



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Toni Uotila

Kuulapommitus

Komponentin väsymiseliniän pidentäminen kuulapommituksen avulla

Opinnäytetyö
Kevät 2021
Tekniikan yksikkö
Konetekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Koneinsinööri

Tekijä: Toni Uotila

Työn nimi: Kuulapommitus

Ohjaaja: Samuel Suvanto

Vuosi: 2021

Sivumäärä: 66

Liitteiden lukumäärä: 2

Tässä työssä tutkittiin kuulapommitusta. Tämä on konepajateollisuudessa käytössä oleva kylmämuokkausmenetelmä metallikomponentin väsymiseliniän pidentämiseksi.

Prosessissa pienet pyöreät kuulat singotaan suurella nopeudella komponentin pintaan. Osumista syntyvät pienet lommot luovat pintaan puristusjännityskerroksen sekä sulkevat säröjä ja huokosia komponentin pinnasta.

Käsittelyn lopputuloksena komponentti kestää aiempaa suuremman syklimäärän dynaamisessa, väsyttävässä kuormituksessa, koska nettojännitystasot komponentin pinnassa laskevat kohti puristusjännitystilaa ja särön eteneminen on tällöin hitaampaa. Tämä laskee komponentin vaurioitumistodennäköisyyttä väsyttävissä kuormitustilanteissa.

Menetelmä on hyvin tunnettu auto- ja ilmailualan osia valmistavissa yrityksissä maailmalla ja löi itsensä läpi toisen maailmansodan jälkimainingeissa. Suomessa menetelmä ei kuitenkaan vaikuta olevan yleisesti kovin tunnettu. Toimeksiantajayritystä lukuun ottamatta joitain jousikomponenteille teollisessa mittakaavassa kuulapommituspalvelua tarjoavia yrityksiä on Suomessa löydettävissä.

Työssä käsitellään ensin väsymisvaurioita ja niiden merkitystä koneensuunnittelussa yleisellä tasolla. Kun väsymisvauriot tunnetaan, siirrytään tutkimaan kuulapommitusta menetelmänä.

Työssä myös luodaan yritykselle opinnäytetyösopimuksen mukaisia työkaluja prosessissa syntyvän tiedon hallintaan, prosessin markkinointiin sekä prosessista raportointiin.

¹ Asiasanat: kuulapommitus, kuulapuhallus, väsymisvaurio, väsyminen, väsymiselinikä

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical and Production Engineering

Specialization: Mechanical Engineering

Author: Toni Uotila

Title of thesis: Shot peening

Supervisor: Samuel Suvanto

Year: 2021

Number of pages: 66

Number of appendices: 2

In the thesis shot peening was studied. Shot peening is a cold working process used in the mechanical engineering industry to extend the fatigue lifespan of a metal component.

In the process small spherical balls are propelled at high velocity to the component surface. Small dents made up by the impacts induce a layer of compressive stresses and close fractures and pores on the surface of the component.

The outcome of the process is that the component lasts higher cycle rates under dynamic fatigue loads, mainly because total stress levels on the component surface are reduced towards compressive stress state and crack formation is slower. This reduces the probability of failure for the component under fatigue loads.

The method is well known amongst companies producing parts for automobile and aviation sector around the world since the Second World War. In Finland the method seems to be not so well recognized on a general level. Apart from the thesis client some companies producing shot peening service for spring components can be found in Finland.

In the thesis fatigue failures and their meaning in mechanical engineering were addressed first. As fatigue failures were familiar, shot peening as a process was studied.

In accordance with the thesis contract, tools were created for the thesis client to manage data collected from the process, market the process and report on the process, too.

¹ Keywords: shot peening, fatigue failure, fatigue, fatigue lifespan

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	7
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	9
1 JOHDANTO	11
1.1 Tehtävänanto	11
1.2 Opinnäytetyösopimus.....	11
1.3 Opinnäytetyön rakenne	12
1.4 Heatmac Oy	12
2 VÄSYMISVAURIOT	13
2.1 Väsymisvaurioiden historia ja Versaillesin junaonnettomuus.....	13
2.2 Väsymisvauriomekanismin tutkimisen historia ja Versaillesin junaonnettomuuden seuraukset väsymisvaurioanalyysille.....	14
2.2.1 Systemaattinen väsymisvaurioanalyysi ja August Wöhler	15
2.2.2 Maksimijännityksen mittaaminen akseleissa.....	15
2.2.3 Akselin eliniän määrittäminen	16
2.2.4 Wöhlerin väsytyksoe	16
2.2.5 Basquinin logaritminen piirros	18
2.3 Väsymisanalyysi nykypäivänä	19
2.4 Kidehila ja raerakenne.....	20
2.4.1 Kidehila	20
2.4.2 Raerakenne	22
2.4.3 Raeraja	22
2.4.4 Anisotropia	23
2.4.5 Hilaviat	23
2.5 Väsymissärö ja särön ydintyminen	25
3 KUULAPOMMITUKSEN TEORIAA	29

3.1	Kuulapommituksen historiaa	29
3.2	Menetelmänä kuulapommitus.....	31
3.3	Kuulapommitusprosessi	32
3.4	Puristusjännityskerros	32
3.5	Prosessin hallinta	37
3.5.1	Kuulan nopeus.....	37
3.5.2	Kuulan koko	37
3.5.3	Peitto.....	38
3.5.4	Kuulan kovuus	39
3.5.5	Komponentin kovuus	39
3.5.6	Intensiteetti.....	40
3.5.7	Liuskan taipumisen aiheuttava mekanismi.....	41
3.5.8	Intensiteetin mittaus	43
3.5.9	Saturaatiokäyrä & intensiteetilukema.....	45
3.5.10	Mitä intensiteetti oikeastaan on?.....	46
3.6	Jäännöspuristusjännitysten mittaus.....	48
3.6.1	Barkhausenin kohina	48
3.6.2	Röntgendiffraktio.....	49
4	OPINNÄYTETYÖSOPIMUKSESSA TILATUT TYÖT	51
4.1	Markkinointimateriaali.....	51
4.2	Testaustietokanta ja mittauspöytäkirja.....	51
4.2.1	Tietokannan rakentamiseksi sopivimman ohjelmiston selvitys.....	52
4.2.2	Excel	52
4.2.3	Access	53
4.2.4	Ohjelmiston valinta tietokannan rakentamiseksi	53
4.3	Tietokannan luominen	54
4.4	Saturaatiokäyrä ja mittauspöytäkirja.....	55
4.4.1	Saturaatiokäyrän funktio	55
4.4.2	Kertoimien ratkaiseminen.....	56
4.4.3	Saturaatio intensiteetti ja -aika	58
4.4.4	Ratkaisun automatisointi.....	58

4.5 Mittauspöytäkirja	59
5 YHTEENVETO	60
6 SUOSITUKSET JA JATKOTUTKIMUS	61
6.1 Markkinointi	61
6.2 Testaustietokanta ja laadunvarmistus	61
6.3 Saturaatiokäyrä ja mittauspöytäkirja	61
6.4 Jäännöspuristusjännitysten mittaus	62
LÄHTEET	63

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Väsymisvaurio eräässä komponentissa.....	14
Kuvio 1. Palkin taipuma kuorman alla	15
Kuvio 2. Wöhlerin väsytyskoelaite	17
Kuvio 3. eräs S-N käyrä	19
Kuvio 4. Yksikkökoppi & hila	21
Kuvio 5. Särmädislokaatio	24
Kuvio 6. Ellipsin akselit	26
Kuvio 7. Testisauva	27
Kuvio 8. Suurennos ellipsin muotoisesta lovesta	28
Kuvio 9. Kuulan osuman luoma jännitys jakauma komponenttiin	33
Kuvio 10. Hertzin pintapaine	34
Kuvio 11. Eräs Haigh diagrammi	36
Kuvio 12. Momenttia tuottava voima	41
Kuvio 13. Liuskan taipumisen simulointi elementtimenetelmällä.....	43
Kuvio 14. Piirros Almen-mittauslaitteesta.....	44
Kuvio 15. Eräs saturaatiokäyrä	45
Kuvio 16. Barkhausenin kohina anturi	48
Kuvio 17. XRD-laitteisto	50
Kuvio 18. Pommitusraportti.....	59

Taulukko 1. Almen testiliuskojen paksuuserot	40
Taulukko 2. Almen A-liuskan dimensiot Volvo Aero Corp -liuskalle	42
Taulukko 3. Kertoimien suhteet saturaatio intensiteettiin & -aikaan.....	58

Käytetyt termit ja lyhenteet

Komponentti	Käsiteltävä tuote.
Kuulapommitus	Komponentin pinnan jännitystilaan vaikuttamista sinkoamalla siihen koneellisesti pieniä teräs-, valurauta-, lasi- tai keraamisia kuulia.
Jäännöspuristusjännitys	Kuulapuhalluksen jälkeen pintaan jäävä ohut puristusjännityskerros, joka suojaa pintaa särön syntymiseltä ja etenemiseltä väsymisvaurioiden ehkäisemiseksi.
Kylmämuokkaus	Jähmettyneen metallin mekaanista muokkausta.
Lämpökäsittely	Metallin mikrorakenteen muokkausta lämmön avulla tyypillisesti suuremman kovuuden saavuttamiseksi.
Ydintyminen	Mikroskooppisten säröjen synty.
Singulariteetti	Yleisesti ottaen piste, jossa funktio (matematiikassa) palauttaa äärettömän arvon. Käsitteellä on monia merkityksiä soveltamisalan mukaan.
Vakanssi	Vakanssilla tarkoitetaan pistemäistä hilavikaa, jossa teoreettisen hilajärjestyksen mukainen atomi puuttuu paikaltaan. Vakansseja on sekä kiteen sisällä että raerajoilla. Vakanssit itsekin voivat vaihtaa paikkaa. Tällöin jokin aineen atomeista täyttää vakanssin paikan ja jättää oman paikkansa tyhjäksi hilajärjestyksessä.
Abrasiivinen kuluminen	Hiontakuluminen. Hankaava kuluminen.
NDT	Nondestructive testing suom. rikkomaton aineenkoetus on joukko menetelmiä, joilla mm. metalliosia voidaan testata tuhoamatta testikappaletta.

Monokromaattinen säteily

Sähkömagneettista säteilyä, joka sisältää vain yhtä aallonpituutta.

1 JOHDANTO

Seuraavaksi käydään lyhyesti läpi, miten työtä päädyttiin tekemään ja millainen yritys on työn tilaajana.

1.1 Tehtävänanto

Syksyllä 2020 Heatmac Oy tarjosi SeAMK:lle opinnäytetyöksi kuulapommituksen tutkimista. Tavoitteena on tutkia menetelmää teoriassa ja käytännössä.

Menetelmä oli yritykselle uusi eikä sitä valtakunnallisestikaan tiedetä tehtävän tässä kokoluokassa. Suomesta on mahdollista löytää joitain kuulapommituspalveluita lähinnä jousikomponenteille tarjoavia yrityksiä (Meconet, [viitattu 5.4.2021]). Heatmac Oy:n laitteilla pommitusta on mahdollista suorittaa huomattavasti suuremmille komponenteille.

1.2 Opinnäytetyösopimus

8.10.2020 järjestettiin Heatmac Oy:n tiloissa Seinäjoella aloituspalaveri, jossa oli läsnä Heatmac Oy:n toimitusjohtaja, opinnäytetyön ohjaaja ja opinnäytetyön kirjoittaja. Toimitusjohtaja kertoi yrityksestä ja sen tarpeista opinnäytetyön suhteen tarkemmin ja työtä rajattiin, koska tehtävää oli paljon.

Opinnäytetyösopimuksessa sovittiin markkinointimateriaalin, testaustietokannan ja mittauspöytäkirjan laatimisesta yrityksen käyttöön kyseistä menetelmää koskien. Alustavasti opinnäytetyön päätyminen kirjattiin seuraavan vuoden kesäkuulle, koska aikataulu saattoi vielä elää työn aikana. Tiedonhankinta teoriaosuuden ja työn suorittamiseksi aloitettiin heti palaverin jälkeen.

1.3 Opinnäytetyön rakenne

Työ koostuu soveltavista osuuksista.

Tutkimuksessa käsitellään ensin väsymisvaurioiden teoriaa metallikomponenteilla. Tämän jälkeen käsitellään kuulapommituksen teoriaa ja tarkastellaan mekanismeja, joista pidempi väsymiselinikä komponentille kuulapommituksessa syntyy.

Soveltavassa osuudessa kehitetään markkinointimateriaalia kuulapommitusta koskien sekä pyritään kehittämään yritykselle työkaluja prosessissa syntyvät tiedon hallintaan ja prosessista raportointiin.

1.4 Heatmac Oy

Heatmac Oy on perustettu vuonna 2019 toimialanaan konepajateollisuus ja metallityöt. Yritys on erikoistunut teräksen lämpökäsittelyyn ja sillä on käytössään modernit karkaisulinjat, joilla suurien volyymien käsitteleminen onnistuu luontevasti. Vaikka kyseessä on nuori yritys, yrityksen henkilöstöllä on vankka kokemus lämpökäsittelystä ja materiaalitekniikasta. Uutena aluevaltauksena yritys on hankkinut kuulapuhallukseen soveltuvat laitteet tarjotakseen lisäpalveluita asiakkailleen. Vuonna 2019 liikevaihto oli 195 000 € ja tilikauden tulos 46 000 €. Toimitusjohtajana toimii Hannu Kangas.

2 VÄSYMISVAURIOT

Jotta voidaan ymmärtää kuulapommituksen komponentille tuomat hyödyt, on ensin ymmärrettävä materiaalin väsyminen ja väsymisvauriot. Hietikon (2015, 159) mukaan vielä nykyäänkin väsymistä koetetaan ymmärtää lähinnä kokeellisten metodien tai pitkälle yksinkertaistettujen mallien kautta. Väsymisanalyysin kehitys jatkuu yhä edelleenkin. Tässä työssä esitellään yleisimmin tunnettuja menetelmiä pintapuolisesti, koska työ koskee kuulapommitusta eikä varsinaisesti väsymisvaurioanalyysiä.

Väsymisilmiö tarkoittaa tilannetta, jossa kappaleessa vaikuttava jännitys on selkeästi myötörajaa alemmalla tasolla, mutta ajan mittaan kappale kuitenkin vaurioituu. Väsymisilmiö esiintyy vain silloin, jos kappaleeseen vaikuttaa vaihtokuormitus. Väsymismurtuma lähtee tyypillisesti etenemään pinnan epäjatkuvuuskohdasta. (Hietikko 2015, 159.)

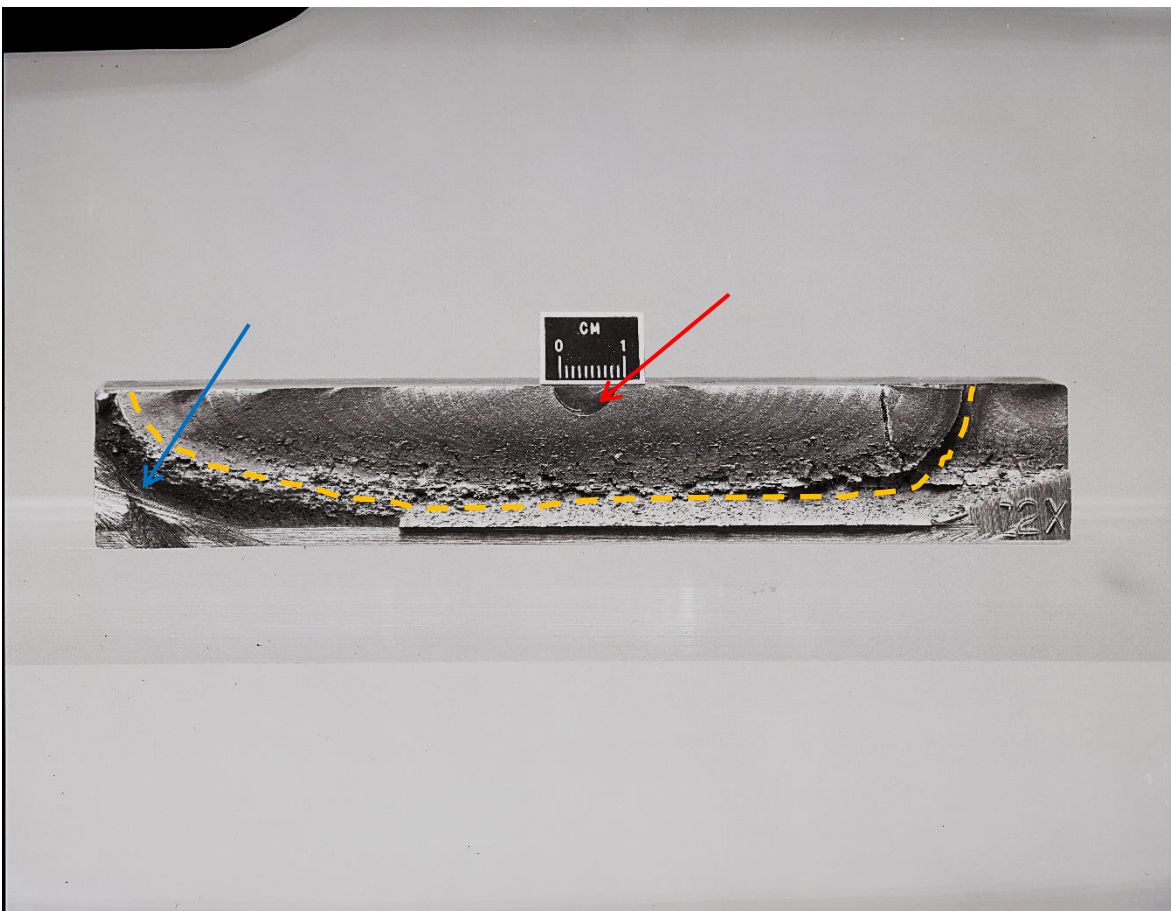
2.1 Väsymisvaurioiden historia ja Versaillesin junaonnettomuus

Cotterell (2010, 174) tarkastelee väsymisvaurioiden historiaa Versaillesin junaonnettomuuden kautta. Ranskalainen tutkimusmatkailija Jules Dumont d'Urville (1790–1842) kuoli vaimonsa, poikansa ja noin 50 muun kanssa ensimmäisessä suuressa junaonnettomuudessa. D'Urville oli osallistunut Pariisin ja Saint-Germainin välisen rataosuuden avajaisseremoniaan ja oli epätavallisen pitkässä 17 vaunun ja 1 500 matkustajan paluujunassa, jota veti kaksi veturia. Versaillesin lähettyvillä etummaisesta veturista murtui akseli. Takana tullut veturi törmäsi etummaiseen ja sen höyrykattila räjähti aiheuttaen tulipalon kuuteen ensimmäiseen vaunuun. Suuri määrä henkiä menetettiin onnettomuudessa toki osittain myös siksi, että ajan käytäntöön kuului lukita matkustajat vaunuun matkan ajaksi. (Cotterell 2010, 175.)

Samoihin aikoihin muutaman vuoden käytössä olleiden akseleiden vauriot eivät olleet kovin epätavallisia, nykyisin niitä kutsuttaisiin väsymisvaurioiksi. On valitettavaa, että termiä materiaalin (metallin) väsyminen tiedetään käytetyn ensimmäisen kerran vain muutamaa vuotta aiemmin vuonna 1839 Jean-Victor Ponceletin luennolla Metz'n sotakoulussa. Ilmiö ei kuitenkaan ollut yleisesti hyvin tunnettu tai todistettu ja tuohon aikaan insinöörit mitoittivat komponentit myötörajaa vastaan myös väsymistilanteissa. Onnettomuuden jälkeen Ranskan hallitus nimitti komitean tutkimaan onnettomuutta ja tätä voidaan pitää lähtölaukauksena väsymisvaurioiden tutkimukselle. (Cotterell 2010, 175.)

2.2 Väsymisvauriomekanismin tutkimisen historia ja Versaillesin junaonnettomuuden seuraukset väsymisvaurioanalyysille

Cotterellin (2010, 175) mukaan aluksi ei osattu erottaa haurasmurtumaa ja väsymismurtumaa toisistaan. Useat tutkijat tekivät testejä ja tutkivat aihetta vuosia ja lopulta ymmärsivät, että väsyminen on oma kuormitustyyppinsä ja väsymisvaurioita voisi löytyä muualtakin kuin junan akseleista. Myös särön syntyminen todistettiin kokeellisesti ja ymmärrettiin, että akseli vaurioituu lopullisesti sitten, kun särö on edennyt niin pitkälle, ettei jäljellä oleva materiaali jaksakaan enää kannatella itseään ja siihen kohdistettuja kuormituksia.



