



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Konepajan menetelmäkehitys

Aaro Väisänen

Opinnäytetyö
Heinäkuu 2015
Kone- ja tuotantotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio

AARO VÄISÄNEN:
Konepajan menetelmäkehitys

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Syyskuu 2015

Opinnäytetyön aiheena oli pehmeähammastuksen menetelmäkehitys Ata Gears Oy:ssä. Päätaavoitteeksi asetettiin nopeamman jäysteenpoistomenetelmän kehittäminen pehmeähammastuksen jälkeen syntyvän raadin ja terävien särmien poistamiseen.

Koko tuotantoon tehdystä nykytilanneanalyysistä ilmeni myös toinen kehityskohde, joka oli erittäin potentiaalinen pehmeähammastuksen tehostamisessa. Näiden kahden kokonaisuuden, jäysteenpoiston- ja hammastuksen menetelmäkehittäminen nosti 5-akselisilla CNC-työstökoneilla suoritettavan pehmeähammastuksen kustannustehokkuutta merkittävästi.

Tärkeimpänä tuloksena useita tunteja kestävästä työstöajasta saatiin leikattua jopa 30 prosenttia. Menetelmä on skaalattavissa jokaiseen lautaspyörään tuotannossa. Kokonaisuus uudesta menetelmästä syntyi pehmeähammastuksen ratasuunnittelun optimoinnilla sekä uudella jäysteenpoistomenetelmällä.

Jäysteenpoistolle suunniteltiin ja testattiin erilaisia malleja. Viimeiseen tuotantotestiin valikoitiin kaksi parasta menetelmää, joita kehitettiin edelleen kohti lopullista työstötapaa. Nopeimmassa menetelmässä vaadittiin koneenkäyttäjältä huomiota kappaleen asettamisessa, jotta törmäysriskiltä vältyttäisiin. Tämän takia jouduttiin tekemään kompromisseja tehokkuuden ja käyttäjän virheitä kestävästä työstösuunnittelun välillä.

Lopputuloksena kokonaissästö oli jo niin suuri, että se kannatti toteuttaa hitaammalla mutta turvallisemmalla tavalla. Jäysteenpoistoa voidaan edelleen kehittää jatkossakin, sillä työn tulos ei aiheuta estettä jatkokehittämiselle. Pienellä panostuksella ja jatkokehityksellä myös nopeammasta menetelmästä voitaisiin saada turvallinen. Työkalumakasiiniin varastoitava kulmapää, tai pitempi työkalunpidin voisi auttaa leukapakkojen ohittamiseen työstön aikana.

Julkisessa raportissa luottamuksellista aineistoa on poistettu tai muutettu.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Mechanical and Production Engineering
Machine Automation

AARO VÄISÄNEN:
Developing New Methods at an Engineering works

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 0 pages
September 2015

The main aim of this thesis was to develop a new deburring process for five-axis CNC milling machines at Ata Gears Ltd. The deburring process comes after soft machining in the production cycle of a bevel gear plate.

The analysis of the current situation in the soft-machining process was implemented to the whole factory. Research highlighted the scale of the deburring problem and also revealed great development opportunity in tooth machining development. By developing these two main goals, cost efficient deburring process and faster tooth machining, there was a change to achieve a 30 per cent cut off from the machine time in the soft machining stage.

After the development two deburring methods were chosen, simulated and tested. The faster and simpler way had a tiny risk of collision. By sloppy operating, holder jaws could crash during the deburring process so a slower but safer machining toolpath was introduced.

In the end the overall cost efficiency was so huge that the new method was taken in use. The result of this thesis does not prevent further development of the process. A potential solution for the implementation of the faster deburring path could be a longer toolholder or an angle head which can be stored in the tool magazine of the milling machine. That could help avoid jaws during the machining.

As an outcome of this thesis, 100 minutes were cut off from the milling process lasting 270-400 minutes. The new method can be scaled to fit all kinds of five axis plate gear production.

Confidential material has been deleted from the public release.

Key words: milling, deburring, development

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	YRITYS- JA TUOTE-ESITTELY.....	8
	2.1 ATA Gears Oy.....	8
	2.2 Kartiohammaspyörä.....	9
	2.3 Valmistuksen työvaiheet.....	10
3	TEORIA.....	12
	3.1 Pehmeähammastus.....	12
	3.2 Jäysteen muodostuminen.....	14
	3.3 FMS-linja.....	16
4	JÄYSTEENPOISTO HAMMASPYÖRÄTEOLLISUUDESSA.....	17
	4.1.1 Puoliautomaattinen jäysteenpoistokone.....	17
	4.1.2 Robottisolu jäysteenpoistossa.....	18
5	NYKYTILA-ANALYYSI.....	19
	5.1 Yleistä.....	19
	5.1.1 Pyörityksien vaatimukset ja kaavat.....	19
	5.2 Käytössä olevat pupotavat.....	21
	5.2.1 Pyöristävä hampaanavaus.....	22
	5.2.2 Hammasaukkojen pyöristäminen.....	23
	5.2.3 Jäysteenpoisto käsin.....	24
	5.2.4 Harjaviisteet.....	25
	5.3 Seurattavien koneiden tilanne.....	26
	5.3.1 DMC 160 U Atala FMS-linja.....	26
	5.3.2 Mazak UN600.....	28
	5.3.3 DMC 160 FD Hautala.....	28
	5.3.4 Heller kiekkojyrsin.....	29
	5.3.5 Työstökeskus DMU 200 P.....	29
	5.3.6 Syklopalloidi kovahammastus.....	30
	5.3.7 Mallintamisen haasteet.....	31
	5.4. Nykytila-analyysin yhteenveto.....	32
6	Kehityskohdat.....	34
	6.1 Työstöstrategian muuttaminen hampaan avauksessa.....	34
	6.2 Jäysteenpoiston kehittäminen.....	35
	6.2.1 Koeajo fyysisten rajojen selvittämiseksi.....	36
	6.2.2 Koeajo viistemuodon määrittämiseksi.....	37

6.3	Tuotantotesti	38
7	TULOKSET	39
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	41
9	LÄHTEET	42

LYHENTEET JA TERMIT

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
FMS	Flexible Manufacturing System
MMS5	Manufacturing Management System FMS-ohjainohjelmisto
Pupo	Purseenpoisto, hammastuksessa muodostuvan jäysteen poistovaihe
Hampaan avaus	Pehmeähammastus, jossa hampaat työstetään muotosorvattuun aihioon
CAM	Computer Aided Manufacturing - tietokoneavusteinen valmistus
Lämpövääntymä	Lämpökäsittelyssä tapahtuvat muodonmuutoksen hammaspyörässä
Pinioni	Lautaspyörän vastapari

1 JOHDANTO

Nykyaikaisessa prosessituotannossa minuuttienkin vähentäminen työstöajasta on huomattava edistys. Kappaleen läpäisyajan leikkaaminen ei pelkästään lisää katetta, vaan lyhentää toimitusaikaa, mikä on merkittävä kilpailuetu globaaleilla markkinoilla. Esimerkiksi laivavarustamot arvostavat nopeaa toimitusaikaa, sillä mitä nopeammin potkurilaitteisiin tarvittavat hammaspyörät saapuvat toimittajilta, sitä nopeampaa toimitusaikaa he voivat luvata omille asiakkailleen.

Opinnäytetyön aiheeksi tuli Ata Gears Oy:ssä hammaspyörien pehmeähammastusvaiheen prosessi-kehittäminen. Tuotteen läpäisyajassa kyseisen työvaiheen kohdalla koettiin olevan kehittämisen varaa. Tässä työvaiheessa muutosorvattuun aihioon jyrsitään hampaat ennen karkaisua. Purse ja terävät reunat pitää poistaa ennen seuraavaa työvaihetta, joten jyrsimen on käytävä hampaat uudelleen läpi. Haasteeksi tässä työssä muodostui Jäysteenpoiston kehittäminen kustannustehokkaammaksi nykyiseen tapaan verrattuna.

Koneistuskeskusten tuottavuuden maksimoimiseksi jokaisen liikkeen pitää olla perusteltu ja tarkoin harkittu. Sinänsä Jäysteenpoisto eli pupoaminen ei välttämättä ole järkevää tehdä samalla koneella, koska jyrsin voisi keskittyä eniten arvoa tuottavaan työvaiheeseen, eli hammastukseen. Jos tämä taas toteutettaisiin toisella, mutta halvemmalla ja yksinkertaisemmalla laitteella, kappalekohtainen asetus-aika nousisi kun hammaspyörää joutuisi käyttämään useammassa koneessa.

Tavoitteeksi työlle asetettiin pehmeähammastuksen tilannekartoittaminen koko tuotannossa, kustannuksien laskenta, ongelmakohtien selvittäminen, paremman menetelmän kehittäminen jäysteenpoistovaiheeseen ja käytännön testit tuotannossa. Tuloksena tämän opinnäytetyön jälkeen pehmeähammastusvaiheen pitäisi olla entistä kustannustehokkaampi lyhyemmän läpäisyajan ansiosta.

Nykytilanne-analyysissä tutkin pehmeähammastusvaiheen lähtötilanteen. Tutkimusasetelma työssä oli seuraava: kerättävä aineisto oli työstöaikoja ja niille laskettuja hintoja. Tutkittavat työt valittiin kuormitusryhmäkohtaisesti yleisimmin tehtävistä töistä.

2 YRITYS- JA TUOTE-ESITTELY

2.1 ATA Gears Oy

Ata Gears Oy on meriteollisuuden kartiohammaspyörien toimittaja yli 70 vuoden kokemuksella. Ata työllistää n. 200 henkilöä Tampereella Atalassa ja Leinolassa. Lisäksi yrityksellä on saha- ja varastotilat Pälkäneellä. Yrityksellä on lukuisia alihankkijoita Pirkanmaan alueella. Liikevaihto vuonna 2013 oli 48 miljoonaa euroa.

Työskentelin koulun ohella kahden vuoden ajan murskain-linjalla, josta pyöriä toimitetaan eri murskainvalmistajille.



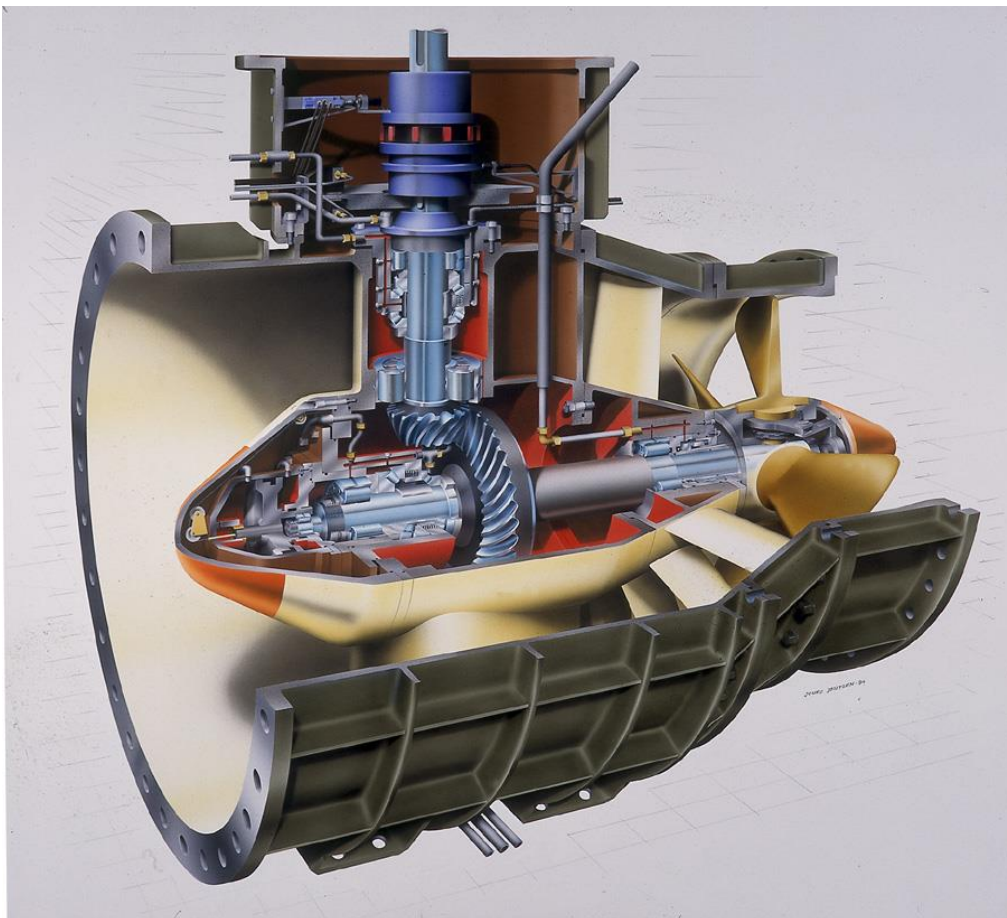
KUVA 1 Ata Gears Oy:n päätoimipiste Atalassa (Ata Gears Oy 2014)

2.2 Kartiohammaspyörä

Kartiohammaspyörät (lyh. kartiopyörät) valmistetaan pareina, jotka koostuvat kaarevahampaisista kartiolautaspyöristä ja pinioneista. Valmistuskapasiteetin puolesta suurimman hammaspyörän halkaisija Ata:lla on n. 3000mm. Pyörät menevät pääasiassa Euroopan ulkopuolelle laivateollisuuteen, jossa niiden kuormitukset ovat suuria ja osille asetettavat vaatimukset korkeita.

