



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

HAMMASHIONNAN PARAMETRIEN OPTI- MOINTI VAKIOTYÖNIMIKKEILLE

Jari Huotari

Opinnäytetyö
Marraskuu 2019
Konetekniikka
Tuotantotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotantotekniikka

HUOTARI, JARI:

Hammashionnan parametrien optimointi vakiotyönimikkeille

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Marraskuu 2019

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Katsa Oy. Katsa Oy on tamperelainen konepajayritys, joka valmistaa hammaspyöriä ja teollisuusvaihteita. Hammaspyöriä valmistettaessa yksi tuotannon osa on hampaan profiilihionta. Profiilihionta on hyvin haastava ja hidas prosessi. Tästä syystä hammashionnan parametrien optimoinnilla voitaisiin tehdä hammashionnasta mahdollisimman kustannustehokasta. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan käytettävien parametrien vaikutusta hammashionnassa käytettävään aikaan, hampaan kyljen pinnanlaatuun ja hionnassa tapahtuvaan hiontapalamiseen

Parametrien tutkimisella päästään opinnäytetyön tavoitteeseen, joka oli parantaa hammashionnan tehokkuutta laatu säilyttäen. Työn tarkoituksena oli luoda kokonaisuus asioista, jotta hammashiontaoperaattorit voivat hyödyntää hionnassa käytettäviä parametreja tehokkaasti. Kustannussyistä tutkimus jaettiin kahteen tutkimukseen, ja tässä tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitetään kymmenestä merkittävästä parametrista eniten merkittävät parametrit.

Työssä toteutettiin Taguchi-menetelmän mukainen koesuunnittelu, jossa tehtiin 12 hiontakoetta hammaspyörille ja yksi konfirmaatiokoe tulosten varmistamiseksi. Kokeissa käytettiin kustannussyistä kooltaan moduulin kymmenen lieriöhammaspyörää, missä oli 27 hammasta. Tutkimuksen toisessa vaiheessa vakiotyönimikkeille tehtävä optimointi tapahtuu suurimoduuliselle mutta suurempi määrä hiottavia hampaita.

Tuloksena työssä saatiin neljä merkittävää parametria, jotka olivat rouhinnan sisään-syöttö, rouhinnan syöttönopeus, rouhinnan leikkuunopeus ja viimeistelyn leikkuunopeus. Työstä tulee tehdä jatkotutkimus, jossa nämä neljä merkittävää parametria optimoidaan jokaiselle vakiotyönimikkeelle. Ilman jatkotutkimusvaihetta ei työn tarkoituksessa olleeseen kokonaisuuteen päästä.

Asiasanat: hammaspyörä, hammashionta, Taguchi, koesuunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Production Engineering

HUOTARI, JARI:

Optimization of Gear Wheel Grinding Parameters for Standard Titles

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 2 pages
November 2019

This thesis was commissioned by Katsa Oy. Katsa Oy is a manufacturing company that manufactures gear wheels and industrial gears. Katsa Oy is located in Tampere, Finland. When making gear wheels, one part of the production is tooth profile grinding. This part of production is a very challenging and slow process. Therefore, by optimizing the parameters of tooth grinding, tooth grinding could be made as cost-effective as possible. This thesis research the effect of parameter adjustment on the time required for gear wheel grinding, the quality of the tooth flank surface, and internal deformation of the tooth that occurs during the grinding.

The goal was to improve the efficiency of the tooth grinding while maintaining quality. The purpose of this thesis was to enable the grinding operator to utilize the grinding parameters the most effectively. For cost reasons, the actual study was divided into two separate studies. In this first phase of the study, the goal was to find the most significant parameters out of the ten original parameters.

In this thesis, an experimental design was carried out according to the Taguchi method. The study included 12 tests and one confirmation test to confirm the accuracy of the experiments. Due to cost reasons, experiments were done by grinding spur wheels, which had 27 teeth of module ten. In second phase of this thesis optimization for standard titles would be done to spur wheel, which has as high number of modules as the one in experiment module but higher number of teeth.

As a result of this thesis, four most significant were found. These parameters were roughing infeed, roughing feed rate, roughing cut speed and finishing cut speed. A follow-up study these four parameters should be conducted. These parameters should be optimized for each of the standard titles. Without a second phase of this thesis, the whole purpose of the thesis cannot be achieved.

Key words: gear wheel, gear wheel grindig, Taguchi, experimental design

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KATSA OY	6
3	HAMMASPYÖRÄ	8
3.1	Lieriöhammaspyörä	8
3.2	Kartiohammaspyörä.....	9
3.3	Ruuvi- ja hammaskierukka	11
3.4	Moduuli.....	12
4	HIONTA.....	14
4.1	Hammashionta	15
4.2	Koneet.....	17
4.3	Hiomakivet.....	18
5	TAGUCHI.....	19
5.1	Systeemisuunnittelu	19
5.2	Parametrisuunnittelu	20
5.3	Toleranssisuunnittelu	20
6	KOESUUNNITTELU	22
7	MERKITTÄVIEN PARAMETIREN ETSIMINEN.....	26
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	37
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET	41
	Liite 1. Ohjaus- ja häiriötekijät.....	41
	Liite 2. Mittauspöytäkirja.	42

1 JOHDANTO

Hammaspyörien profiilihionta on hidas ja vaativa prosessi. Hitaudesta ja vaativuudesta johtuen hammashionta on myös hyvin kallis työvaihe hammaspyörien valmistuksessa. Kuitenkin haastavuudesta ja hitaudesta riippumatta, hammashionta on erittäin tärkeä osa hammaspyörien valmistusta. Profiilihionnalla saavutetaan erittäin tarkka hampaanprofiilin muoto, joilla saavutetaan hammaspyörälle pidempi käyttöikä ja hiljaisempi käynti.

Alkuperäisenä tavoitteena opinnäytetyössä oli parantaa hammashionnan tehokkuutta laatu säilyttäen ja tarkoituksena luoda valmiit parametrikokonaisuudet hammashionta-operaattorille tuotannon käyttöön. Tarkoituksena oli myös luoda oppimisprosessi opiskelijalle ja työn tilaajalle.

Alkuperäisestä tavoitteesta poiketen tässä tutkimuksessa tutkittiin hiontaprosessissa käytettävien kymmenen parametrin vaikuttavuutta prosessissa käytettävään aikaan. Toissijaisina tutkimuksina tutkittiin parametrien vaikutusta hampaankyljen pinnanlaatuun ja sisäisiin vaurioihin. Parametrien optimoinnilla saavutettaisiin kustannustehokkaampi tuotanto hammashionnassa vakiotyönimikkeille, joiden tuotantovolyymit ovat suuria. Normaalisti hammashiojaoperaattori käyttää vakioparametreja, jotka käytännössä määräytyvät hampaan moduulin mukaan. Vakio parametrit ovat käytännönkokemuksella todettu toimiviksi arvoiksi, joilla saavutetaan laadullisesti erinomaisia hammaspyöriä. Kuitenkin nämä parametrit eivät käytä hyväksi koneiden optimaalisia mahdollisuuksia tuottaa hyvälaatuisia hammaspyöriä mahdollisimman nopeasti.

Teoriassa työssä käydään läpi tilaajan taustat, eri hammaspyörätyyppien ominaisuuksia ja geometriaa, hiontaa menetelmänä ja hammashiontaprosessissa sekä Taguchi-menetelmän mukaista koesuunnitteluprosessia. Teoria tiedot yhdistetään todellisessa Taguchi-menetelmän mukaisessa koesuunnittelututkimuksessa, jossa tulokseksi saadaan merkittävimmät tekijät hammashiontaprosessin parametreista ajan pienentämiseen, pinnanlaadun säilyttämiseen ja hiontapalamisen estämiseen. Kokonaisuudessa tutkimus suoritetaan Katsa Oy:n normaaleissa tuotannon tiloissa ja olosuhteissa normaaleille tuotannossa oleville lieriöhammaspyörille.

2 KATSA OY

Opinnäytetyön tilaajana toimii Katsa Oy. Katsa Oy on pirkanmaalainen konepajateollisuuden yritys. Alun perin Katsan ovat perustaneet 1950-luvun puolivälissä Jouko Kattelus ja Väinö Salli eli nimi juontuu perustajien sukunimien alkukirjaimista. Alussa Katsan toiminta oli alihankintakoneistusta. Nykyään Katsan tuotteina ovat pääasiassa erilaiset hammaspyörät ja teollisuusvaihteet. Katsan omistus on pysynyt Sallin suvussa tähän päivään saakka, sillä Kattelus myi oman omistuksensa Väinö Sallille 50-luvun lopussa. (Katsa Oy, Historia)

Katsa Oy toimii maailmanlaajuisesti hammaspyörien ja vaihteiden toimittajana ja alihankintatehtaana. Asiakkaita on pohjoismaiden lisäksi muualla Euroopassa ja Aasiassa. Tästä syystä myös toimintaa on ympärimaailman. Suomen viiden toimipisteen lisäksi Katsalla on myyntiagenttuureja mm. Singaporessa, Norjassa ja Isossa-Britanniassa. Päätoimipiste sijaitsee Tampereella. Pääasiallinen tuotanto tapahtuu Tampereen Härmälän toimipisteellä ja Ikaalisten toimipisteellä. (Katsa Oy, Historia)

Nykyisin Katsa Oy:n toimitusjohtajana toimii Tomi Koskinen. Koskinen nimitettiin toimitusjohtajaksi vuonna 2017. Kokonaisuudessaan Katsa Oy työllistää suoraan noin 170 työntekijää suurimmaksi osaksi pääkonttorilla Tampereen Härmälän ja Ikaalisten toimipisteillä. Vuonna 2018 liikevaihtoa Katsa Oy on tuottanut reilu 29 miljoonaa euroa. Yleisesti yritystä voidaan pitää hyvin omavaraisena, sillä Katsan omavaraisuusaste vuonna 2018 oli yli 80 %. (Kauppalehti, Katsa Oy)

Katsa Oy valmistaa tuotteitaan täysvaltaisesti ja suurimmaksi osaksi ilman alihankintaa. Eli hammaspyörän elämänkaari kulkee yrityksen sisäisesti aina aihion sahauksesta pakkaukseen. Myös vaihdehuolto on yksi Katsa Oy:n toimialoista eli asiakkaille voidaan tuottaa palveluita myös tuotettujen hammaspyörien jälkeen. Työvälineitä yritykseltä on sahojen lisäksi myös mm: useita monitoimisorveja, pehmyt ja kvasorvaukseen, hampaiden vierityskoneita, ulkopuolisille hammastuksille, pistokoneita sisäpuolisille hammastuksille, hiiletys- induktiokarkaisu välineitä, lämpökäsittelyyn, hiomakoneita pyöröhiontaan, reikähiontaan, tasohiontaan ja hammashiontaan. Lisäksi tarkastusta suoritetaan koneellisesti esimerkiksi hammasprofiilin ja kyljen suunnasta sekä lisäksi särö- ja ultraäänitarkastusta valmistetuille tuotteille. Näiden lisäksi Katsa Oy tasapainottaa tarvittavat

hammasakselit ja hammaspyörät. Myös kokoonpantujen vaihteiden testaus ja koeajo kuuluu yrityksen toimenkuvaan. Suurimmillaan yrityksessä voidaan valmistaa kahden ja puolen metrin halkaisijalla olevia hammaspyöriä ilman hammashiontaa ja hammashionnan kanssa jopa 1,6 metriin asti. (Katsa Oy, Tuotanto)

Kaikkiaan Katsa Oy valmistaa tuotteita laivateollisuuteen, terästeollisuuteen ja metallin jalostukseen, kaivosteollisuuteen ja maanrakennukseen, sellu- ja paperiteollisuuteen, energiateollisuuteen ja tuulivoimaan sekä raskaisiin työkoneisiin ja kiskokalustoon (Katsa Oy, Toimialat).

Laadullisesti Katsa antaa asiakkailleen sadan prosentin jäljitettävyyden hammastetuille tuotteille, materiaalin, prosessin, lämpökäsittelyn ja mittauksen osalta. Tämä on mahdollista, kun tuotteet yksilöidään sarjanumerolla Katsan toimesta. Laadun takaamiseksi Katsalla on käytössä myös sertifioitu ISO9001-laatu järjestelmä sekä ISO1400-ympäristösertifikaatti. (Katsa Oy, Laatu)

Laatu- ja ympäristölupauksessa Katsa Oy (Katsa Oy, Laatu) mainitsee seuraavasti:

Haluamme olla paras kumppani mekaanisen voimansiirron toimittajana Pohjois-Euroopassa valituissa asiakassegmenteissä. Päivittäisessä toiminnassamme tämän näkyy seuraavasti: Kehitämme tuote- ja palvelutarjontaa aktiivisesti ja asiakaslähtöisesti. Pidämme lupauksemme sekä informoimme asiakasta mahdollisista poikkeamista etukäteen. Parannamme kilpailukykyä kouluttamalla ja motivoimalla henkilöstöä sekä kehittämällä tuotantoa ja tuotteita jatkuvasti. Toteutamme työterveyteen ja turvallisuuden liittyviä parantavia toimenpiteitä osana päivittäistä toimintakulttuuriamme. Teemme pitkäjänteistä yhteistyötä toimittajiemme kanssa. Sitoudumme ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseen sekä jätteiden ja energian käytön vähentämiseen. Noudatamme toimintaamme koskevia lakeja, asetuksia ja viranomais määräyksiä.