Kuva 1. Väsymisvaurio eräässä komponentissa (soveltaen Brown, 1974)

Kuvassa 1. tumma alue viivaimen alla, johon punainen nuoli osoittaa, on vaurion lähtöpaikka. Oranssilla rajattu alue on särön etenemisalue, jolloin särö on hiljalleen ydintynyt suuremmaksi. Sininen nuoli osoittaa karkeaan pintaan, jolloin lopullinen vaurio on syntynyt ja materiaali pettänyt.

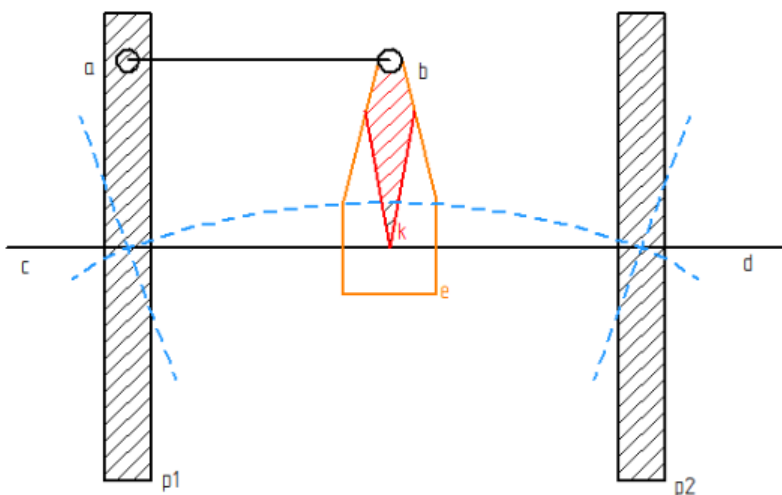
2.2.1 Systemaattinen väsymisvaurioanalyysi ja August Wöhler

Cotterell (2010, 179) kirjoittaa, että systemaattisesti veturin akseleita alkoi tutkia August Wöhler, joka oli vastuussa Niederschlesisch-Märhrische rautatien kalustosta ja konepajasta Frankfurtissa.

Hänen tavoitteensa, kuten aiemmin aihetta tutkineilla oli ennaltaehkäistä ja selittää väsymisvaurioita. Hänen tulokulmansa aiheeseen oli kuitenkin systemaattinen ja tieteellinen. Tämän vuoksi hän sai vietyä väsymisvaurioanalyysiä merkittävästi eteenpäin ja yleisesti häntä pidetään systemaattisen väsymisvaurioanalyysin kehittäjänä, jos yksilöitä halutaan nimetä. (Cotterell 2010, 179.)

2.2.2 Maksimijännityksen mittaaminen akseleissa

Cotterell (2010, 179) kertoo, että ensimmäisenä Wöhler keksi keinon mitata akseleissa vaikuttavia maksimijännityksiä. Hänen kojeensa oli käytännössä yksinkertainen akseliin kiinnitettävä laite, jossa laitteen osoitin piirsi sinkkilevylle viivan akselin taipuessa.



Kuvio 1. Palkin taipuma kuorman alla

Cotterellin (2010, 179) kuvailun pohjalta piirrettiin laitteesta havainnekuva. Kuviossa 1. p1 ja p2 ovat pyörät, laakerit tms. ja akseliin cd on kiinnitetty laite e, jossa on osoitin k. Saranoitu vipu ab yhdistää pyörän ja laitteen jolloin, kun akseli taipui sinisen katkoviivan mukaisesti piirsi osoitin k naarmun sinkkilevylle akselin cd suunnassa. Tämä on käytännössä taipumaviivan maksimiarvo, josta voidaan laskea akseliin kohdistuvat jännitykset, kun materiaali tunnetaan.

2.2.3 Akselin eliniän määrittäminen

Cotterellin (2010, 179) mukaan Wöhler sai selville eräitä seikkoja, kuten että akselin maksimi dynaaminen kuormitus oli 1,33 kertaa staattinen kuormitus ja maksimi taivutuskuormitus akselille tapahtuu silloin, kun vaunu ylittää vaihteen junaradalla.

Wöhler teki myös oletuksia, joista eräs oli, että maksimi taivutuskuormitusyhteisyyttä oli korkeintaan yksi saksanpeninkulman (7 420 m) matkalla. Lisäksi hän oletti näiden tietojen pohjalta, että akselin elinikä oli noin 200 000 saksanpeninkulmaa. Täten Wöhler oletti, että akseli on tyydyttävä, jos se pystyi kestäämään 200 000 kuormitusyhteisyyttä maksimaalisella dynaamisella kuormalla. Akseliin toki kohdistuu myös pienempiä kuormittavia voimia kuin maksimi dynaaminen kuormitus, mutta näitä Wöhler ei pitänyt merkittävänä akselin eliniän kannalta. (Cotterell 2010, 179–180.)

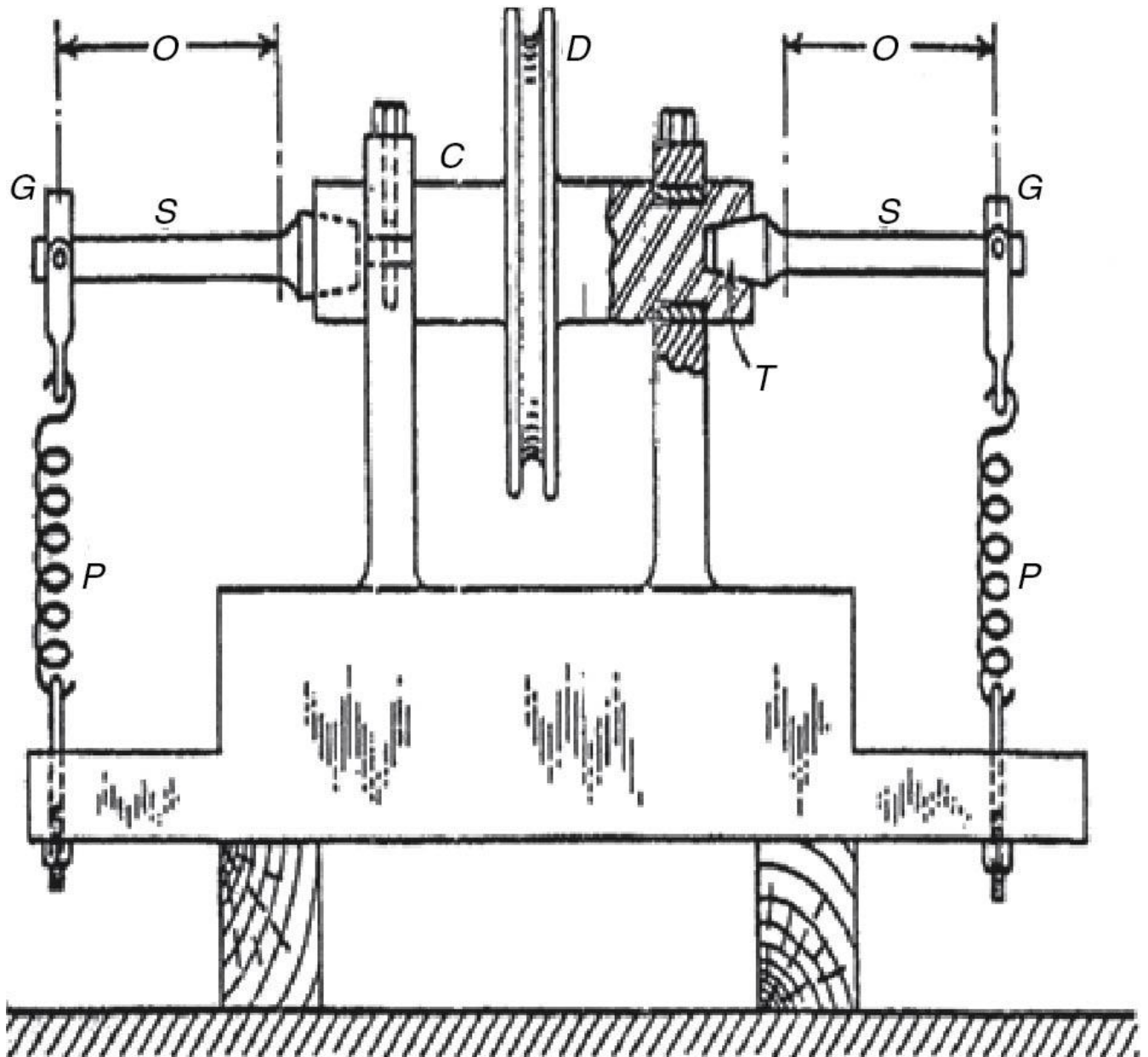
2.2.4 Wöhlerin väsytysoike

Cotterell (2010, 180) kirjoittaa, että Wöhler käytti ensin oikeita täysimittaisia akseleita, mutta niitä pystyi ajamaan vain matalilla nopeuksilla. Wöhler ymmärsi, että kattava testaus oli tarpeellista ja tähän vaadittiin suuri määrä testejä, jotta tulosten perusteella voidaan vetää johtopäätöksiä.

Wöhler alkoikin käyttää pienempiä 38 mm:n tangosta koneistettuja akseleita, joiden nopeus voitiin nostaa 40 000 kierrokseen päivässä, kuitenkin säilyttäen kokeellisen rakenteen, joka oli samantyyppinen, mitä oli käytetty suuremmilla akseleilla. Hän siis ryhtyi tekemään väsymiskokeita pienemmässä mittakaavassa. (Cotterell 2010, 180.)

Tällä järjestetyllä Wöhler pystyi testaamaan näytteitä jopa 10^7 sykliin saakka ja osoitti todeksi, että jännityksellä oli rajoittava vaihteluväli, jonka alapuolella säröä ei syntynyt. Muissa testeissään Wöhler vertaili tuloksia akseleille, joilla oli yhtenäinen halkaisijamitta akseleihin, joissa halkaisija joko kasvoi tai pieneni ja huomasi, että terävät nurkat saattoivat alentaa tätä rajoittavaa jännitystä jopa 25–33 %. Terävät nurkat ja epäjatkuvuuskohdat siis heikensivät akselin väsymiselinikää. (Cotterell 2010, 180.)

Aarno (1992, 341) esittää, että väsymiskokeisiin laboratoriossa käytetty laite on vielä nykyisinkin rakenneperiaatteeltaan samankaltainen kuin Wöhlerin alkuperäinen laite vuodelta 1871, joka on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Wöhlerin väsytykskoelaite (Shashidhar, Banavasi, Ravishankar & Naik 2018)

Koelaitteen tarkoituksena on kuormittaa testikappaletta (S) vaihtelevalla jännityksellä jousien (P) avulla tuottaen hyvin määritellyn jännitys jakauman.

2.2.5 Basquinin logaritminen piirros

Cotterell (2010, 180) kertoo, että Wöhler keräsi uransa aikana valtavat määrät väsymistietoja kokeissaan, mutta nykyisin tutut logaritmiset piirrokset teki ensimmäisenä Basquin vuonna 1910 ehdottaessaan suhdetta

$$\sigma_a = CN^n \quad (1)$$

jossa

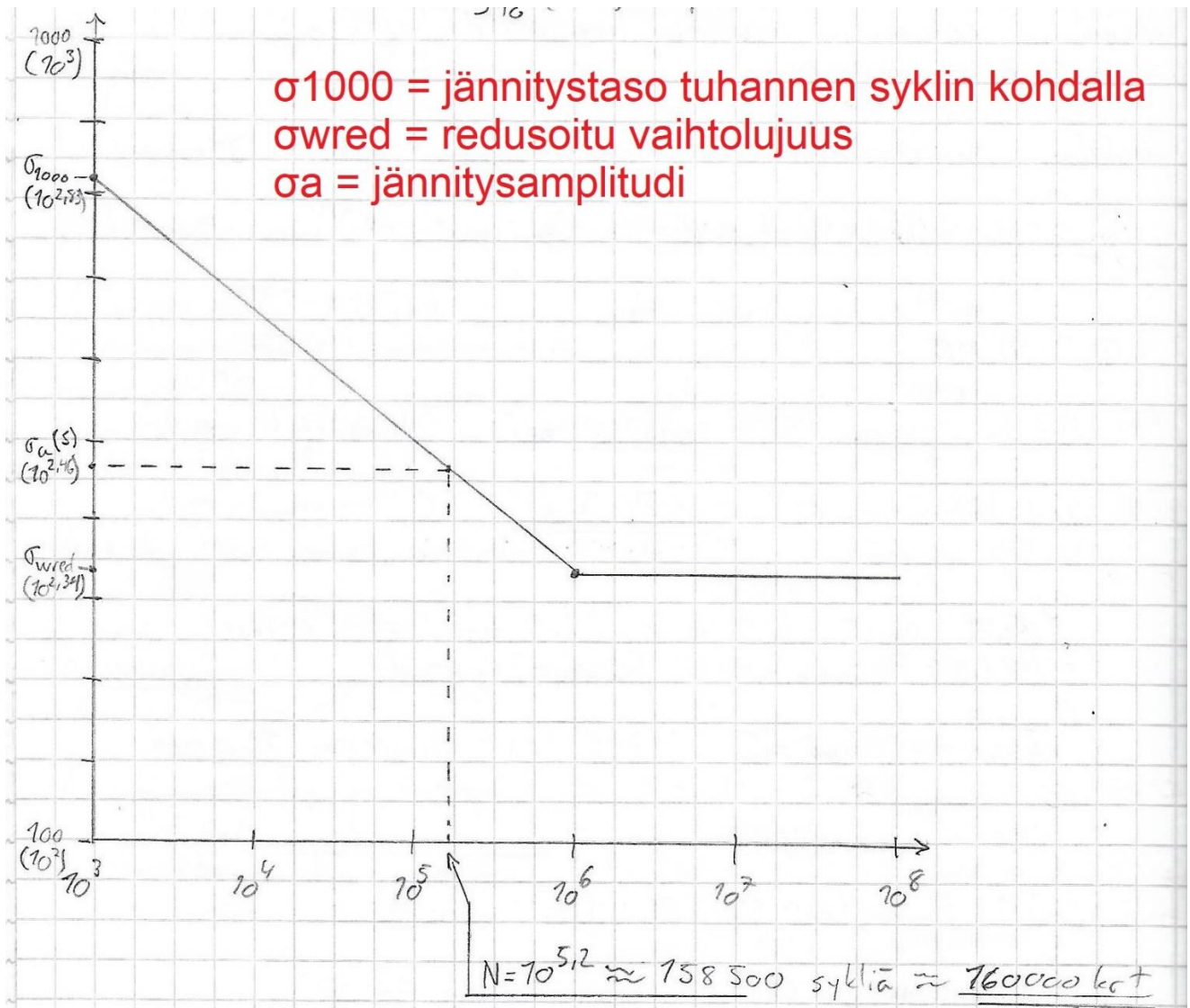
σ_a on muuttuva jännitys

N on elinikä ko. muuttuvalla jännityksellä

C & n ovat vakioita, jotka muuttavat funktion suoraksi logaritmisella asteikolla

Basquin käytti pääosin Wöhlerin tuolloin n. 50 vuotta vanhaa väsymiskoedataa taulukoidessaan C:n ja n:n arvoja monille metalleille. Useimmille metalleille n:n arvo vaihtelee välillä -0,05 ja -0,12. Nykyisin S-N käyränä tunnetun logaritmisin piirroksen tekemiseen on useita menetelmiä. (Cotterell 2010, 180.)

Kuviossa 3. on nähtävillä eräs S-N käyrä. Yksinkertaisinta on käyttää valmista S-N käyrää, jolloin pystyakselille on merkittävä jännitysamplitudi ja luettava käyrän vaaka akselilta amplitudia vastaava syklimäärä. Kuviossa 3. on katkoviivalla merkitty jännitysamplitudi ja sitä vastaava vaaka-akselin kohta.



Kuvio 3. eräs S-N käyrä

2.3 Väsymisanalyysi nykypäivänä

Edellä käsiteltiin sitä, miten metallin väsymisvauriot ensimmäisen kerran havaittiin ja niiden tutkimus aloitettiin. Nykyisin ilmiö tunnetaan jokseenkin paremmin. Rabb (2013, 16) kuvaa väsymisrajaa tyypilliseksi satunnaismuuttujaksi, jolla on keskiarvo ja keskihajonta. Nämä arvot määritetään yleensä testaamalla. Rabb onkin pyrkinyt uudistamaan väsymisanalyysiä ja kehittämään tarkempia menetelmiä, jotka pohjautuvat todennäköisyyslaskentaan nykyisin oppikirjoissa usein esitettyjen nimellisjännitysten, muotolukujen ja lovenvaikutuslukujen sijaan.

Kuitenkaan tässä työssä ei paneuduta kovin syvällisesti varsinaiseen väsymisanalyysiin vaan pyritään ymmärtämään dynaamisen kuormituksen aiheuttama särö ja sen ydintyminen, jotta voidaan ymmärtää kuulapuhalluksen hyödyt. Väsymisilmiön selittämisessä tyydytään siis yksinkertaistamiseen ja perusmekanismien kuvaamiseen yleisellä tasolla.

Rabbin (2013, 17) mukaan väsymisilmiön ymmärtäminen helpottuu, kun tunnetaan muutamia nykyaikaisen materiaaliopin perusasioita.

2.4 Kidehila ja raerakenne

Niinimäki (2008, 50) kertoo, että metallisten aineiden atomit järjestäytyvät kiteisesti (kristallimaisesti). Mikrorakennetta voi tutkia mikroskoopilla, jonka suurennokset ovat tyypillisesti monisatakertaisia. Tämä antaa kuvan siitä, miten pienistä, kirjaimellisesti mikroskooppisista virheistä on kyse, kun puhutaan siitä, mitkä seikat materiaalissa vaikuttavat väsymissärön ydintymiseen.

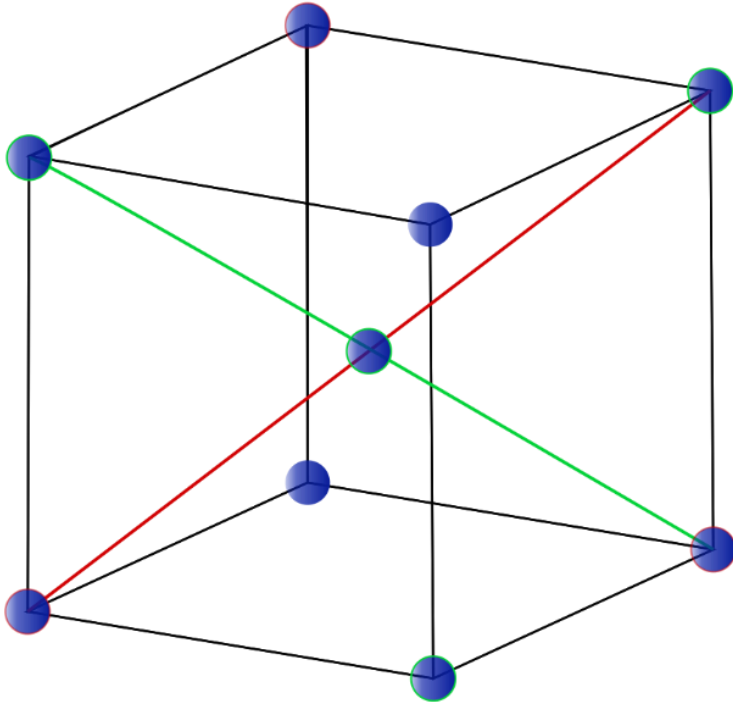
2.4.1 Kidehila

Niinimäen (2008, 50) mukaan kiteet syntyvät alun perin metallin jähmettyessä. Jäähdytymisen aikana alkaa jähmettymislämpötilassa syntyä pieniä kiinteitä atomiryhmiä, joissa atomit asettuvat hilan mukaiseen järjestykseen. Myös jähmeässä tilassa metallin mikrorakenne voi muuttua esim. kylmämuokkauksen tai lämpökäsittelyn vuoksi.

Hilaa voi hahmottaa ajattelemalla atomit palloiksi, jotka asettuvat metallin rakenteen muodostuessa tiiviisti toistensa lähelle. Avaruushilan voi kuvitella rakentuvan siten, että atomien muodostamia tasoja eli hilatasoja pinotaan päällekkäin. (Niinimäki 2008, 50.)

Hilan rakennetta kuvaavaa pientä osaa kutsutaan yksikkökopiksi. Hilan voidaan ajatella muodostuvan, kun yksikkökopit yhdistyvät toisiinsa. Yksikkökoppien rakenteet voivat olla erilaisia, tästä syystä puhutaan eri hilatyypeistä. Metallien tavallisimmat hilatyypit ovat tilakeskinen kuutio, pintakeskinen kuutio ja tiiviisti pakkautunut heksagoninen hila. (Niinimäki 2008, 50.)