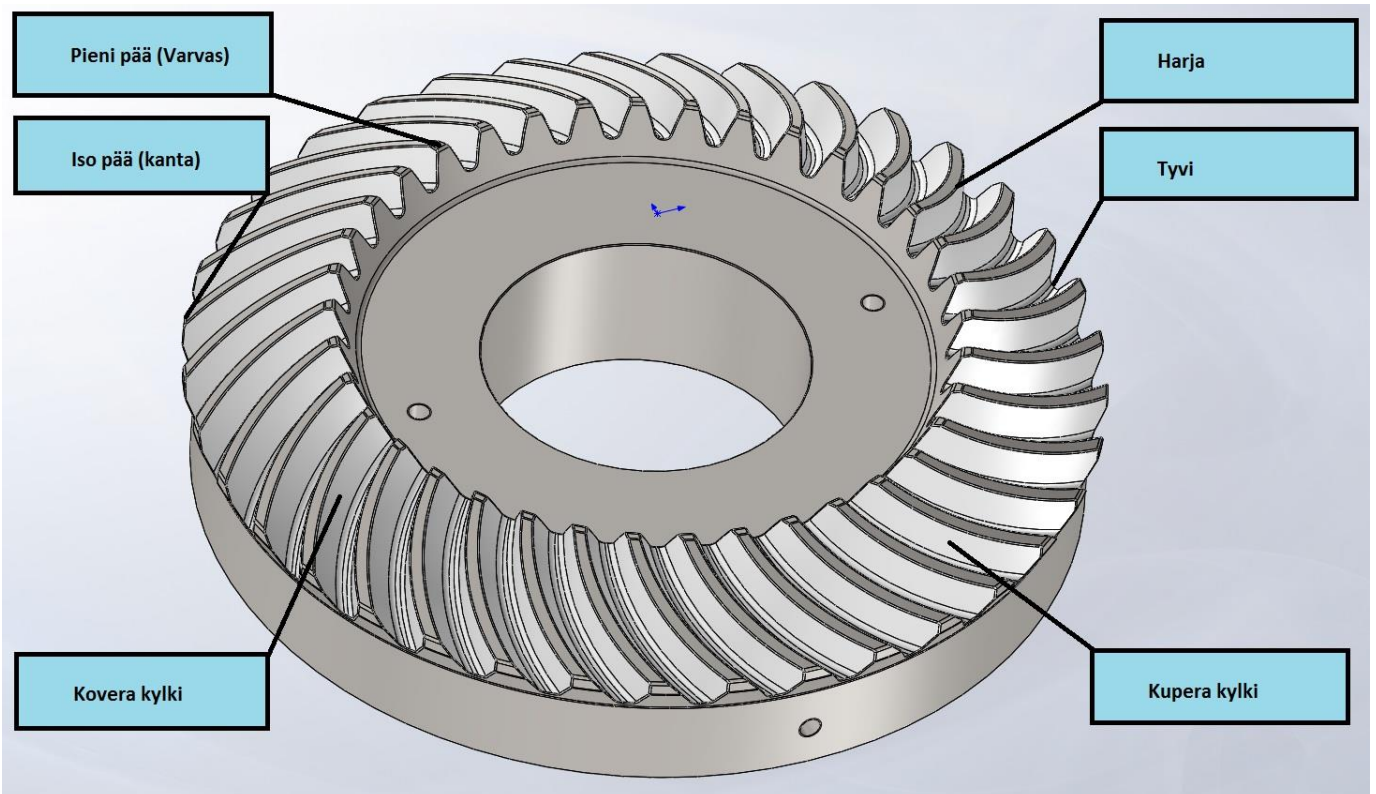
Kartiopyöräpari on oleellinen osa potkurilaitteen hammasvaihdetta, jossa sen tärkein tehtävä on saada akselit 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Vaikean valmistuksen takia ne ovat kalliimpia kuin lie-riöhammaspyörät. Kaarevahampaisen pyörän etuja suorahampaiseen nähden ovat mm. hiljaisempi käyntiääni sekä suurempi tehonsiirtokyky. (Airila ym 1985, 295 - 299)

Kuvassa 2 näkyy potkurilaitteessa asennettuna oleva hammaspyöräpari. Pystyssä oleva akseli hammaspyörineen on pinioni ja sitä kohtisuoraan vastassa on lautaspyörä.



KUVA 2 Hammaspyöräpari (Ata Gears Oy 2014)

Atalla valmistettavien kartiopyörien hampaat ovat kaarevia, mutta ne voivat olla myös vinoja tai suorina. Kaarevahampaisen kartiohammaspyörän geometria on monimutkainen, mikä luo haasteita tuotannossa. Kaarevuutta on myös hampaiden kyljissä, koveralla ja kuperalla puolella, mitä kutsutaan *pallomaisuudeksi*. Pallomaisuutta on sekä pituus- että korkeussuunnassa. Kuvassa 3 on esitelty peruskäsitteitä hammaspyörästä.



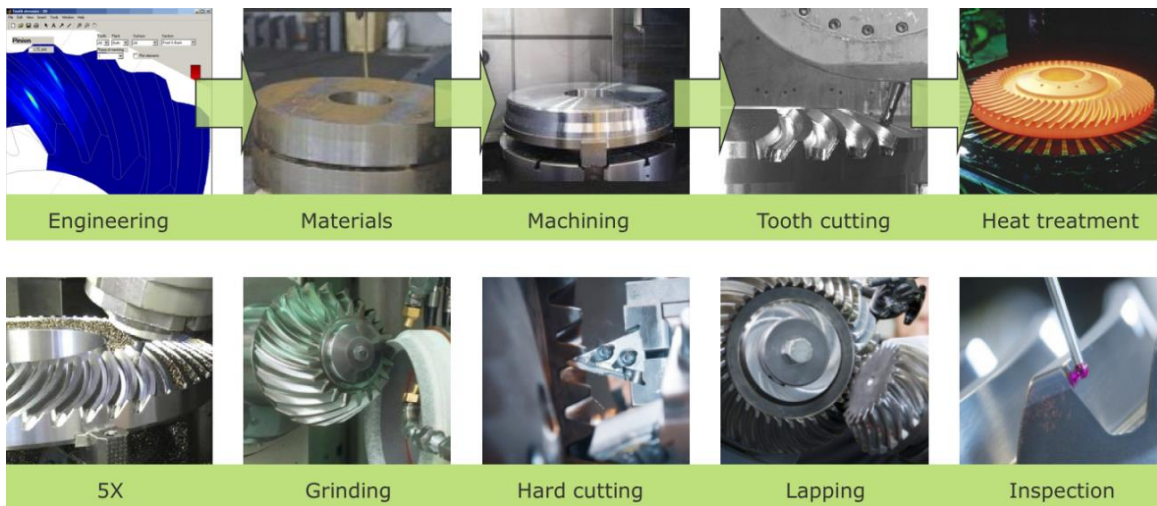
KUVA 3 Vasenkätinen lautaspöörä

2.3 Valmistuksen työvaiheet

Hammaspyörillä on korkeat vaatimukset mm. geometriassa, materiaalissa ja pinnanlaadussa. Jotta nämä vaatimukset toteutuvat, tuotanto sisältää useita metallintyöstön erikoisosaamisaloja. Esimerkiksi hiiletyskarkaisussa pyritään saamaan hampaiden pinnalle kova, kulutusta kestävä pinta sopivalla *hiiletysvyvydellä*. Hampaat eivät kuitenkaan saa olla läpikarkaistuja, vaan sitkeäksi jäänyt sisus kestää murtumatta isojen kuormien alla. (Kukkonen 2015)

Valmistusprosessi koostuu useammasta työvaiheesta jossa tuote jalostuu vaihe vaiheelta takeesta viimeistellyksi hammaspyöräksi. Jokaisen työvaiheen on toteuduttava suunnitellun mukaisesti laadukkaan tuloksen aikaansaamiseksi.

Kuvassa 4 on esitelty hammaspyörän valmistusvaiheet pääpiirteittäin. Ylemmällä rivillä on työvaiheet lämpökäsittelyyn asti: Suunnittelu, materiaalin- esim. takeen tilaus, muotosorvaus, aihion hammastaminen ja lämpökäsittely. Alemmalla rivillä neljä kuvaa vasemmalta on vaihtoehtoisia kovaviimeistelyvaiheita: 5-akselinen jyräintä, hionta, syklokoneella tehtävä kovahammastus ja läppäys (lapping). Kovaviimeistelyvaiheen tarkoituksena on oikaista lämpökäsittelystä tulleet lämpövääntymät, sekä tuottaa hyvä pinnanlaatu kosketuspinoille. Viimeisessä vaiheessa on tuotteen tarkastaminen. (Kukkonen 2015)



KUVA 4 Valmistuksen päätyövaiheet (Ata Gears Oy 2015)

Tuotannossa on myös paljon sivuvaiheita, joita ei ole esitelty kuvassa 4. Näistä esimerkiksi taustan oikaisusorvaus ja reiän hionta valmiiseen mittaan on työvaihe, joka tehdään lämpökäsittelyn jälkeen. Hammaspyörän taustan on oltava kohtisuorassa reikään nähden, jotta kovaviimeistelyssä päästäisiin tavoiteltuihin geometrisiin vaatimuksiin.