3 HAMMASPYÖRÄ

Pääsääntöisesti hammaspyörät voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan; lieriöhammaspyöriin (Kuva 1.), kartiohammaspyöriin (Kuva 2.) ja ruuvi- tai kierukkahammaspyöriin (Kuva 3.). Kuitenkin lieriö- ja kartiohammaspyörätyyppejä voidaan valmistaa ulko- ja sisähampaisina ja suora- ja vinohampaisina. Lisäksi hammaspyöriä valmistetaan nuolihammastuksella ja kaarihammastuksella. Eli todellisuudessa erilaisia hammaspyöriä tyyppejä on useita. Jokaisella hammaspyörä tyypillä on omat ominaisuudet ja niitä käytetään eri olosuhteissa ja tehtävissä. (Hamrock, Smith & Jacobson 2006, 607; Björk, Hautala, Huhtala, Kivioja, Kleimola, Lavi, Martikka, Miettinen, Ranta, Rinkinen & Salonen 2014, 329)

Hammaspyörä itsessään määritellään SFS:n standardissa (Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry 1989, 9). seuraavasti: ”Hammaspyörä on koneenelin, jossa on säännöllisessä järjestyksessä ulkonevat osat (hampaat), jotka joutuessaan ryntöön vastaavanlaisen koneenelimen kanssa siirtävät liikkeen koneenelimestä toiseen”. Eli hammaspyörien tarkoituksena on siirtää pyörimisliikettä toiselle hammaspyörälle, hammasakselille tai hammas-tangolle. Hammaspyörillä voidaan myös muuttaa akselien pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Hammaspyörä parin muodostaa kaksi hammaspyörää, jotka ovat keskenään rynnöissä. Yleisesti ottaen hammaspyörillä saadaan erittäin hyvä hyötysuhde sillä tehon siirrosta hammaspyörät voivat saavuttaa jopa 98 %:n hyötysuhteen. (Hamrock ym. 2006, 607)

3.1 Lieriöhammaspyörä

Lieriöhammaspyörä on nimensä mukaisesti suoran ympyrälieriön muotoinen. Lieriöhammaspyörä on yleisin käytössä oleva hammaspyörätyyppi. Lieriöhammaspyörä siirtää tehoa toiselle samansuuntaiselle lieriöhammaspyörälle eli hammaspyöräparin tulee olla samansuuntaiset. Kuten aiemmin on mainittu, tällaisia hammaspyöriä voidaan valmistaa suorilla tai vinoilla hampailla. (Hamrock ym. 2006, 608)

Lieriöhammaspyöriä tehdään usein vinolla hammastuksella. Sillä saavutetaan jouhevampi kosketus toiseen hammaspyörään verrattuna suorahampaiseen pyörään. Tästä joh-

tuen vinohampaisetpyörät eivät aiheuta niin suurta meluhaittaa. Myös käyttöikä on vinohampaisilla pidempi kuin suorahampaisilla, koska työssä tapahtuva rasitus on pienempi. Haittoina voidaan pitää, että vinohampaiset lieriöhammaspyörät aiheuttavat kuormitusta akselille, joka taas voi aiheuttaa erilaisia vaatimuksia akselin käyttöön kasvattamiseen. Lisäksi suorahampaisenpyörän hyötysuhde on hieman parempi kuin vinohampaisen. (Hamrock ym. 2006, 608, 673)



KUVA1. Lieriöhammaspyörä. (Katsa Oy, Komponentit, 2019)

3.2 Kartiohammaspyörä

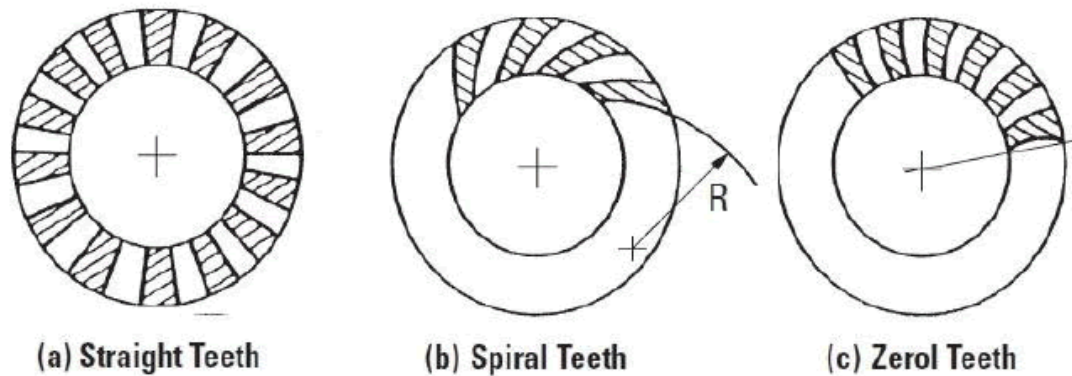
Kartiohammaspyörä valmistetaan hammastamalla kartion muotoinen aihio. Koska hammaspyörät ovat kartionmuotoiset, eivät niiden käyttökohteen tarvitse olla samansuuntaiset kuten lieriöhammaspyörien. Eli kartiohammaspyöräparin keskiakselit voivat olla toisiinsa nähden vaikka kohtisuorassa. Näin ollen kartiohammaspyöriä käytetäänkin tapauksissa, jossa pyörähdysliike halutaan kääntää keskiakselista poikkeavaksi. Yleisin tapa mihin kartiohammaspyöriä käytetään, onkin tapa jossa hammaspyöräpari on kohtisuorassa toisiaan nähden. (Hamrock ym. 2006, 609, 678) Tällainen on käytössä esimerkiksi veneen perämoottorissa, jossa moottori käyttää horisontaalista akselia ja voima käännetään vertikaaliseksi kartiohammaspyöräparin ansiosta.

Kartiohammaspyörillä voidaan saavuttaa paras mahdollinen hyötysuhde eri hammaspyöristä. Kuten lieriöhammaspyöriä valmistetaan suorilla ja vinoilla hampailla, niin kartiohammaspyöriä voidaan valmistaa suorilla tai kaarevilla hampailla. Kaarevalla muodolla saavutetaan jouhevampi kontakti hammaspyöräparin välillä ja näin vähennetään meluhaittoja ja saavutetaan pidempi käyttöikä hammaspyörille. Kaareviakin hammastyypppejä on kolme, patentoitu Zerol-kartiohammaspyörä, kierähampainen kartiohammaspyörä ja hypoidi kartiohammaspyörä. (Hamrock ym. 2006, 681)



KUVA 2. Kartiohammaspyörä. (Katsa Oy, Komponentit, 2019)

Hypoid-mallin hammaspyöriä voi monesti havaita auto- ja teollisuusvaihteissa. Se on hyvin samanlainen kuin muut kartiohammaspyörät paitsi tässä tapauksessa hampaan muoto on hyperbolinen. Tällaiset hammaspyörät eroavat muista lieriö- ja kartiohammaspyöristä siten ettei niiden jakohalkaisija ole verrannollinen hampaiden lukumäärään. Zerol-hammaspyörä ja kierähampainen hammaspyörä eroavat toisistaan siten, että kierähampaisessa hammaspyörässä hampaan kierrekulma muuttuu verrattuna keskiakseliin ja Zerol-pyörässä se pysyy vakiona. Tämä on helppo havaita kuviosta 1. (Hamrock ym. 2006, 681)



KUVIO 1. Hampaiden muodot kartiohammaspyörissä, a) Suorahampainen b) kierähampainen ja c) Zerol-hampainen. (Ratnadeepsinh M. Jadeja, Dipeshkumar M. Chauhan, Jignesh D. Lakhani, 2013)

Zerol-pyörässä on yhteneväisyyksiä suorahampaiseen kartiohammaspyörään ja kierähampaiseen hammaspyörään. Sillä siinä on kaarevat hampaat, mutta se eliminoi sisäisen aksiaalivoiman kuten suorahampainen pyörä. Zerol-pyörä on myös määritelty tarkemmiksi, hiljaisemmiksi ja pyörissä on kitkaa vähentävä laatu verrattuna suorahampaiseen kartiohammaspyörään. Verrattuna kierähampaiseen pyörään Zerol-pyörää voidaan käyttää molempiin suuntiin. Normaalisti kierähampaaset pyörät valmistetaan joko oikea- tai vasenkätisiksi ja käytetään vain yhteen suuntaan. Tällainen pyörä on myös kestävämpi, koska käytössä on paksummat hampaat ja hampaiden pituus on pidempi kuin suorahampaisessa kartiohammaspyörässä. (KHK Stock gears, About Zerol bevel gears.)

3.3 Ruuvi- ja hammaskierukka

Ruuvi- ja hammaskierukat ovat hyvin erilaisia hammaspyöriä verrattuna lieriöpyöriin tai kartiopyöriin. Tämä on havaittavissa niiden geometriassa ja valmistustavoista. Tämä onkin yksi syy, miksi ne ovat myös kalliimpia vaihtoehtoja muihin mainittuihin verrattuna. Hyvinä puolina ruuvi- ja kierukkapyörille voidaan pitää yli 80 %:n hyötysuhdetta ja suuretkin välityssuhteet saadaan hyvin kompaktiin kokoon. Hyvien puolien vastakohtana tulee, että pyörien kantavuuskapasiteetti on hyvin pieni sekä pyörien kosketuspintoihin aiheutuu suuria pintapaineita. Tästä syystä niiden kuluvuus on suuri. Näistä johtuen ruuvi- ja hammaskierukoita käytetäänkin tilanteissa, jossa kuormitukset pyörille ovat matalat. (Hamrock ym. 2006, 610, 673)

Ruuvi- ja hammaskierukoita käytetään yleensä juurikin tilanteissa, jossa halutaan suuria nopeudenmuutoksia. Väilyssuhteita valmistetaan väliltä 1:1-360:1. Kuitenkin yleensä väilyssuhde on välillä 3:1-100:1. Pienemmät väilyssuhteet vaativat yleensä kahden tai useamman kierteen kierukassa, kun suuret väilyssuhteet pärjäävät vain yhdelle kierteellä. (Hamrock ym. 2006, 690)

Yleensä kierukka-akseli valmistetaan kovemmasta materiaalista kuin kierukkapyörä, koska akselilla yleensä vain muutama hammas/kierre ja niille aiheutuu enemmän työtä kuin pyörällä oleviin useisiin hampaisiin. Myös kierukkaparin kosketuksen kitkaa voidaan vähentää käyttämällä akselille kovaa materiaalia ja pyörälle pehmeämpää materiaalia. (KHK Stock gears, What are worm gears?)



KUVA 3. Kierukkapyörä. (Katsa Oy, Komponentit, 2019)

3.4 Moduuli

Hammasyöriä valmistettaessa käytetään apusuuretta moduuli (m). Moduulin yksikkönä käytetään millimetriä. Moduuli kuvaa hampaan kokoa eli voidaan ajatella, että mitä suurempi moduuli sitä suurempi hampaan koko. (Blom, Lahtinen, Nuutio, Pekkola, Pyy, Rautiainen, Sampo, Seppänen & Suorsa 1999, 251) Standardikoon moduulit on taulukoitu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. SFS 3039:n mukainen moduulisarja. (Blom ym. 1999, 252)

Moduuli m mm			
Sarja 1.	Sarja 2.	Sarja 1.	Sarja 2.
0.5	0.55	5	5.5
0.6	0.7	6	7
0.8	0.9	8	9
1	1.125	10	11
1.25	1.275	12	14
1.5	1.75	16	18
2	2.25	20	22
2.5	2.75	25	28
3	3.5	32	36
4	4.5	40	45
-	-	50	-

Hammaspyörää valmistettaessa moduulin valinta määrää hampaan jyrsimiseen käytettävää terää. Yleensä hammaspyörä valmistetaan oikeaan moduuliin jo vierintäjyrsintä vaiheessa, joten tästä syystä käytetään standardoituja moduuleita. (Blom ym. 1999, 252) Kuitenkin suunnitteluvaiheessa moduuli voidaan laskea hampaan leveyden (b), jakohalkaisijan (d), minimi hammasluvun (z_{1min}) ja vakiokertoimen (λ) avulla. Moduuli alaraja (m_{min}) voidaan laskea tasaisen kuormituksen kautta kaavalla 1. Vastaavasti moduulin yläraja (m_{max}) lasketaan jakohalkaisijasta ja minimihammasluvusta ja se on esitetty kaavassa 2. Eli moduuli valitaan näiden kahden määritetyn luvun välistä standardin mukaisesti. (Björk ym. 2014, 338)

$$m_{min} = \frac{b}{\lambda} \quad (1)$$

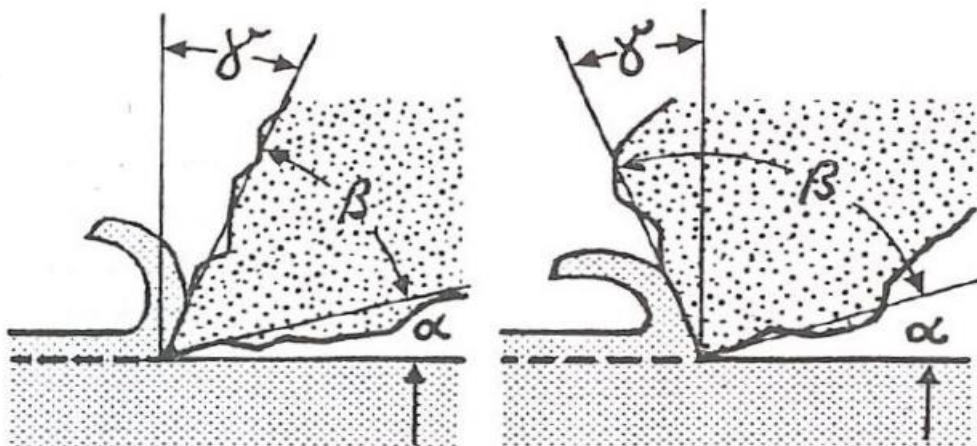
$$m_{max} = \frac{d}{z_{1min}} \quad (2)$$