Metallin ominaisuudet riippuvat osaltaan hilatyypistä. Plastinen muodonmuutos tapahtuu tiettyjä kidetasoja ja hilasuuntia pitkin. Hilatyypin vaikutus on myös materiaalin väsymiseen. Osittain tämän vuoksi eri materiaalit väsyvät eri tavoilla. Tässä työssä keskitytään rakenneteräksen väsymiseen ja rakenneteräksessä esiintyviin hilatyyppeihin.



Kuvio 4. Yksikkökoppi & hila (Wikipedia, 2011)

Kuviossa 4. on esitetty tilakeskinen kuutiokoppi. Niinimäen (2018, 50) mukaan juuri tämä hilatyypin esiintyy erittäin käytetyssä rakenneteräksessä S235.

2.4.2 Raerakenne

Niinimäki (2008, 47) toteaa, että raerakenteessa hiepinta on metallin tasoleikkaus, jossa rakeet näkyvät verkon silminä tai tummuudeltaan erilaisina pieninä pintoina. Raekoko voi vaihdella paljon ja sen yleisin mittaustapa on ns. vertailumenetelmä, jossa mikroskoopilla otettua kuvaa hieppinnan mikrorakenteesta verrataan mallikuviin raekokostandardista. Raekoko voi vaihdella melko paljon ja sopivalla käsittelyllä siihen voidaan vaikuttaa.

Raekoko vaikuttaa metallin ominaisuuksiin Niinimäen (2008, 48) mukaan suuresti:

- lujuus, erityisesti myötölujuus suurenee raekoon pienentyessä
- kovuus suurenee raekoon pienentyessä
- iskutikeys paranee raekoon pienentyessä
- muokattavuus paranee sekä murtovenymä ja -kurouma suurenevat raekoon suurenessa

Rabb (2013, 17) kuvailee rakeiden orientaatiolla ja rajoilla olevan suuri merkitys väsymissärön ydintymisvaiheessa. Joissain rakeissa särö voi jopa pysähtyä, kun se saavuttaa raerajan. Usein pyritään mahdollisimman pieneen raekokoon materiaalia valmistettaessa, koska silloin materiaalin lujuusominaisuudet ovat yleensä parhaimmillaan.

2.4.3 Raeraja

Niinimäki (2008, 54) kirjoittaa, että kiteitä yhdistää sisäinen pinta, jota sanotaan raerajaksi. Hän kuvaa sitä muutaman atomietäisyyden paksuiseksi epäsäännöllisyysalueeksi, jossa on mm. vakansseja eli tyhjiä atomipaikkoja (hilavika), seos ja epäpuhtausatomeja ja joskus jopa raerajakalvoja.

Raerajalla sijaitsevat atomit eivät ole järjestäytyneet kummankaan viereisen kiteen kidesuuntiin, vaan toimivat välittäjinä kiteiden välillä. Raeraja voi myös siirtyä, kun kiteen atomit hylkäävät paikkansa ja asettuvat toisen kiteen hilasuunnan mukaisesti. Tätä kutsutaan ylipinoutumiseksi ja tällä tavoin metallin raekoko voi muuttua. (Niinimäki 2008, 54.)

2.4.4 Anisotropia

Niinimäki (2008, 52) selittää anisotropiaa siten, että kiteen ominaisuudet ovat yleensä erilaiset eri hilasuunnissa. Samassa kiteessä esim. lujuus, kimmoisuus (kimmokerroin) ja muodonmuutoskyky (Poissonin luku) saattavat hilasuunnan mukaan vaihdella paljonkin. Yksittäisen kiteen muodonmuutos riippuu siitä, mistä suunnasta jännitys kohdistuu kiteeseen.

Tätä ominaisuuksien erilaisuutta kutsutaan anisotropiaksi. Anisotropiaa ei metallikappaleessa yleensä ole, koska sen lukemattomat kiteet ovat suuntautuneet tilastollisesti satunnaisesti toisiinsa nähden. Yleensä metallin ominaisuudet ovat siis samat aineen eri suunnissa. (Niinimäki 2008, 52.)

Rabb (2013, 18) kertoo, että vaikka jännitystila olisi makroskooppisesti tasainen, syntyy rakeiden välille jännityseroja anisotropian vuoksi, vaikka ne olisivat vierekkäin. Tämä vaikuttaa siis osaltaan väsymissärön ydintymiseen. Esimerkiksi kimmokerroin saattaa vaihdella kiteen eri suunnissa.

2.4.5 Hilaviat

Metallin hilarakenne ei kuitenkaan todellisuudessa ole niin säännöllinen kuin edellä kuvattiin. Kuvaus on lähinnä teoreettinen hilajärjestys ja poikkeukset siitä ovat nimeltään hilavikoja. (Niinimäki 2008, 52) Hilavikoja syntyy jo metallin jähmettyessä ja niitä syntyy lisää esimerkiksi muokkauksessa.

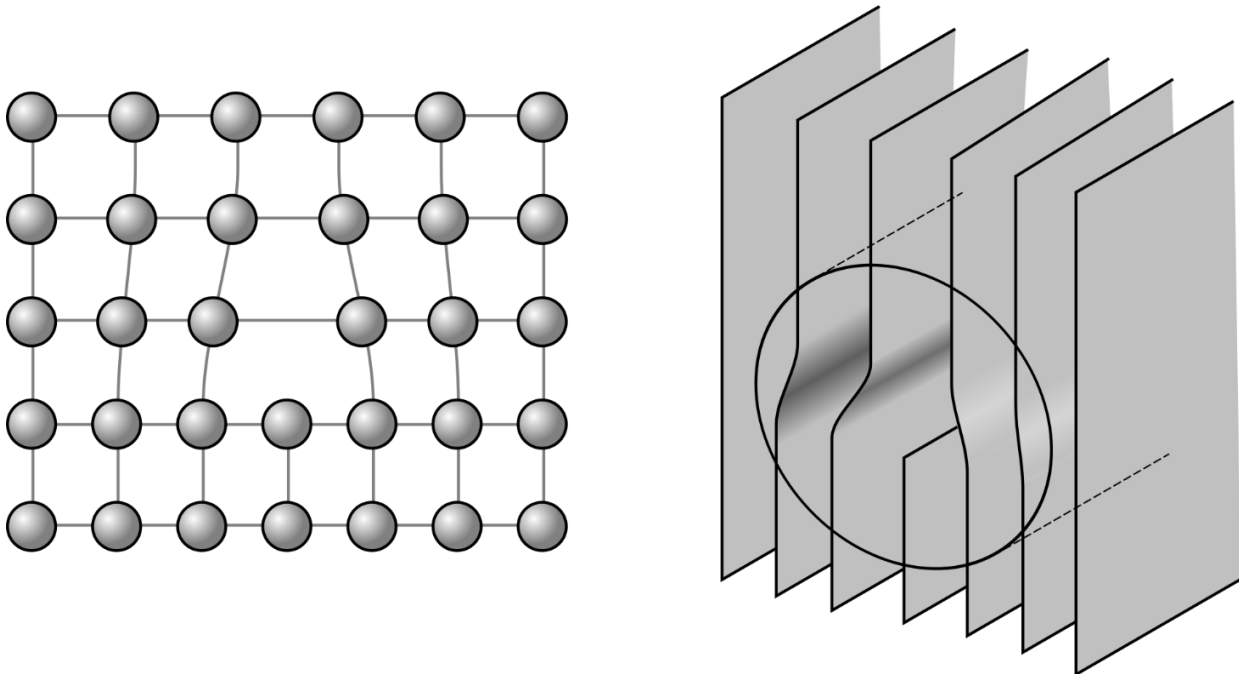
Hilaviat voivat olla Niinimäen (2008, 52) mukaan mm:

- pistemäisiä, kuten vakanssit, välisija-atomit ja korvausatomit
- yksiulotteisia eli dislokaatioita
- kaksiulotteisia, kuten raerajat
- kolmiulotteisia, kuten vakanssien tai vieraiden atomien kertymät

Hilavian ainakin yhden ulottuvuuden on oltava pieni, yleensä alle 10 atomietäisyyttä. Vioilla voi kuitenkin olla paljonkin pituutta, kuten dislokaatioilla. Ne voivat myös olla laajoja, kuten raerajat, jotka ovat oikeastaan jo pintoja. Halkeamia ja huokosia sen sijaan pidetään makroskooppisina rakennevikoina, koska ne ovat kaikilta mitoiltaan yli 10 atomietäisyyttä. (Niinimäki 2008, 52.)

Hilaviat vaikuttavat metallin ominaisuuksiin ja sisäisiin tapahtumiin paljon. Rakenneherkkiin ominaisuuksiin, kuten myötölujuuteen hilavioilla on myös suurta vaikutusta. Myös väsymissärön ydintymisen alkuvaiheeseen dislokaatioilla ja vakansseilla on suuri vaikutus. (Niinimäki 2008, 53.) Dislokaatioita on kahta perusmuotoa: särmä- ja ruuvidislokaatioita. Väsymissärön kannalta kiinnostavampi on särmädislokaatio, joten tarkastellaan tässä työssä vain sitä. (Rabb 2013, 20.)

Särmädislokaatiota voidaan kuvata siten, että hilassa on vajaa atomitaso, jonka särmän alapuolelle muodostuu liukutasoon hieman putkimainen reikä. Särmädislokaatio on kuvattuna kuviossa 5. Myös dislokaatio voi vaihtaa paikkaa siten, että dislokaation asema siirtyy viereiselle atomitasolle ja äskeinen vajaa taso täydentyy kokonaiseksi. (Niinimäki 2008, 53.)



Kuvio 5. Särmädislokaatio (Wikipedia, 2009)

Rabb (2013, 18) kuvailee, että kiteen rakenteen vuoksi syntyy liukutasoja. Näillä tasoilla voi liukuma eri atomitasojen välillä helpommin tapahtua.

Dislokaatio aiheuttaa ympäristöönsä myös jännitystilän. Liukutasen yläpuolella atomit ovat puristuksissa, kun taas alapuolella on väljyyttä. Metallin plastinen muodonmuutos tapahtuu yleensä juuri dislokaation liikkeenä mikrotasolla tarkasteltuna. (Niinimäki 2008, 52.)

2.5 Väsymissäro ja särön ydintyminen

Rabb (2013, 19) esittää, että koska atomitasot voivat liukua ns. liukutasossa helpommin on helppoa hahmottaa, että leikkausjännitys on edellytys tällaiselle liukumiselle. Mikäli maksimileikkausjännitys on vaihteleva ja liukutaso osuu samaan suuntaan leikkausjännityksen kanssa, on tilanne särön ydintymiselle mahdollisimman otollinen.

Useimmiten ydintyminen alkaa jonkin ainevian kohdalta, vaikka moni muukin asia edesauttaa särön ydintymistä. Rabb (2013, 22) kertoo teräkselle epämetallisten sulkeumien olevan tyypillisiä ainevikoja. Ainevika voidaan jopa ymmärtää jo aineessa olemassa olevaksi alkusäröksi.

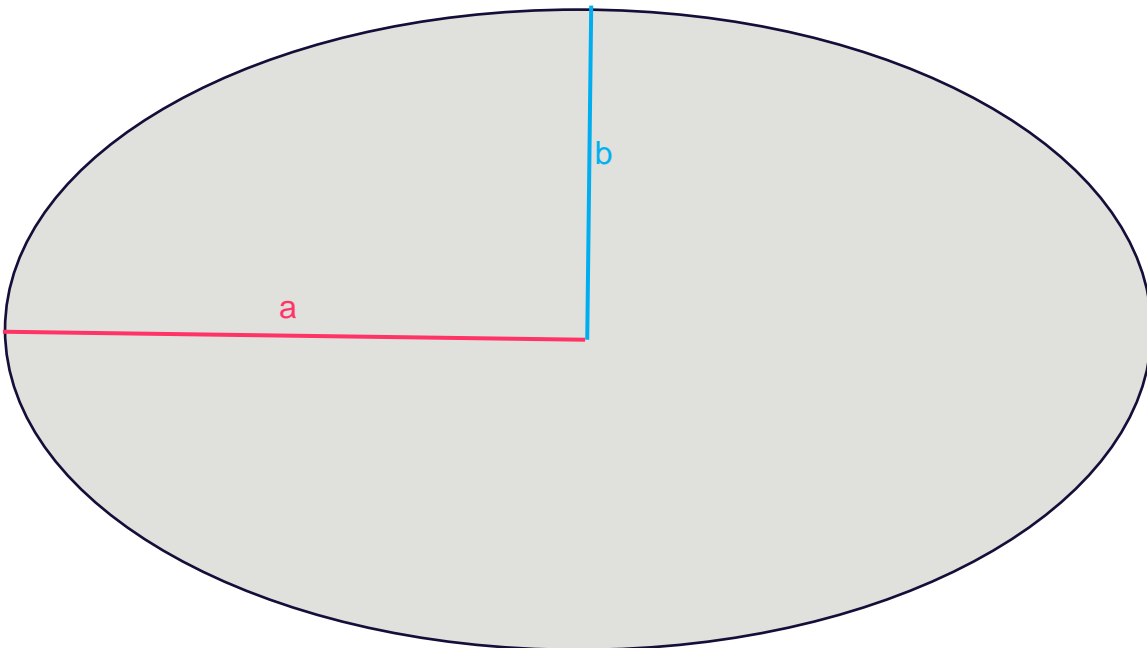
Ranta (1992, 346) kertoo, että särön ydintymisen ehtona on riittävän korkea jännitystila. Toistuvassa syklisessä kuormituksessa särö kasvaa jo huomattavasti myötörajaa pienemmilläkin kuormilla. Särön kasvu voi myös pysähtyä, jos kuormitus laskee riittävästi. Koska ydintymisvaihe tapahtuu hyvin pienessä materiaalilavuudessa, on pinnanlaadulla, kiderakenteella ja korroosiolla vaikutusta väsymismurtuman alkuun.

Ranta (1992, 344) kirjoittaa säröjä olevan kahta tyyppiä: pintasärö ja sisäinen särö.

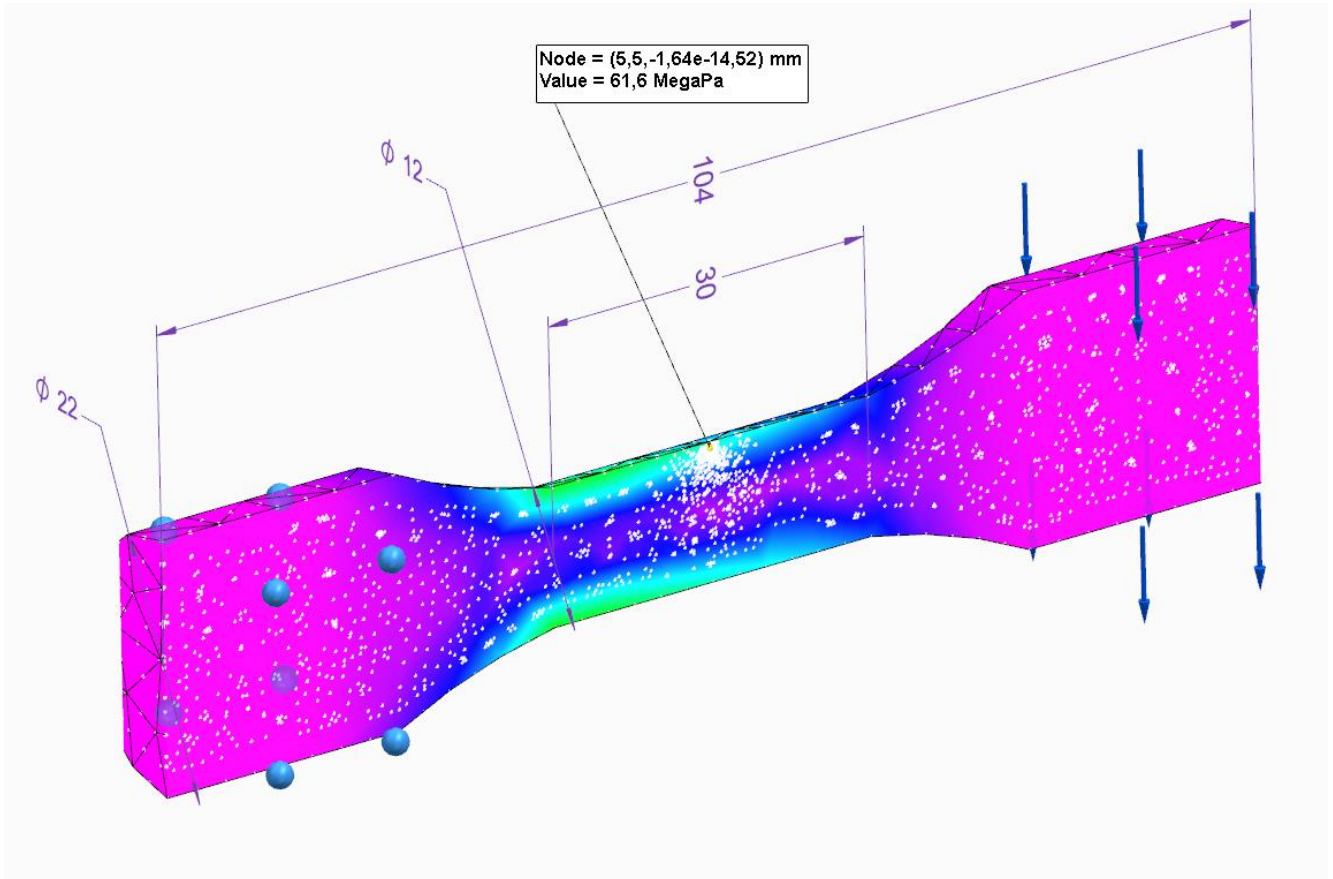
Kuten kuvassa 1. on esitetty, särö ydintyy hiljalleen. Tähän voi kulua pitkäänkin (miljoonia syklejä), joka laitteen käytön mukaan voi olla kuukausia, vuosia tai vuosikymmeniä. Särön ydintyminen on monimutkainen ilmiö, jota ei voi selittää yhdellä mekanismilla vaan se on useiden tekijöiden summa. Kuitenkin keskeisessä asemassa ovat mikro- ja makrotason materiaaliviat, joita ei voi silmällä havaita.

Särön ydintyessä plastisoituminen tapahtuu särön pohjalla äärimmäisen pienessä materiaalityluvudessa, kuten luvussa 2.5 todettiin. Väsymisvaurioille keskeistä on, että kuormitustasojen ei tarvitse saavuttaa edes materiaalin myötörajaa. Pienemmätkin kuormitukset riittävät lopulta rikkomaan materiaalin, kuten luvussa 2.1 todetaan tapahtuneen.

Ydintymistä voi vielä lopuksi havainnollistaa esim. testisauvan simuloinnilla. Tarkoitusta varten on mallinnettu testisauva ja sauvan pituussuunnan keskelle, lähelle pintaa ellipsin muotoinen särö, jonka mitat ovat $a=0,2$ mm ja $b=0,1$ mm. Mitat on valittu siten, että elementtimenetelmällä simulointi on käytetyllä ohjelmalla vielä mahdollista verkon pienestä koosta johtuen. Tarkoituksena on vain havainnollistaa jännitysten konsentroitumista särössä. Kuviossa 6. on nähtävissä ellipsin perusakselit.