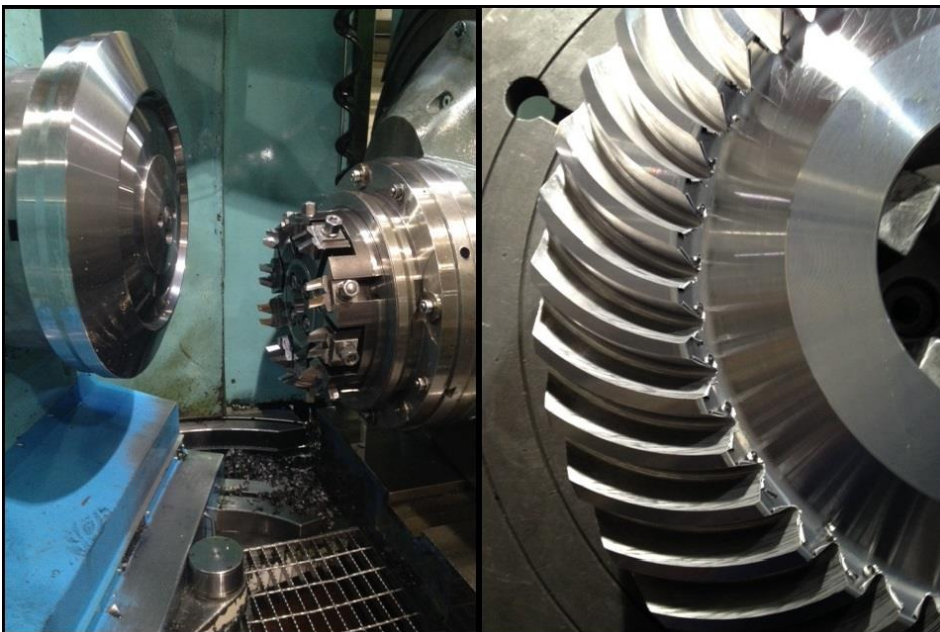
3 TEORIA

Tässä luvussa on opinnäytetyöhön liittyvää teoriaa ja taustatietoa. Ensimmäisissä alaluvuissa käsitellään purseen, eli jäysteen syntymistä sekä sen poistamiskeinoista. Lopussa kerrotaan tarkemmin FMS-linjasta, johon tämän opinnäytetyön tulokset konkretisoituivat.

3.1 Pehmeähammastus

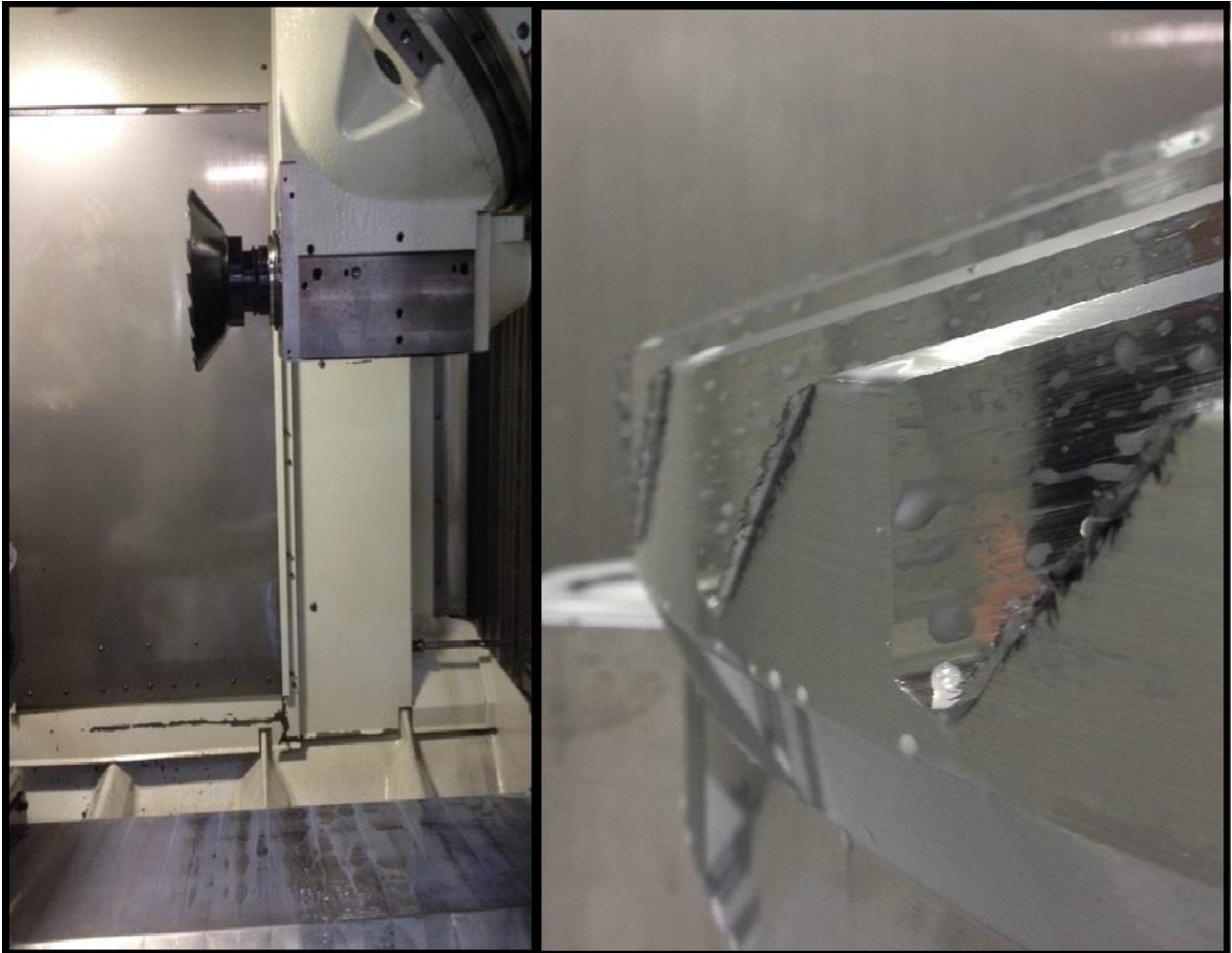
Hampaanavaus on työvaihe, jossa muotosorvattu aihio pehmeähammastetaan ennen lämpökäsittelyä. Lastuvirrat ovat pehmeähammastuksessa suuria, sillä ennen hiilletyskarkaisua hammaspyöräaihioiden *työstettävyys* on parempi. Hampaan avauksessa kyljille jätetään *kylkivara* J_s , mikä poistetaan lämpökäsittelyn jälkeen. Näin lämpökäsittelystä tulleet lämpöväntymät saadaan oikaistua ja kylkien pinnanlaatuvaatimukset täytettyä.

Hammaspyörän avaus voidaan tehdä syklopalloidi-menetelmällä (kuva 5), tai 5-akselisesti CNC-työstökoneella erilaisilla työkaluilla, kuten tapilla ja *kiekolla* eli monisärmäisellä jysintyökalulla. Jäysteen muoto ja koko vaihtelee pehmeähammastustekniikasta riippuen. Suurin jäyste syntyy kuvan 5 vierintäjysinkoneessa avatussa lautasessa reiän puoleiselle hammasaukolle.



KUVA 5 Muotosorvattu lautanen syklopalloidijysimisessä (vas.) ja hammastuksen jälkeinen purse

Kiekkolla jrsittäessä halkaisijalle asennetut palat poistavat materiaalia tehokkaammin kuin jrsintappi (kuva 6). Tällöin myös purse on isompi ja vaikeammin poistettavissa.



KUVA 6 Avaustyökaluna monisärmäinen jrsintyökalu (vas.) ja hampaanavauksen jäyste

Tapeilla työstettäessä käytettävien työkalujen kirjo on laajempi kuin kiekko- tai vierintäjrsinnässä. Moduulista riippuen ensimmäiseksi avastyökaluksi valitaan mahdollisimman iso, suuren lastuvirran työkalu, vaihtaen portaittain pienempään halkaisijaan hampaan pohjalle mentäessä. Geometriavaatimusten, kuten esimerkiksi *jakopoikkeaman* toteutuminen jrsinnässä on osoittautunut luotettavaksi. FMS-tekniikan soveltaminen 5-akselisien jrsinten kanssa on mahdollistanut miehittämättömän ajon, jolloin pehmeähammastuksen kapasiteetti on noussut merkittävästi syklopalloidi-tekniikkaan nähden. (Kukkonen 2015)

3.2 Jäysteen muodostuminen

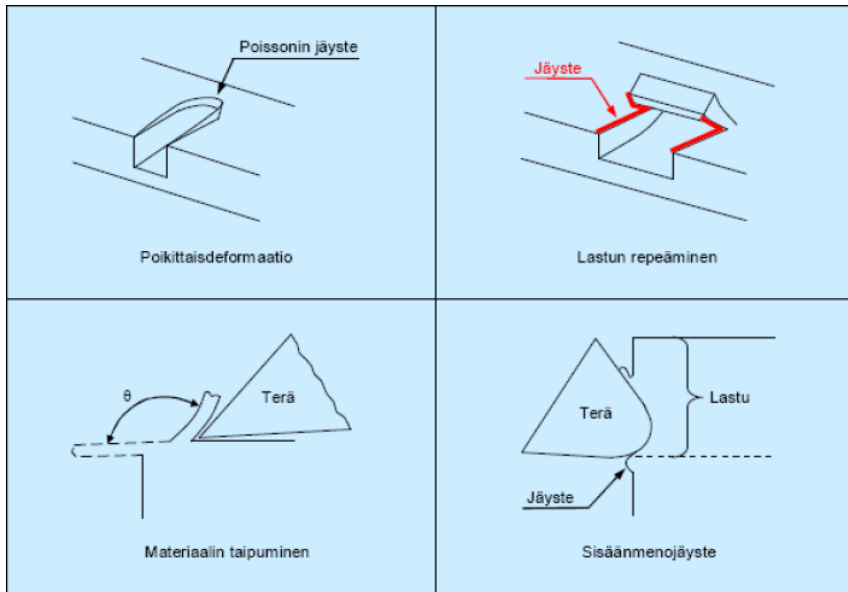
Kun hammas on avattu jollakin edellisessä kappaleessa mainituista tekniikoista, hampaan aukolle jää *pursetta* tai jäystettä. Jäysteenpoisto on viimeistelyvaihe, jossa kappaleesta poistetaan terävät särmät ja purseet joko pyöristämällä tai viistämällä reunat. Pupo tehdään joko koneellisesti tai käsin. Jos työvaihe tehdään käsin, hammasaukoille ja harjoille hiotaan kulmahiomakoneella viiste. 5-akselisesti pehmeähammastetussa hammaspyörässä pupossa pyöristetään hammasaukot.

Terävien särmien poistaminen on yleinen vaatimus lähes kaikissa metalliteollisuuden tuotteissa. Esimerkiksi tuotannon käsittelyssä terävät nurkat voivat aiheuttaa työtaturmia, tai ne voivat lohjeta niihin kohdistuvasta iskusta. Lisäksi mahdolliset irtoavat jäysteet voivat kulkeutua hammaspyörän kosketuspintaan ja aiheuttaa käyntihäiriöitä tai jopa rikkoutumisen. Tämän työvaiheen menetelmähityks jää monesti liian pienelle huomiolle jäädessään muiden päävaiheiden varjoon.

Purse syntyy metallintyöstössä plastisessa muodonmuutoksessa työkappaleen kahden leikkaavan pinnan muodostaman särmän ulkopuolelle (Gillespie 1999,36). Jos lastu repeytyy leikkautumatta työkappaleesta, jää kappaleeseen pursetta.

