaisten superseoksien 100 000 tunnin virumiskestävyys eri lämpötiloissa ja jännitustasoilla (Abe 2014, s. 267).

4.2 Muita huomioonotettavia asioita

Suurella osalla teräksistä valmistetuissa rakenteissa on jonkinlaisia epäjatkuvuuksia. Komponentteja joudutaan liittämään toisiinsa esimerkiksi ruuviliitoksilla tai hitsaamalla. (Evans & Wilshire 1985, s. 31.) Epäjatkuvuudet aiheuttavat kappaleeseen jännityskonsentraatioita, joiden seurauksena paikallinen jännitys voi olla hyvin paljon suurempi verrattuna jännityksiin muualla komponentissa. Nämä korkean jännityksen alueet ovat kriittisiä virumisen kannalta (Boyle & Spence 1983, s. 272). Jännityskonsentraatioita aiheuttavat muun muassa erilaiset liitokset, reiät, urat, pyöritykset, taivutukset, vahvikkeet, hitsit ja niin edelleen (Pilkey et al. 2020, s. 24). Rakenteissa tulisi välttää turhia epäjatkuvuuksia tai yrittää minimoida niiden vaikutus.

Hitsauksessa kappaleet liitetään toisiinsa lämmön avulla. Tällöin perusmateriaali sulaa ja jäähtyy uudelleen. Hitsin ja perusmateriaalin väliin syntyy lämpövyöhyke (eng. Heat-affected zone, HAZ), jossa tapahtuu mikrorakennemuutoksia. Lämpövyöhyke voidaan jakaa vielä useaan eri alueeseen. Tarkasteltaessa esimerkiksi päittäishitsin poikkileikkausta, hitsiaineen ja sularajan jälkeen tulee karkearakeinen vyöhyke ja sitä seuraavana hienorakeinen vyöhyke. (Lukkari et al. 2016, s. 72.) Hitsien virumisvauriot ilmenevät nimenomaan hienorakeisella alueella, ainakin ferriittisillä ja martensiittisillä teräksillä.

Esimerkiksi Mayr & Cerjak (2010) huomasivat, että hitsatulle kappaleelle tehty virumiskoe ei eroa perusmateriaalin virumiskestävydestä lyhyen aikavälin kokeessa, mutta pitkällä aikavälillä hitsattu kappale murtui huomattavasti nopeammin. Tämä on yksi mielessä pidettävä asia, kun tehdään virumiskestävyyden ekstrapoloimista lyhyen aikavälin kokeen perusteella. (Mayr & Cerjak 2010, s. 60–62.) Perusmateriaalin ja hitsin virumiskestävyys ovat samankaltaisia matalilla lämpötiloilla. Kun lämpötilaa nostetaan ja jännitystä pienennetään, tulee lämpövaikutusalue kriittiseksi. Samoin myös pienempiin jännityksiin siirryttäessä murtuman tyyppi muuttuu sitkeästä hauraaksi. (Sakthivel et al. 2014, s. 115–116.)

Huoneenlämpötilassa kylmämuovaaminen lisää materiaalin lujuutta kasvattamalla dislokaatioiden määrää. Lämpötilan noustessa elpymismekanismit alkavat kuitenkin toimia. Elpyminen ja rakeenkasvu ovat sitä nopeampia, mitä suurempi muokkausaste ja siten dislokaatiitiheys materiaalilla on. Näin ollen suuri dislokaatiitiheys kasvattaa virumisnopeutta. Kun muokkausaste on tarpeeksi suuri, on rakeenkasvun jälkeinen raekoko pienempi kuin alkuperäinen. (Valorinta 1993, s. 56–59; Abe 2014, s. 255.) Yadav et al. (2019) totesivat, että erään titaanilla seostetun austeniittisen ruostumattoman teräksen virumislujuus kasvaa muokkausasteen noustessa tiettyyn raja-arvoon asti. Muokkausasteen noustessa yli 20 prosenttiin, virumislujuus alkaa laskea, koska titaanikarbidit erkautuvat ja elpymisprosessit nopeutuvat. (Yadav et al. 2019, s. 609–611.) Kylmämuovaamisen vaikutus virumislujuuteen on kuitenkin materiaalikohtaista. Tyypillisesti kylmämuovaaminen pienentää virumisvenymää, mutta murtumaan kuluvaan aikaan tai virumisnopeuteen se voi vaikuttaa joko kasvattavasti tai vähentävästi. (Wilshire & Willis 2004, s. 570.)