Kuitenkin moduulia yleisesti käytetään apusuureena, jonka avulla lasketaan muita hammaspyörän geometrisia arvoja. Joten mainituista kaavoista yleensä haetaan hampaan leveyttä, jakohalkaisijaa tai minimihammaslukua. (Blom ym. 1999, 251)

4 HIONTA

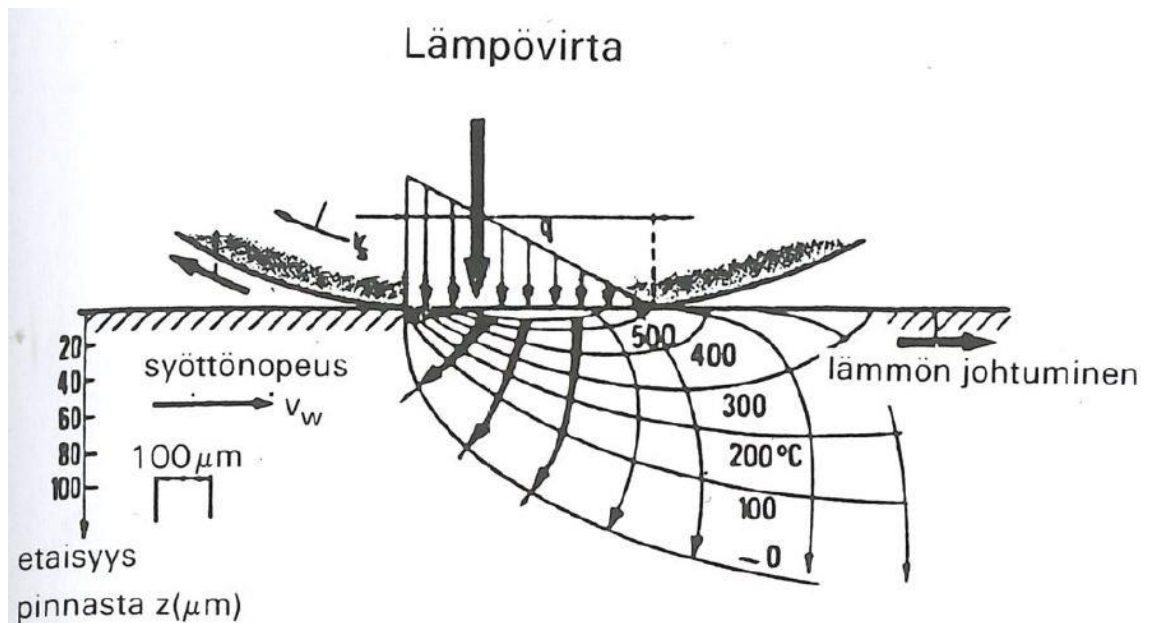
Hionta on yksi lastuavista työstömenetelmistä, kuten sorvaaminen tai jyrsiminen. Hiontaa on käytetty aineen poistamiseen jo antiikin ajasta lähtien. Tuotannossa käytettäväksi hionta on yleistynyt 1900-luvulla. Tämä johtuu hiontakoneiden kehityksestä tarkkuushiomakoneiksi. 1980-luvun lopussa teollisuudessa käytettävien hiontamenetelmien osuus oli 20-25 % muista lastuavista menetelmistä. Koska hionnalla työstettävien materiaalien määrä on suurempi kuin muilla lastuavilla menetelmillä, ennen hiontaa käytettiin usein kovien aineiden lastuamiseen. Nykypäivänä tämä onnistuu myös sorveilla tai jyrsimillä, joten hiontaa käytetäänkin työkalupaleille joissa on tarkat mita-, geometria- ja pinnanankarheusvaatimukset. (Aaltonen, Aromäki, Ihalainen & Sihvonen, 2003. 197)

Teollisuudessa käytettävä hionta tapahtuu yleensä hiomakivellä. Hiomakivessä olevilla hiomarakeilla suoritetaan lastuaminen kappaleen pinnalla. Hiomarakeet toimivat tällöin teränä lastunpoistamiselle. Ne eroavat kuitenkin esimerkiksi sorvissa käytettävistä teristä siten ettei ne ole geometrisesti yhdenmuotoisia vaan ne ovat epämääräisen muotoisia (Kuvio 2.). Hiomarakeet myös sijoittuvat hiomakivellä satunnaisesti. Vaikka hiomarakeet omaavat epämääräisen muodon, voidaan todeta että hiomarakeilla on kuitenkin yleensä negatiivinen rintakulma. Rintakulma onkin yleensä alkaen -40° aina -80° :een. (Youssef, & El-Hofy, 2008. 120)



KUVIO 2. Hiomarakeella voi olla positiivinen tai negatiivinen rintakulma γ vaikka rakeen muoto on epämääräinen (Aaltonen ym. 2003. 198.).

Hionnassa syntyy usein suuria lämpötiloja hiomarakeen kärkeen. Vaikka hiomarakeen kärjen kosketusaika kappaleeseen on vain millisekunnin sadasosa, sen lämpötila voi kohota jopa 1800 °C:een. Korkea lämpötila syntyy 70-80 %:esti, kun lastunmuodostuksen yhteydessä tapahtuu voimakas tyssäytyminen. Loppu lämmöntuotannosta tulee hiomakiven ja kappaleen välisestä hankauksesta. Lämmönsiirtyminen on havainnollistettu kuviossa 3. Lämmönsiirtymistä kappaleeseen pyritään estämään esimerkiksi lastuamisnes-teellä, koska liian suuri lämmönjohtuminen kappaleeseen voi aiheuttaa kappaleessa sisäisiä rakennemuutoksia ja vaurioita. (Aaltonen ym. 2003. 198) Tämä onkin yksi huomioitavista asioista, kun työstöarvoja optimoidaan äärialueelle.



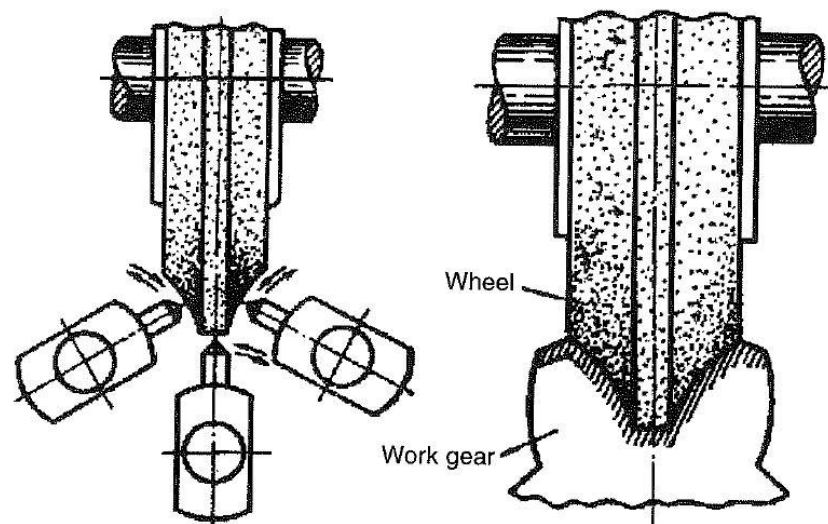
KUVIO 3. Esimerkki lämmönjohtumisesta hionnan aikana (Aaltonen 2003. 199).

4.1 Hammashionta

Hammaspyörien hionta on viimeistelytyövaihe, jossa hampaan profiiliin on jätetty hio-mavara karkaisun jälkeen. Hionnalla saavutetaan korkeamman laatuksia hammaspyöriä. Korkean laatu antaa pidemmän käyttöiän sekä tekee pyörien käynnistä hiljaisempaa. Hammashiontatapoja on kahdenlaisia: muotohionta (formed wheel grinding) ja vierintä-hionta (generation gear grinding). (Youssef, & El-Hofy, 2008. 212-213)

Muotohionnassa hiomakivi muotoillaan eli timantoidaan halutun hammasvälin muo-toiseksi. Eli hampaan lopullinen profiili on valmistettu suoraan hiomakiveen. Hionnassa

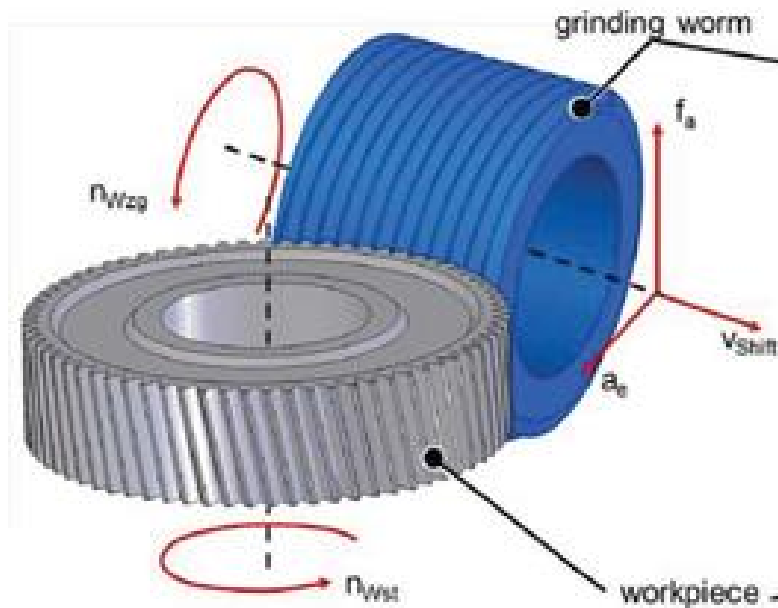
hiomakivi sijoitetaan kohtisuoraan hiottavaan hammasväliä vasten ja asetusliike on suoraan hammasväliä kohti. Tässä tilassa hiomakiveä liikutetaan edestakaisin hammasvälissä syöttöliikkeellä. Yleensä hionta tapahtuu yhtäaikaaisesti hammasvälin molemmille kyljille, mutta on myös mahdollista hioa vain toista kylkeä. Tapahtuma toistetaan jokaiselle hammasvälille yleensä 3-4 kertaa eli 2-3 rouhintatyökiertoa ja yksi viimeistelytyökierto. Työvaroissa oleskellaan hyvin pienissä mittayksiköissä ja hiontavaroja yleensä onkin 50-120 μm hampaankylkeä kohden. Ongelmana muotohionnassa on hiomakiven epätasainen kuluminen, joten kaikki hammasvälit eivät ole yhdenmukaisia. Tätä voidaan kompensoida timantoimalla hiomakivi aika-ajoin uudelleen. Muotohionta on havainnollistettu kuvassa 4. (Youssef, & El-Hofy, 2008. 212)



KUVA 4. Muotohionnassa hiomakivi timantoidaan haluttuun muotoon. (Youssef, & El-Hofy, 2008. 213)

Vierintähionta voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, joko hiomakivi on muotoilun hammaskierukan mallinen tai käytössä on kaksi lautaslaikkaa. Yleensä vierintähiontaa käytetään moduuleille 0,5-10 mm. Vierintähionta on muihin hiontatapoihin verrattuna hyvin paljon nopeampi. Kuitenkin nopeamman tuotannon vastapuolena on, ettei vierintähionnalla saavuteta tarkimpia laatuvaatimuksia. Yksi nopeuttavista tekijöistä on, että hammaskierukkamallinen hiomakivi on kokoajan hiomakontaktissa hiottavan pyörän kanssa. Tämä johtuu siitä että hiomakivi pyörii kokoajan oman akselinsa ympäri ja samaan aikaan hiottava hammaspyörä pyörii myös oman keskiakselinsa ympäri. Eli hionnassa on yhtäaikaaisesti useampi hammasväli eikä vain yksi niin kuin muotohionnassa. Vierintähionta

on havainnollistettu kuvassa 5. (Youssef, & El-Hofy, 2008. 213; Brumm, Klocke & Reimann 2012.)



KUVA 5. Vierintähionta voidaan tehdä hammaskierukan muotoisella hiomakivellä. (Brumm ym. 2012.)