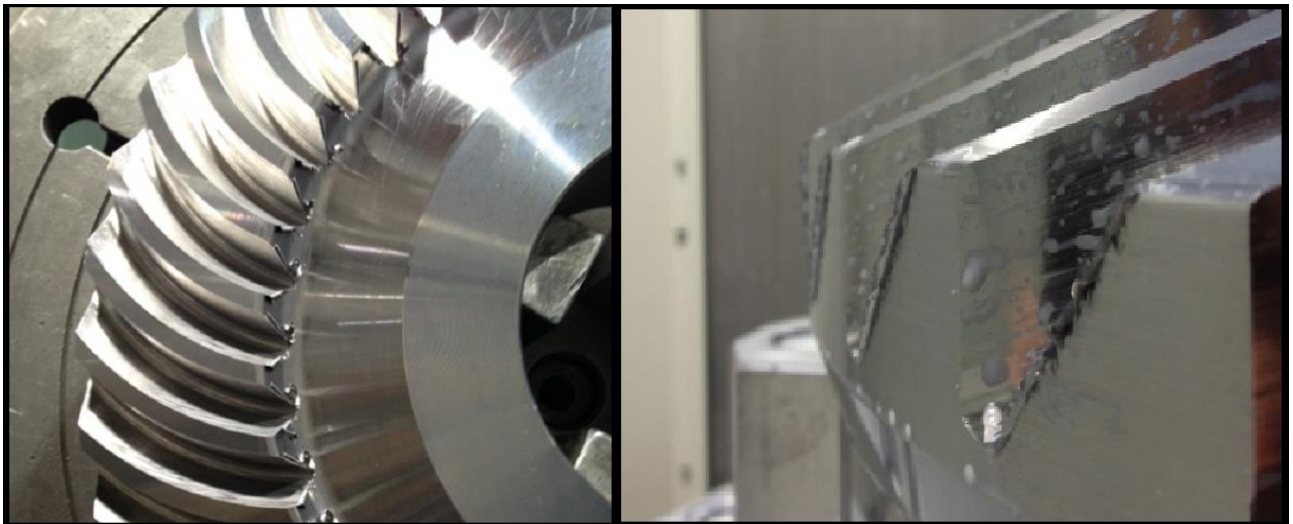
Muita plastiseen muodonmuutokseen perustuvia jäysteen muodostumistapahtumia ovat mm: terän tunkeutuminen tai irrottautuminen materiaalista ennen katkaisun lopettamista tai materiaalin virtaaminen vasten työkalun syöttösuuntaa (Gillespie 1999, 53).

Jäysteen muodostumisprosessia on havainnollistettu kuvassa 7. Yleisimpiä jäysteen muodostumismekanismeja hammaspyörän valmistuksessa ovat materiaalin taipuminen, sisäänmenojäyste sekä poissonin jäyste (kuva 7).



KUVA 7 Jäysteen muodostuminen (Suhonen 2010, Gillespie 1999, muokattu)

Hammaspyörän valmistuksessa jäyste muodostuu pääasiassa ison- ja pikkupään aukoilta pehmeähammastusvaiheessa, riippuen hammastustekniikasta ja lastuamissuunnasta. Syklopalloidikoineilla jäyste nousee hampaan aukolta ylös vain pienelle päälle, ja jättää terävän reunan ison pään hammasaukolle. Kiekolla hammastetussa pyörässä jäyste muodostuu samalla periaatteella mutta isolle päälle, koska terän ulostulo on hammaspyörän ison pään aukolla (kuva 8).



KUVA 8 Vierintäjyrsinnässä (vas.) ja kiekkoahmastuksessa muodostunut jäyste

3.3 FMS-linja

FMS-linja eli Flexible Manufacturing System tarkoittaa joustavaa valmistusjärjestelmää. Se koostuu yleensä kahdesta tai useammasta NC-työstökoneesta, materiaalinkäsittelyjärjestelmästä ja keskusohjauksesta. Joustavan järjestelmästä tekee se, että tuotanto jatkuu keskeytymättä työjonon mukaan, eikä ole jatkuvasti riippuvainen työntekijöistä.

FM-järjestelmästä saatuja hyötyjä ovat mm. pienempi tarve ihmistyövoimalle sekä kapasiteetin lisääntyminen. Lisäksi on paljon ei-rahassa mitattavien asioiden kuten laadun, asiakaspalvelun, luotettavuuden ja joustavuuden parantuminen yksittäisiin koneisiin nähden. (Kuisma 2007, 23-24)

Opinnäytetyön panos keskitettiin FMS-linjalle, jossa pehmeähammastetaan vuositasolla eniten kuin missään muualla valmistuslinjalla. Mitä vähemmän ihmisen panos ratkaisee linjan läpimenoaikaan, sitä suurempi merkitys on koneiden työstrategian suunnittelulla. Kuvassa 10 on Ata Gears Oy:n Atalan tuotantotiloissa sijaitseva FMS-linja. Kokonaisuuteen kuuluu kaksi kappaletta DMC 160 U – työstökeskusta ja automaattinen, työstökoneisiin integroitu varastohylly. Ata Gears Oy:llä on yhteensä kaksi kappaletta FMS linjoja, joista toinen on Hautalan tehtaassa.



KUVA 10 Atalan FMS-linja

4 JÄYSTEENPOISTO HAMMASPYÖRÄTEOLLISUUDESSA

Purseenpoisto on perinteisesti tehty käsin, mutta tekniikan kehittyessä työtä on alettu siirtää koneille. Likaisen ja vähän lisäarvoa tuottavan työvaiheen automatisointi onkin perusteltua, jos koneinvestoinnin kokonaiskustannus saadaan pidettyä kohtuullisena suhteessa saatuun hyötyyn. Esimerkiksi jos jäysteenpoisto siirretään tehtäväksi 5-akseliselle koneistuskeskukselle, tämä vapauttaa henkilön muille askareille. Kustannuksia vertailtaessa on otettava huomioon nykytilan ja suunnitellun tavoite-tilan piilokustannukset. Jäysteenpoisto on pakollinen sivutyövaihe, joka vie koneaikaa itse lisäarvoa tuottavalta hampaan jyrksinnältä. (Kukkonen 2015)

Koneet voivat olla puoliautomaattisia tai täysin itsenäisiä robottisoluja, jotka etsivät hammaspyörän muodon itse ja tekevät työn ilman tarvittavaa ihmisen läsnäoloa. Jäysteenpoistava työkalu voi olla harja, hiomalaikka tai jyrksintappi riippuen jäysteen muodosta ja vahvuudesta. Leikkaavan terän paine toteutetaan esimerkiksi pneumatiikalla tai servomoottoreiden avulla.

5-akselisen työstötekniikan ansiosta hammaspyörät pystytään puopamaan heti hammastuksen jälkeen, joten ne ovat heti valmiita lämpökäsittelyyn, eikä ylimääräisiä asetuksia tai siirtoja tarvitse tehdä. 5-akselisilla jyrskoneilla myös jäysteen muodostuminen on pientä verrattuna vanhaan syklohammastuskoneeseen.

4.1.1 Puoliautomaattinen jäysteenpoistokone

Gratomat on kuuluisa pääasiassa hammaspyöräteollisuudelle toimittamistaan puoliautomaattisista jäysteenpoistokoneistaan. Tämän laitteen asetus tehdään käsin jokaiselle geometrialle aina ennen ajettavaa sarjaa. Erilaisien vipujen ja varsien päässä on hiomalaikka, jota painetaan esim. pneumaattisesti vasten kappaletta (kuva 9). Hammaspyörä pyörii täyden kierroksen kiinnityspöydällä, hiomalaikan viistäessä terävän särmän ja purseet. Erillistä ohjausta manipulaattori ei tarvi, koska hammaspyörä lepää kuormitusjousen paineella hammaspyörän päällä ja seuraa näin hampaan geometriaa mekaanisesti.

Kone toimii erinomaisesti lieriöhammaspyörän viistämisessä, kun hammasaukon geometriassa ei tule suuria nousuja eikä liian jyrkkiä kulmia. Olen viistänyt Gratomat-merkkisellä jäysteenpoistokoneella

suorahampaisia pyöriä ja kokemuksen perusteella se sopii hyvin yksinkertaisiin muotoihin ja isoihin - mutta pienien kappaleiden - sarjoihin.

Koneen asettamisen jälkeen ensimmäisen pyörän riskinä on, että hiomalaikka rouhaisee hampaan kyljeltä, jonka seurauksena olisi kappaleen hylkäys. Lisäksi hiomalaikan kulumista pitää kompensoida muuttamalla alkuperäistä asetusta, muutoin laikan rata muuttuu kohtalokkain seurauksin. Suuria sarjoja ajettaessa muutaman pienen kappaleen hylkäys ei ole taloudellisesti iso menetys verrattuna siihen että vastaava tapahtuisi esimerkiksi Atan tuotannossa, jossa kappaleet ovat suuria ja yksikköhinnoiltaan moninkertaisia.



KUVA 9 Jäysteenpoistomanipulaattori pyöröpöydällä (Ata Gears 2015)

4.1.2 Robottisolu jäysteenpoistossa

Robotisoidussa jäysteenpoistossa etuna on viiden vapausakselin tuoma liikkuvuus ja vaikeidenkin työstöratojen toistotarkkuus. Uusimpien teollisuusrobottien toistotarkkuudet ovat millin sadasosien luokkaa. Oikein toteutettuna tällainen solu pystyy toimimaan täysin itsenäisesti: Kappaleet varastoidaan FMS-linjan varastohissiin, josta solu tilaa paletin jäysteenpoistoon pehmeähammastuksen jälkeen. Hammaspyörä kiinnitetään ja kelloitetaan palettiin vain kerran ja otetaan pois vasta, kun hammas ja jäysteenpoisto on suoritettu.

Robotisoidun jäysteenpoiston toteuttamisen haasteina ovat sen suuri hinta, ylläpitokustannukset ja solun viemä lattiapinta-ala. Kokonaishinnaksi yhden robotin ja kahden kiinnityspöydän jäysteenpoitosolulle saattaa tulla yhteensä vajaa 300 000 €. Tällainen investointi, joka eräässä hammaspyörätehtaassa tehtiin, olikin perusteltua, koska siellä hammastuksessa käytetyissä kahden vapausakselin vierintäjyrsintäkoneissa ei jäysteenpoistoon ollut mahdollisuutta.

5 NYKYTILA-ANALYYSI

5.1 Yleistä

Nykytila-analyysissä pyrittiin rakentamaan mahdollisimman kattava kuva pehmeähammastuksesta Ata Gears Oy:n tuotannossa. Tuotannosta otetaan seurantaan jokaiselta pehmeähammastusvaiheen koneelta yleisimmät nimikkeet. Näistä töistä selvitetään kokonaishammastukseen, hammasaukkojen pyöristämiseen ja harjaviistämiseen kuluva aika. Menetelmissä on eroja mm. työstöradoissa ja työkaluissa.

Vertailemalla pupon prosentuaalista osuutta kokonaiskoneistusaikaan, löytyy kone jolla pupovaihe pitäisi ainakin teoriassa olla tehokkain. Poikkeuksena on kuitenkin Heller-kiekkojyrsinkoneesta saatava pupoaika, koska hammastusvaihe on erilaisen työkalun ansiosta lyhyempi, ja täten pupon osuus kokonaisajasta on suurempi.

Parhaiten todellisuutta vastaavan ajan pupovaiheesta sai seuraamalla työvaiheeseen käytetyn työkalun käyttöaikaa. Esimerkiksi DMU160-työstökeskuksella pupovaiheeseen käytetty pallopäättäppi mitattiin ennen ja jälkeen työvaiheen, josta tulee merkintä koneen lokiin. Muita tapoja on katsoa työstöajat CAM-simuloinnista. Simuloinnista saatu tulos on kuitenkin teoreettinen, eikä sisällä aina simulointitavasta riippuen kaikkia pikaliikkeitä, terätarkastuksia tai muita sivuvaiheita. MMS5- ohjainohjelmistosta on mahdollista saada koko hammastusvaiheen työstöaika, mutta tämä ei ole käytössä jokaisella työstökoneella.

5.1.1 Pyörityksien vaatimukset ja kaavat

Laadun, suunnittelun ja myynnin kanssa käydyistä keskusteluista kävi ilmi, että asiakkaan näkökulmasta viisteiden ja pyöritysten muodolla ja koolla on pääasiassa visuaalinen merkitys. Poikkeuksia löytyy aina, esimerkiksi hyvin harvoin asiakas saattaa määrittää hammasaukon pyöritykselle säteen. Toiminnallisessa mielessä harjaviisteelle ja hammasaukon pyörityksille ei kohdistu rasitusta, minkä takia lujuusopilliset kysymykset voidaan jättää huomiotta.

Tuotannossa menee hampaan avaustekniikasta riippuen käsin, 5-akselisesti tai molemmilla tekniikoilla pupottuja pyöriä. Näiden lopputulokset eroavat visuaalisesti niin paljon, että uskon optimaalimman muodon löytyvän näiden vanhojen muotojen perusteella, jolloin asiakkaalle ei tarvitse lähteä kokeilemaan mitään uutta muotoa.