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Viruminen on yleensä pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa plastista muodonmuutosta, jota tapahtuu erityisesti sulamislämpötilaan nähden korkeissa lämpötiloissa. Viruminen jaetaan tyypillisesti kolmeen vaiheeseen. Primäärivaiheessa virumisnopeus hidastuu muokkauslujittumisen edetessä kohti vakioarvoa. Sekundäärivaiheessa virumisnopeus pysyy likimain vakiona, kun lujittuminen ja elpymisprosessit ovat tasapainossa. Tertiäärivaiheessa virumisnopeus kiihtyy nopeasti, mikä johtaa lopulta kappaleen murtumiseen. Diffuusio on erittäin tärkeässä roolissa virumismekanismeissa. Viruminen tapahtuu joko vakanssien diffuusiona raerajoilla tai korkeilla jännityksillä diffuusion avustamana dislokaatioiden liikkeenä. Virumismurtuma tapahtuu raerajoilla, kun raerajojen väliin syntyvät voidit yhdistyvät. Nämä virumismekanismit eivät koske vain teräksiä, vaan ne toimivat kaikille metallisille tai kiderakenteisille materiaaleille.

Tämä kandidaatintyön tarkoituksena ei ole antaa perinpohjaista selitystä virumisesta, vaan johdatella sellainen lukija aiheeseen, jolla ei ole ennestään tietoa virumisesta. Työn perusteella voidaan todeta, että viruminen on monimutkainen ilmiö jo yksinään. Korkeissa lämpötiloissa haasteeksi tulee virumisen lisäksi hapettuminen ja usein väsyminen. Tämän kandidaatintyön tarkoitus on toimia johdantona aiheeseen. Tarvittaessa virumiseen kannattaa perehtyä tarkemmin aina materiaalikohtaisesti, sillä paljon oleellista asiaa on rajattu pois.

Virumisen laskennallinen tarkastelu on haastavaa ja sitä tutkitaan jatkuvasti. Insinöörirakenteissa virumismurtuma yritetään välttää rakenteen suunnitellun kestoajan aikana tai virumisesta aiheutuva venymä pyritään pitämään tietyn raja-arvon alapuolella. Laitteet, joissa viruminen voi olla ongelma suunnitellaan usein kestäväksi satoja tuhansia tunteja eli kymmeniä vuosia. Näin pitkään kestävä testaus on kallista ja luonnollisesti aikaa vievää. Tästä syystä virumismurtumaan kuluvan ajan ennustamiseen on kehitetty useita erilaisia malleja, jotka perustuvat lyhyen aikavälin kokeisiin. Yksittäistä mallia nimenomaan terästen virumislaskentaan ei löytynyt, vaan mallit vaikuttavat toimivan kaikille kide materiaaleille.