Kuvio 6. Ellipsin akselit

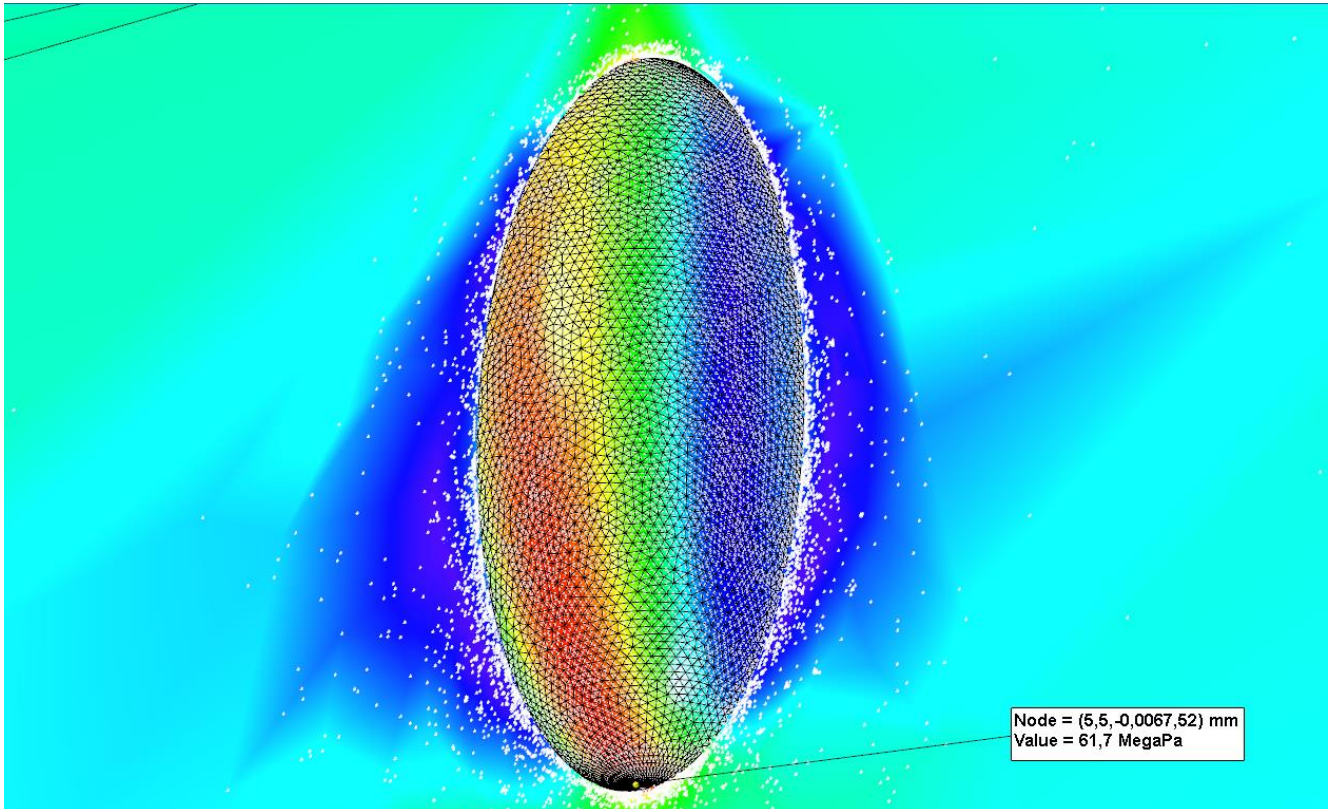


Kuvio 7. Testisauva

Kuviossa 7. on kuvakaappaus testisauvan pituussuuntaisesta poikkileikkauksesta. Nuoli osoittaa jännityskonsentraation ellipsin pohjalle. Vasemmassa päädyssä näkyvät pallot kuvaavat fixed-reunaehtoa, jolla sauva on kiinnitetty simulointiohjelman avaruuteen. Oikean päädyn nuolet kuvaavat voimaa, joka taivuttaa testisauvaa. Käytetty voima oli suuruudeltaan 100 N (n. 10 kg), jonka arveltiin olevan riittävä voima jännityskonsentraation havainnollistamiseksi. Simulaatiossa käytettiin teräksen S355 materiaalivakioita.

Tilanteen on tarkoitus simuloida väsymiskoe menettelyä, mutta on huomautettava, että kyseessä on todellisuudessa lineaarinen staattinen analyysi, joten se ei kuvaa todellista väsymiskoemenettelyä hyvin. Tarkoitus on kuvantaa ainoastaan jännityskonsentraatiota kappaleessa olevassa materiaaliviassa (ellipsin pohjalla).

Simulaatiossa sauva taipuu siis ainoastaan kerran alaspäin voiman vaikutuksesta ja simulointi päättyy siihen. Plastisoitumisestakaan ei voi päätellä mitään, koska jännitys on lineaarista.



Kuvio 8. Suurennos ellipsin muotoisesta lovesta

Kuviossa 8. on huomattavissa, miten jännitys keskittyy materiaalivian alueelle. Suurimmat jännitykset keskittyvät ellipsin pohjalle. Tämä kuvaakin jännitysten kerääntymistä materiaalivikaan hyvin, sillä vain 100 N kuormituksella pystyttiin tuottamaan n. 62 MPa jännitys materiaalivian kohdalle. Sauvan dimensiot ovat nähtävillä kuviossa 7.

Koska mikään materiaali ei ole täydellistä, pääsee väsymisvaurioita syntymään. Väsymisvaurioriskin voi kuitenkin ottaa huomioon, kun suunnitellaan dynaamisesti kuormittuvaa komponenttia ja mitoittaa komponentin väsymistä vastaan materiaalin myötörajan sijaan.

Eräs keino komponentin väsymisvaurioriskin laskemiseen on tehdä valmistettavalle komponentille kuulapommitus ennen käyttöönottoa. Seuraavaksi käsitellään kuulapommitusta ja sitä, miten se edistää komponentin väsymisenkestoa.

3 KUULAPOMMITUKSEN TEORIAA

Kuulapommitus (shot peening) on menetelmä, joka on laajasti käytetty mekaanisten osien valmistuksessa. Menetelmää ei tule sekoittaa hiekkapuhallukseen (sand blasting) tai teräsraepuhallukseen (shot blasting), jota käytetään komponenttien puhdistukseen tai hilseen poistoon. Menetelmässä pieniä langanpätkiä, teräs-, valurauta-, tai lasikuulia singotaan suurella nopeudella vasten käsiteltävää kappaletta. Kuulien koko vaihtelee suunnilleen välillä 0,1–1,3 mm, mutta jopa 2 mm:n kuulia on olemassa. Käsittelyn keskeinen hyöty on, että se nostaa huomattavasti dynaamisten kuormitusten alla olevien mekaanisten komponenttien väsymiselinikää. Menetelmällä on useita käyttökohteita useiden erityyppisten osien valmistuksessa. Näitä ovat esimerkiksi: kierrejouset, kiertokanget, hitsisaumat, lentokoneiden osat, voimansiirtoakselit, vääntövarret jne. (Niku-Lari 1996, 1.)

3.1 Kuulapommituksen historiaa

Verkkokirjaan Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel (Inoue, Howes, Totten 2002) on koottu 27 artikkelia, joista kuulapommituksen historiaa sivutaan artikkelissa Inducing Compressive Stresses through Controlled Shot Peening (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345–358). Artikkelissaan Kritzler ja Wübbenhorst esittävät, että hiekkapuhallusta valujen puhdistamiseen voidaan pitää kuulapommituksen edeltäjänä. Hiekkapuhalluksen kirjallisuuslähteitä voidaan jäljittää aina 1800-luvulle asti.

Kuulapommituksen esittelivät Zimmerli Associated Spring Companylla ja Almen General Motorsilla ennen vuotta 1930. Vuonna 1934 patentit myönnettiin kuulapommituskoneille ja vuosina 1935–1945 Almen suoritti perustavanlaatuista työtä kuulapommituksen kehittämiseksi. Esimerkiksi Almen liuska, jota käytetään yhä tänä päivänä, keksittiin tuona aikana. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345.)

Kuulapommitusta tutkittiin myös Saksassa ennen toista maailmansotaa Darmstadtin ja Braunschweigin teknillisissä yliopistoissa. Opel on käyttänyt kuulapommitettuja venttiilinjousia vuodesta 1935 alkaen. Suunnilleen vuonna 1940 oli selvää, että kuulapommitus parantaa väsymiselinikää pääasiassa, koska se tuottaa komponentin puristusjännityskerroksen, joka ehkäisee särön syntymistä ja väsymismurtumia eikä suinkaan siksi, että se ainoastaan lisää pintamateriaalin kovuutta. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345.)

Toinen maailmansota vauhditti kuulapommituksen suuren mittakaavan teollista hyödyntämistä Yhdysvalloissa. American Society for Metals piti konferenssin kuulapommituksesta 1944. Voikin saada vaikutelman, että kuulapommituksen teollinen hyödyntäminen laahasi perässä Saksassa suhteessa Yhdysvaltoihin. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345.)

Samoihin aikoihin ilmestyi raportti, jossa käsiteltiin kuulapommitusprosessin optimointia riippuen konetyypistä, altistusajasta ja kuulan koosta. Vuonna 1946 pinnan jäännöspuristusjännitysten mittausta kuulapommitetuista vääntäjousista kuvattiin ensimmäisen kerran. Vuonna 1949 tuli ulos raportti ”jännityspuhalluksesta” (stress peening), joka kertoi lehtijousien kuulapommituksesta, kun ne olivat jo esijännitetyssä tilassa ennen pommitusta. Tämä tuotti erityisen korkean väsymiseliniän lehtijousille. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345.)

Vuonna 1952 SAE (Society of Automotive Engineers) julkaisi artikkelinsa ”Manuaalinen kuulapommitus”. Vuosien 1951 ja 1954 välillä oli kaksi konferenssia Neuvostoliitossa, joissa kuulapommitus sai menetelmän suurta huomiota. Vuodesta 1954 alkaen kuulapommitusta on käytetty monimutkaisten kaarevien pintojen valmistuksessa sen tuomien hyötyjen vuoksi. Ensimmäinen amerikkalainen standardi koskien kuulapommitusta oli MIL-S-13165 ”Shot Peening of Metal Parts”, joka tuli voimaan vuonna 1956 ja pätee yhä edelleen kehittyneemmässä muodossaan. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345.)

Mielenkiintoista on, että amerikkalaisten ensimmäinen standardi koskien kuulapommitusta on MIL-S eli ”Military Specification” eikä esim. jokin muun standardoimisorganisaation standardi. Tämä voi osaltaan selittää kuulapommituksen nopeaa kehitystä toisen maailmansodan jälkimainingeissa, sillä yleisesti tunnettuja kuulapommitettavia komponentteja ovat erilaiset ilmailu-, avaruus- ja autoilualan komponentit, kuten jouset, laskutelineet, roottorin lavat ym. Tähän maailmanaikaan näiden alojen kehitys oli poikkeuksellisen nopeaa ja tuotantovolyymit suuria.

Pian standardin tultua voimaan käytännössä kaikki lentokone- auto- ja muut valmistajat liittyivät omilla säädöksillään ja normeillaan. Yleinen teollinen kuulapommituksen sovellus Saksan liittotasavallassa voidaan jäljittää suunnilleen vuoteen 1955. (Kritzler & Wübbenhorst. 2002, 345.)

Tässä asiayhteydessä erityisesti autonvalmistajat tulisi nostaa esiin, koska käytännössä kaikki autoissa käytettävät jouset (venttiilien ja jousituksen) on kuulapommitettu viimeistään ko. vuodesta alkaen. Schütz, W. kirjotti samoihin aikoihin raportin, joka kertoo kuulapommituksesta värinävymskeston parantamisessa rata- ja tieajoneuvojen komponenteille. Sama kirjoittaja myöhemmin käsitteli myös ohjausteknologian erityisvaatimuksia kuulapommituksessa. (Kritzler & Wübbenhorst. 2002, 345.)

3.2 Menetelmänä kuulapommitus

Kuten edellä todettiin, väsymisvaurio lähtee etenemään yleensä jonkin mikrotason ainevian kohdalta. Usein, jos kyseessä on oskilloiva, väsyttävä kuormitus, triviaaliratkaisu olisi kasvattaa komponentin poikkileikkausta, jotta jännitystasoja saataisiin laskettua ja särön olisi edettävä lisäksi pidempi matka ennen lopullista vaurioitumista.

Toisaalta myös komponentin pinnanlaatuvaatimusta voisi hienontaa tai käyttää alun perin lujempaa materiaalia, jotta särön etenemistä voitaisiin ehkäistä. Edellä mainittujen menetelmien haittapuolet ovat siinä, että ne tuottavat painavamman rakenteen lopputuloksena tai lisäävät huomattavasti valmistuskustannuksia.

Komponentti voidaan myös kuulapommittaa. Tämä käsittely parantaa komponentin väsymiselinikää ja se on yleensä kohtalaisen edullinen suorittaa. Suomessa ei juurikaan ole kyseiselle palvelulle tarjoajia, koska menetelmä ei liene kovin hyvin tunnettu. Ainoastaan jousille oli teollisessa mittakaavassa löydettävissä kuulapommituspalvelun tarjoajia. (Meconet, [viitattu 5.4.2021])

3.3 Kuulapommitusprosessi

Lefteri (2012, 274) kuvaa kirjassaan lyhyesti, mutta ytimekkäästi kuulapommitusprosessin perusteet. Kyseessä on kylmämuokkausprosessi, jolla parannetaan metallin lujuusominaisuuksia. Hahmottaakseen prosessia ylimalkaisella tavalla voi kuvitella haulikon laukausta, jossa haulit leviävät ilmassa pieneksi parveksi.

Periaatteessa kyse ei ole sen kummallisemmasta kuin komponentin pinnan pommittamisesta pienillä pyöreillä partikkeleilla. Osuessaan komponenttiin pienet partikkelit jättävät pintaan pienen pyöreän kuopan. Kun näitä partikkeliä aiheuttamia kuoppia on pinnalla tiheästi, ne muodostavat komponentin pintaan puristusjännityskerroksen, koska materiaali pinnan alla pyrkii palautumaan alkuperäiseen muotoonsa. (Lefteri 2012, 274.)

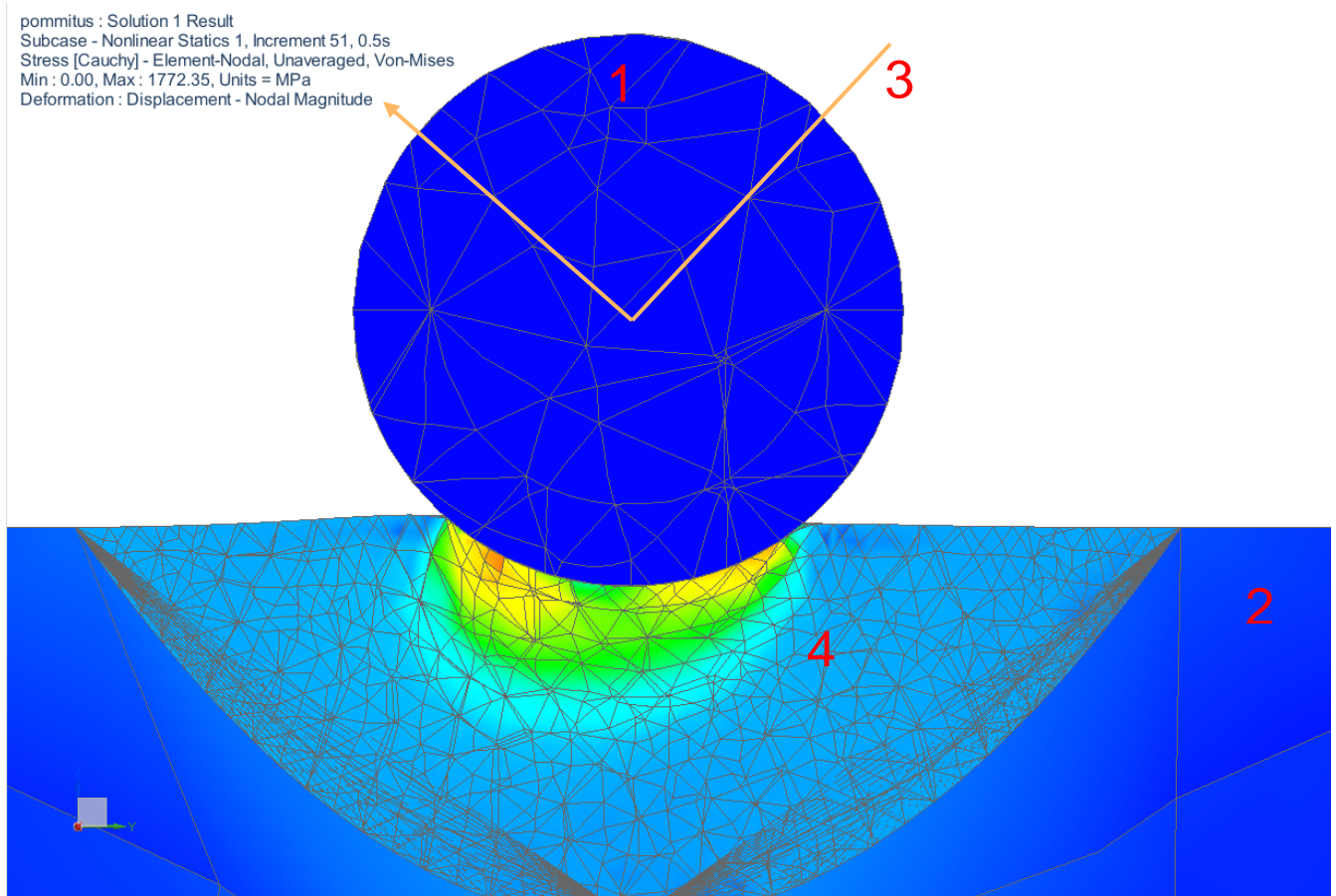
Pintapuolisesti prosessi vaikuttaa samanlaiselta kuin rae- tai hiekkapuhallus, mutta se aiheuttaa komponentille vähemmän abrasiivista kulumista ja on pikemminkin muovaava. Prosessi voi nostaa joissain tapauksissa väsymiselinikää jopa kymmenkertaiseksi (1000 %). (Lefteri 2012, 274.)

3.4 Puristusjännityskerros

Kuulan osuessa pommitettavan komponentin pintaan, kyseessä on elastisplastinen prosessi. Prosessissa kineettistä energiaa siirtyy kuulasta työstettävään komponenttiin, jonka seurauksena syntyy pieni kuoppa ja plastista muodonmuutosta kuopan läheisyyteen. Tästä johtuu kuulapommitusprosessin jälkeen havaittavissa oleva komponentin pinnan jännitystilän muutos. (Kritzler & Wübbenhorst. 2002, 345–346.)

Jäännöspuristusjännityskerros pinnassa on siis seurausta lukemattomista pienistä plastisista muodonmuutoksista komponentin pinnassa.

Kuviossa 9. kuula on kuvattu numerolla 1 ja komponentti numerolla 2. Kuula osuu komponenttiin lentorataa 3 pitkin ja muuttaa suuntaansa kimmoisan törmäyksen vuoksi. Tästä syntyy kuoppa ja sen ympärille puristusjännitystila 4. Tällaisia pieniä muodonmuutoksia on komponentin pinnassa lukematon määrä.

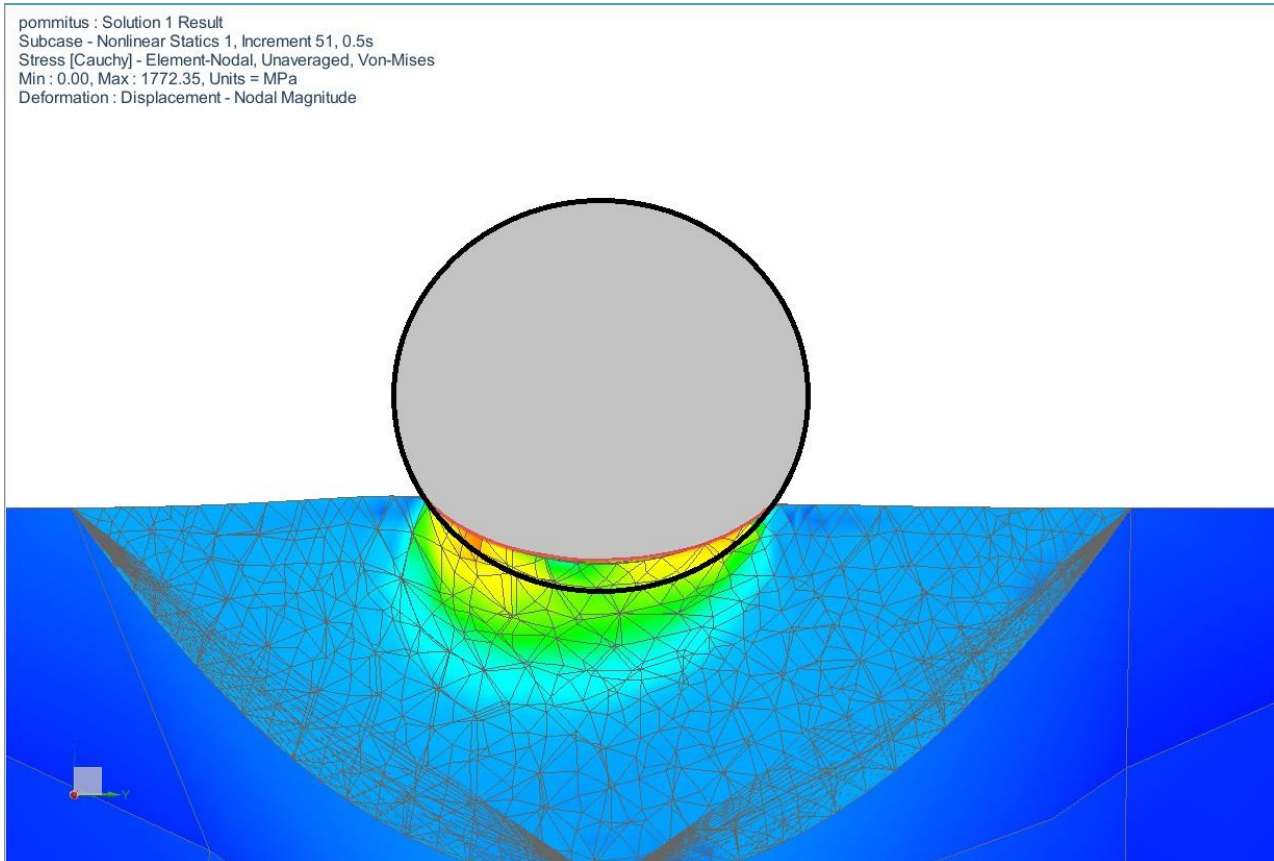


Kuvio 9. Kuulan osuman luoma jännitysjaakauma komponenttiin

Kritzler & Wübbornhorst (2002, 345–346) viittaavat Wohlfahrtin artikkeleihin selittäessään jäännösjännitysten syntymistä. Tilanteessa vaikuttaa kaksi keskeistä prosessia:

- Hertzin pintapaine
- plastinen muodonmuutos osumakohdan välittömässä läheisyydessä

Tribologia on oma tieteenalansa, joka tutkii kosketuspintojen kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviä ilmiöitä (Bhushan. 2013, 1). Hertzin pintapaine voidaan lukea tribologian osa-alueeksi eikä sitä käsitellä kovin syvällisesti tässä työssä. Todetaan kuitenkin sen olevan keskeinen vaikuttava mekanismi riittävän jännityskonsentraation luomiseksi työstettävän komponentin pintaan, jotta plastinen muodonmuutos, josta kuoppa syntyy voi tapahtua.