Yleisesti ottaen hammashiontaa voidaan pitää hitaana ja työläänä prosessina. Prosessiin joudutaan hankkimaan omat koneensa, mitkä ovat yleensä hyvin hintavia. Myöskin koneiden käyttö vaatii työntekijöiltä ammattitaitoa ja tarkkuuta. Kokonaisuutena hammashionta aiheuttaa paljon kustannuksia hammaspyörien valmistuksessa. (Youssef, & El-Hofy, 2008. 214)

4.2 Koneet

Katsa Oy:llä on tällä hetkellä käytössä molempien tyyppisiä hammashiomakoneita. Gleason-Pfauter merkkisiä muotohiomakoneita ja Reishauer merkinen vierintähiomakone. Vierintähiomakone on Reushauer RZ1000 ja se on tarkoituksellisesti sarjatuotantotarpeisiin ja pienempiin moduuleihin. Maksimi moduuli, mitä Reishauer- koneella voidaan hioa, on 8 mm. Suurempien moduulien hionta ja pienemmät sarjat tuotetaan Gleason-Pfauter muotohiomakoneilla, joita Katsalla löytyy kaikkiaan kuusi. Kokoluokissa Katsalla on kolme P600/800G-hiomakonetta, joilla voidaan hioa 800 mm halkaisijaan asti, kaksi P1200G-hiomakonetta, joilla voidaan hioa aina 1200 mm halkaisijaan ja yksi 1600G-sarjan hiomakone, jolla hiotaan suurimmat hammaspyörät aina 1600 millimetrin

halkaisijan omaavat hammaspyörät. Muotohiontakoneilla hiotaan myös suuremmat moduulit, jotka voivat olla jopa 24 mm. (Katsa Oy, Tuotanto)

4.3 Hiomakivet

Hiomakivet muodostuvat pääasiassa hioma-aineesta ja sideaineesta. Hioma-aineena yleisin on alumiinioksidi Al_2O_3 . Tämä johtuu siitä että alumiinioksidi soveltuu paremmin useimpien teräslaatujen hiontaan. Seuraavaksi yleisin käytössä oleva hioma-aine on piikarbidi SiC. Piikarbidia käyttävät hiomakivet soveltuvat alumiinioksidia paremmin aineille joiden vetolujuus on pieni, kuten kovametalleille ja myös valuraudalle. Harvemmin käytössä olevat hioma-aineet ovat yleensä alumiinioksidia ja piikarbidia kovempia. Muita aineita on mm boorinitridi CBN ja timantti. Knoop-asteikolla boorinitridin kovuus on 4000-500 ja timantin kovuus on 7000-800, kun alumiinioksidilla vastaavasti kovuus on 2100-3000 ja piikarbidilla 2500-3000. (Aaltonen 2003. 202; Youssef, & El-Hofy, 2008. 122-123)

Sideaineina hiomalaikoissa käytetään keraamia, silikaattia, bakeliittia, kumia tai shellakkaa. Yleisin on keraaminen sideaine, sitä käytetään noin 70 %:ssa hiomakivissä. Keraamisessa sideaineessa etuina on sen lujuus ja huokoisuus, mitkä antavat hiomakivelle korkeat raaka-aineen poisto-ominaisuudet. Etuina on myös, ettei keraaminen sideaine reagoi veteen, öljyihin tai happoihin, mille hiomakivi voi altistua esimerkiksi jäähdytysnestestä. (Aaltonen 2003. 203; Youssef, & El-Hofy, 2008. 124-125)

Hiontaparametrien optimoinnissa hiomakivellä on suuri merkitys lopputulokseen, koska erilaisia leikkuunopeuksia tai lastuvirtojen arvoja ei voida suoraan kääntää erilaiselle hiomakivelle. Tässä työssä ei kuitenkaan perehdytä tai testata eri hiomakivien vaikutusta parametreihin, vaan vakioidaan hiomakivi jo olemassa olevaan hiomakivityyppiin. Hiomakivien valinnassa on suoritettu eri testaukset ja johtopäätökset omassa tutkimuksessaan.

5 TAGUCHI

Taguchi-menetelmä on 1900-luvulla kehitetty laadun optimointimenetelmä tuote- ja prosessisuunnittelussa. Japanilainen tohtori Genichi Taguchi kehitti menetelmän, joka parantaa kokeellista toimintaa ja kokeista saatavan informaation tulkintaa. Taguchi-menetelmässä pyritään samanaikaisesti kehittämään tuotteista ja prosesseista kustannustehokkaampia ja laadullisesti parempia. (Karjalainen 1990, 3)

Optimointimenetelmä voidaan jakaa kolmeen perusvaiheeseen: systeemisuunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleranssisuunnittelu. Nämä kaikki vaiheet tukevat Taguchin laatufilosofian perusajatusta, joka koostuu neljästä kohdata: 1. Laadun parantaminen ja kustannusten alentaminen samanaikaisesti on mahdollista, kun pienennetään tuotteen ominaisuuksien vaihtelua, 2. Tuotteen ominaisuuksien vaihtelua pienennetään käsittelemällä ohjaus- ja häiriötekijöitä erillisinä niin, että tuotteesta tulee robusti, 3. ohjaamalla ja valitsemalla suunnittelijan käytettävissä olevia tekijöitä voidaan sellaisten häiriötekijöiden vaikutukset minimoida, joihin ei voida suoraan vaikuttaa ja 4. tavoitearvo on vain laatua. (Karjalainen 1990, 7-8)

5.1 Systeemisuunnittelu

Tässä menetelmässä systeemisuunnittelulla tarkoitetaan asiakaslähtöistä tuotteen suunnittelua. Suora matemaattinen menetelmä ei sovi systeemisuunnitteluun sillä systeemisuunnittelussa pyritään hakemaan asiakaslähtöisesti tuotteen tarpeet ja selvittämään mahdolliset erilaiset tuotekonseptit. Systeemisuunnittelussa yhdistetään tieteen ja insinööritekniikan viimeisimmät tiedot. Lopulliset parametrit valitaan parametrisuunnittelussa, vaikka systeemisuunnittelussa valitaankin alustavat tuoteparametrit. (Karjalainen 1990, 41-43; Karjalainen 1992, 15)

Systeemisuunnittelussa voidaan käyttää apuna Quality Function Deployment -menetelmää eli QFD-menetelmää. QFD-menetelmän tarkoituksena on asettaa asiakkaan tarpeet suunnittelun lähtökohdaksi ja niiden perusteella luoda matriiseja ja taulukoita. Näiden matriisien ja taulukkojen avulla hallitaan asiakkaan tarpeita tilastollisesti. Luodut taulukot ja matriisit muodostavat suoraan dokumentaation kyseisestä tuotteen ja prosessin suunnittelusta. (Karjalainen 1990, 41-43; Karjalainen 1992, 15)

5.2 Parametrisuunnittelu

Parametrisuunnittelua voidaan pitää Taguchi-menetelmän tärkeimpänä osana. Sen tarkoituksena on, että suunnittelija asettaa prosessin tai tuotteen ominaisarvot siten, että voidaan saavuttaa maksimaalinen suoritusarvo, minimoida häiriötekijät ja suoriutua kaikesta kustannustehokkaasti. Tehokkaammin ominaisarvoja voidaan parantaa pienentämällä tuotteista hävikkiä ja häiriöitä. Näitä voidaan parhaiten pienentää optimoimalla ohjaus- ja häiriötekijöiden keskinäisvaikutuksia. Ohjaustekijöinä voidaan pitää suunnittelijan asettamia parametreja tuotteelle ja näitä voidaan hallita ja muuttaa suunnittelussa. Häiriötekijät taas ovat tekijöitä, joita ei voida hallita suoraan eikä niitä aseteta tuotteelle. Eli ohjaustekijöitä optimoimalla pyritään pienentämään häiriötekijöiden vakikutusta. (Karjalainen 1990, 41-48)

Parametrisuunnittelun perusajatuksena voidaan pitää, että suunnittelussa lähdetään liikkeelle halvimista ratkaisuista tuottaa tuotteita tai prosesseja. Tässä esimerkiksi valitaan halvimmat materiaalit ja komponentit. Tämä eroaa yleisestä suunnittelusta siten, että tavallisesti valitaan parhaat tarvikkeet ja prototyypin jälkeen pyritään vaihtamaan tarvikkeet halvempiin. (Karjalainen 1990, 41-48)

Etuina tällaisessa suunnittelussa voidaan pitää; huomioidaan ohjaus- ja häiriötekijöiden keskinäisvaikutukset ja epälineaariset efektit, voidaan huomioida samaan aikaan tuotteen tai prosessin keskiarvoja ja poikkeamia, voidaan soveltaa tuotteensuunnittelusta organisaatiosuunnitteluun ja parametrisuunnittelulla voidaan parantaa tuotteen tai prosessin laatua nostamatta kustannuksia. Parametrisuunnittelussa hyödynnetään Taguchi-menetelmän koesuunnittelu- ja optimointimenettelyllä. (Karjalainen 1990, 41, 45-48)

5.3 Toleranssisuunnittelu

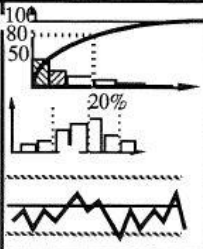
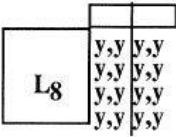

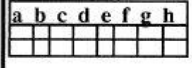
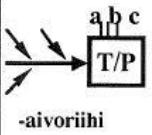
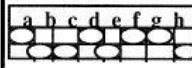
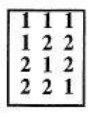
Kuten parametrisuunnittelussa myös toleranssisuunnittelussa on tarkoituksena pienentää vaihtelua. Aina parametrisuunnittelussa ei voida minimoida vaihtelua tarpeeksi pieneen, ja tässä vaiheessa vaihtelun pienentämiseen käytetään tuotteeseen tai prosessiin valikoiduja toleransseja. Yleisesti kuitenkin toleransseja pyritään välttämään tai ainakin asettamaan toleranssit mahdollisimman laajaksi, koska tiukat toleranssit aiheuttavat lisää kus-

tannuksia. Kuten aikaisemmin on mainittu, kustannuksia pyritään välttämään myös materiaalien ja komponenttien kohdalla valitsemalla halvimmat materiaalit ja komponentit. (Karjalainen 1990, 41, 75-80)

Kuitenkin jos havaitaan tuotteen tai prosessin vaihtelut liian suuriksi ja tästä syystä joudutaan käyttämään parempia materiaaleja, komponentteja tai asettamaan niille tiukempia toleransseja, niin aluksi luodaan hävikkifunktio, jonka avulla arvioidaan kustannukset vaihtelun syntymisestä ja verrataan kustannuksiin, jotka tulevat esimerkiksi parempien materiaalien tai tiukempien toleranssien käyttämisestä. Toleranssisuunnittelussa etsitään myös vaihtelujen kokonaismäärää eri tuotteen tai prosessin osioissa. Ja näin voidaan spesifioida suurin vaihtelun aiheuttaja johonkin yhteen vaiheeseen tai osaan tuotteessa tai prosessissa. Esimerkiksi jos tuotteen yksi osio aiheuttaa suurimman osan vaihteluista, niin määritetään tälle osiolle tiukemmat toleranssit ja kustannukset eivät nouse kaikissa tuotteen osioissa. (Karjalainen 1990, 41, 75-80)

6 KOESUUNNITTELU

Teollista koesuunnittelulla tarkoitetaan jonkun tuotteen tai prosessin eri parametrien tutkimista kokeellisesti. Eri parametreja voidaan tutkia monella eri tavalla, riippuen halutusta lopputuloksesta. Lopputuloksena voi olla esimerkiksi suoraan optimit toimintatavat kyseiseen prosessiin tai tuotteeseen tai lopputuloksena voi olla kaikista tutkituista parametreista vaikuttavimmat tekijät. Koesuunnittelu prosessin yksi vaihtoehtoinen etenemistapa on esitetty kuvassa 6. Kuten kuvasta voi huomata, prosessin läpiviennissä on kahdeksan eri vaihetta. Vaiheet ovat: ongelman määrittely, tavoitteen määrittely, ohjaus- ja häiriötekijöiden ja tasojen määrittely, kokeen suunnittelu, kokeiden suorittaminen ja datan kerääminen, datan analysointi, tulosten tulkinta ja optimin valinta sekä tarkistuskoe. (Karjalainen 1992, 53)

No	Vaihe	Menetelmät	No	Vaihe	Menetelmät
1.	Ongelman (kohteen) määrittely		5.	Kokeiden suoritus ja datan kerääminen	
2.	Tavoitteen määrittely		6.	Datan analysointi	 -S/N-suhde -Keskiarvo -Anova -Vastetaulut
3.	Ohjaus- ja häiriötekijöiden ja tasojen määrittely		7.	Tulosten tulkinta ja optimin valinta	 -Optimivalinta -Optimiennuste
4.	Kokeen suunnittelu	 -Ortogonaalmatriisit -Lineaari-kuvaajat L ₄	8.	Tarkistuskoe	-Varmistetaan koetulokset (additiivisuusmalli)

KUVA 6. Taguchi-menetelmän mukainen koesuunnittelu järjestys. (Karjalainen 1992, 54)

Taguchi-menetelmän mukaisessa etenemistavassa aloitetaan ongelman määrittelystä. Eli aloitetaan siitä mitä halutaan muuttaa tai parantaa. Onko ongelma jo olevassa tuotteessa tai prosessissa vai onko tuote tai prosessi kokonaan uusi. Ongelman määrittelyssä on hyvä myös huomioida valitun koemenetelmän soveltuvuus ongelman ratkaisemiseksi. Koemenetelmän valinnalla on suuri merkitys esimerkiksi todellisten kokeen kustannuksien tai olemassa olevien resurssien käyttöön kokeessa ja ongelman ratkaisussa. Esimerkiksi yksi muuttuja kerrallaan tehtävässä kokeessa käytetään resursseja vain yhden parametrin optimointiin tai monen tekijän kokeessa jokainen parametrien kombinaatio on testattava ja tämä vie paljon resursseja ja aikaa. Ammattitaito vaikuttaa myös menetelmän valintaan sillä Taguchi-menetelmä perustuu ortogonaalimatriiseihin ja niiden käyttö on oltava tiedossa ongelmaa ratkaistaessa. (Karjalainen 1992, 53-55)

Ongelmakohtien selvitysten jälkeen on määritettävä tavoitteet, joihin kokeissa pyritään. Tavoitteet tulee olla konkreettisia esimerkiksi numeraalisia arvoja eikä vain toiveita paremmasta suorituksesta. Samalla määritetään myös mittaukset, joita kokeessa mitataan. Nämä ovat ns. ulostulot joita tulkitaan kokeiden suorituksen jälkeen. Esimerkiksi jos ongelmana on ollut prosessin hitaus, niin tuloksena täytyy mitata prosessin aikaa. Ja tavoitteeksi on määritettävä, joku maksimiaika. Tavoitteisiin on myös määritettävä rajoitteet, joita tavoitteeseen pääsy ei saa ylittää. Esimerkiksi kustannukset voivat olla tällainen tekijä. Vaikka prosessi ajallisesti nopeutuisi äärimmilleen, mutta tällöin prosessin kustannukset nousisivat pilviin, niin silloin tavoitteena ei voi olla mahdollisimman pieni aika vaan ajalle täytyy asettaa raja, jolloin kustannukset pysyvät maltillisina. (Karjalainen 1992, 55)