Kirjallisuudessa selvästi eniten esillä ovat parametriset mallit kuten Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn ja Manson-Haferd, mutta muitakin parametrisia malleja vaikuttaa olevan jopa kymmeniä. Näillä menetelmillä voidaan ennustaa murtumaan kuluva aika, kun käyttöolosuhteet tiedetään. Näiden parametristen mallien etuna on niiden yksinkertaisuus, sillä virumiskoetuloksista täytyy määrittää yleensä vain yhdestä kahteen vakiota. Huomioitavaa on se, että käytettävää mallia ei voida päättää etukäteen, sillä koetuloksista voi olla vaikea nähdä, mikä malli toimii parhaiten kyseisen materiaalin kanssa. Myös suuri hajonta koetuloksissa vaikeuttaa vakioiden määrittämistä. Parempi vaihtoehto on siis kokeilla useita eri malleja. Tämän työn valossa ei varsinaisesti voida kommentoida mallien toimivuutta, vaan sitä tulisi tarkastella aina tapauskohtaisesti. Näyttää kuitenkin sille, että esimerkiksi jännitystilan muutos tai virhe vakion määrittämisessä voi saada aikaan jopa vuosien virheen arvioidussa kestoikässä. Monissa uudemmissakin oppikirjoissa annetaan ymmärtää, että Larson-Miller-parametri on toimiva malli jokaisessa tilanteessa ja vakion arvona voidaan käyttää suoraan lukua 20. Tämä on harhaanjohtavaa ja vaarallistakin, mikäli suunnittelija ei ole perehtynyt virumiseen tarkemmin. Parametristen mallien yleinen ongelma on niiden ominaisuus yliarvioida kestoikä niissä käytettyjen yksinkertaistuksien takia. Pienimmän sitoutumisen malli ja venäläiset mallit voivat teoriassa olla tarkempia, sillä niissä käytetään selvästi enemmän mittausdatasta määritettäviä vakioita. Todellisuudessa kuitenkin toimivuus ainakin venäläisten mallien osalta vaikuttaa olevan hyvin vaihtelevaa. Koedatasta määritettävien vakioiden määrän lisääminen lisää myös virheen mahdollisuuksia ja vaatii käyttäjältä enemmän osaamista.

Toisaalta vaikuttaa sille, että tällä hetkellä tutkimuksissa ollaan enemmän kiinnostuneita virumiskäyrän ennustamiseen tähtäävästä laskennasta sekä virumisen ja väsymisen yhteisvaikutuksista. Tämän onkin luonnollista, sillä todelliset komponentit ovat harvoin puhtaan virumiskäyttäytymisen alaisina. Uudemmat mallit, kuten Wilshiren mallit, näyttävät olevan tarkempia kestoikän arvioimisessa. Parametrisista malleista on olemassa paljon tutkimuksia ja muuta kirjallisuutta. Jatkossa kannattaa perehtyä tarkemmin moderneihin laskentamalleihin, sekä mahdollisesti tarkastella niiden toimivuutta uusien virumiskokeiden avulla. Myös virumisen FE-analyysin tarkempi käsittely olisi hyödyllistä, sillä tietokoneavusteinen suunnittelu on nykyään arkipäivää, toisin kuin silloin, kun useimmat laskentamallit on kehitetty. Työssä esitellyt laskentamallit ja niiden ominaisuudet on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Laskentamallien yhteenvetotaulukko.

Mallin nimi	Vakiot/parametrit	Voidaan määrittää
Larson-Miller	C_{LM}	Murtumaan kuluva aika
Orr-Sherby-Dorn	C_{OSD}	Murtumaan kuluva aika
Manson-Haferd	t_a, T_a	Murtumaan kuluva aika
Venäläinen malli 1 ja 2	a, b, c, d, f	Murtumaan kuluva aika
Pienimmän sitoutumisen malli	a, b, c, d, f, g	Murtumaan kuluva aika
Theta-projektio	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$	Virumiskäyrä
Wilshiren mallit	Q_c, σ_{TS} ja k_1, u tai k_2, v tai k_3, w	Riippuen mallista virumiskäyrä, murtumaan kuluva aika tai tiettyyn venymään kuluva aika