Kuvio 10. Hertzin pintapaine

Kuviossa 10. esitetyn ideaalisen pallon ja tasopinnan välinen kosketus tapahtuu, kun kuula törmää käsiteltävään komponenttiin. Koska toinen pinnoista on kupera, todellinen kosketusala on hyvin pieni. (Kivioja 1997, 26.)

Pallon ja jäykän tason kosketusalue on poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoinen. (Kivioja 1997, 27.) Olisi helppo kuvitella kosketuksen olevan pistemäinen, mutta todellisuudessa sekä kuula että työkappale myötäävät hieman, kuten kuviossa 10. on ylikorostetusti osoitettu muodostaen pienen ympyrämäisen kosketusalueen.

On myös huomioitava, että tyypillisesti kuulamateriaali ja komponentin materiaali ovat tyystin erilaisia ja niillä on omat Poissonin lukunsa ja kimmokertoimensa ja onkin järkevää olettaa kuulamateriaalin olevan kovempaa ja muokkautuvan huomattavasti komponenttia vähemmän kosketuksessa. Kuulapommitusprosessissa yleensä käytettyä kuulaa suodatetaan prosessin aikana ja pyritään erottelemaan teräväreunaiset vaurioituneet kuulat pyöreistä kuulista.

Tämä puristusjännityskerros suojaa komponenttia väsymisvaurioita vastaan pääosin siksi, että se tasopainottaa pintaan kohdistuvia vetojännityksiä. (Kirk 1999, 349.) Tällöin keskijännitys saattaa jäädä puristuksen puolelle, vaikka komponenttiin kohdistuisikin tilanteessa ulkoista vetojännitystä.

Tämä voidaan osoittaa myös laskemalla keskijännitys σ_m esimerkiksi Rannan (1992, 340) esittämällä kaavalla (2)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

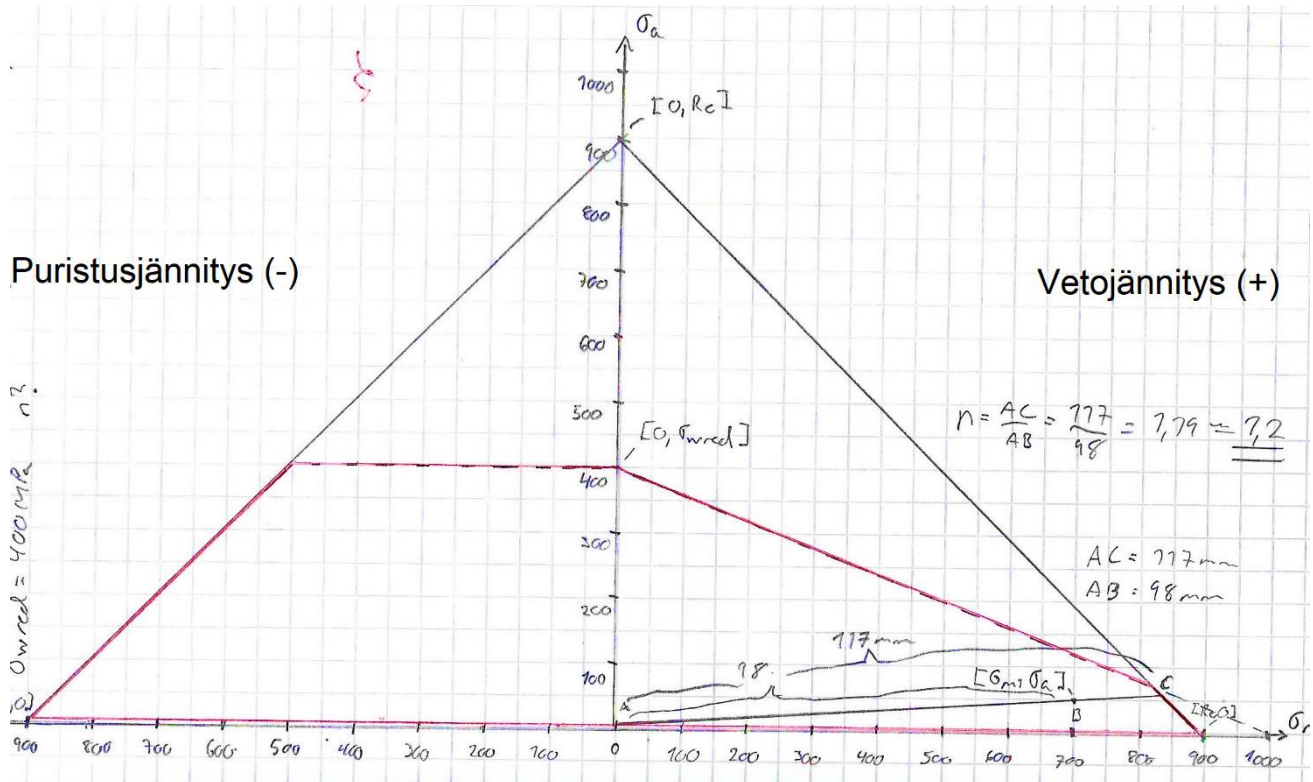
jossa

σ_m on keskijännitys

σ_{max} on ylempi rajajännitys

σ_{min} on alempi rajajännitys

Olkoon esimerkiksi σ_{max} 200 MPa ja σ_{min} kuulapommituksen aiheuttama puristusjännitys -300 MPa. Tällöin, kun lasketaan kaavalla (2) saadaan keskijännitykseksi -50 MPa, joka on vielä puristuspuolella. Väsymisen kannalta puristusjännitys on suotuisampi vaihtoehto verrattuna vetojännitykseen. Tämän voi todeta myös yleisistä väsymislujuuspiirroksista, kuten Haigh -diagrammista kuviossa 11.



Kuvio 11. Eräs Haigh diagrammi

Määrittelemättömälle materiaalille piirretty Haigh- diagrammi kuviossa 11. näyttää S355 - teräksellä ja monilla muilla teräksillä hyvin samankaltaiselta. Huomionarvoista on se, miten punaisella rajatulla ns. "ikuisen keston" alueella jännitysamplitudit laskevat keskijännityksen ollessa vetopuolella (positiivinen). Ja puristuspuolella (negatiivinen) jännitysamplitudien voidaan sallia olevan korkeammalla tasolla pidempään. Materiaali kestää siis väsymisen suhteen paremmin puristus-, kuin vetojännitystä.

Vapaasti muotoiltuna ja mutkia oikoen voi mieltää kuulapommituksen ikään kuin "esijännittävän" pinnan negatiivisella jännityksellä ja koska jännitykset ovat suoraan summautuvia näin kuulapommitus ehkäisee haitallisemman positiivisen vetojännityksen vaikutuksia rakenteeseen laskemalla nettojännityksiä.

On myös huomioitava, että todellisessa komponentissa voiman suuruuden lisäksi vaikuttaa lisäksi alueen suuruus, jolla voima vaikuttaa. Tämän vuoksi kuulapommitustilanteessa on tyypillistä, että pintaan pommitetut suuret jännitykset pienellä alalla tasapainottavat "sisäisiä" matalia jännityksiä suurella alalla. (Kirk 1999, 350.)

3.5 Prosessin hallinta

Erilaisilla prosessiparametreilla ja työkappaleen materiaalilla vaikutetaan kuulapommitusprosessin lopputulokseen.

Kritzler ja Wübbenhorst (2002, 347) esittävät Metal Improvement Companyn kuvaajan, jossa on jäännösjännitys puristusjännityskerroksen syvyyden funktiona. Kuvaajaan vaikuttavien parametrien (ts. prosessiin vaikuttavien parametrien) todetaan olevan:

- kuulan nopeus [m/s]
- kuulan koko [mm]
- peitto [%]
- kuulan kovuus [HRC]
- komponentin kovuus [HRC]

3.5.1 Kuulan nopeus

Kuulan nopeus on luultavasti tärkein yksittäinen parametri kuulapommitusprosessissa, koska sitä voidaan helposti muuttaa säätämällä joko painetta tai sinkopyörän pyörimisnopeutta laitetyypistä riippuen (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 347). Nopeus vaikuttaa suoraan yksittäisen partikkelin sisältämään kineettiseen energiaan, joka tekee työtä komponentin muokkautuessa.

3.5.2 Kuulan koko

Kuulan koko vaikuttaa intensiteettiin, peittoasteeseen ja puristusjännityskerroksen syvyyteen. (Kirk 2009, 24.) Erikoislujissa komponenttimateriaaleissa kuulakoon kasvattaminen johtaa yleensä huomattavaan puristusjännityskerroksen kasvuun. Pinnan vetojännitykset säilyvät lähes muuttumattomina, kuitenkin puristusjännitykset ja puristusjännityskerroksen syvyys kasvavat. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 347.)

Pehmeämmässä komponenttimateriaaleissa, kuten alumiinissa puristusjännityskerroksen syvyys ja pinnanlaatu muuttuvat siirryttäessä kuulakoosta toiseen. Suurempi kuulakoko tuottaa paremman pinnanlaadun, kun sillä pommitetaan sama intensiteetti. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 347.)

3.5.3 Peitto

Peitto on pommituksessa käytetty prosessiparametri, joka kuvaa prosenttilukuna, kuinka suuri osa määrätystä pinta-alasta on painaumien peittämä. Yli 100 % peittoasteet määritellään 100 % peittoon vaaditun ajan kerrannaisina. Esimerkiksi, jos ajassa T on pommitettu komponenttiin 100 % peitto, tällöin 200 % peitto vaatii pommitusajan 2T. (Cammett 2007, 8.)

Käytännön näkökulmasta nk. ”täysi peitto” ja 100 % peitto voidaan ajatella olevan sama asia. Kuitenkin todellisuudessa näissä on pieni ero ja ”täysi peitto” määritellään 98 % peittoasteena. Tämä johtuu siitä, että korkeilla peittoasteilla peittoprosentin määrittelemineen on käytännössä hyvin vaikeaa ja 100 % ja 98 % peiton välillä on vaikeaa havaita eroavaisuuksia. (Cammett 2007, 8.)

Pommituksessa tapahtuvien osumien kumulatiivinen vaikutus kasvattaa pinnan peittoa. Kuulat osuvat pintaan satunnaisiin paikkoihin ja pommituksen edetessä yhä suurempi osa komponentin pinnasta on painaumien peittämä. Mitä pitempään prosessi kestää, sitä enemmän painaumia alkaa syntyä myös limittäin, koska painaumia on jo komponentin pinnassa paljon. Prosessin loppuvaiheilla lähes kaikki painaumet osuvat limittäin edellisten painaumien kanssa. (Kirk 1999, 357.)

Peiton mittaaminen on haastavaa ja käytännössä sekä tilastollisesti on mahdotonta sanoa, milloin komponentin pinta-ala on täysin peittynyt painaumista johtuen kuulien osumien satunnaisesta luonteesta. (Kirk 1999, 357.)

Työstettävän komponentin pinta muokkauslujittuu paikallisesti joka ikisestä kuulasta. Koska painaumet limittyvät, se tarkoittaa myös, että limittyneissä kohdissa komponentti on altistunut enemmän kuin yhdelle muodonmuutokselle. Ennen pitkään nämä lokaalisti muokkauslujittuneet alueet ovat kärsineet niin paljon plastista muodonmuutosta, että ne alkavat säröillä. (Kirk 1999, 357.)

Asiakkaan kannalta usein tärkeämpää onkin peiton tasalaatuisuus kuin se, onko peitto tasan 100 %. Mikäli peitto vaihtelee suuresti tämä tarkoittaa myös sitä, että asiakkaan vaatima intensiteetti vaihtelee komponentin pinnalla suuresti, koska kuulat eivät ole pommittaneet pintaa tasaisesti. (Kirk 1999, 357.)

Mikäli pommitettavan komponentin materiaali ei ole täysin sama kuin Almen-liuskan (SAE 1070 jousiteräs) on peitto todettava aina itse komponentista eikä Almen-liuskaa tutkimalla sillä osumakulma, komponentin geometria ja -kovuus vaikuttavat kaikki lopulliseen peittoasteeseen. Kuten standardissa SAE J2277 on kuvattu, yleisin menetelmä peiton määrittämiseen on optinen tarkastelu 10–30 kertaisella suurennoksella. (Cammett 2007, 8.)

3.5.4 Kuulan kovuus

Kuulamateriaalin tulisi olla vähintään yhtä kovaa tai kovempaa kuin komponentin materiaalin. Kuulamateriaalin kovuus vaikuttaa erityisesti puristusjännityskerroksen jännitystilaan ja syvyyteen. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 345–346.)

3.5.5 Komponentin kovuus

Kovuus yleisesti ottaen on mittari sille, miten helposti jähmeitä kappaleita voi plastisesti muovata eli toisin sanoen, miten hyvin materiaali vastustaa plastista muodonmuutosta. Tähän vaikuttavat eniten dislokaatiot, joita käsiteltiin lyhyesti luvussa 2.4.5. (Gilman 2009, 7.)

Kovuus tulee huomata erottaa lujuudesta, joka on oma materiaaliominaisuutensa. Määritellään kovuus kuitenkin vielä hieman tarkemmin, sillä kovuus luonnollisesti vaikuttaa merkittävästi siihen, millainen kuoppa materiaaliin syntyy pommituksessa.

Kovuutta voi hahmottaa hyvin miettimällä esim. kovuusmittausta. Mittauksessa kappaleeseen kohdistetaan vakioidun kärjen kautta vakioitu voima (esim. Brinell ja Rockwell B & C mittauksissa pallon muotoinen kärki). Tällöin kappaleen pintaan jää palautumaton muodonmuutos. Kokeessa mitataan tyypillisesti sitä, kuinka syväälle kärki painuu materiaaliin tällä vakiovoimalla. (Gilman 2009, 8.)

Tällöin mittauksen aikana kappaleen pinnassa vaikuttaa hyvin samankaltainen mekanismi kuin pommituksessa, jossa kuoppa/painauma muodostuu kappaleen pintaan. Myös tässä

vaikuttavat mekanismit ovat elastinen venymä ja plastinen muodonmuutos, ja tapahtumaa voi selittää osittain Hertzin pintapaineen avulla. (Gilman 2009, 8.)

Näin ollen komponentin kovuus vaikuttaa merkittävästi siihen, millaisia kuoppia komponentin pintaan syntyy pommituksen aikana ja tätä kautta puristusjännitystilaan (väsymiselinikään).

Tämän perusteella ei kuitenkaan sovi tehdä johtopäätöstä, että kovat materiaalit eivät sovellu kuulapommitettaviksi, vaan materiaali täytyy huomioida pommituksessa.

3.5.6 Intensiteetti

Intensiteetti määräytyy Almen liuskan perusteella. Kyseessä on kylmävalssattu suorakaiteen muotoinen liuska jousiterästä SAE 1070, joka on päästökarkaistu kovuuteen välillä 44–50 HRC. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 349.)

Testiliuskoja on saatavilla kolmea eri kokoa: N, A tai C. Usein tämä valinta tehdään loppukäyttäjän eikä kuulapommittajan toimesta. Kaikilla kolmella liuskatyypillä on suurin piirtein samat päädimensiot välillä 75,6 mm–76,6 mm leveyttä ja 18,85 mm–19,05 mm korkeutta. Suurin ero on liuskojen välisessä paksuudessa. (Kirk. 2013, 24.)

N	A	C
0,76 mm - 0,81 mm	1,27 mm - 1,32 mm	2,36 mm - 2,41 mm

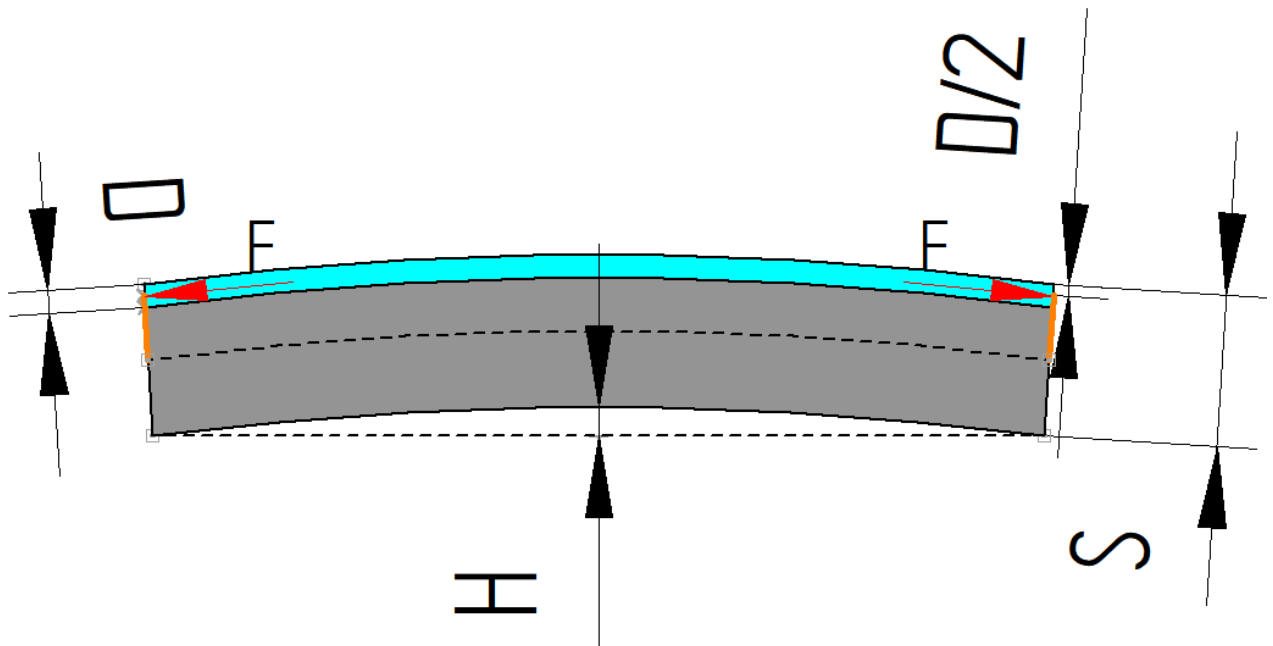
Taulukko 1. Almen testiliuskojen paksuuserot (Kirk, 2013)

Suurin osa pommituksesta suoritetaan A-liuskoilla. Kuitenkin A-liuskat ovat myös ainoita, joille on määritelty suositeltavat ala- ja ylärajat (0,1 mmA – 0,6mmA), joiden ulkopuolella tuloksia ei voi pitää luotettavina vaan on käytettävä toisia liuskatyyppejä. (Kirk. 2013, 24.)

Nämä Almen liuskat kiinnitetään ruuveilla ennalta määrättyyn pitimeen prosessin ajaksi. Prosessin aikana liuska pommitetaan vain toiselta puolelta toisen ollessa suojassa pidintä vasten. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 349.)