Tavoitteiden jälkeen voidaan miettiä ohjaus- ja häiriötekijöitä. Nämä ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat haluttuun lopputulokseen. Aikaisempaan esimerkkiin viitaten tällaisia tekijöitä voi olla mm. työstöarvot, koneiden kunto, koneiden tyyppi, käytettävät materiaalit tai työstötavat. Tekijöitä etsiessä on hyvä käyttää asiantuntemusta kaikilta tutkittavaan kohteeseen liittyviltä tahoilta. Tällaisia tahoja voivat olla mm. asiantuntijat, prosessin operaattorit, ja suunnittelijat. Eli kannattaa hyödyntää paljon eri näkökulman omaavia asiaan perehtyneitä henkilöitä, jotta saadaan mahdollisimman paljon eri tekijöitä nimettyä. Taguchi-menetelmän mukaan koesuunnittelua tehdessä tulee tekijöiden nimeämisen yhteydessä antaa tekijöille myös ns. ääriarvot. Jos esimerkiksi poran pyörimisnopeutta

pidetään vaikuttavana tekijänä, niin pyörimisnopeudelle täytyy määrittää maksimi ja minimiarvo. Tai jos koneen tyyppin oletetaan vaikuttavan prosessin nopeuteen, niin kokeeseen tulee määrittää kone a ja kone b. (Karjalainen 1992, 56-60)

Kokeiden suunnittelussa on hyvin tärkeää erottaa sisäortogonaalimatriisi ulkoisesta ortogonaalimatriisista eli erottaa aikaisemman kohdan suunnittelut ohjaustekijät ulkoisista häiriötekijöistä. Tämän seurauksena täytyy sijoittaa ohjaustekijät ortogonaalimatriisiin ja pitää ulkoiset häiriötekijät mahdollisimman vakaina. Häiriöiden samankaltaisuus on ensiarvoisen tärkeä, jotta kokeiden tulokset ovat vertailukelpoisia toisiinsa nähden. Suunnitteluvaiheessa on myös hyvä luoda selkeät ohjeet ja mittauspöytäkirjapohjat kokeiden suorittajalle, mikäli kokeita ei suorita itse. Myös on huomioitava esimerkiksi mitä koneita ja mittavälineitä tullaan käyttämään ja varattava tarvittavat resurssit niiden käytöstä. Tämä voi esimerkiksi aiheuttaa kustannuksia kokeita tehdessä, jos esimerkiksi käytetään tuotannossa käytössä olevia koneita ja laitteita. (Karjalainen 1992, 61-64)

Edellä mainittujen hyvä esivalmistelu kokeita suorittaessa vähentää ulkoisten häiriöiden syntymistä. Myös kokeen tekijän on varmistuttava ennen kokeiden suorituksen aloitusta, että kokeen olosuhteet pysyvät stabiilina ja hän ymmärtää varmasti, mitä dataa kokeissa on tarkoitus dokumentoida ja mitata. Ennen kaikkea kokeita suorittaessa täytyy varmistua kokeiden vertailukelpoisuudesta toisiinsa nähden. Myöskään kokeentekijä ei saa myötävaikuttaa kokeiden tuloksiin, vaikka hänen mielestään kokeiden lopputulos ei olisikaan ennusteiden mukainen. Jos mahdollista kokeita täytyy uusua, mikäli kokeentekijä huomaa virheen sattuneen koetta tehdessä ja tämän vaikuttaneen lopputulokseen. (Karjalainen 1992, 64-67)

Dataa analysoidessa matemaattisten laskutoimitusten tekemiseen on hyvä käyttää valmiita tietokoneohjelmistoja. Näiden oikeaoppinen käyttö vähentää inhimillisten virheiden syntymistä laskutoimituksissa ja helpottaa niiden tekemistä. Mikäli kokeiden tekemisen jälkeen kokeista saatua dataa on hukkunut tai että on erittäin suuri syy epäillä olosuhteiden stabiilisuuden liiallinen vaikutus kokeiden lopputulokseen, niin kokeita täytyy ensisijaisesti uusua. Kuitenkaan jos kokeita ei ole mahdollista toistaa voidaan yksittäisten kokeiden tuloksia arvioida esimerkiksi vaiheittaista likiarvomenetelmää käyttäen tai korvata se keskiarvolla. Tämä kuitenkin on huomioitava todellisessa lopputuloksessa ja arvioitava siitä johtuvaa virhettä. (Karjalainen 1992, 67-70)

Kokeista saadun data-analyysin perusteella koesuunnittelussa voidaan edetä vaiheeseen, jossa määritetään tutkittavaan kohteeseen optimitilanne. Tällainen tilanne saavutetaan, kun tavoitteeseen on päästy ja kokeiden perusteella voidaan todeta vaihtelun olevan pienin mahdollinen. Optimivalinnan yhteydessä täytyy vielä todistaa onko koe ollut luotettava ja voidaanko tuloksien perusteella todeta, että alkuperäiseen ongelmaan on löydetty ratkaisu. Eli lopuksi on aina suoritettava konfirmaatiokoe. Konfirmaatiokoe täytyy suorittaa samanlaisissa olosuhteissa kuin muutkin kokeet, jotta niitä voidaan vertailla. Konfirmaatio koe suoritetaan matemaattisesti lasketuilla optimiarvoilla ja näillä tuloksilla pitäisi saada ennustettu tulos. Esimerkiksi jos haetaan nopeinta aikaa prosessissa, niin konfirmaatiokokeen tuloksen täytyisi olla nopein eli ennusteen mukainen. Kuitenkaan jos ennusteeseen ei ylletä konfirmaatio kokeessa, voidaan ajatella jonkin olevan pielessä. Tällaisia syitä voi olla: tekijöiden huono valinta, tekijöiden tasoja ei ole asetettu riittävän laajalle, vahva keskinäisvaikutus, häiriötekijöiden huono valinta tai ne peittävät koetuloksen, laatuominaisuuden huono vaste, parametrisuunnittelulla ei voida saavuttaa asetettuja tavoitteita tai nykytekniikan taso eri riitä ongelman ratkaisuun. (Karjalainen 1992, 74)

7 MERKITTÄVIEN PARAMETIREN ETSIMINEN

Työn lähtökohtana oli tarve saada hammashiontaprosessista kustannustehokkaampi vakiotyönimikkeillä, joita Katsa Oy tuottaa asiakkailleen säännöllisin väliajoin. Kustannustehokkaampi toiminta tarkoittaa käytännössä tässä tapauksessa ajallisesti nopeampaa hampaiden profilihiontaa. Eli ajatuksena lähdettiin liikkeelle hiontakoneen parametrien optimoinnista vakiotyönimikkeille, koska hammashiontaprosessi on varsin hidas työstötapa etenkin suurille moduuleille ja suurien hammaspyörien työstöajat yrityksellä vaihtelevat tunnista muutamiin tunteihin.

Tässä vaiheessa yrityksellä oli tiedossa ongelma, johon haluttiin paneutua. Aikaisemman kokemuksen mukaan alkuperäisenä suunnitelmana ongelman ratkaisemiseksi oli suorittaa full factor -koe, josta saadaan selville kaikille halutuille parametreille optimoidut arvot. Eli tavoitteeksi määritetään optimoidut arvot, jotka pienentävät hionta-ajan mahdollisimman pieneksi, kuitenkin rajoitteina hionta-ajan pienentämiseen oli, ettei hiottaviin hampaisiin saa syntyä hiontapalamista ja hampaan kyljen pinnanlaatu oli säilyttävä alle Ra 1,0. Muutoin geometrisesti tai mittatarkkuudellisesti hampaisiin rajoitteita ei määritetty, koska ne ovat yrityksen laatufilosofian mukaan itsestäänselvyksiä ja operaattorin ammattitaidosta riippuvia asioita. Tavoitteiden määrittelyssä todettiin, että vertailuaika todennetaan todelliseksi sekunti määräksi kokeita suoritettaessa ensimmäisenä, jolloin voidaan kokeiden tuloksia vertailla samoissa olosuhteissa.

Jotta ajallista parannusta oli mahdollista saavuttaa, täytyi päättää ohjaus ja häiriötekijät kokeisiin. Suurin osa tekijöistä oli jo vakioitu lähtökohdallisesti, sillä niistä oli tehty omia kokeita jo aikaisemmin tai muutoin nämä tekijät olivat jo todettu kustannustehokkaiksi tai ettei niitä ollut kustannussyistä mahdollista muuttaa. Tällaisia tekijöitä olivat mm. kone tyyppi, leikkuuneste, leikkuunestesuuttimet, hiomakivi ja timantointirulla. Esimerkiksi hiontakoneen vaikutusta aikaan ei ollut mahdollisuutta testata, koska normaali tehtaantuo tinto täytyi pitää kokoajan yllä, eikä useampia koneita voitu varata testiin. Myöskin testiin vakioitiin leikkuuneste ja leikkuunestesuuttimet, sillä niiden vaikutus ei suoraan ole aikaan riippuvainen vaan niiden tehtävä on lähinnä estää hiontapalamista ja parantaa pinnanlaatua. Suuttimet olivat testissä käytännössä mahdollisimmat hyvät, sillä ne olivat juuri tarkoitukseensa 3D-tulostetut. Muutoin hiomakivistä oli jo tehty aikaisemmin tutkimuksia, missä oli päädytty käytettyyn hiomakiveen. Kokonaisuudessaan tekijöitä etsittiin

aivoriihessä, johon osallistui erialojen henkilöitä. Mukana oli tuotannontyöntekijä, tuotannonesimies, menetelmäsuunnittelija ja hammashionnan asiantuntija. Kaikilla osallistujilla on hammashiontataustaa. Tällä tavalla mahdollistettiin mahdollisimman laaja näkemys eri ohjaus- ja häiriötekijöistä. Kaikista tekijöistä tutkittavaksi valittiin kymmenen muuttujaa, joiden vaikutus oli kokemusten perusteella suurin tutkittaviin muutoksiin nähden. Nämä tekijät olivat: rouhinnan; syöttönopeus, sisäänsyöttö, leikkuunopeus, timantointi volyyymi, timantoinnin nopeusuhde ja viimeistelyn; syöttönopeus, leikkuunopeus, timantointi volyyymi, timantoinnin nopeussuhde ja timnantoinnin peittoaste. Kaikille näille parametreille arvioitiin samalla maksimi ja minimi arvot, jotka olisivat mahdollista toteuttaa. Kaikki mahdolliset ohjaus- ja häiriötekijät ovat nähtävissä liitteessä 1.

Tutkimuksen edetessä kokeiden suunniteluun, tutkimuksessa havaittiin suuri ongelma kokeen suorittamiseen. Ongelmaksi tuli kokeiden laajuus, sillä full factor -kokeiden suoritus eli täydellinen parametrien optimointi kaikille kymmenelle parametrille vaatii yli sadan kokeen tekemisen. Tähän ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta sillä aikaa tai materiaaleja kokeiden suorittamiseen ei ollut niin paljoa käytettävissä. Myös tutkimuksen kustannukset olisivat nousseet liian suuriksi, koska yli sadan tutkimushammaspyörän hionmiseen kulutettu aika hidastaa myös muuta tuotantoa. Koska tutkimukseen oli jo käytetty paljon resursseja, ei ollut järkevää lopettaa tutkimusta tähän kustannusten nousemiseen vaan tutkimus muutettiin Taguchi-tutkimukseksi, jossa saadaan selville vaikuttavimmat tekijät näistä kymmenestä muuttujasta. Todellisuudessa tutkimuksessa muuttui tutkimuksen lopputulos, sillä aikaisemmin tuloksena oli saada yhdelle vakiotyönimikkeelle optimoidut parametrit, mutta nyt lopputulokseksi saataisiin vaikuttavimmat parametrit. Muuten kokeet eivät muutu, sillä kokeissa edelleen tutkittaisiin aikaa, joka hammaspyöränhionmiseen kuluu ja hionnassa ei edelleenkään saa tapahtua hiontapalamista ja kyljen pinnanlaatu on pysyttävä riittävän hyvänä.

Taguchi-kokeen suunnitteluvaiheessa luotiin ortogaalmimatriisi, johon sijoitettiin kaikki halutut muuttujat. Ortogaalmatriisi luotiin tietokone avusteisesti Minitab-ohjelmistolla. Tässä koemenettelyssä ortogonaalmatriisiin sijoitetaan vain arvoja yksi ja kaksi. Nämä arvot kuvaavat haluttujen muuttujien maksimi ja minimi arvoja. Ortogonaalmatriisi on kuvattu taulukossa 2. Taulukossa esitettyjen muuttujien edessä oleva R-kirjain tarkoittaa rouhintaa ja V-kirjain viimeistelyvaiheessa olevaa parametria. Tästä vaiheesta koetta voi-

tiin todeta, että kokeita tarvittaisiin yksi vertailukoe alkuperäsillä parametreilla, 12 koesuunnittelukoetta ja yksi konfirmaatiokoe, jolla varmistuttaisiin kokeiden luotettavuudesta eli yhteensä vähintään 14 koekappaletta.