Virumista voidaan kontrolloida ensisijaisesti materiaalivalinnoilla. Lisäksi esimerkiksi voimalaitoksen prosessi tulisi säätää niin, että olosuhteet eivät edistä virumista. Rakenteelliset jäähditysratkaisut auttavat, mutta ne ovat vaikeita toteuttaa. Toisin sanoen lämpötila tulisi pitää mahdollisimman alhaisena, sillä lämpötilalla on suurin vaikutus virumisnopeuteen. Lämpötila ja siitä aiheutuvat lämpöjännitykset tulisi myös pitää tasaisina, jolloin kuormitus ei ole väsyttävää. Tämä on kuitenkin haastavaa, esimerkiksi voimalaitoksissa, joiden tarkoitus on toimia vain kysyntähuippujen aikana. Virumisen kannalta erityistä huomiota on kiinnitettävä erilaisiin jännityskonsentraatioihin. Erityisesti hitsit ovat usein välttämättömiä, mutta samalla myös virumisen kannalta kriittisiä pisteitä. Standardit kuitenkin määrittävät miten jännitykset tulee määritellä virumistarkastelussa.

Laskentamallien ohella näyttää sille, että erilaiset korkeisiin lämpötiloihin tarkoitetut materiaalit ovat aktiivisen tutkimustyön alla. Virumiskriittisissä tilanteissa käytetään pääsääntöisesti kuumalujia teräksiä. Virumiskestävyyttä parannetaan seostamalla teräkseen esimerkiksi molybdeenä ja muita suuren atomikoon seosaineita. Suuret korvaussija-atomit ja erkaumat lisäävät virumiskestävyyttä vaikeuttamalla dislokaatioiden liikettä. Myös suuri raekoko parantaa virumislujuutta, sillä pienempi raerajojen määrä vähentää vakanssien määrää sekä vähentää mahdollisia alkupisteitä murtumille. Tämä ja muut virumisen torjumismenetelmät ovat selvästi näkyvissä esimerkiksi kaasuturbiinien siipien kehityksessä. Toisaalta erilaiset nikkelpohjaiset seokset ja keraamiset materiaalit ovat

yleistymässä korkeiden lämpötilojen sovelluksissa. Teräksillä on kuitenkin edelleen paikkansa halvempana vaihtoehtona. Erillinen katsaus moderneihin kuumalujiin teräksiin ja esimerkiksi hitsauksen vaikutukseen virumiskestävyyteen voisi olla myös hyödyllistä. Lisäksi syvällisempi katsaus jokaiseen aihealueeseen erikseen parantaa tiedon luotettavuutta, sillä tässä työssä kutakin aihealuetta on käsitelty pintapuolisesti.

LÄHTEET

Abdallah, Z., Gray, V., Whittaker, M. & Perkins, K. 2014. A Critical Analysis of the Conventionally Employed Creep Lifting Methods. *Materials*, 7: 5. S. 3371-3398.

Abdallah, Z., Perkins, K. & Arnold, C. 2018. Creep Lifting Models and Techniques. In: Tański, T. A. Creep. Sroka, M., Zieliński, A. IntechOpen. 2018. S. 115-149.

Abe, F. 2014. 9 - Development of creep-resistant steels and alloys for use in power plants. In: Shirzadi, A. & Jackson, S. *Structural Alloys for Power Plants - Operational Challenges and High-Temperature Materials*. 1st edition. Cambridge: Woodhead Publishing. 2014. S. 250-293.

Baldan, A. & Tascioglu, E. 2008. Assessment of θ -projection concept and fracture cavitation. *Journal of Materials Science*, 43: 13. S. 4592-4606.

Barnard, P., 2017. 4 - Austenitic steel grades for boilers in ultra-supercritical power plants. In: Gianfrancesco, A.D. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. Amsterdam: Elsevier. 2017. S. 99-119.

Boyle, J.T. & Spence, J. 1983. *Stress analysis for creep*. London: Butterworths. 283 s.

Cedro, V. III, Garcia, C. & Render, M. 2018. Use of the Wilshire Equations to Correlate and Extrapolate Creep Data of HR6W and Sanicro 25. *Materials*, 11: 9. S. 1585.