Atalla viisteille on asetettu tiettyjä vaatimuksia, jotta ne olisivat sopusuhtaisen näköisiä hampaan kokoon nähden. Seuraavat kaavat on laadittu ohjeistamaan pyörityksien ja viisteiden kokoa. On otettava huomioon, että viisteen koko pehmeässä hampaassa ennen lämpökäsittelyä ja viiste kovahammasuksen jälkeen eivät ole samat. Hampaalle jätetyn kylkivaran lisääminen viisteen kokoon varmistaa sen, että viiste säilyy oikean kokoisena varan poistamisen jälkeen.

Ensimmäisessä kaavassa (kaava 1) määritellään hammasaukon pyöritystä. X muuttujaan sijoitetaan kokemusperäisesti hyväksi havaittu arvo. Yleisin käytössä oleva $x:n$ arvo on 0,3 isolla päällä, ja pienellä 0,25. R on pyörityksen säde, joka syötetään CAM ohjelmaan valmista mallia varten. Mn on hammaspyörän moduuli.

$x * mn = R$ Hammasaukon pyöritys

Kaava 1

Harjaviisteelle kaava on muuten sama kuin päätypyöritykselle, mutta lisätyllä kylkivaralla (kaava 2).

$Z * mn + kylivara$

Kaava 2

Harjaviisteelle on määritelty myös tarkemmat ehdot (taulukko 1), jotta viisteen koko pysyisi kohtuullisena moduulin kasvaessa. Mn sarakeella on moduulin arvo, minkä viereiseltä sarakeelta löytyy kullekin tapaukselle spesifimpi kaava.

TAULUKKO 1 Tarkemmat ehdot harjaviisteelle (mm)

mn	Harjaviisteen kaava
< 6,5	0,25 + kylkivara
=6.5...25	0,04 * mn + kylkivara
>25	1 + kylkivara

5.2 Käytössä olevat pupotavat

Tuotannossa tehdään kolmea erilaista jäysteen poistavaa tai – ennalta ehkäisevää työvaihetta. Näissä kolmessa vaihtoehdossa viistetään siis hammasaukkojen reunoja. Hampaiden harjaviisteitä käsitellään erikseen kappaleen lopussa.

Jos seurataan hammaspyörän jäysteenpoistoa, tai siihen verrattavia työtapauhtumia kronologisessa järjestyksessä, ensimmäisenä tehdään hampaan avausrataan sisällytetty pyöritys eli *pyörittävä avaus*. Tämä on alkuperäinen tapa, jossa hammas avataan ja purseet poistetaan samaan aikaan. Toinen työvaihe on varsinainen purseenpoisto *pystypupolla*, kun avauksessa tehdyt pyöritykset eivät tuota tarpeeksi tasaista pintaa syklokoneiden viimeistelyä varten. Nimi pystypupo viittaa työkalun asentoon joka on lähes pystysuorassa kappaleen pyörähdysakseliin nähden.

Kolmas tapa on käsin tehtävä jäysteenpoisto, joka tehdään kun hammas on avattu perinteisellä syklo-tekniikalla. Vierintäkoneessa avatun hammaspyörän jäysteet ovat isompia verrattuna muihin tappi-koneisiin. Joissakin tapauksissa hammaspyöriä joudutaan hiomaan uudestaan lämpökäsittelyn jälkeisessä kovahammastuksessa. Jos hammasaukon pinnassa esiintyy teriä rikkovia epätasaisuuksia, hammastaja joutuu viistämään hammasaukot uudestaan kulmahiomakoneella.

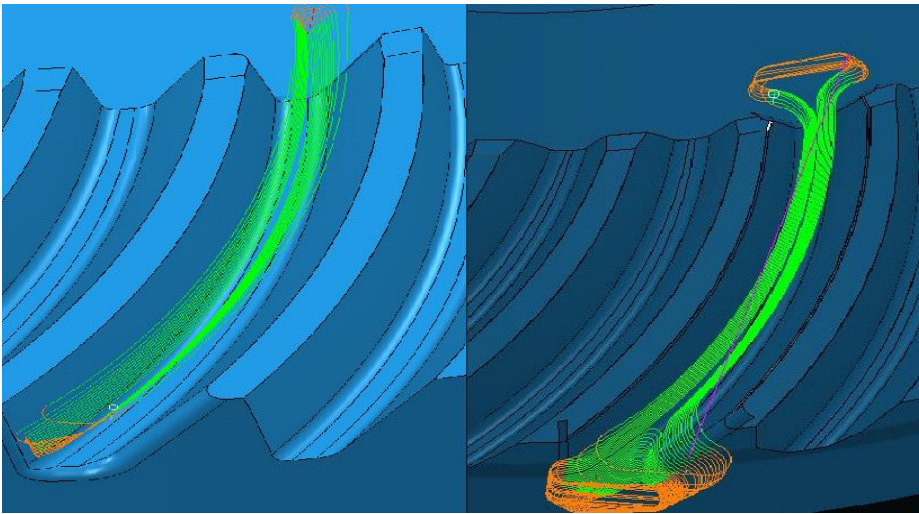
Käytössä olevat pupotavat vaihtelevat konekohtaisesti. Alla olevassa taulukossa on listattu kaikki seurattavat koneet ja niillä toteutettavat pupotavat.

TAULUKKO 2 Konekohtaiset pupotavat

	Pyöritys sisällytetty avaukseen	Pystypupo	Harjaviisteet
Deckel Maho 160 Atala	x	x	
Heller		x	x
Mazak		x	x
Deckel Maho 160 Hautala		x	x
Deckel Maho 200	x		
125	Syklopalloidi vierintäjyrsinkone pupo käsin		

5.2.1 Pyöristävä hampaanavaus

Pyöristystä tehdään hampaanavauksen yhteydessä (kuva 11 oikean puoleinen kuva). Strategiana on, että työkalun rata on levennetty kummankin hammasaukon pässä. Tällä ennaltaehkäistään jäysteen muodostumista ja tuloksena syntyy pyöristys, jonka pinnanlaatu on huono. Kuvassa 8 on vierekkäin normaali avausrata ja pyöristävä avausrata. Kuvassa olevat hammaspyörät eivät ole identtisiä, jonka takia työstöratojen määrät eroavat.



KUVA 11 Suora (vas.) ja pyöristävä avausrata

Pyöristävää avausrataa käytetään pääasiassa isommalla DMU200-jyrsinkoneella ja Atalan FMS-linjalla. Pyöristykseen pinnasta tulee röpelöinen ja epätasainen. Kuvassa 12 näkyy rosainen pinta pyöristävän avauksen jälkeen.

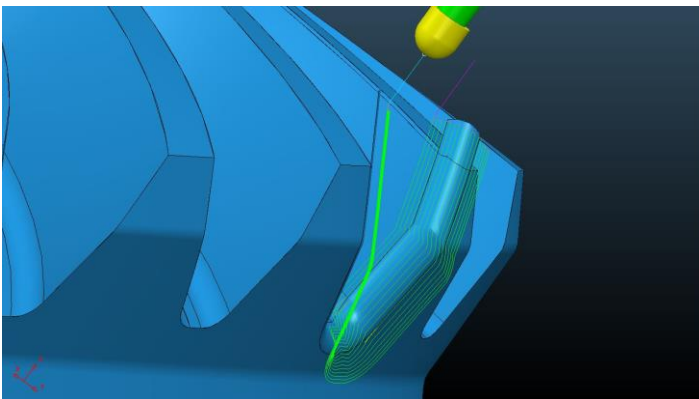


KUVA 12 Pyöristävän hampaanavauksen jälki

Huono pinnanlaatu aiheuttaa ongelmia, jos hampaat viimeistellään vierintäjyrsinkoneella. Syklokoneen terä lähestyy kovahammastuksessa hammasaukolta, jolloin pyöristyksestä tulleet pituussuuntaiset raot ohjaavat terää ja aiheuttavat siten kovan pistevoiman. Jos hampaat viimeistellään tapilla 5-akselisesti, pyöristyksen pinnanlaadulla ei ole väliä.

5.2.2 Hammasaukkojen pyöristäminen

Universaalia, 5-akselisten koneiden pupoamistekniikkaa Atalla kutsutaan pystypupoksi. Ohjelman työaika on n. 30-50 minuuttia hammasluvusta ja syöttönopeudesta riippuen. Tässä ohjelmassa työ suoritetaan niin, että työkalun kulma on lukittu pieneen kulmaan pysty akseliin nähden. Aukon reunaa ajetaan edestakaisin 6-12 mm pallotapilla, kunnes reuna saadaan pyöreäksi. Kuvassa 13 näkyy *pystypupon* periaate.

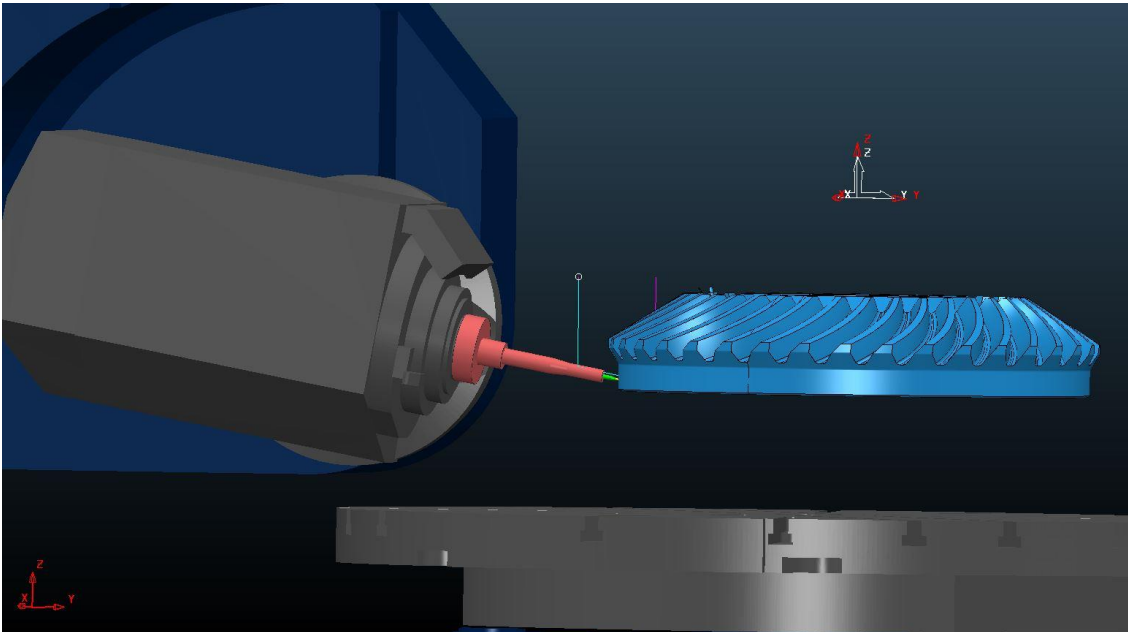


KUVA 13 Ison pään pystypupo. Lastun vahvuus 0,5 mm

Pystypupo otettiin käyttöön, kun kovahammastuksessa syklokoneiden terien kestoiän huomattiin heikentyvän niillä lautaspyörillä, jotka oli avattu pyöristävällä hampaanavauksella. Vihreät linjat ovat jyrsintapin ratoja. Kuten kuvasta 13 näkyy, tappi joutuu käymään yhden hammasaukon läpi useamman kerran.

Jos tapin kääntäisi vaakatasoon niin, että suora tappi jyrnsisi pallopään sijasta kyljellä, tehollinen lastuamispinta-ala kasvaisi ja tarvittavien työstöratojen lukumäärä per hammasaukko vähenisi. Työstökoneiden fyysisten rajojen takia jyrsimen asento ei onnistu, kun pohjaa pyöristettäessä työkalupään pitäisi kääntyä yli vaakatason.