3.5.7 Liuskan taipumisen aiheuttava mekanismi

Pommitetun pinnan plastinen venyminen (kylmämuokkauksen vuoksi) pakottaa liuskan taipumaan pysyvästi. Tätä taivutusta liuska luonnollisesti vastustaa aiheuttaen jäännöspuristusjännityksen. Tämä jäännöspuristusjännitys pommitetulla pinnalla aikaansaa ulospäin suuntautuvan voiman. Voimakomponentti ei kulje täysin liuskan keskilinjalla vaan karkeasti puolessavälissä jäännöspuristusjännityskerrosta, joten se aikaansaa momenttia, joka pakottaa liuskan taipumaan. (Kirk 2015, 26.)



Kuvio 12. Momenttia tuottava voima

Kuviossa 12. pommituksen aikaansaama puristusjännityskerros on merkitty vaaleansinisellä värillä. Tämän kerroksen plastinen venyminen aiheuttaa voiman F , joka vaikuttaa oranssin varren kautta luoden momenttia liuskan keskilinjalle.

Momentin vaikutuksesta liuska, jonka paksuus on S , taipuu siirtymän H verran. Taipuma H on samalla myös pommituksen intensiteetilukema. Intensiteetti merkitään Euroopassa millimetreinä ja se mitataan erityisesti tähän tarkoitukseen suunnitellulla Almen mittauslaitteella, joka on käytännössä mittakello erityisessä pitimessä johon liuskan voi asettaa.

Liuskan taivuttamiseen vaadittua voimaa F voidaan approksimoida esimerkiksi elementtimenetelmällä simuloimalla. Tällä tavoin ei toki saada absoluuttisen tarkkaa tulosta, mutta saadaan hyvä käsitys voiman suuruusluokasta.

Liuskan dimensiot valittiin taulukosta, jonka Shotpeener-lehti on julkaissut vuonna 2001. Valinta osui Volvo Aero Corporationin kohdalle, koska tämä entinen pohjoismainen puolustus- ja ilmailualan yritys käyttää tuotannossaan metristä järjestelmää. Tällöin liuskan dimensiot on pyöristetty mukaviksi tasalukemiksi. Liuskan dimensiot ovat näkyvillä taulukossa 2.

Leveys	Korkeus	Paksuus	Tasomaisuus
76 mm \pm 0,4	18,95 mm \pm 0,1	1,29 mm \pm 0,01	\pm 0,013 mm

Taulukko 2. Almen A-liuskan dimensiot Volvo Aero Corp -liuskalle (Shotpeener -lehti, 2001)

Liuska tuettiin molemmista päistään siten, että translaati vapausasteet lukittiin ja rotaatio vapausasteet jätettiin vapaiksi. Kuormitus annettiin momenttina, joka laskettiin kaavalla (3).

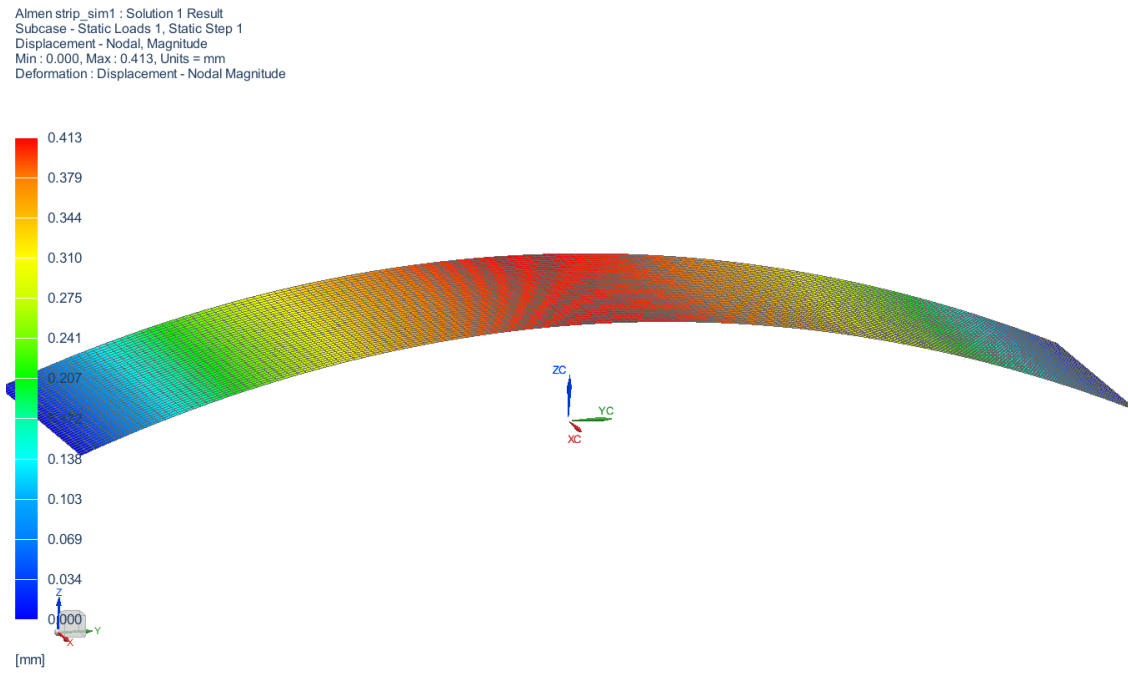
$$\left(\frac{S}{2} - \frac{D}{2}\right) * 10^{-3} m * F \approx 0,385 Nm \quad (3)$$

jossa

S on liuskan paksuus (taulukosta 1. 1,29 mm)

D on puristusjännityskerroksen paksuus (oletettu laskussa 0,2 mm)

F on voima, joka aiheuttaa momenttia (kokeilemalla päädyttiin 700 N voimaan, joka aiheuttaa n. 0,4 mm siirtymän, jollainen todetaan kuviossa 15. olevan mahdollinen)



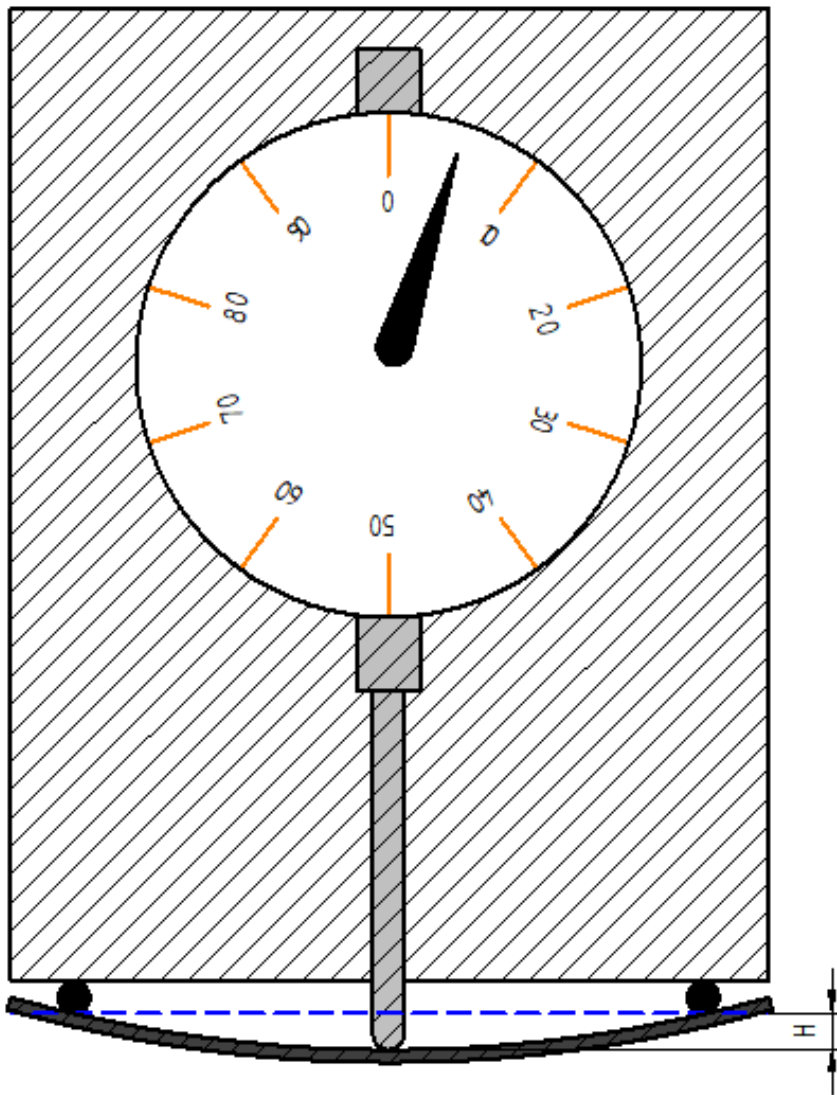
Kuvio 13. Liuskan taipumisen simulointi elementtimenetelmällä

Kuviossa 13. näkyy em. simuloinnin siirtymätulos. Tällä tavoin saatiin jonkinlainen käsitys voiman suuruusluokasta, joka liuskaa taivuttaa sekä siitä millaisia voimia puristusjännityskerros voi tuottaa.

3.5.8 Intensiteetin mittaus

Kuten luvussa 3.5.6 todettiin, intensiteetti määräytyy Almen-liuskan perusteella. Käytännössä taipuman mittausta tapahtuu erityisellä Almen-mittauslaitteella. (Kritzler & Wübbenhorst 2002, 349.)

Kuviossa 14. esitetään mittauslaitteen toimintaperiaate. Mittalaite on käytännössä tavallinen mittakello, jolle on rakennettu erityinen pidin. Taipunut liuska asetetaan pitimessä olevia vasteita vasten ja magneetti pitää liuskan paikallaan mittauksen ajan. Mittakello on nolattu mittapalan avulla sinisellä katkoviivalla piirretylle liuskan teoreettiselle keskijalalle. Näin liuskan taipuman H voi nähdä suoraan mittakellon asteikolta, kun liuska on kiinni pitimessä. Tämä lukema ilmoitetaan suoraan intensiteettinä esimerkiksi, jos lukema olisi 0,46 mm ja mitattava liuska olisi Almen A-liuska ilmoitettaisiin mittaustulokseksi 0,46 mmA.



Kuvio 14. Piirros Almen-mittauslaitteesta

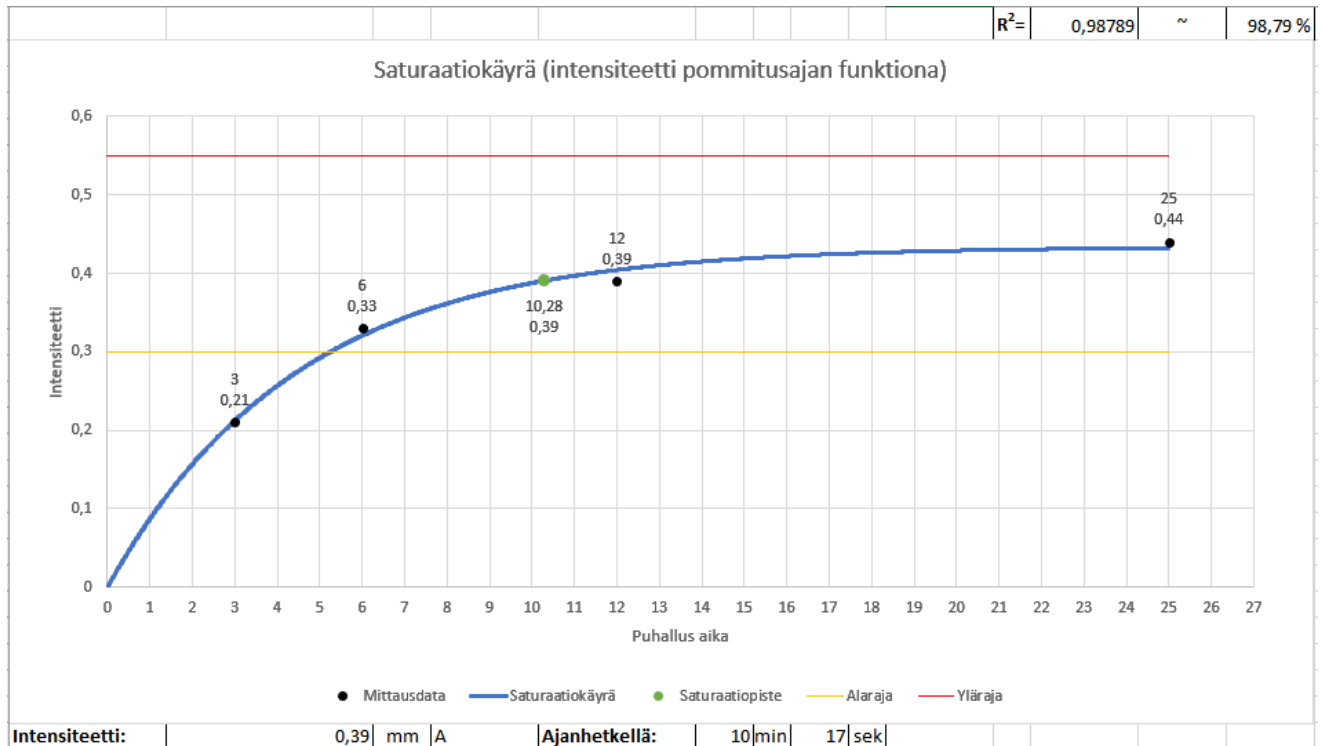
Jos intensiteetin haluaa muuttaa SAE-standardin mukaiseksi, täytyy se kertoa 40:llä. Esimerkiksi $0,1 \text{ mmA} = 4A$. (Niku-Lari 1996, 3.)

Kirkin (2013, 24) mukaan karkea approksimointi eri liuskoilla saatujen intensiteettien välillä voidaan suorittaa seuraavasti:

- C-liuskan taipuma * 3,5 = A-liuskan taipuma
- A-liuskan taipuma * 3 = N-liuskan taipuma

3.5.9 Saturaatiokäyrä & intensiteettilukema

Intensiteettilukema on määrätty piste tasokoordinaatistossa saturaatiokäyrällä. Y-akselilla on pommitettu intensiteetti (mitattu Almen mittauslaitteella) ja X-akselilla on aika. Intensiteettilukema osuu käyrällä siihen ajanhetkeen, jolloin pommitusajan tuplaaminen nostaa intensiteettiä enää n. 10 %. (Kirk 2015, 26.)



Kuvio 15. Eräs saturaatiokäyrä

Kuviossa 15. käyrällä sijaitseva vihreä piste on intensiteettilukema (ts. saturaatiopiste). Jokaiselle materiaalille ja eri pommitusparametreille on piirrettävä oma käyränsä, jonka avulla intensiteettilukema selviää. Tämän jälkeen pommittaminen ei ole enää mielekästä, koska saturaatio alkaa vaikuttaa niin voimakkaasti, että lisäprosessointi ei tuota merkittävää hyötyä. Yllä esitetyn käyrän materiaalin pommittaminen ei olisi siis enää noin 10,5 minuutin jälkeen hyödyllistä.

3.5.10 Mitä intensiteetti oikeastaan on?

Ehkä tärkein ja helpoiten todennettavissa oleva mittari on kuulapommituksessa intensiteetti. Kuitenkin on hyvä pohtia, mitä itseasiassa mitataan silloin, kun mitataan intensiteettiä ja mitä se tarkoittaa?

Peiton kannalta määritelmä oli melko selkeä ja yksiselitteinen: kuinka suuri osa komponentin pinta-alasta on pommitettu ainakin kertaalleen prosessin aikana?

Intensiteetti kuitenkin voidaan määritellä ja ymmärtää usealla tavalla. Asiakkaille intensiteetti usein tarkoittaa tiettyä pistettä ko. prosessille piirretyllä saturaatiokäyrällä. Mikäli määritettä intensiteetille pyrkii hakemaan verkon hakukoneilla, saa usein vastaukseksi: "Intensiteetti on kuulavirtauksen sisältämän energian mittari". Tämä virheellisesti viittaa siihen, että intensiteetti kasvaisi kuulavirtauksen massavirran mukana ja johtaa väärinkäsityksiin. (Kirk 2016, 26.)

Oikeampi määritelmä intensiteetille voisi olla: "Yksittäisten partikkelien, jotka kollektiivisesti synnyttävät pommituksen massavirran keskimääräinen kyky tuottaa lommo kappaleeseen". Ei ole siis merkitystä intensiteetin kannalta onko massavirrassa yksi vai miljoona partikkelia per sekunti (peiton kannalta tällä tietenkin on merkitystä). Merkitystä on yksittäisten partikkelien keskimääräisellä lommontuottokyvyllä. (Kirk 2016, 26.)

Almen liuskojen avulla voi siis vertailla eri parametreille asetettujen prosessien keskimääräistä lommontuottokykyä tai lommontuottokyvyn muutosta muutettaessa parametreja. Kyseessä on siis kvantitatiivinen mittari. Kuviossa 15. esitetyllä käyrällä kaikkien prosessin aikana kappaleeseen osuneiden kuulien keskimääräinen lommontuottokyky on siis 0,39 mmA.

Tämä ei kerro mitään varsinaiseen työkappaleeseen jäävistä jäännöspuristusjännityksistä, jotka varsinaisesti pidentävät komponentin väsymiselinikää, sillä komponentti voi olla mitä tahansa pommitukseen soveltuvaa materiaalia ja testiliuska on aina jousiterästä.

Lommontuottokykyyn vaikuttavat oleellisesti monet asiat, kuitenkin helpointa intensiteetin kasvattaminen lienee pidentämällä prosessointiaikaa, mikäli ollaan vielä saturaatiopisteen alapuolella.

Lisäksi kuulan nopeus ja massa vaikuttavat singotun kuulan sisältämään kineettiseen energiaan, joka tekee työtä törmäystilanteessa, joten niihin vaikuttamalla voidaan vaikuttaa myös intensiteettiin. Kuitenkin kuulapommitus ja sen lopputulos on usein kompromissi monien eri muuttujien kesken.

Monista tärkeistä parametreista ehkä tärkein on juuri kuulan nopeus. Tämä johtuu siitä, että liikkuvan partikkelin kineettisen energian voi laskea kaavalla (4). (Kirk 1999, 350)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

jossa

E on liike-energia

m on kuulan massa

v on kuulan nopeus

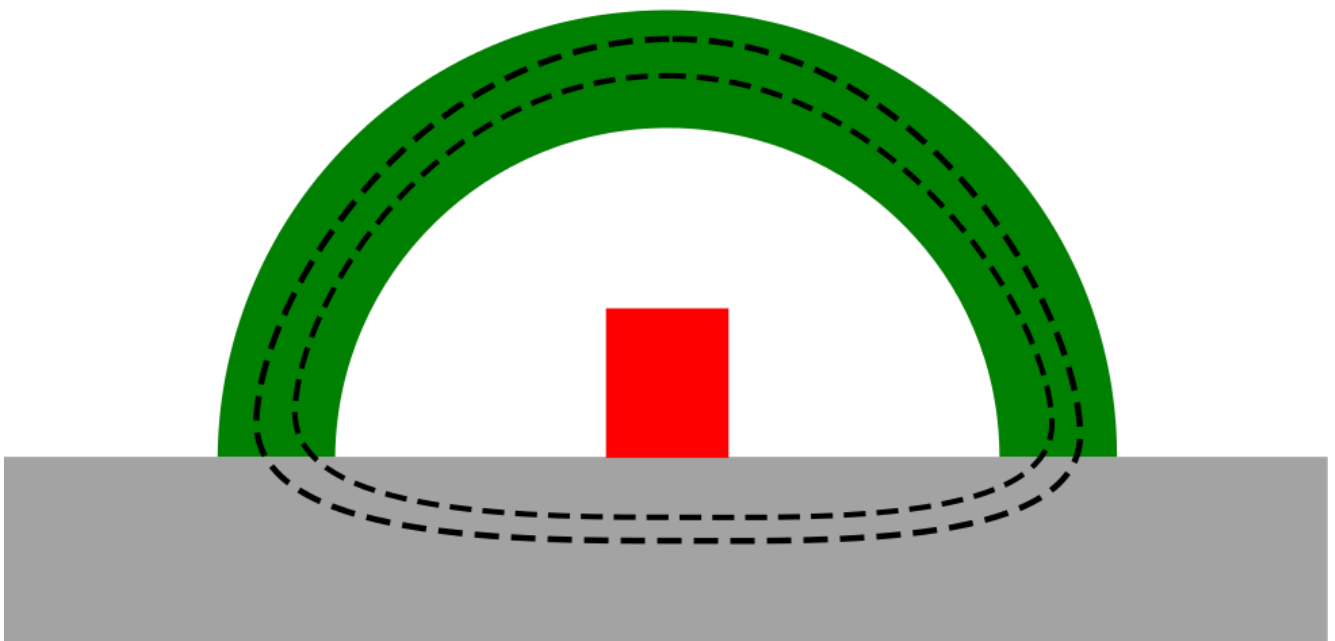
3.6 Jäännöspuristusjännitysten mittaus

Kappaleeseen lopulta syntyvien jäännöspuristusjännitysten mittaus vaatii melko korkeatasoista osaamista ja laitteistoa. Käytännössä kävi ilmi, että pinnan puristusjännitystilaa voi mitata ainoastaan laboratoriossa ja instrumenttien käyttö vaatii erikoisosaamista. Menetelmiä puristusjännityskerroksen jännitystilan mittaamiseksi ei käydä tässä työssä kovin syvällisesti läpi, mutta tutustutaan kuitenkin yleisellä tasolla eräisiin NDT-menetelmiin, joita voidaan käyttää jännitystilan todentamiseksi.