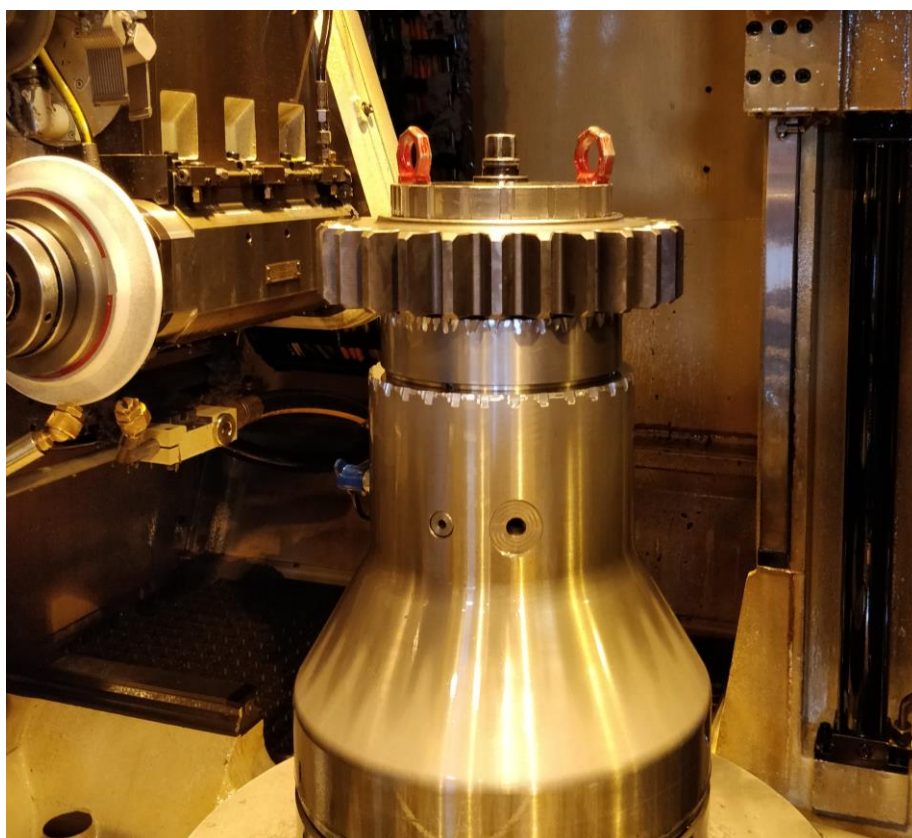
TAULUKKO 2. Ortogonaalimatriisi.

R Syöt tö- no- peus	R Si- sää- nsy öttö	R Leik- kuu- no- peus	R Ti- man- tointi vo- lyymi	R Ti- mantoin- nin no- peus- suhde	V Syöt tö- no- peus	V Leik- kuu- no- peus	V Ti- man- tointi vo- lyymi	V Ti- mantoin- nin no- peus- suhde	V Ti- man- toinnin peitto- aste
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	1	1	1	2	2
1	2	1	2	2	1	2	2	1	1
1	2	2	1	2	2	1	2	1	2
1	2	2	2	1	2	2	1	2	1
2	1	2	2	1	1	2	2	1	2
2	1	2	1	2	2	2	1	1	1
2	1	1	2	2	2	1	2	2	1
2	2	2	1	1	1	1	2	2	1
2	2	1	2	1	2	1	1	1	2
2	2	1	1	2	1	2	1	2	2

Alkuperäisen suunnitelman mukaan hammaspyörä, jolle parametrien optimointi tuli suorittaa, oli suuri moduulinen ja suuri hammaslukuinen suorahampainen lieriöpyörä. Kuitenkin, kun tutkimus menetelmää ja tavoitetta muutettiin merkittävien parametrien etsimiseen, oli kustannussyistä järkevää muuttaa koepöörää huomattavasti halvemmaksi. Koetta suunnitellessa valittiin koepööräksi noin 300 mm halkaisijalta oleva suorahampainen lieriöhammaspyörä, jonka moduuli oli 10 ja hammasluku 27. Tämä huomattavasti edullisempi hammaspyörä soveltuu hyvin koepööräksi, koska ainoastaan moduulin koko oli merkittävä tekijä tutkimuksissa ja 10 moduulinen hammaspyörä voitiin todeta vastaavan alkuperäisen hammaspyörän suurta moduulia.

Pienenpään hammaspyörään siirryttäessä, vaihdettiin samalla hiomakonetta Gleason-Pfauter P1200G -koneesta Gleason-Pfauter P600/800G -koneeseen. Tämä tehtiin käytännön järjestely syistä, sillä pienemmälle koneelle oli helpompi tehdä asetukset sarjaa varten ja samoja hammaspyöriä voitiin hioa kokeiden jälkeen suoraan tuotantoon.

Kokeiden suunnittelun jälkeen kokeita aloitettiin suorittamaan tekemällä normaalit valmistelut hiontakoneelle, kuten muissakin tuotannon sarjoissa. Kuitenkin sillä erolla, että hiomakivi vaihdettiin suoraan käyttämättömään kiveen, koska haluttiin varmistua kokeiden olosuhteiden pysyvän mahdollisimman yhtenäisenä ja stabiilina eikä hiomakiveä tarvitsisi vaihtaa kesken kokeiden. Kuten jo suunnitteluvaiheessa todettiin normaalien hionta-asetusten tekemisen jälkeen, kokeet aloitettiin hiomalla ensimmäinen hammaspyörä tavallisilla työstöparametreilla. Tällä tavalla kokeille todennettiin alkuperäisten parametrien todellinen hionta-aika, kylkien pinnanlaatu sekä ettei kyljille synny hiontapalamista. Tutkittavien suureiden lisäksi alkuperäisillä arvoilla tehdyllä todennuksella varmistuttiin laadullisesti hyvään lopputulokseen, niin geometrisesti kuin mittatarkkuudellisesti. Vaikka kokeiden tavoitteissa ei huomioitukaan parametrien vaikutusta laadullisesti hiontakappaleisiin. Tällä tavalla voitiin kuitenkin seurata radikaaleja muutoksia lähtökohtaan. Kokeiden hiontatapa on kuvattuna kuvassa 7.



KUVA 7. Hammaspyörän profiilihionta muotohionta menetelmällä.

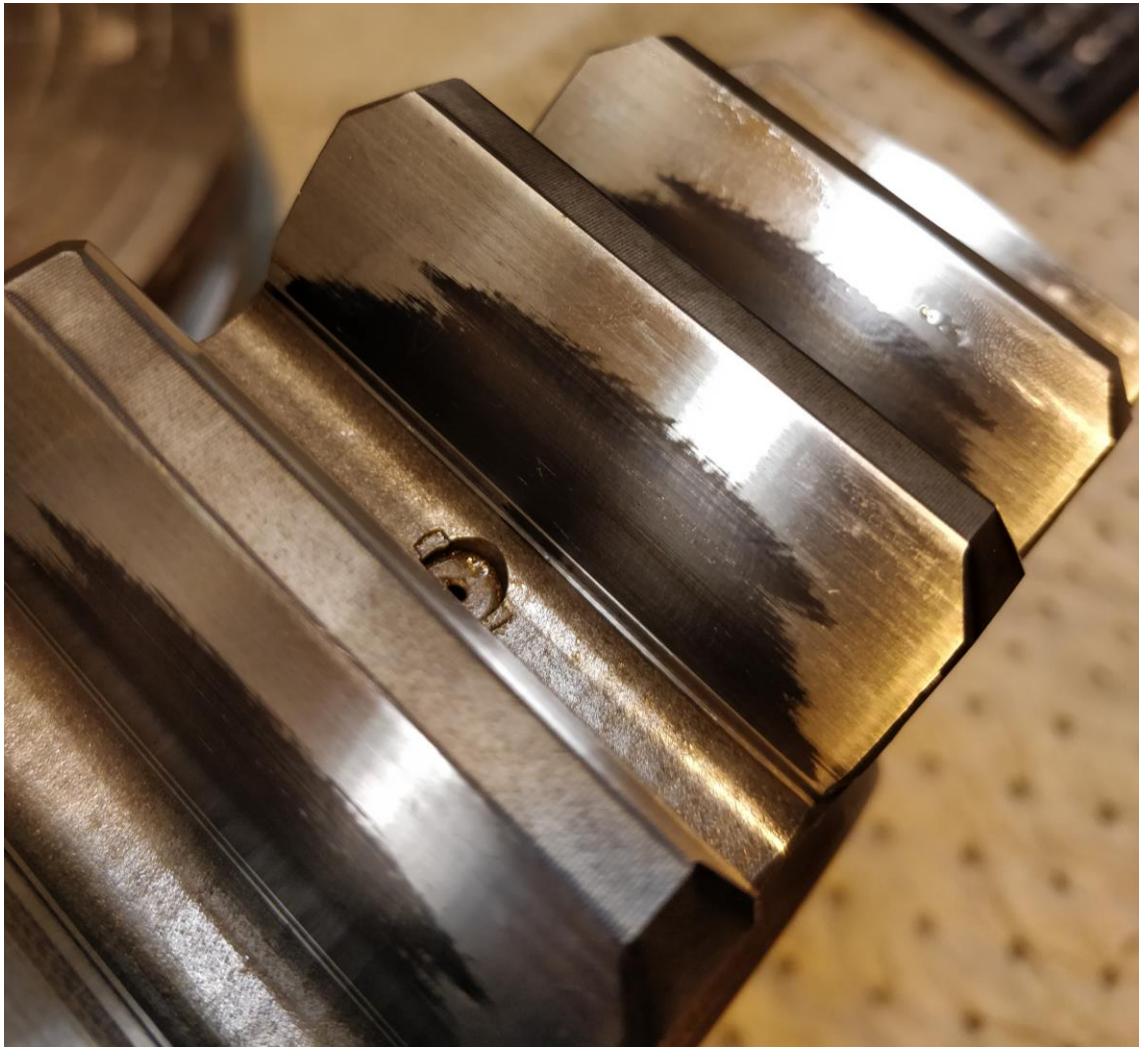
Kun vertailukappale oli hiottu, voitiin siirtyä todellisiin tutkimuksiin. Kokeet päätettiin aloittaa kokeesta, jossa ennustettiin olevan suurin rasitus hiontakoneelle, koska maksimi parametrien kerrannaisvaikutusta ei ollut tutkittu aikaisemmin. Tähän päädyttiin koska, suurimman rasituksen omaavan kokeen onnistuminen hiontakoneella takasi muiden kokeiden onnistumisen ilman koneen maksimirasituksen ylittymistä. Suurin rasitus ennustettiin tapahtuvan kun käytössä oli maksimi parametrit rouhinnan sisään syötölle, rouhinnan syöttönopeudelle ja rouhinnan leikkuunopeudelle. Alkuperäisen suunnitelman mukaan arvot asetettiin sisään syötölle 0,5 mm, syöttönopeudeksi 5500 mm/min ja leikkuunopeudeksi 50 m/s. Näillä parametreilla hiontakoneeseen asennetut tehoanturit havaitsivat karankäyttöasteen ylityksen ja aiheuttivat hätäpysäytyksen, ettei kone voisi hajottaa itseään. Tästä syystä kokeille asetettuja parametrien maksimiarvoja jouduttiin pienentämään. Ensin parametrien arvoiksi asetettiin 4600 mm/min, 0,35 mm ja 50 mm/s. Tämäkään parametrien madallus ei riittänyt, vaan maksimiarvoja jouduttiin madaltamaan vielä arvoihin: 4400 mm/min, 0,25 mm ja 50 mm/s. Vaikka leikkuunopeuden oletettiin olevan rasitusta aiheuttava tekijä, sen pienentämistä ei kuitenkaan toteutettu, koska hiomakiven toimittaja lupaa maksimiarvon olevan 50 mm/s. Muutoin maksimi ja miniarvot ovat kuvattu taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Parametrien maksimi- ja miniarvot

	Min	Max
R Syöttönopeus	1000	4400
R Sisäänsyöttö	0,05	0,25
R Leikkuunopeus	20	50
R Timantointi volyymi	600	3000
R Timantoinnin nopeussuhde	0.4	0.9
V Syöttönopeus	1000	4400
V Leikkuunopeus	20	50
V Timantointi volyymi	300	700
V Timantoinnin nopeussuhde	-0.4	-1.2
V Timantoinnin peittoaste	1	4

Ensimmäisen virallisen kokeen onnistuttua arvioitiin hiontakoneen karan maksimin suorituskyvyn löytyneen, eikä sen tulisi ylittyä muissa kokeissa. Muutoin voitiin todeta parametrien maksimi arvojen kerrannaisvaikutuksen olevan koneen äärirajoilla, koska tässä kokeessa karan tehollinen kuorma kävi yli 80 %:ssa sallitusta maksimista. Hiontakone

ilmoitti varoituksen kuormituksesta, muttei pysäyttänyt työstöä. Tämän jälkeen kokeita aloitettiin suorittamaan järjestyksessä ensimmäisestä alkaen. Kokeista aikaa mitattiin hiontakoneen ilmoittamalla ajanottojärjestelmällä, pinnanlaatua Klingelnberg-mittauskoneella hampaan profiilin- ja jakomittauksen yhteydessä ja hiontapalamista normaaleilla hiontapalamisen mittaamismenetelmillä siihen perehtyneen ammattilaisen toimesta. Hampaiden laatua voitiin arvioida myös silmämääräisesti, sillä hampaiden hiontapalaminen oli havaittavissa hampaan pinnalta useammassa kokeessa. Kuvassa 8. on esitetty lämmön vaurioittamat hampaat hammaspyörässä. Hiontapalaminen oli havaittavissa myös hampaan profiili-käyrissä, jotka muuttuivat huomattavasti vertailupyörän profiileista. Käytännössä tämä oli selitettävissä hiomalaikan tukkiutumisella, mutta tukkiutumiselle ei voitu antaa syytä ennen datan analysointia.