Ongelmaa on helppo havainnoida kaiverrustyövaiheella, jossa työkalupää on käännetty lähes vaakatasoon ja joutuu työskentelemään lähellä pöytää (kuva 14).



KUVA 14 Työnumeroiden kaivertaminen. Kuvasta puuttuu pöydän vasteet ja leuat

5.2.3 Jäysteenpoisto käsin

Perinteisin tapa terävien reunojen ja jäysteiden poistamiseen on ollut kulmahiomakoneen käyttö. Käsipupoaminen on tällä hetkellä nopein tapa, mutta työvaiheeseen kuuluu paljon muutakin, kuin itse viistäminen. Kappale pitäisi irrottaa koneesta, siirtää työtilaan ja kiinnittää pyörittäjään. Työaika yhteensä näistä vaiheista on keskimäärin puoli tuntia.

Käsin tekeminen sitoo työntekijöitä muilta töiltä ja on kovan melun ja lian (hiomispöly ja irtoavat purseet) takia epämiellyttävää. Pehmeähammastettuja lautasia valmistuu pelkästään Atalan tuotantotiloissa tuhansia vuodessa, joista suurin osa pupotaan samalla koneella millä hammas on avattukin. Mikäli pyöriä alettaisiin pupoamaan käsin, se lisäisi valtavasti sisäistä liikennettä, kun pyöriä kuskattaisiin tilasta toiseen.

Myös kovahammastusvaiheessa joudutaan viistämään kappaleita satunnaisesti (kuva 15). Sahalaitainen pinta hammasaukon pyöristyksessä hajottaa syklokoneiden teriä, joten välttääkseen turhat teränvaihdot, jotkut työntekijät ovat ottaneet tavaksi hioa hammasaukot ennen kovahammastusta. Käsin

tehtävän jäysteenpoiston kustannuslaskennassa käytetään jalostustuntihintana 30 euroa ja yhden kappaleen käsittelyaikana 0,75 tuntia. Näin ollen yhdelle hammaspyörälle kustannukseksi tulee 22,5 euroa.

5.2.4 Harjaviisteet

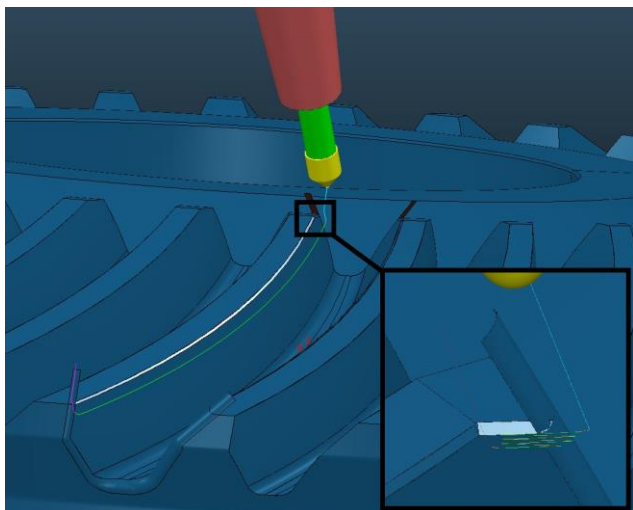
Harjaviisteitä alettiin tehdä työstökeskuksilla vasta vuonna 2012. Aikaisemmin hampaan harjat viistettiin käsin kulmahiomakoneella kovahammastuksen jälkeen (kuva 15), mutta nyt tätä työtä on alettu siirtämään pehmeähammastukselle. Muutos aikaisempaan tapaan on se, että viiste tehdään ennen lämpökäsittelyä ja koneellisesti. Pehmeähammastuksessa tehdyt viisteet vääntyvät lämpökäsittelyssä ja ohenevat epätasaisesti pitkin hammaspyörän kehää riippuen siitä kuinka pyörä on vääntynyt lämpökäsittelyssä.



KUVA 15 Harjaviisteiden tekoa kulmahiomakoneella kovahammastuksessa (Lintula 2012)

Ajallisesti harjaviisteet vievät cnc-työstökoneella 5-30 minuuttia. Harjaviisteiden rata on sinänsä yksinkertainen ja nopea liike, mutta jos hampaanpää taittuu terävästi alaspäin, on joillakin koneilla tällaiselle muodolle tehty oma vaiheensa. Esimerkiksi jos Atalan FMS:llä harjaviisteeseen kuluu 30 minuuttia, saattaa puolet kuluneesta ajasta mennä kuvan 13 suurennoksessa näkyvään hampaanpäähän (kuva 16).

Tähän ratkaisuna on Hautalan FMS:llä käytössä oleva makro, joka tekee harjaviisteiden radat automaattisesti, riippumatta siitä onko harjalla laskevaa päätä.



KUVA 16 Harjaviisteen simuloitu rata

5.3 Seurattavien koneiden tilanne

Seurattavat koneet ovat kaikki 5-akselisesti ohjattavia CNC-koneita, mikä tarkoittaa sitä, että kappa-
leiden mallintaminen ja työstöratojen suunnittelu on olennainen osa koneen aikaansaamaa tulosta.
Osa tuloksista on saatu tarkaksi seuraamalla työkalun käyttötietoja, kun taas toisilla jouduttiin tur-
vautumaan simuloinnissa tehtävään ajanottoon. Epätarkkuutta simuloinnista saatavaan työstöaikaan
tuovat mm. terätarkastuksiin ja pikaliikkeisiin kuluva ajan puuttuminen. Epävarmoissa tilanteissa
aika kelloitettiin käsin.

Pupovaihe tehdään pehmeähammastusvaiheessa, kun muotosorvattuun aihioon jyrksitään hampaat.
Tapilla jyrksittäessä hammasaukolle tulee siisti terävä reuna, kun taas kiekkoavauksessa reunalle muo-
dostuu jäystettä. Seurattavilla koneilla tehtiin pehmeähammastusta tarkastelujaksolla hyvin epätasai-
sesti.

5.3.1 DMC 160 U Atala FMS-linja

Atalan FMS-linja käsittää kaiken kaikkiaan kaksi kappaletta DMC 160 U – työstökeskusta joihin on
integroitu automaattisesti lataava varastohissi. Koneet on hankittu vuonna 2006. Koneet toimivat ym-
päri vuorokautisesti varastohissin ansiosta, mikä lisää merkittävästi Ata Gears Oy:n pehmeähammas-
tuskapasiteettia. Työntekijät mallintavat ja ohjelmoivat työstöradat itse. Lisäksi työn kuvaan kuuluu
terähuollot ja varastohissin käyttö.

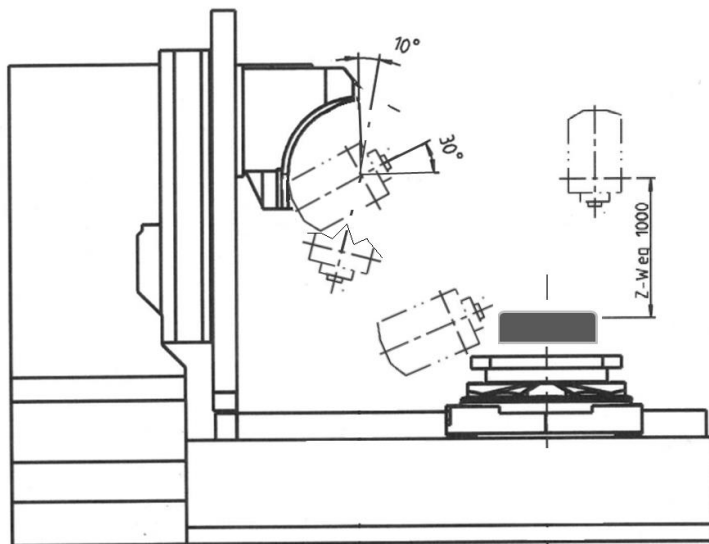
Tätä kuormitusryhmää seurattiin intensiivisemmin kuin muita, koska konekohtaisesti se pehmeähammastaa eniten lautaspyöriä. Taulukossa 1 on tarkastelujakson (10.2012-10.2014) aikana tehdyt yleisimmät nimikkeet ja *pystypupossa* kuluva aika. Kuten taulukosta 3 näkyy, ensimmäistä nimikettä ei pupota ollenkaan, mikä laskee toteutuneen vuosikustannuksen keskiarvoa (taulukko 3). Lau-taspyörän hammasaukolle, jolle ei tehdä jäysteenpoistoa, jää kuvan 12 mukainen jälki.

Yhteenveto toteutuneista kuluista on kappaleen lopussa.

TAULUKKO 3 Seurattavat nimikkeet DMU Atala (yksiköt muutettu julkisesta raportista)

Nimike	Pupo (suht)	kok.koneistusaika (suht)	Pupon osuus %	Kokonaiskustannus €
2017828	0,0	0,7	0,0	x
2014647	0,8	0,9	13,1	x
2016623	1,0	0,8	16,4	x
2018278	0,8	1,0	10,8	x

Koneen fyysiset rajat, kuten johde- ja työkalupään suojat, pöytä ja kiinnitystyökalut rajoittavat työ-tökulmaa. Kuvassa 17 on DMU:n mahdollisista työkalupään kääntökulmista sekä optimaalisesta asennosta aukkopyörityksen jyrksinnässä.



KUVA 17 FMS Atalan DMU160 ulottuvuus (Ata Gears Oy 2015)

5.3.2 Mazak UN600

Tämä sorvi kuuluu pinioneiden pehmeähammastusvaiheen kuormitusryhmään. Pyöristysten ajaminen on nopeampaa pienen hammasluvun takia. Pinionin asento koneessa ei rajoita tapin liikkuvuutta niin paljoa kuin lautasen jyrinnässä. Jos tapin kontaktipistettä saisi siirrettyä päästä kyljelle, tehollinen lastuamisala kasvaisi ja vähentäisi pupoon tarvittavien lastujen määrää. Tämä mahdollisuus on kuitenkin jäänyt käyttämättä mallinnusohjelman haasteiden takia. Taulukoissa 5 ja 6 on Mazakilla seurattujen nimikkeitten yhteenveto.

TAULUKKO 4 Seurattavat nimikkeet Mazak (yksiköt muutettu julkisesta raportista)

Nimike	Pupo (suht)	kok.koneistusaika (suht)	Pupon osuus %	Kokonaiskustannus €
2017827	0,5	0,8	6	x
2014907	0,1	0,7	2	x
2014646	0,7	0,7	9	x
2016622	1,0	1,0	9	x

5.3.3 DMC 160 FD Hautala

Hautalassa on sijoitettu 5-x linjalle kaksi DMC:n työstökeskusta varastohissin yhteyteen. Koneet ovat samalta valmistajalta kuin Atalan Fms-linjalla, mutta uudempia. Tällä linjalla oli käytössä MMS-5 seurantajärjestelmä, joten työstöajat saatiin mitattua tarkasti.