3.6.1 Barkhausenin kohina

Magneettisella Barkhausenin kohinalla (MBN) on potentiaalia NDT-työkaluna kovuuden, muodonmuutoksen, jäännösjännityksen ja mikrorakenteen mittaamiseen. Menetelmä perustuu alkeismagneettien diskreetteihin liikkeisiin ferromagneettisessa materiaalissa, johon vaikuttaa ulkoinen magneettikenttä. (Bhasin, Kumar, Singh, Vaze 2011, 71)

Jos otamme vaikkapa pienen rautakappaleen, sen sisällä on monia pieniä magnetoituneita alueita, joissa magnetisaatio osoittaa kussakin eri suuntaan. Kun laitamme tällaisen kappaleen magneettikenttään, näitä alueita erottavat rajapinnat lähtevät liikkeelle. Barkhausenin kohina syntyy näistä liikkeistä. (Laurson 2019)



Kuvio 16. Barkhausenin kohina anturi (Wikipedia, 2007)

Kuviossa 16. vihreällä on korostettu ulkoinen magneettikenttä ja punaisella induktiivinen anturi, joilla testataan harmaata koekappaletta.

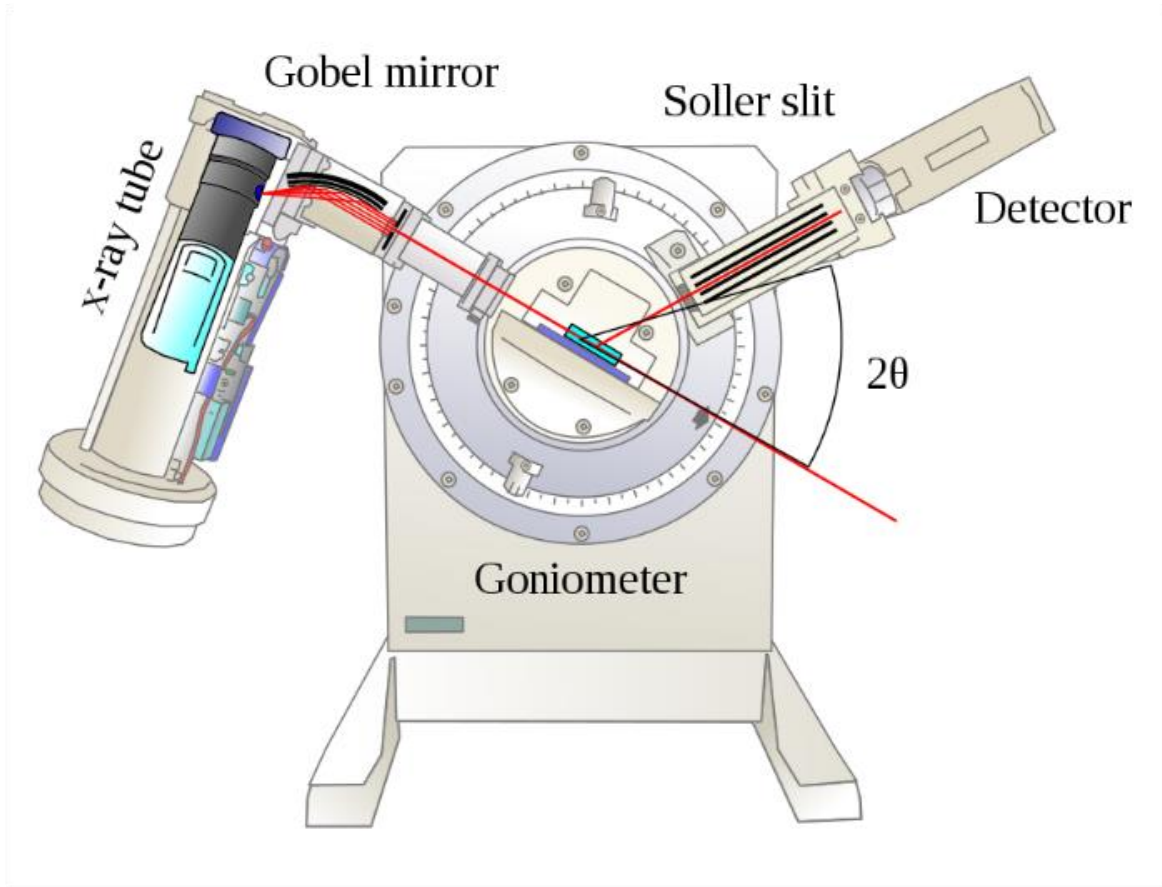
Käytännön haasteena Barkhausenin kohinamittauksissa mainittakoon, että pieninkin välys anturin ja testikappaleen välillä voi vaikuttaa tuloksiin. Joten jokaiselle mitattavalle geometrialle olisi suositeltava olla oma muotoiltu sensorinsa. Yleismallinenkin anturi on olemassa, mutta tällöin sensoria tai kappaletta ei voi liikutella sensorin rakenteen vuoksi. (Wartiainen 2018, 17.)

3.6.2 Röntgendiffraktio

Röntgensäteet ovat elektromagneettista säteilyä aallonpituudeltaan luokkaa 0,01–100 Å (Ångström). Röntgensäteet, joita käytetään röntgendiffraktiossa ovat luokkaa 1 Å. Kun monokromaattinen röntgensäde osuu komponenttiin absorptio ja muiden ilmiöiden ohella syntyy hajasäteilyä (siroutuneita röntgensäteitä) samalla aallonpituudella, kuin alkuperäinen säde oli. Tällainen siroutuminen tunnetaan myös nimillä kimmainen sironta tai koherentti sironta. Siroutuneet röntgensäteet eivät jakaudu avaruuteen tasaisesti, vaan komponentin elektronien jakauman funktiona ja kuvaavat tällä tavoin komponentin rakennetta. (He 2009, 13).

Röntgendiffraktiota käytetään hilatasojen etäisyyksien mittaamiseen. Etäisyyden avulla on mahdollista laskea jäännösjännitys materiaalissa. Diffraktiokuvioista on mahdollista löytää diffraktiopiikit. Kun komponentin jännitystila ei ole nolla se aiheuttaa diffraktiokuvion siirtymän, kun hilatason etäisyys muuttuu (Wartiainen 2018, 11).

Kuviossa 17. on nähtävissä röntgendiffraktiolaitteiston piirros, johon on merkitty röntgensädeputki, gobel peili, sollar lovi, ilmaisin ja goniometri.



Kuvio 17. XRD-laitteisto (Wikipedia, 2020)

4 OPINNÄYTETYÖSOPIMUKSESSA TILATUT TYÖT

Tässä luvussa esitellään siltä osin, kun tieto on julkista yritykselle tehty työ ja sen tulokset. Tehdyt työt pohjaavat opinnäytetyösopimuksessa sovittuihin tehtäviin.

4.1 Markkinointimateriaali

Opinnäytetyössä yritys halusi käyttöönsä markkinointimateriaalia, jossa kuulapommitus ja sen hyödyt käydään läpi lyhyesti ja ytimekkäästi. Lyhyen harkinnan jälkeen päädyttiin PowerPoint -muotoiseen esitykseen, joka on nopea ja selkeä esittää mahdollisille asiakkaille esim. yrityksen toimitiloissa.

Hyvin samankaltaisesti, kuin tässä työssä materiaalissa käydään läpi väsymisvaurioiden aiheuttamat haitat ja kuulapommituksen niihin tarjoamat ratkaisut sekä yrityksellä kuulapommitukseen käytössä olevaa kalustoa.

4.2 Testaustietokanta ja mittauspöytäkirja

Sopimuksessa mainittujen testaustietokannan ja mittauspöytäkirjan lisäksi yritys halusi piirtää saturaatiokäyriä helposti. Kaupallisiakin ohjelmistoja kuulapommitukseen liittyen on saatavilla, mutta tässä tapauksessa päädyttiin rakentamaan itse tietokanta ja käyrän sovitus jollekin tutulle alustalle.

Pienen pohdinnan jälkeen päädyttiin kokeilemaan MS Access- tai Excel-toteutusta tietokannasta, johon kirjataan pommituksessa käytetyt parametrit ja niitä vastaavat tulokset. Tällä tavoin on myöhemmin helppo tarkastaa millaisilla parametreilla mitäkin materiaaleja on aiemmin pommitettu ja millaisiin tuloksiin ko. parametreilla päädyttiin. Saturaatiokäyrän piirtoon ei otettu vielä tässä vaiheessa kantaa, vaan haluttiin ensin toteuttaa tietojen kirjaus ja säilytys.

4.2.1 Tietokannan rakentamiseksi sopivimman ohjelmiston selvitys

Jo selvitystyön alussa oli selvää, että tietokanta toteutettaisiin toisella kahdesta ohjelmistosta: Access tai Excel. Tämä siksi, että aikaa tai tietoteknistä osaamista toimivan ohjelmiston ja graafisen käyttöliittymän rakentamiseksi ei käytännössä ollut ja ko. ohjelmat (varsinkin Access) pystyvät käsittelemään suuria tietomääriä näppärästi. Päätettiin tutkia hieman ohjelmistojen ominaisuuksia ja käytettävyyttä, jotta valinnan tekeminen helpottuu.

4.2.2 Excel

Excel on maailman käytetyin taulukkolaskentaohjelma sekä osa Microsoft Office -pakettia. Muitakin taulukkolaskentaohjelmia on saatavilla, mutta Excel on ylivoimaisesti suosituin. Suuri osa Excelin suosiosta selittyy sillä, että se on niin monipuolinen. Excelin vahvuus on toki numeeristen laskutoimitusten suorittamisessa, mutta Excel on myös hyvin käytännöllinen moniin epänumeerisiin sovellutuksiin. (Walkenbach 2010, 3.)

Esimerkkejä mahdollisista Excel-sovelluksista:

- "Numeron murskaus" (Budjetit ja analyysit)
- Taulukoiden luonti
- Listojen järjestäminen (rivi- sarake layout tehokkaaseen listaamiseen)
- Muun tiedon käyttö (Mahdollisuus tuoda tietoa monista muista lähteistä)
- Graafisten kuvaajien luonti (Suurten datamäärien visualisointi)
- Monimutkaisten työkulkujen automatisointi (VBA makrot mahdollistavat työkulkujen nauhoittamisen, muokkaamisen ja toteuttamisen yhdellä painikkeella)

Exceliä opetetaan usein jo toisen asteen koulutuksessa, joten se on monille tuttu ohjelma. Kyseessä on kuitenkin nimenomaan taulukkolaskentaan alun perin tarkoitettu ohjelmisto, eikä tietokanta ja data-analyysi ohjelmisto. Tämän vuoksi Excelissä on rajoitteensa suurien datamäärien kanssa työskenneltäessä sekä tiedon eheyden säilyttämisessä.

4.2.3 Access

Access sisältää kuusi osa-alueita: taulukot, kyselyt, lomakkeet, raportit, makrot ja moduulit. Näistä taulukot toimivat varastoina joihin tieto säilötään, muut tietokannan objektit hakevat tiedot taulukoista (Alexander 2010, 13).

Vaikka Exceliä usein pidetään tärkeimpänä dataanalyysi työkaluna, on siinä joitain synnynnäisiä ominaisuuksia, jotka usein johtavat ongelmiin skaalautuvuuden, analyttisen prosessin läpinäkyvyyden sekä varsinaisen tietokannan ja tietojen sekoittumisen kanssa. Access sisältää useita analyysityökaluja, jotka voivat auttaa välttämään näitä Excelin valuvikoja (Alexander 2010, 12).

Ensinnäkin Access voi käsitellä hyvin suuria tietojoukkoja ja siinä ei ole ennalta määriteltyä rivirajoitetta. Tästä johtuen Accessin skaalautuvuus on omaa luokkaansa Exceliin nähden. Access myös pakottaa läpinäkyvyyteen erottelemalla tiedot (taulukot, kyselyt ja raportit) ja tiedon esityksen toisistaan heti alusta alkaen ja lisäämällä rajoite ehtoja, jotka suojaavat tietoja huonoilta prosesseilta ja työtavoilta (Alexander 2010, 12).

Access on luotu tietokantaohjelmistoksi alusta alkaen ja näin ollen esimerkiksi taulukoita ei voi muokata visuaalisesti samalla tavalla kuin Excelissä. Taulukot ovat yksinkertaisesti vain tietovarastoja ja tiedot haetaan taulukoista ulos esim. lomakkeilla tai raporteilla esitystä ja analyysiä varten.

Tietokannat myös linkitetään toisiinsa ja ohjelma tuntee eri tietueiden väliset yhteydet; esim., jos kirjataan Accessiin tilaus ja epähuomiossa kirjataan asiakkaan tiedot väärin ohjelma antaa huomautuksen, ettei ko. asiakasta löydy asiakastaulukosta. Excelissä virheen havainnointi olisi huomattavasti monimutkaisempaa tehdä. Tällä tavoin Access auttaa käyttäjää säilyttämään tiedon eheyden.

4.2.4 Ohjelmiston valinta tietokannan rakentamiseksi

Kumpaakin ohjelmaa testattiin ja lopulta päädyttiin Exceliin lähinnä siitä syystä, että se on entuudestaan tuttu työn tekijälle, työn tilaajalle ja todennäköisesti muillekin tietokannan käyttäjille. Tämä nopeuttaa työn tekemistä ja helpottaa lopputuloksen käyttöönottoa sillä ei ole tarvetta opetella Accessin käyttöä vain siitä syystä, että tietokanta rakennettiin Accessiin.

4.3 Tietokannan luominen

Ohjelman valikoiduttua tietokannan rakentamiseksi alettiin hahmotella mitä tietoja tietokantaan tulisi kirjata ja millä tavalla. Tässä vaiheessa päädyttiin myös siihen, että yhdistetään tietokanta ja mittauspöytäkirja samaan tiedostoon käytön sujuvoittamiseksi.

Prosessin aikana mitattavat suureet ovat jokseenkin samat kuin luvussa 3.5 on kuvailtu. Suureet valittiin siten, jotta tehdystä pommituksesta jäisi mahdollisimman selkeät tiedot ylös sikäli, kun niitä voidaan mitata.

Excel-tiedostoon luotiin omat välilehdet pommitettaville materiaaleille, kuulan materiaaleille, testaustietokannalle, laadunvarmistukselle sekä saturaatiokäyrälle ja mittauspöytäkirjalle.

- Pommitettavat materiaalit -välilehti
 - Tähän välilehteen kerättiin talteen pommitettavien materiaalien nimikkeet ja nimelliskovuudet. Prosessin kannalta on oleellista tietää mitä materiaalia osa oli, jotta voidaan muodostaa kuvaa eri materiaalien pommitettavuudesta.
- Kuulan materiaali -välilehti
 - Tähän välilehteen kerättiin vastaavasti ylös kuulien nimikkeet, kovuudet ja halkaisijat.
- Pommitus testit -välilehti
 - Liitteessä 1 esitetyssä kuviossa 19. voi nähdä kuvakaappauksen lopullisesta välilehdestä. Välilehden periaatteet ja toiminta esitellään tarkemmin liitteessä 1.
- Laadunvarmistus -välilehti
 - Tämä välilehti kerää ”Pommitus testit” välilehdeltä hyväksytyjä tuloksia. Tällä tavoin hyväksi havaitut parametrit ovat yhdestä paikasta helposti tarkastettavissa tarvittaessa.

4.4 Saturaatiokäyrä ja mittauspöytäkirja

Käyrän piirto lisättiin työhön opinnäytetyösopimuksen solmimisen jälkeen. Kuitenkin myöhemmin kävi ilmi, että käyrän sovittaminen datajoukkoon olikin alun perin oletettua suurempi työ.

Sinänsä funktion sovittaminen datajoukkoon ei ole erityisen haastavaa, mutta haaste syntyi siitä, että haluttiin käyrän olevan täysin samanlainen kuin esim. internetissä saatavilla olevien käyrän piirto sovellusten tuottamat käyrät. Tällöin tuli saada aikaiseksi omaan käyrään samansuuruinen virhe ja oikeaan suuntaan suhteessa muihin käyrän piirto sovelluksiin. Toisin sanoen tuli selvittää käyrän funktio ja parametrit.

Yleensä, kun valitaan saturaatiokäyrän sovitusohjelmaa, on ohjelman täytettävä standardin SAE J2597 ”Computer Generated Shot Peening Saturation Curves” vaatimukset. Yleensä kaupallisesti tai muuten saatavilla olevat ohjelmat sisältävät käyränsovitusyhtälön, jolla on kaksi parametria: a ja b (Kirk 2016, 30).

Euroopassa kyseinen standardi ei ole voimassa, eikä sitä hankittu käyrän piirtämisen tueksi tässä tapauksessa, joten päädyttiin tutkimaan avoimista lähteistä löytyvää tietoa saturaatiokäyrien piirtämisestä.

4.4.1 Saturaatiokäyrän funktio

Saturaatiokäyrän funktiosta paljon julkaisuja tehnyt tohtori Kirk (2007, 26) esittää taulukoituna neljä eri funktiota käyrän sovittamiselle. Funktiot ovat seuraavat:

$$h = a(1 - e^{-b*t}) \quad (5)$$

$$h = a(1 - e^{-b*t^c}) \quad (6)$$

$$h = a(1 - e^{-b*t^c}) + d * t \quad (7)$$

$$h = \frac{a*t}{(b+t)} \quad (8)$$

Funktioiden erot ovat lähinnä siinä, että mitä enemmän funktio sisältää parametreja sitä tarkemmin se korreloi datajoukon kanssa. Funktion sovittamisessa ei siis sinänsä ole absoluuttisesti "oikeita" ja "väriä" ratkaisuja vaan pikemminkin hieman paremmin tai huonommin sopivia. Yleensä paras likiarvoratkaisu on se vaihtoehto, jonka kanssa edetään.

Funktion sopivuutta voidaan tarkastella esim. selitysasteen (R^2) kautta. Tämä on prosenttiluku, joka kuvaa, kuinka monta prosenttia muuttujat selittävät toistensa arvojen vaihtelusta.

On huomautettava, että lähde, jossa kaikki neljä funktiota olivat taulukoituina, löytyi vasta myöhemmin ja aluksi tunnettiin ainoastaan kaava (7) toisen Kirkin julkaisun (2002, 11) perusteella.

4.4.2 Kertoimien ratkaiseminen

Nyt, kun tunnettiin kaava (7) saturaatiokäyrälle täytyi ratkaista kertoimet a, b, c & d. Päätettiin, että ratkaisu tehdään aluksi Octave -ohjelmalla matriisilaskentana, sillä Octave -tiedostoja on erittäin nopea muokata, koska ne ovat tekstipohjaista ohjelmakoodia. Kun löydetään sopiva ratkaisu kertoimille, siirretään menetelmä Exceliin, ettei työn tilaajan tarvitse opetella matriisilaskentaohjelmiston käyttöä käyrän piirtämiseksi.

Kertoimien ratkaisu osoittautui melko haastavaksi, joten päätettiin pyytää ohjausta matematiikan lehtorilta kertoimien ratkaisemisen suhteen.

Kävi melko nopeasti ilmi, että syy ratkaisun haastavuuteen on siinä, että kertoimia sijaitsee kaavassa (7) myös eksponentissa, jolloin niille ei synny lineaarista yhtälöryhmää. Tällöin virheiden neliösumman minimoinnista (käyrän optimoinnista aineistoon) tulee haastavaa. Koetettiin myös "gradient descent" -algoritmia, joka on ensimmäisen kertaluvun iteroiva optimointialgoritmi lokaalin minimin löytämiseen differentioituvalle funktiolle. Kuitenkaan tulokset eivät olleet riittävän hyviä suhteessa tavoitteeseen. Tässä vaiheessa virheiden neliösumman minimointi alkoi tuntua todella haastavalta, joten alettiin epäillä, onko kertoimet hankittu jollain toisella menetelmällä.