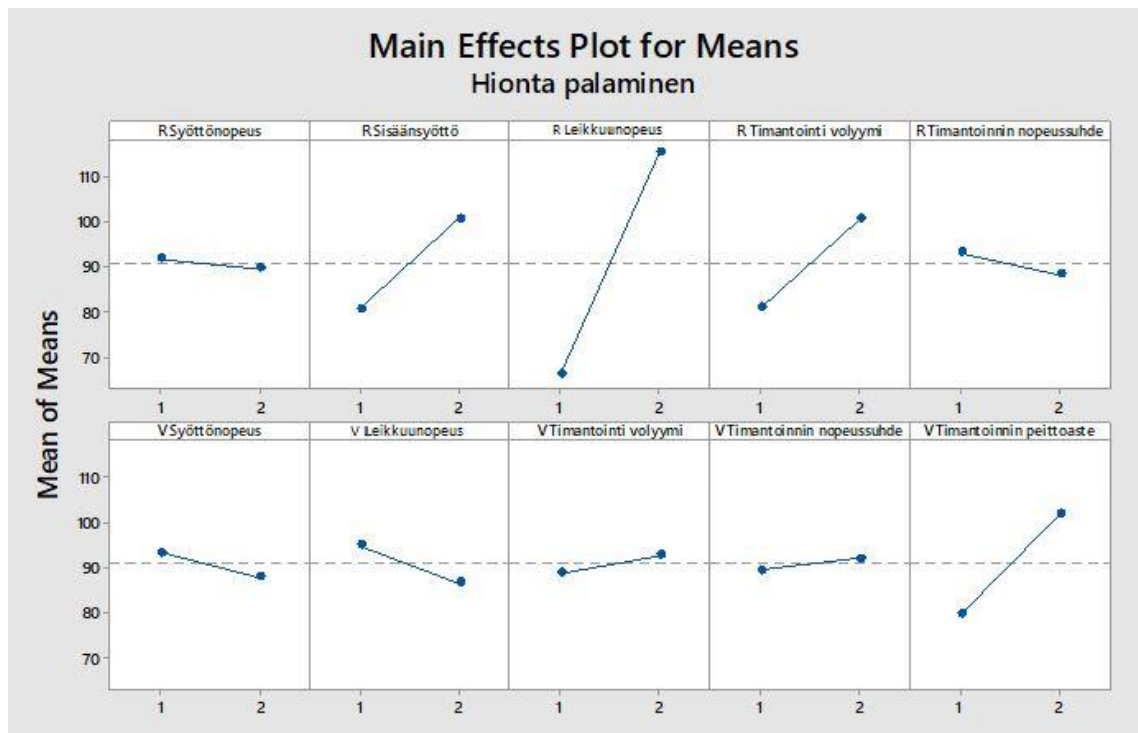


KUVA 8. Liiallinen lämpö aiheuttaa vaurioita hampaassa.

Kokeista saadut tulokset koottiin mittauspöytäkirjaan. Ajallisesi nopeimman ja hitaimman tuloksen ero oli noin 6300 sekuntia, pinnanlaatuojen ero oli Ra 0,43 ja hiontapalamisen eli kohinan maksimiarvojen ero noin 85 mp. Koko mittauspöytäkirja on nähtävissä liitteessä 2.

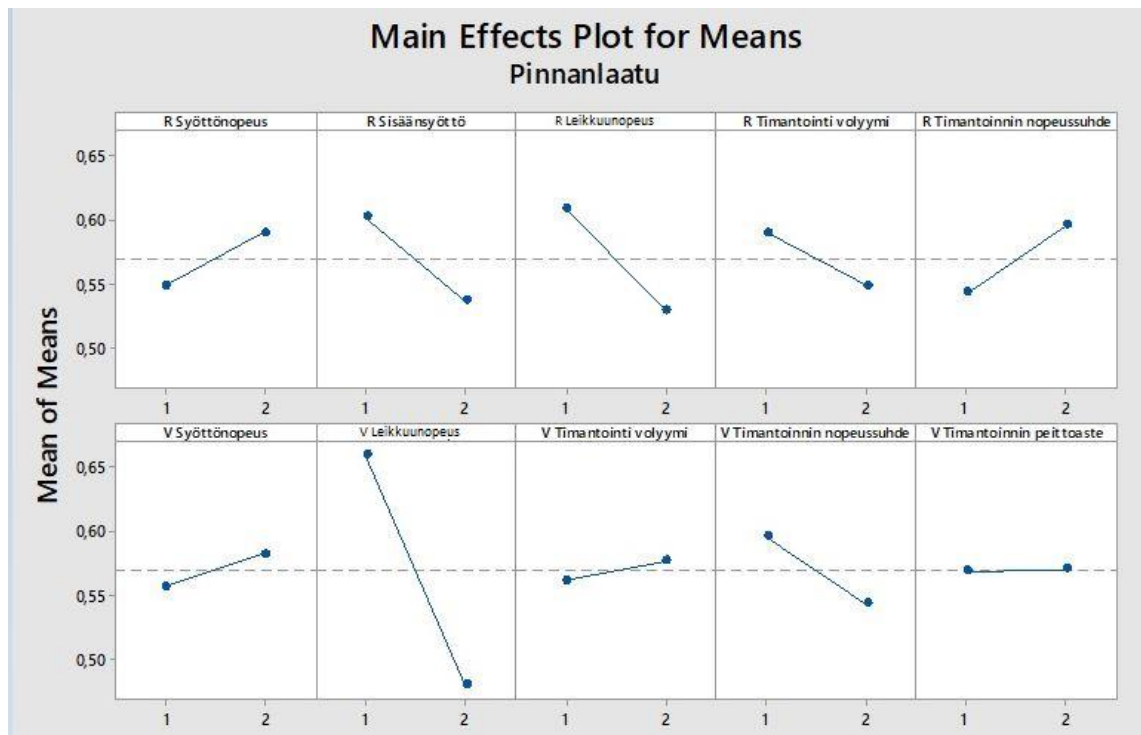
Kokeiden suorituksen jälkeen dataa voitiin alkaa analysoimaan. Kerätty data sijoitettiin Minitab-ohjelmistoon, jonka avulla voitiin suorittaa matemaattiset laskutoimitukset. Ohjelmistoon täytyi vain sijoittaa alkuperäinen ortogonaalimatriisi, mitatut suureet tuloksiin ja halutut lopputulokset. Ohjelmiston analyysin perusteella saatiin kaikkien valittujen ohjaustekijöiden vaikutus aikaan, pinnanlaatuun ja hiontapalamiseen. Todellisuudessa tulokseksi saatiin jokaiselle tutkittavalle suurelle kaavio. Kaavioista voidaan havaita vaikuttavimmat tekijät lineaaristen kuvaajien kulmakertoimien perusteella. Suurimpien kulmakertoimien omaavat ohjaustekijät ovat todellisesti vaikuttavimpia tekijöitä halutulle suurelle.

Tuloksena hiontapalamisen vaikuttavin yksittäinen tekijä oli rouhinnan leikkuunopeus. Rouhinnan leikkuunopeuden jälkeen merkittäviksi tekijöiksi osoittautui rouhinnan sisäänkyöttö, rouhinnan timantointi volyymi ja viimeistelyn timantoinnin peittoaste. Muiden tekijöiden vaikutus hiontapalamiseen voitiin todeta olevan merkityksetöntä tai lähes merkityksetöntä. Kokeissa saatiin hiontapalamiselle suuria vaihteluita ja silminnähden palaneet kappaleet osoittautuivat myös mittausten perusteella palaneiksi, joten tuloksia voitiin pitää suurimmaksi osaksi luotettavina hiontapalamisen osalta. Kuitenkin on epävarmuustekijän hiontapalamisen tutkimiselle tuo, että myös samanlaisia kappaleen sisäisiä vaurioita voi olla jo ennen hiontaa. Tämä voi johtua esimerkiksi raaka-aineesta tai ennen hiontaa tapahtuvasta karkaisusta. Kokonaisuudessaan tutkimuksessa tutkittujen tekijöiden vaikutus hiontapalamiseen ovat nähtävissä kaaviossa 1. Myös tutkimuksessa vakioitu leikkuuneste ja sen hyvin asemoitu suihkutuspaine hiottavaan hampaaseen on hyvin merkittävä tekijä hiontapalamisessa varsinkin, kun parametrit optimoidaan äärirajoilleen.



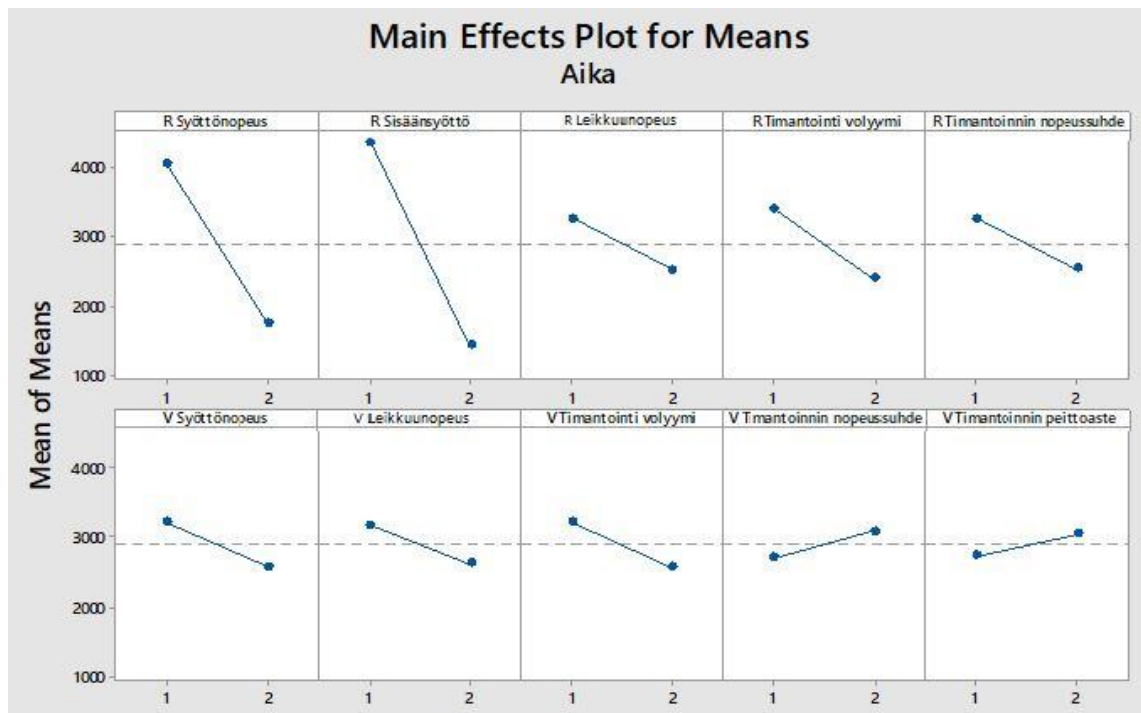
KAAVIO 1. Tekijöiden vaikuttavuus hiontapalamiseen.

Viimeistelyn leikkuunopeus oli merkittävin tekijä pinnanlaatuun vaikuttavista tekijöistä. Muita merkittäviä tekijöitä olivat rouhinnan leikkuunopeus ja rouhinnan sisäänsyöttö. Yllätyksesi tutkimuksessa osoittautui, ettei viimeistely vaiheen timantoinnin peittoaste tai volyymi ollut juurikaan merkittävä tekijä lopulliseen pinnanlaatuun, mikä oli tutkimusta suunnitellessa ennusteena. Kuitenkin pinnanlaadun osalta tutkimuksen tuloksia tulee arvioida hieman epäilevästi, koska missään kokeessa ei päästy rikkomaan Ra-arvon maksimirajaa. Tästä syystä tutkimuksen lopputulos tältä osalta jäi hieman epäonnistuneeksi ja ei voida varmuudella sanoa, että kaikki pinnanlaatuun vaikuttavat tekijät olisivat löytyneet. Tämä ei kuitenkaan ole suuri epäonnistuminen kokonaisuudessa, koska alkuperäisessä suunnitelmassa pinnanlaatu asetettiin toissijaiseksi ohjaavaksi tavoitteeksi ajan parannuksen rinnalle. Kaikkien tekijöiden vaikutus on nähtävissä kaaviossa 2.



KAAVIO 2. Tekijöiden vaikuttavuus pinnanlaatuun.

Tärkeimmät tulokset kokeissa saatiin aikaan vaikuttavien tekijöiden etsinässä, koska ajan pienentäminen oli tutkimuksen pääasiallinen ratkaisu kustannustehokkaampaan tuotantoon. Vaikuttavimmat tekijät ajansuhteen olivat rouhinnan sisäänsyöttö ja rouhinnan syöttönopeus, joiden molempien vaikutus aikaan oli erittäin suuri. Muiden tutkittavien parametrien vaikutus ei ollut merkittävä. Ajan mittauksia voidaan pitää erittäin luotettava, koska ajan kulutus otettiin ylös suoraan hiontakoneen käyntiajasta jokaiselle kappaleelle erikseen. Kokonaisaika siis koostui ajasta, joka kuluu kappaleen keskitykseen ja työstöön. Kappaleen keskitykseen kuluva aika voidaan todeta vakioksi, koska muutamien sekuntien erot hammaspyörän keksityksessä ovat merkityksettömiä 0,25-2 tunnin kokonaisaikaan nähden. Eli ainoat merkittävät aikaa muuttavat tekijät tapahtuivat koneen hionnan aikana. Kaikkien parametrien vaikutus aikaan on nähtävissä kaaviossa 3.