Evans, R.W. & Wilshire, B. 1985. *Creep of metals and alloys*. London: Institute of Metals. 314 s.

Ghatak, A. & Robi, P.S. 2016. Modification of Larson–Miller Parameter Technique for Predicting Creep Life of Materials. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69: 2. S. 579-583.

- González-Velázquez, J.L. 2020. Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials. 1st edition. Cham: Springer International Publishing. 244 s. Structural Integrity 12.
- Harrison, W., Whittaker, M. & Gray, V., 2018. Advanced Methods for Creep in Engineering Design. Teoksessa: Tański, T. A. Creep. Sroka, M., Zieliński, A. IntechOpen. 2018. S. 221-238.
- Holmström, S. 2010. Engineering tools for robust creep modelling. Espoo: VTT.
- Hu, Z. 2012. Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants. In: Rasul, M. Thermal Power Plants. IntechOpen. 2012. S. 195-226.
- Kassner, M.E. 2009. Fundamentals of creep in metals and alloys. 2nd edition. Oxford: Elsevier. 288 s.
- Kauppila, P., Kouhia, R., Ojanperä, J., Saksala, T. & Sorjonen, T. 2017. Metallien virumismurron ja virumisväsytymisen mallintaminen. Rakenteiden Mekaniikka, 50: 4. S. 420–450.
- Liang, T., Liu, X., Fan, P., Zhu, L., Bi, Y. & Zhang, Y. 2020. Prediction of long-term creep life of 9Cr–1Mo–V–Nb steel using artificial neural network. The International journal of pressure vessels and piping, 179:104014. S. 1-6.
- Llewellyn, D.T. & Hudd, R.C. 1998. Steels metallurgy and applications. 3rd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann. 389 s.
- Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 1, Metallioopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korrosio. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 186 s.

Maruyama, K., Abe, F., Sato, H., Shimojo, J., Sekido, N. & Yoshimi, K. 2018. On the physical basis of a Larson-Miller constant of 20. *The International journal of pressure vessels and piping*, 159. S. 93-100.

Mayr, P. & Cerjak, H. 2010. The impact of welding on the creep properties of advanced 9–12% Cr steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 63: 2. S. 131-136.

Mehta, M.I., Kashyap, B.P., Singh, R.K.P., Kadam, R. & Bapat, S. 2016. Estimation of Creep Failure Life of Rotor Grade Steel by Using Time–Temperature Parametric Methods. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69: 2. S. 591-595.

Miekk-oja, H., Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. *Uudistettu Miekk-ojan metallioppi*. Helsinki: Teknillisten tieteiden akatemia. 841 s.

Nikitin, V.I. & Rybnikov, A.I. 2018. Parametric Methods for Determining the Characteristics of Long-Term Metal Strength. *Thermal engineering*, 65: 6. S. 379-386.

Pelleg, J. 2017. *Creep in Ceramics*. Cham: Springer International Publishing. 445 s. *Solid Mechanics and Its Applications* 241.

Pelleg, J. 2013. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer Netherlands. 634 s. *Solid Mechanics and Its Applications* 190.

Pilkey, D.F., Pilkey, W.D. & Bi, Z. 2020. *Peterson's stress concentration factors*. 4th edition. Hoboken: John Wiley & Sons. 601 s.

Sakthivel, T., Vasudevan, M., Laha, K., Parameswaran, P., Chandravathi, K.S., Panneer Selvi, S., Maduraimuthu, V. & Mathew, M.D. 2014. Creep rupture behavior of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb (ASME grade 92) ferritic steel weld joint. *Materials Science and Engineering: A*, 591. S. 111–120.

SFS-EN 13445. 2017. *Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 3: Suunnittelu*. 4. painos Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 791 s.

SFS-EN 10028-2. 2017. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset. 4. painos Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 56 s.