TAULUKKO 5 Seurattavat nimikkeet FMS Hautala (yksiköt muutettu julkisesta raportista)

Nimike	Pupo (suht)	kok.koneistusaika (suht)	Pupon osuus %	Kokonaiskustannus €
2014908	0,4	0,8	56,2	x
2018278	1,0	1,0	100,0	x
2016623	0,5	0,7	60,5	x
2022629	0,6	0,7	88,2	x

5.3.4 Heller kiekkojyrsin

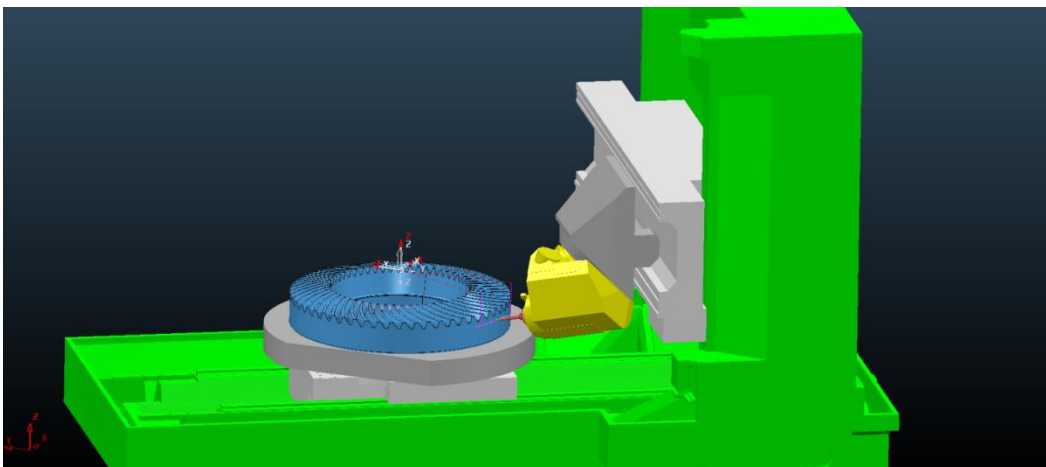
Heller on vuonna 2012 ostettu kiekkojyrsin, joka käyttää hammastukseen tapin sijasta kiekkoa, jonka leikkuunopeus on ylivoimainen tappiin verrattuna. Puvovaiheessa tälläkin koneistuskeskuksella joutuu kuitenkin käyttämään tappia. Hammasaukkojen pupo-ohjelmat on kopioitu suoraan FMS koneilta minkä takia nämä työstöajat ovat suunnilleen samat. Taulukossa 7 on Heller:n neljän seuratun nimikkeen työstöajat.

TAULUKKO 6 Seurattavat nimikkeet Heller-työstökoneella (yksiköt muutettu julkisessa raportissa)

Nimike	Pupo (suht)	kok.koneistusaika (suht)	Pupon osuus %	Kokonaiskustannus €
2017659	0,7	0,7	94	x
2014906	0,7	0,7	90	x
2018663	0,4	0,6	63	x
2015067	1,0	1,0	100	x

5.3.5 Työstökeskus DMU 200 P

Tämä kone on pääsääntöisesti suurien (yli 1000 mm:n halkaisija) lautasien pehmeähammastusta varten. Koska hammaspyörän halkaisija on suuri, myös lämpövääntymät ovat suuria, minkä takia harjaviisteitä ei tehdä ollenkaan. Mikäli hammaspyörä menee syklokoneelle viimeistelyyn, viisteet tehdään käsin kovahammastuksen jälkeen. Koneen ulottuvuudet ovat rajoittuneempia kuin DMC:llä, mikä pitää ottaa huomioon uuden puporadan suunnittelussa. Työkalupää ei käänny vaakatason yli toisin kuin DMC:n kone. Kuvassa 18 on riisuttu simulointimalli kaiverrusvaiheesta.



KUVA 18 DMU200-työstökeskus

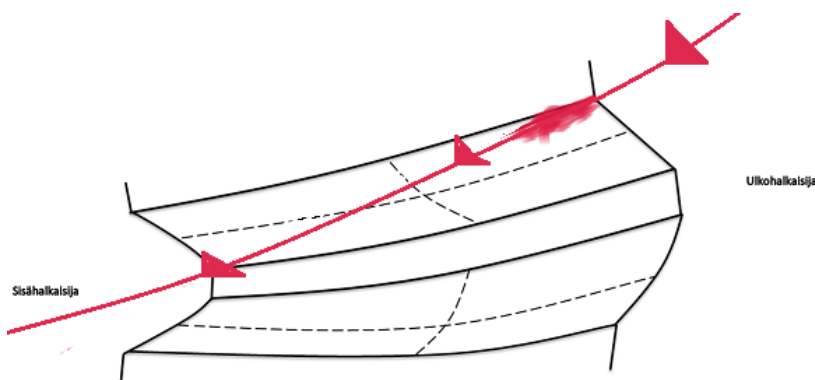
Hampaan pehmeävauksessa käytetään samaa, päistä levennettyä pyörivistävää avausrataa kuin Atalan FMS-linjalla. Tässä tapauksessa on päädytty sellaiseen kompromissiin, että kun pyöristykset tulevat avausradasta, pystypupo voidaan jättää kokonaan pois. Pyöristykseen huono pinnanlaatu hioetaan ennen kovahammastusta käsihiomakoneella.

DMU 200:n pehmeähammastusaika lyhenisi merkittävästi, mikäli pupoamistapaan löytyisi jokin toinen, pystypupoa nopeampi vaihtoehto. Tällöin hampaat voitaisiin avata suorilla, nopeammilla radoilla ja pupo tehdä erikseen esim. viistämällä.

5.3.6 Syklopalloidi kovahammastus

Klingenbergin AMK koneet edustavat Ata Gears Oy:n vanhaa hammastustekniikkaa. Nykyaikaisen 5-akselisen sijaan kone työstää lämpökäsitellyt pyörät kovametalliterällä. Pinnanlaatu on syklopalloidivierintäkoneen vahvuus. Nykyään syklokoneilla avataan pienimodulisia hammaspyöriä, joiden pienet hammasvälit vaatii ohuet, helposti katkeavat jrsintapit. Nykyään kun jrsintäkoneet mahdollistavat kustannustehokkaan pehmeähammastuksen, syklokoneilla on alettu tekemään kovahammastusta. Kovahammastuksessa on havaittu ongelmia teräpalojen käyttöajassa niiden pyörien osalta, jotka on pehmeähammastettu 5-akselisesti.

Kuvassa 19 on havainnollistettu syklohammastuskoneen terän reittiä hammaspyörien kylkiä viimeisteltäessä. Punainen täplä osoittaa, missä pistemäinen voima saattaa hajottaa teriä. Kuten kuvasta näkyy, isonpään hammasaukon viisteen pinnanlaadulla on oleellinen merkitys HPG terien kestoiässä.



KUVA 19 HPG-terän reitti vasenkätisessä hammaspyörässä

Jäysteenpoiston rikkonainen pinnanlaatu on hajottanut syklokoneiden teriä kovahammastuksessa (kts. 5.2.1 Pyöristävä hampaanavaus). Tämä asia ratkaistiin luomalla pupolle toinen, sileämpi rata, joka pyörästi hammasaukot perusteellisesti (kts. 5.2.2 Hammasaukkojen pyöristäminen).

Vierintäsuunta on suunta, mihin teräpään alusta pyörii. Tätä suuntaa muuttamalla pystytään vaikuttamaan kummalta päältä terät alkavat lastuamaan materiaalia pois. Yleensä vierintäsuunnan määrää hammaspyörän kätsisyys: Vasenkätiset hammastetaan niin, että teräpalat lähestyvät isolta päältä pikkupäälle, jolloin ison pään hammasaukon pyöristyneen pinnanlaatu on oleellinen terien keston kannalta. Terän syöttösuunta on aina sama, eli sisäänmeno tapahtuu ison pään hammasaukolta. Tämän takia jäyste muodostuu pienen pään hammasaukolle (kts. 4.1.1 Jäysteen muodostuminen).

5.3.7 Mallintamisen haasteet

Tuotannossa yleisesti käytössä oleva Power-mill ja Power-shape -ohjelmien kanssa on ollut ratkaiseva merkitys 5-akselisesti suoritettavan jäysteenpoistoratojen määrittelyssä. Power-Shapessa mallinnetuille pinnoille suunnitellaan radat Power-millissä. Perusideana on, että ohjelma laskee työstettävää tilavuutta varten pisteet, joita työkalu seuraa. Lisäksi määritellään työkalulle asento suhteessa pinnan normaaliin.

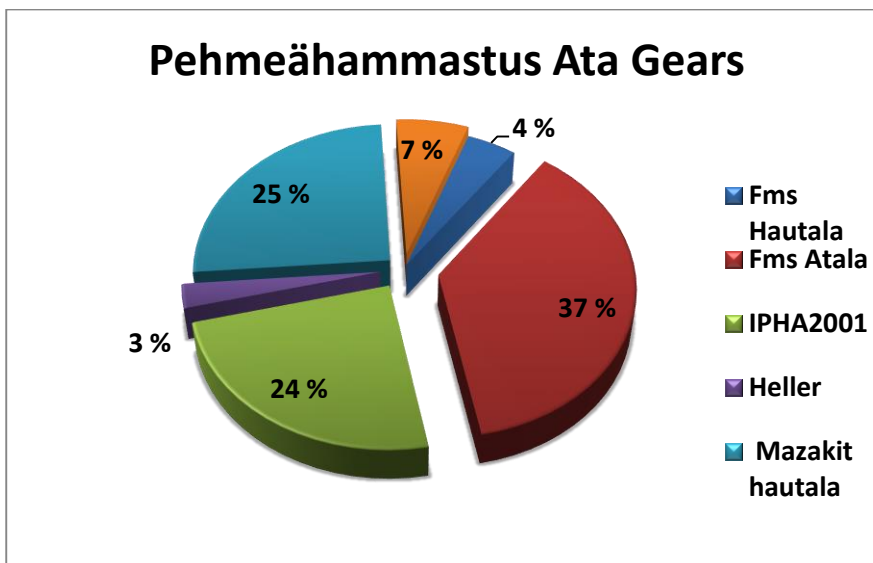
Mallinnettua viistemuotoa ei rajoita ainoastaan työstökoneiden fyysiset rajat ja liikkuvuus, vaan myös mallinnusohjelmat. Suunnittelussa käytössä olevilla CAD-ohjelmilla pyöristyneen mallintaminen on erityisen vaikeaa.

Suunnittelussa käytössä on SolidWorks, kun taas tuotannossa käytetään Delcam:in ohjelmistoja. Pupomuotoa, oli se sitten viiste tai pyöristys, ei yksinkertaisesti pysty mallintamaan hammasaukolle juuri halutun kokoista viistettä. Syy siihen ilmeni, kun tutkittiin tarkemmin suunnittelussa tehtyä hammaspyörämallia. Hammasaukon reunan muotoviiva ei ole yhtenäinen, tangentialisesti jatkuva käyrä, vaan siihen tulee teräviä kulmia koska lopullinen malli on koottu useammasta palasta. Tämä seikka aiheuttaa sen, että yksinkertaisen viisteen mallintaminen työstöratoja varten vie koneistajalla aikaa, että löytyy oikean kokoinen pyöristys, minkä mallinnusohjelma pystyy toteuttamaan. Tämä tarkoittaa siis sitä, että koneistaja joutuu kokeilemaan erilaisia pyöristysmuotoja ja valitsemaan sen mikä toimii.

5.4. Nykytila-analyysin yhteenveto

Pehmeähammastus painottuu selkeästi kahdelle kuormitusryhmälle: Lautaspyöriä hammastavalle FMS-linjalle Atalaan ja pinioneita hammastaville Mazakeille Hautalaan (kuvio 1). Päätelmät voidaan tehdä vuosi-estimaatista (Taulukko 9), jossa on vuoden aikana pehmeähammastuksesta valmistuneiden kappaleiden määrä, jalostustuntihinta, pupoamiseen kuluva aika, sen suhde koko hammastusvaiheeseen ja keskiarvoinen kustannus. Tätä estimaattia voidaan pitää edellä mainittujen kuormitusryhmien osalta luotettavana, sillä vain näillä kahdella pystyttiin toteamaan käytännössä arvioidut koneajat useammalla nimikkeellä. Atalan DMC-koneilla ajat saatiin suoraan työkalun käyttäjoista.

Kuviossa 1 näkyy Atalan FMS-linjan tuotantokapasiteetti suhteessa muihin kuormitusryhmiin Ata Gears:lla.