KAAVIO 3. Tekijöiden vaikuttavuus aikaan.

Viimeisenä vaiheena koesuunnittelua tehdessä jäi optimiparametrien valinta ja konfirmaatiokoe. Optimiparametrit voitiin todeta valitsemalla aikaisemmista kaavioista parametrit, jotka toteuttavat teoriassa mahdollisimman pienet arvot pinnalaadulle, hiontapalamiselle ja ajalle. Optimiparametrit ovat luettavissa taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Optimiparametrit

Parametri arvo max/min	Aika	Hiontapalamien	Pinnanlaatu
R Syöttönopeus	Max	Min	Min
R Sisäänsyöttö	Max	Min	Max
R Leikkuunopeus	Max	Min	Max
R Timantointi volyymi	Max	Min	Max
R Timantoinnin nopeussuhde	Max	Max	Min
V Syöttönopeus	Max	Max	Min
V Leikkuunopeus	Max	Max	Max
V Timantointi volyymi	Max	Min	Min
V Timantoinnin nopeussuhde	Min	Min	Max
V Timantoinnin peittoaste	Max	Min	Min

Optimiparametrien valinnan jälkeen tulosten todenmukaisuus varmistettiin konfirmaatiokokeella. Konfirmaatio kokeessa ylläolevan taulukon optimiparametrit sijoitettiin hiomakoneeseen ja hiottiin konfirmaatio kappale. Koe päätettiin suorittaa aika suurelle, koska ajan optimointi oli tärkein kokonaisuus. Ensimmäinen konfirmaatiokoe kuitenkin epäonnistui, koska jo aikaisemmin kokeeseen määritetyt arvot loivat optimi olosuhteissa liiallisen rasituksen hiontakoneelle ja aiheuttivat koneen pysähtymisen. Tästä syystä koe päätettiin suorittamaan ilman hiottavaa kappaletta. Tällöin hiontakone suoritti tarvittavat työstöliikkeet timantoinneineen ja asetusliikkeineen, mutta ei oikeasti hionut kappaletta. Tämä ratkaisu toimii todellisena tilanteena, sillä hiontakone ei hidasta tai muuta mitään liikettä normaaliin hiontaan hammaspyörälle, ellei sen tehollinen rasitus ylitä sallittua maksimiarvoa. Kuitenkin, kun hiottavaa hammaspyörää ei todellisuudessa ollut, tuloksiksi saatiin vain työstö aika ilman hiontapalamista tai pinnanlaatua. Todellisuudessa konfirmaatioksi riitti pelkän ajan mittaus, sillä kokeessa käytetyt optimiparametrit olivat kohdistettu juuri pienimpään mahdolliseen aikaan. Toisen konfirmaatiokokeen jälkeen voitiin kaikki tulokset julistaa onnistuneiksi, sillä optimiparametreilla aika oli 812 sekuntia, mikä oli yli minuutin muissa kokeissa mitattua pienintä aikaa pienempi.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tutkimustyön lopullisena tuloksena saatiin merkittävät parametrit aikaan, hiontapalamiseen ja pinnanlaatuun vaikuttavista tekijöistä. Kaikista kymmenestä tutkitusta parametrista voidaan todeta neljän vaikuttavan merkittävästi tutkittaviin suureisiin. Nämä neljä parametria ovat rouhinnan sisäänsyöttö, rouhinnan syöttönopeus, rouhinnan leikkuunopeus ja viimeistelyn leikkuunopeus. Kaksi ensimmäistä parametria ovat merkityksellisiä hionta-ajan pienentämiseen, mikä oli ensisijainen tavoite kustannustehokkaampaan tuotantoon. Rouhinnan leikkuunopeus oli merkittävin tekijä hiontapalamisen syntymiseen ja viimeistelyn leikkuunopeus pinnanlaadun säilyttämiseen.

Tutkimustulosten luotettavuus testattiin konfirmaatiokokeella, joten aikaan vaikuttavat tekijöiden todenmukaisuutta voidaan pitää luotettavina. Kuitenkin pinnanlaadun osalta tuloksia täytyy tulkita hieman epäilevästi, sillä laadullisesti pinnanlaadun raja-arvoa ei ylitetty. Hiontapalamisen osalta tutkimustulokset ovat yhtenäiseviä visuaalisen palamisen kanssa, joten tältä osin merkittävien parametrien löytyvyyttä voidaan pitää luotettavina, vaikka kohinan mittauksia ei tehty ennen hiontaa vaan pelkästään sen jälkeen.

Alkuperäinen tarve Katsa Oy:llä oli parantaa hammashiontavaiheen kustannustehokkuutta vakiotyönimikkeille optimoimalla yksilölliset työstöparametrit. Tätä ei tällä tutkimuksella saavutettu. Kuitenkin tämän tutkimuksen perusteella voidaan toteuttaa uusi tutkimus, missä tämän tutkimuksen neljä merkittävää tekijää tutkitaan full factor -kokeella. Tämän full factor -kokeen perusteella saataisiin optimoidut työstöparametrit vakityönimikkeelle, kun tutkimuksen hiottavana hammaspyöränä käytettäisiin haluttua paljon tuotettavaa hammaspyörätyyppejä. Ilman jatkotutkimusta tämän tutkimuksen tulokset eivät anna yritykselle suurta arvoa huomioon ottaen tähän tutkimukseen käytettyjen resurssien runsaus. Kun jatkotutkimusta tehdään, on hyvä huomioida hiontapalamisen osalta kohinan mittaukset ennen ja jälkeen hionnan, jotta voidaan varmistua, ettei hammaspyörässä ole jo valmiiksi sisäisiä vaurioita aikaisemmista työvaiheista. Muutoin tämän tutkimuksen menetelmiä voidaan hyväksikäyttää uudessa tutkimuksessa täysin.

Tutkimuksen tekijänä pidän henkilökohtaisesti tutkimusta onnistuneena vaikkakin tutkimuksen päämäärä ei täytä tilaajan alkuperäisiä tavoitteita. Tästä kuitenkin tilaajalla on

loistavat edellytykset jatkaa tutkimusta uudella näkökannalla. Omalta osaltani koko projektin suurin epäonnistuminen tapahtui aikataulutuksen osalta ja projektin venyminen on kuormittanut kaikkia tutkimukseen osallistuva tahoja merkittävästi. Tämän seurauksena oma ammattitaito projektien hallinnan osalta on kasvanut merkittävästi ja tulevaisuudessa uusien projektien hallinnassa on huomioitava aikataulutus paremmin.

LÄHTEET

1989. Hammaspyörät: Kugghjul = Gears. 3. p. Hki: Suomen standardisoimisliitto.

Aaltonen, K., Aromäki, M., Ihalainen, E. & Sihvonen, P. 2003. Valmistustekniikka. 10. muuttum. p. Helsinki: Otatieto.

Brumm M., Klocke F. & Reimann J. 2012. Continuous Generating Gear Grinding <http://gearsolutions.com/features/continuous-generating-gear-grinding/> Luettu 5.3.2019

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. uud. p. Helsinki: Sanoma Pro.

Blom, S., Lahtinen, P., Nuutio, E., Pekkola, K., Pyy, S., Rautiainen, H., Sampo, A., Seppänen, S. & Suorsa, E. 1999. Koneenelimet ja mekanismit. 4. uud. p. Helsinki: Edita.

Hamrock, B. J., Smith, S. R. & Jacobson, B. O. 2006. Fundamentals of machine elements. 2nd. ed. Boston, MA: McGraw-Hill Education.

Ratnadeepsinh M. Jadeja, Dipeshkumar M. Chauhan, Jignesh D. Lakhani , 2013, Bending stress analysis of bevel gears. Luettu 26.1.2019. <http://www.rroij.com/open-access/bending-stress-analysis-of-bevel-gears.pdf>

Salmon, S. C. 1992. Modern grinding process technology. New York: McGraw-Hill.

Karjalainen, E. 1992. Teollinen koesuunnittelu. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.

Karjalainen, E. 1990. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla: Taguchi-menetelmä. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto.

Katsa Oy, Komponentit. Luettu 19.2.2019 <https://www.katsa.fi/fi/komponentit/>

Katsa Oy, Tuotanto, Luettu 11.3.2019 <https://www.katsa.fi/fi/tuotanto/>

Katsa Oy, Historia, Luettu 11.3.2019 <https://www.katsa.fi/fi/historia/>

Katsa Oy, Toimialat, Luettu 11.3.2019 <https://www.katsa.fi/fi/toimialat/>

Katsa Oy, Laatu, Luettu 11.3.2019 <https://www.katsa.fi/fi/laatu/>

KHK Stock gears, About Zerol bevel gears. Luettu 26.1.2019. <https://khkgears.net/product-category/bevel-gears/zerol-bevel-gears/>

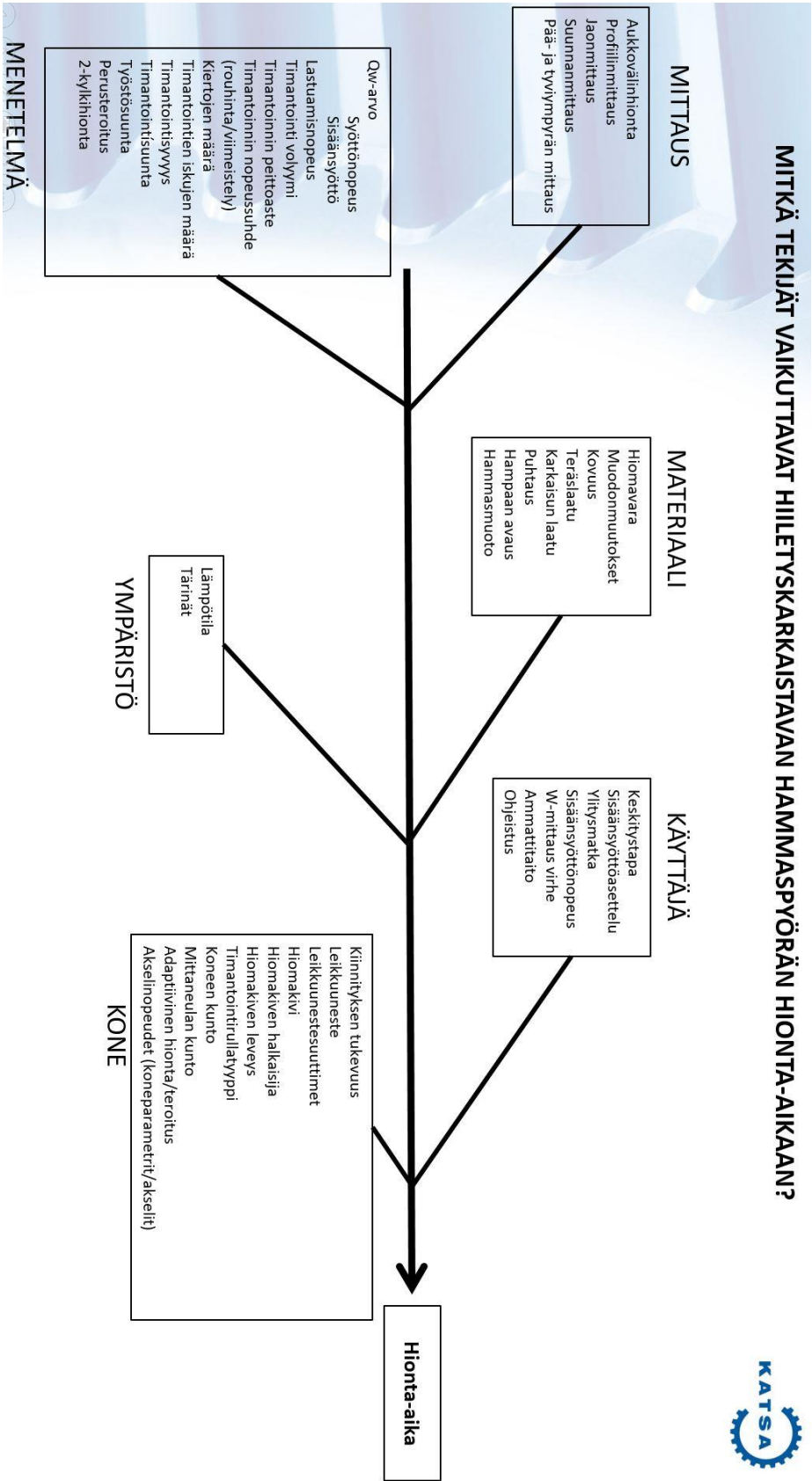
KHK Stock gears. What are worm gears? Luettu 31.1.2019 https://khkgears.net/new/worm_gear.html

Kauppalehti, Katsa Oy. Luettu 11.3.2019 <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/0154162-6>

Youssef, H. A. & El-Hofy, H. 2008. Machining technology: Machine tools and operations. Boca Raton, FL: CRC Press.

LIITTEET

Liite 1. Ohjaus- ja häiriötekijät



Liite 2. Mittauspöytäkirja.

Testi Nro	Aika (s)	Pinnanlaatu (Ra)	Kohina (mp)
1	7178	0.73	47.2
2	6291	0.5	52.4
3	5697	0.57	126.3
4	1559	0.47	67.9
5	1787	0.68	132.4
6	1681	0.34	125.6
7	2248	0.49	131.8
8	2489	0.55	65.8
9	2251	0.77	60.9
10	1210	0.55	111.3
11	882	0.65	91.8
12	1370	0.53	77
13	818		