Tässä vaiheessa alettiin pohtia sitä, miten alan ohjelmistot sitten ylipäänsä ratkaisevat funktion. Yleisesti ottaen differentiaali- ja integraalilaskenta ei suju tietokoneelta kovin hyvin vaan

kaavoja on yksinkertaistettu voimakkaasti ja ratkaisut vaativatkin yleensä vähemmän hienostuneita algoritmeja ja enemmän laskentatehoa.

Kirkin (2006, 24) mukaan eräs etu saturaatiokäyrien piirtämiseksi tietokoneella on siinä, että saturaatiokäyrän kertoimet ovat suoraan yhteydessä saturaatio intensiteettiin ja -aikaan. Suosittuja kaavoja ovat "kahden parametrin eksponentiaalinen" sekä "kahden parametrin saturaation kasvu". Nämä ovat kaavat (5) & (8).

Kaavassa (8) ei ole kertoimia eksponentissa, joten se pysyttiin ratkaisemaan tavallisella PNS-ratkaisulla. Ratkaisu testattiin ensin Octavessa ja koetettiin sitten viedä Exceliin, mutta lopuksi huomattiin, että vaikka käyrä piirtyy oikein eivät parametrien suhteet jostain syystä vastaa Kirkin ilmoittamia suhteita, jotka ovat nähtävissä taulukossa 3.

Ratkaisua ei siis voinut käyttää, vaikka käyrä saatiin piirrettyä sillä lopullista saturaatio intensiteettiä ja saturaatioaikaa ei saatu oikein laskettua. Tässä vaiheessa käyrän piirto ja kertoimien ratkaisu vaikutti vielä aiempaakin haastavammalta

Päätettiin tutkia, voisiko kertoimet ratkaista Excelissä, vaikka ne sijaitsevatkin eksponentissa kaavassa (5). Tähän sopikin hyvin Excelin Solver -lisäosa, joka sisältää valmiit ratkaisualgoritmit erityyppisille yhtälöille. Varsinkin "Generalized Reduced Gradient - Nonlinear" algoritmi vaikutti laskenta ajaltaan nopealta (muutama sekunti) ja tulosten laadulta lupaavalta.

Päätettiin rakentaa Exceliin Visual Basic for Applications -ohjelmointikieltä käyttäen makro, joka käyttää ratkaisijaa, jotta käyttö olisi nopeaa ja helppoa. Algoritmi asetettiin minimoimaan virheiden neliösummaa muuttamalla funktion parametreja a & b. Tällöin pitäisi olla mahdollista löytää paras likiarvoratkaisu funktiolle.

Ratkaisu vaikutti toimivan hyvin ja kaavalle (5) Kirkin ilmoittamat suhteet, jotka ovat taulukossa 4. vaikuttivat pitävän paikkansa. Ratkaisua kokeiltiin useilla eri datasarjoilla ja kaikilla saatiin verkossa olevaa sovellusta vastaavat tulokset. Ratkaisua voitiin siis pitää onnistuneena.

Siitä miksi Solver-lisäosalla ratkaisu onnistui paremmin ei ole tarkkaa tietoa, mutta epäily on, että Octavella käytetty gradient descent -algoritmi saattaa löytää sellaisen minimikohdan, joka ei ole globaali minimi. Saattaa olla niin, että Excel-lisäosa sisältää jonkinlaista automatiikkaa,

jonka avulla on mahdollista välttää optimointialgoritmin päätyminen "laakson" pohjalle, joka ei ole globaali minimi funktiolle. Kuitenkaan tätä asiaa ei tutkittu tarkemmin vaan tyydyttiin siihen, että ratkaisu toimii ja tulokset ovat yhteneviä referenssin kanssa.

4.4.3 Saturaatio intensiteetti ja -aika

Saturaatiokäyriä piirretään lähinnä sen vuoksi, että niiden avulla voidaan määrittää saturaatiointensiteetti ja -aika. Lisäksi ne kuvaavat havainnollisesti prosessia eli sitä, millä ajanhetkellä keskimääräinen lommontuottokyky alkaa heiketä ja pommitusta ei ole enää mielekästä jatkaa.

Kirk (2006, 24) kertoo, että molemmille yhtälöille pätee se, että saturaatio intensiteetillä ja -ajalla on kiinteä suhde parametreihin a & b. Nämä suhteet on esitetty taulukossa 3.

Kaava nro:	Saturaatio intensiteetti	Saturaatio aika
4	$9a/10$	$2,303/b$
7	$9a/11$	$4,5*b$

Taulukko 3. Kertoimien suhteet saturaatio intensiteettiin & -aikaan (Kirk, 2006)

Em. suhteiden avulla saatiin määritettyä Excelissä saturaatiointensiteetti & -aika. Kuvaaja on nähtävillä kuviossa 15.

4.4.4 Ratkaisun automatisointi

Kuten luvussa 4.4.2 todetaan, päädyttiin ratkaisijaa käyttämään VBA-makrolla. Tämä vähentää virheiden määrää, sillä Excel vaatii aina lähtöarvojen sijoittamista suoraan soluun. VBA makrot, joilla ratkaisu toteutettiin, esitellään liitteessä 2.

Yleisellä tasolla voisi todeta, että käyrän piirto oli suurempi työ kuin aluksi osattiin olettaa. Kokonaisuudessaan ratkaisu söi yhtä paljon aikaa kuin muun taulukon teko.

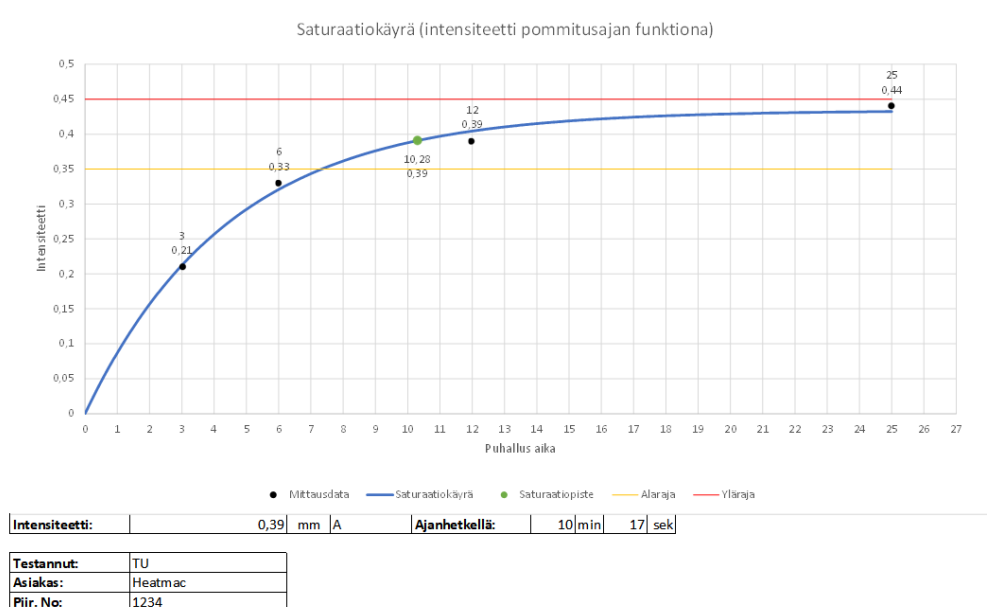
Toisaalta ratkaisuun ollaan lopulta tyytyväisiä ja se täyttää sille asetetut vaatimukset. Lisäksi, mikäli myöhemmin tarvitsee muuttaa tai lisätä ratkaisun toiminnallisuutta, onnistuu sekin makroilla kätevästi, joten jatkokehitys on mahdollista myös opinnäytetyön päätyttyä.

Lopullinen tuotos käyrän piirtämiseen on siis automatisoitu. Rajoitteena mainittakoon, että ratkaisu vaatii tasan neljä mittauspistettä, joka on toki hyvä määrä, sillä pommitusajat pysyvät normaalioloissa yleensä alle 20 minuutissa.

4.5 Mittauspöytäkirja

Käytännössä saturaatiokäyrä ja mittauspöytäkirja vastaavat toisiaan tässä tapauksessa, koska luvussa 3.6 esitetyt menetelmät lopullisten jäännöspuristusjännitysten todentamiseksi ei ole tällä hetkellä käytössä.

Käyrä on asiakkaalle havainnollinen, koska se osoittaa heidän tuotteelleen asetettujen parametrien luoman funktion, sillä käyrään koostuu neljästä Almen-liuskasta tehdyistä mittauksista. Raportti on nähtävillä kuviossa 18.



21.3.2021
14:21

Heatmac Oy

Kuvio 18. Pommitusraportti

5 YHTEENVETO

Työn aikana tekijälle kertyi paljon osaamista ja uutta tietoa koskien kuulapommitusta ja varsinkin sen teoriaa. Vaikka menetelmä ei ole Suomessa yleisellä tasolla kovin tunnettu tai siitä ei ainakaan tiedetä opetettavan esimerkiksi ammattikorkeakouluissa, ovat kuulapommituksella saavutettavat edut merkittäviä, jos pommitus osataan tehdä oikein.

Pommituksen pitkän historian aikana on kiistatta näytetty toteen sen tuomat hyödyt komponentin väsymiseliniän pidentämiseksi. Tästä todisteena esimerkiksi luvussa 3.1 mainittu venttiilinjousien pommitus Opelin toimesta 40-luvulta lähtien.

Riippuukin paljon komponentin rakenteesta, materiaalista ja käytettävissä olevasta pommituslaitteistosta, millainen lopputulos saadaan aikaiseksi. Vaikka prosessin vaikutusmekanismi on melko yksinkertainen, ovat prosessin aikana tapahtuvat ilmiöt lopuksi melko kimurantteja mallintaa tai ennustaa, sillä ne ovat usein monen tekijän summia. Tästä syystä tarvitaan kattavaa testausta ja materiaalitekniikan tuntemusta, jotta menetelmä saadaan täysin hyödynnettyä.

Tiedon karttuessa lienee helpompaa arvioida, millä tavoin komponenttia tulee prosessoida halutun tavoitteen saavuttamiseksi. Lisäksi tuotteelle tehtävät muut mahdolliset käsittelyt kuten lämpökäsittely voivat vaikuttaa pommituksen lopputuloksiin, sillä se muuttaa oleellisesti komponentin materiaalin ominaisuuksia.

Kaiken kaikkiaan työlle opinnäytetyösopimuksessa asetetut tavoitteet saavutettiin ja lopputulosta voidaan pitää melko onnistuneena varsinkin huomioiden yllättävät käyrän sovitukseen liittyneet matemaattiset ja tietotekniset haasteet.

6 SUOSITUKSET JA JATKOTUTKIMUS

Seuraavassa annetaan joitain suosituksia ja ideoita siitä, miten tässä työssä aloitettuja projekteja voi viedä eteenpäin ja kehittää edelleen tarvittaessa.

6.1 Markkinointi

Markkinointimateriaaliin voisi tulevaisuudessa lisätä yrityksessä toteutettuja ja todennettuja projekteja väsymiseliiniän pidentämisestä. Materiaali koostuu tällä hetkellä lähinnä teoriasta, joka johtuu lähinnä siitä, että kyseessä on myös yritykselle uusi prosessi. Olisi uskottavuutta lisäävää, jos voitaisiin esitellä jokin CASE-tyyppinen esimerkki pommituksen vaikutuksista johonkin tuotteeseen, asiakkaan luvalla tietenkin.

6.2 Testaustietokanta ja laadunvarmistus

Testaustietokanta täyttäneen yrityksen tarpeet toistaiseksi. Rajoitteena mainittakoon 5 000 rivin maksimipituus, jonka jälkeen liitteessä 1 esitellyt kaavat eivät enää toimi. Toisaalta 5 000 testiä on paljon ja riittää pitkälle yrityksen tulevaisuuteen.

Mikäli testien määrä kasvaa huomattavasti jatkossa voisi harkita tietokannan siirtämistä tuotannonohjausjärjestelmään tai tietojen automaattista hakua järjestelmään Excel-taulukosta.

6.3 Saturaatiokäyrä ja mittauspöytäkirja

VBA-makrojen edelleen kehittämistä voisi harkita, jos saadaan tietoon muutkin liitteessä 2 mainituista ehdoista, joilla käyttäjälle voidaan huomauttaa käyrän laadusta. Nämä tiedot saattaisivat löytyä ostamalla standardin, joka mainitaan liitteen 2 sivulla 4.

6.4 Jäännöspuristusjännitysten mittaus

Prosessin laadun varmistamiseksi voisi olla mielekästä teettää prosessoiduille komponenteille tutkimuksia esimerkiksi luvussa 3.6 mainittujen menetelmien avulla. Tällä tavoin päästäisiin kiinni todella komponentin pintaan syntyviin jäännöspuristusjännityksiin ja pystytään vertailemaan eri työvaiheiden vaikutusta vaiheiden välillä.

Voisi myös olla mahdollista löytää korrelaatioita Almen -intensiteetin ja jäännöspuristusjännitysten väliltä tietyille materiaaleille.

Tutkimusten avulla on mahdollista selvittää, olisiko komponentin väsymiselinikä mahdollisesti edelleenkin parannettavissa kuulapommituksen keinoin prosessiparametreihin vaikuttamalla.

Toisaalta tutkimuksiin vaaditaan erikoisosaamista ja -laitteistoa, joten yhteistyö jonkin tutkimuslaitoksen tai yliopiston kanssa lienee tarpeen, sillä laitteet ovat kalliita ja osaaminen niiden käyttämiseksi harvinaista.

LÄHTEET

- Alexander, M. 2010. The Excel Analyst's Guide to Access. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons. [Viitattu 15.3.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Balasubramanian, K., Jayakumar, T., Raj B. & Rao, B.P.C. 2011. Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XV). [Verkkokirja]. IOS Press Inc. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Bhasin, V., Kumar, S., Singh P.K., Vaze K.K. 2011. Use of Magnetic Barkhausen Noise to Evaluate the Mechanical Properties and Residual Stress. [Verkkokirja]. Mumbai: Bhabha Atomic Research Centre. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Bhushan, B. 2013. Introduction to Tribology. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons. [Viitattu 28.1.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Brown, M. 1974. Fatigue Crack Surface Of 3 Specimens [Valokuva]. John H. Glenn Research Center at Lewis Field: National Aeronautics and Space Administration. [Viitattu 24.3.2021]. Saatavana: <https://catalog.archives.gov/id/17422413>
- Cammett, J. 2007. Shot Peening Coverage – the Real Deal [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 21 (3), 8–14. [Viitattu 4.2.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2007018.pdf>
- Cammett, J. 2014. Are You Peening Too Much? [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 28 (3), 10–14. [Viitattu 3.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2014023.pdf>
- Cotterell, B. 2010. Fracture and Life. [Verkkokirja]. New Jersey: Imperial College Press. [Viitattu 13.1.2021]. Saatavana Ebsco Academic Search Elite -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Gilman, J. 2009. Chemistry and Physics of Mechanical Hardness. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons. [Viitattu 9.2.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- He, B. B. 2009. Two-Dimensional X-Ray Diffraction. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons. [Viitattu 3.3.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Hietikko, E. 2015. Palkki: Lujuuslaskennan perusteet. 3. p. Helsinki: BoD – Books on Demand.

- Karhunen J., Lassila V., Pyy S., Ranta A., Räsänen S., Saikkonen M. & Suosara E. 1992. Lujuusoppi 11. p. Helsinki: Gaudeamus.
- Kirk, D. 1999. Shot Peening. [Verkkolehtiartikkeli]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 71 (4), 349–361. [Viitattu 1.2.2021]. Saatavana Emerald eJournals Premier - tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Kirk, D. 2002. Curve Fitting For Shot Peening Data Analysis. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 16 (1), 6–11. [Viitattu 20.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2002091.pdf>
- Kirk, D. 2006. Saturation Curve Analysis and Quality Control. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 20 (3), 24–30. [Viitattu 20.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2006025.pdf>
- Kirk, D. 2007. Peening Intensity Curves. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 21 (3), 24–30. [Viitattu 20.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2007020.pdf>
- Kirk, D. 2009. Size and Variability of Cast Steel Shot Particles. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 23 (1), 24–32. [Viitattu 1.2.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2009005.pdf>
- Kirk, D. 2013. Principles of Almen Strip Selection. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 27 (1), 24–32. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2013011.pdf>
- Kirk, D. 2015. Quantification of Shot Peening Intensity Rating [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 29 (1), 24–32. [Viitattu 16.2.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2015007.pdf>
- Kirk, D. 2016. Peening Intensity True Meaning and Measurement Strategy. [Verkkolehtiartikkeli]. The Shot Peener 30 (3), 26–36. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2016030.pdf>
- Kivioja, S., Kivivuori S. & Salonen P. 1997. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. 6. p. Espoo: Gaudeamus/Otatieto.
- Koivisto K., Laitinen E., Niinimäki M., Tiainen T., Tiilikka P. & Tuomikoski J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi 12–14. p. Helsinki: Edita Publishing.
- Kritzler, J. & Wübbenhorst, W. 2002 Inducing Compressive Stresses through Controlled Shot Peening. Teoksessa: Inoue, T., Howes, M. & Totten, G. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. [Verkkokirja]. Materials Park, Ohio: ASM International. 345–358 [Viitattu 10.1.2021]. Saatavana Ebsco Academic Search Elite -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.

- Laurson, L. 9.4.2019. Barkhausenin kohina paljastaa materiaalin mikrorakenteen. [Verkkosivu]. Tampere: Tampereen yliopisto. [Viitattu 3.3.2021]. Saatavana: <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/barkhausenin-kohina-paljastaa-materiaalin-mikrorakenteen>
- Lefteri C. 2012. Making it: Manufacturing Techniques for Product Design. [Verkkokirja]. Laurence King Publishing. [Viitattu 22.1.2021]. Saatavana Ebsco Academic Search Elite -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Meconet Oy. Ei päivystä. Jousiteknologiat. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.4.2021]. Saatavana: <https://www.meconet.net/jousiteknologiat/>
- Niku-Lari, A. 1996. An Overview of ShotPeening [Verkkojulkaisu]. The Shot Peener: International Conference on Shot Peening and Blast Cleaning. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1996002.pdf>
- Rabb, R. 2013. Todennäköisyysteoriaan pohjautuva väsymisanalyysi. [Verkkokirja]. BoD – Books on Demand. [Viitattu 16.1.2021]. Saatavana Elisa Kirja tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Banavasi, S. M., Ravishankar, K.S., Naik, P. S. 2018. Effect of machine scatter on the rotating bending fatigue life of materials. [Kuva] De Gruyter. [Viitattu 24.3.2021]. Saatavana: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jmbm-2018-0021/html>
- Shotpeener. 2001. Almen A Strip specifications [Verkkojulkaisu]. The Shot Peener. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavana: https://www.shotpeener.com/tools/a_strip.pdf
- Walkenbach, J. 2010. Excel 2010 Bible. [Verkkokirja]. John Wiley & Sons [Viitattu 15.3.2021]. Saatavana ProQuest Ebook Central -tietokannasta. Vaatii käyttöoikeuden.
- Wartiainen, J. 2018. Evaluation of shot peening parameters with Barkhausen noise, residual stress and retained austenite content measurements. [Verkkojulkaisu]. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. Fysiikan laitos. Pro Gradu -tutkielma. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavana: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ju-201901041076>
- Wikipedia: "Cdang". 2009. Dislocation coin vue en bout et coeur. [Kuvio]. Wikipedia [Viitattu 24.3.2021]. Saatavana: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dislocation_coin_vue_en_bout_et_coeur.svg?use_lang=en
- Wikipedia: "DaniFeri". 2011. Face-centered cubic crystal lattice. [Kuvio]. Wikipedia [Viitattu 24.3.2021]. Saatavana: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Face-centered_cubic_crystal_lattice.svg
- Wikipedia: "DrBoStefanov". 2020. XRD diffractometer. [Kuvio]. Wikipedia [Viitattu 24.3.2021]. Saatavana: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:XRD_diffractometer.svg

- Wikipedia: "Stannered". 2020. Barkhausen sensor. [Kuvio]. Wikipedia [Viitattu 24.3.2021].
Saatavana: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barkhausen_sensor.svg
- Wohlfart, H. 1982. Shot Peening and Residual Stresses. Teoksessa: Kula, E. & Weiss, V.,
Residual Stress and Relaxation, Sagamore Army Materials Research Conference, Vol.
28. Pariisi, Lontoo: Plenum Press, 71.
- Wohlfart, H. 1983. Ein Modell zur Vorhersage kugelstrahlbedingter Eigenspannungszustände
In Macherau, Hauck: Eigenspannungen -Entstehung, Messung, Bewertung Oberursel:
DGM Informationsgesellschaft Verlag, Nidos 2.