Srinivasan, V.S., Choudhary, B.K., Mathew, M.D. & Jayakumar, T. 2012. Long-term creep-rupture strength prediction for modified 9Cr - 1Mo ferritic steel and type 316L(N) austenitic stainless steel. *Materials at High Temperatures*, 29: 1. S. 41–48.

Valorinta, V. 1993. Koneenrakentajan metallioppi. 3. painos. Tampere: Pressus Oy. 261 s.

Whittaker, M.T., Evans, M. & Wilshire, B. 2012. Long-term creep data prediction for type 316H stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 552. S. 145-150.

Wilshire, B. & Battenbough, A.J. 2007. Creep and creep fracture of polycrystalline copper. *Materials Science and Engineering: A*, 443: 1–2. S. 156-166.

Wilshire, B. & Willis, M. 2004. Mechanisms of strain accumulation and damage development during creep of prestrained 316 stainless steels. *Metallurgical and materials transactions A*, 35: 2. S. 563-571.

Yadav, H.K., Ballal, A.R., Thawre, M.M. & Vijayanand, V.D. 2019. Creep studies of Cold Worked Austenitic Stainless Steel. *Procedia Structural Integrity*, 14. S. 605-611.

Yin, Y., Faulkner, R. & Starr, F. 2014. 5 - Austenitic steels and alloys for power plants. In: Shirzadi, A. & Jackson, S. *Structural Alloys for Power Plants - Operational Challenges and High-Temperature Materials*. 1st edition. Cambridge: Woodhead Publishing. S. 105–152.

Esimerkki Larson-Miller parametrin käytöstä (Mukaiillen: González-Velázquez 2020, s. 233–234).

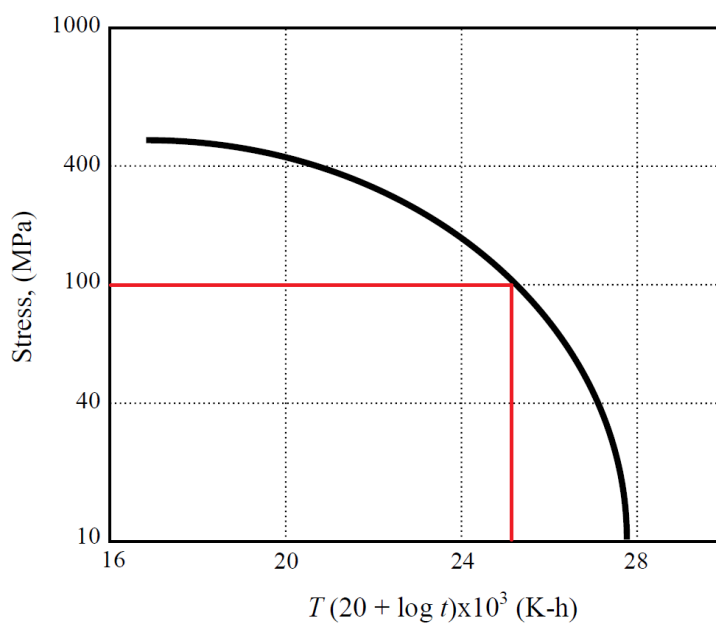
Määritä komponentin kestoikä käyttämällä Larson-Miller parametria, kun Larson-Miller vakio on 20, $\sigma = 100$ MPa ja

a) $T = 1000$ °C = 1273 K

b) $T = 700$ °C = 973 K

$$\text{LMP} = T (20 + \log t)$$

Määritetään Larson-Miller parametrin arvo, kun $\sigma = 100$ MPa kuvaajasta. LMP = 25200



a)

$$25200 = T (20 + \log t)$$

$$\log (t) := \left(\frac{25200}{1273} \right) - 20 = -0,2$$

$$t = 0,62 \text{ h (noin 37,5 min)}$$

b)

$$25200 = T (20 + \log t)$$

$$\log (t) := \left(\frac{25200}{973} \right) - 20 = 5,9$$

$$t = 794\,328 \text{ h (noin 95,5 vuotta)}$$