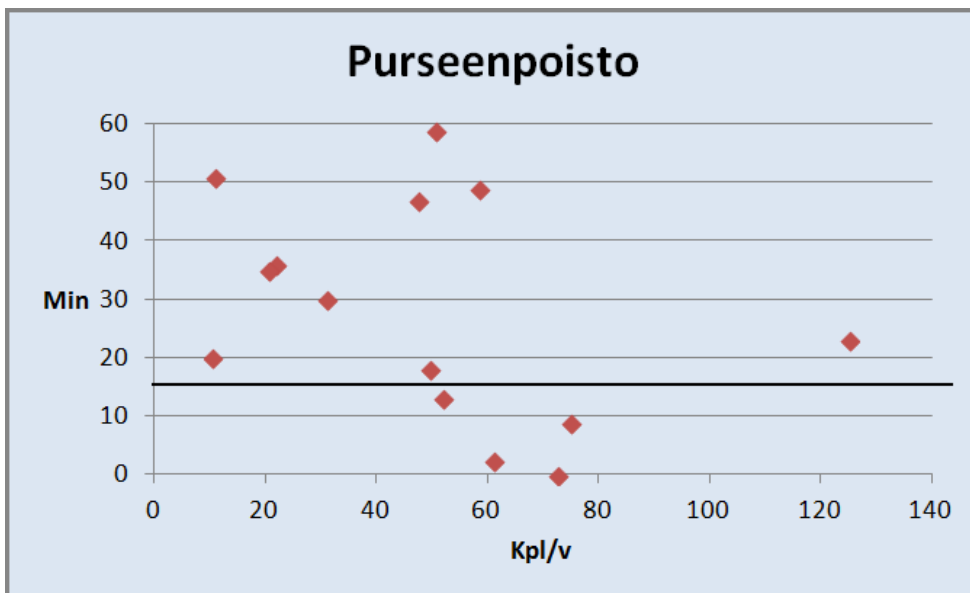
KUVIO 1 TOP 6 kuormitetuimmat yksiköt tuotannossa

FMS-linjoista Atalassa ja Hautalassa voidaan tehdä seuraavia päätelmiä: Hautalan FMS-linja pehmeähammastaa huomattavasti nopeammin kuin vastaava linja Atalassa. Tämä johtuu todennäköisesti erilaisesta työstöstrategiasta, jossa pyöritykset tehdään hammastusvaiheessa samoilla työkaluilla.

Pupovaiheen radoilla ei ole kovin suuria eroja ajallisesti, mikä on n. 0,6-1 h per hammastettava lautanen. Koneistusaikojen erot johtuvat todennäköisesti syöttöarvoista ja hampaanavauksen työstöraidoista, joiden eroja esiteltiin aiemmin.

Pupoaika lautaspyörissä on suunnilleen sama riippumatta kuormitusryhmästä, eikä sitä ole pystytty oleellisesti nopeuttamaan. Pystypupossa aikaavievää on se, että yhtä hammasaukkoa pyöristetään pallotapilla 10-20 vedolla. Osalla koneista pystypupon aikaa on saatu pienemmäksi vähentämällä työstöratojen lukumäärää. Tämän seurauksena lastunvahvuus kasvaa ja pyörityksestä tulee kärkeampi.

Jotta itse jäysteenpoistovaiheeseen saisi tehokkuutta lisää, muoto pitäisi muuttua yksinkertaisempaan viisteeseen. Viistettyjä hammaspyöriä on myyty jo ennen pyörityksen käyttöönottoa, minkä takia vanhaan alkuperäiseen pupomuotoon siirtyminen ei ole riskialtista asiakkaan eikä laadun näkökulmasta. Mikäli viisteen pystyisi tekemään korkeintaan kahdella vedolla per hammasaukko, kärkeästi laskettuna pupoon kuluva aika lyhenisi teoriassa 10 prosenttiin alkuperäisestä. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että jäysteenpoisto aika lautaspyörissä saataisiin pudotettua alle 15 minuutin, joka on rajattu kaaviossa 1 mustalla viivalla (kaavio 1).



KUVIO 2 Vuoden aikana valmistettavien nimikkeiden pupo-aika

6 Kehityskohdat

Kehitysvaiheessa teoriassa löydettyjä ratkaisuja kokeiltiin käytännössä erilaisilla tuotannossa tehtävillä koeajoilla. Testejä tehtiin yhteensä 4 kappaletta, joista ensimmäinen koski työstöstrategian muuttamisen vaikuttamista pehmeähammastuksessa. Toinen ja kolmas testi tehtiin uuden jäysteenpoistotavan kokeilemiseksi. Viimeisessä, eli neljännessä testissä kaikki aikaisemmin kokeillut menetelmät koottiin yhteen ja testattiin.

6.1 Työstöstrategian muuttaminen hampaan avauksessa

Nykytila-analyysistä kävi ilmi, että suurimmat volyymit pehmeähammastuksessa on Atalan FMS-linjalla, joten opinnäytetyön panos päätettiin keskittää siihen. Näin jo pienilläkin parannuksilla saadaan aikaan suuria kustannushyötyjä. Hautalassa olevalla FMS-linjalla todettiin olevan tehokkaampia menetelmiä pehmeähammastuksessa, vaikka volyymit ovat huomattavasti pienemmät. Ensimmäiseksi selvitettiin työstöstrategian, työkalujen ja syöttöarvojen erot näillä kahdella linjastolla. Tämän jälkeen testattiin merkittävimpien menetelmien eroja käytännössä.

Yksi selvä ero oli jo nykytila-analyysissä ilmi tullut hampaan avauksessa käytettävä työstöstrategia. Atalassa käytettävällä pyöristävällä avausradalla ja Hautalassa käytössä olevalla suoralla avausradalla epäiltiin olevan jonkinlainen ero työstöajassa. Testissä huomattiin, että näillä kahdella tavalla on eroa noin tunti (taulukko 11).

TAULUKKO 7 Hampaanavauksen uuden työstöstrategian ero vanhaan

Pyöristävän ja suoran avausradan työstöaika 2016623	
työstötapa	Aika (min)
Suora avaus	84
Pyöristävä avaus	147,3
ero	-63,3

Työkalut ja työstöarvot vaikuttivat olevan lähes samoja, tosin Atalassa on käytössä enemmän työkaluja isomman tuoteskaalan takia. Vertailussa kirjatut työkalut ja tiedot ovat liitteessä.

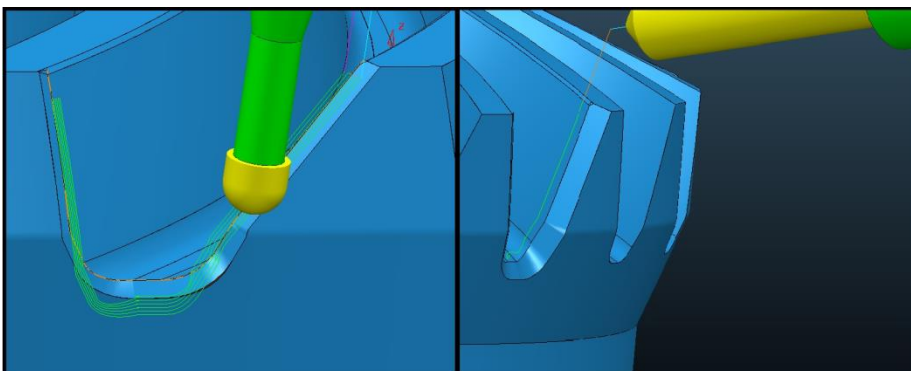
Pyöristävän hampaanavausradan muuttaminen suoraksi jättää avatun hampaan reunan teräväksi, mikä tarkoittaa sitä, että nykyisen puporatojen terät rikkoutuvat. Tämän takia ennen kuin uusi työstöstrategia hammastuksessa voidaan ottaa käyttöön, oli keksittävä uusi tapa jäysteenpoistovaiheelle. Helpoin vaihtoehto olisi ollut kopioida pupo-ohjelma Hautalasta, mutta siellä käytössä oleva pystypupo olisi ollut yhtä hidaskuon alkutilanteessa Atalassa.

6.2 Jäysteenpoiston kehittäminen

Pehmeähammastuksen jäysteenpoistovaiheen tehostaminen oli yksi tavoite tässä opinnäytetyössä. Pyöristykseen muuttaminen yksinkertaisemmaksi viisteeksi olisi paras keino saavuttaa koneajallisesti suurimmat kustannushyödyt. Muutoksella olisi mahdollisuus lyhentää pupoon menevän työstöaika 10%:iin alkuperäisestä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi oli löydettävä ratkaisut seuraaviin ongelmiin: Työstökoneiden fyysiset rajoitukset työkalun asennolle, vaivaton tapa työstöradan CAM-ohjelmointiin ja esteettisesti sekä pinnanlaadullisesti hyvä viiste.

Työstöradoille mallinnettiin erilaisia designeja käytännön testiä varten. Vaatimuksina näille radoille oli jo edellä luettelemani asiat. Valitsimme työstöradoista kehityskelpoiset käytännön testiin.

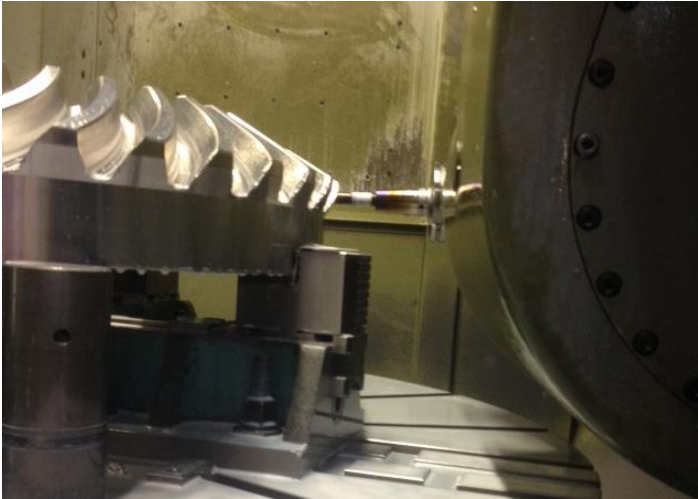
Työkaluiksi testiajoon valittiin pallopäinen jyrshintappi sekä 45 asteen kartioterä. Kartiotapilla tehtävä jäysteenpoisto osoittautui tehokkaaksi ratkaisuksi. Kuvassa 20 on pallopäisen ja kartiotapin radat simuloituna hammasaukossa.



KUVA 20 Pystypupo pallopäisellä tapilla (vas) ja kartiotapilla tehty viiste

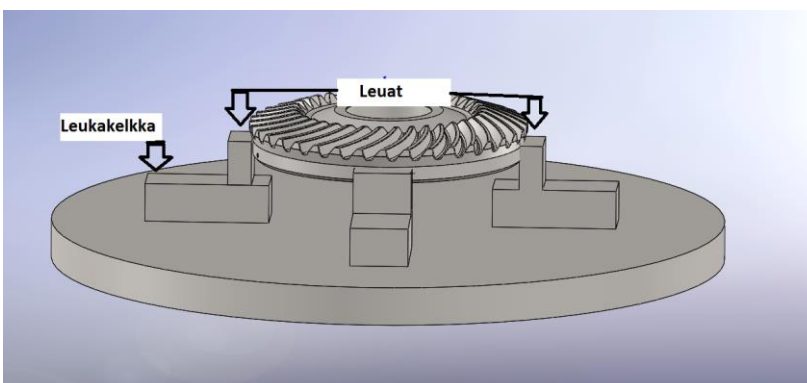
6.2.1 Koeajo fyysisten rajojen selvittämiseksi

Tuotannossa suoritettiin testi, jossa jyrsimellä ajettiin uudella jäysteenpoisto-ohjelmalla. Simuloinnissa kaikki näytti hyvältä, eikä törmäysvaroituksia tullut. Kuvasta 21 näkyy, kuinka lähellä teräpää käy pöytää (kuva 21).



KUVA 21 Hammaspyörää viistetään DMC-työstökeskuksella

Toinen kriittinen kohta on kappaletta pitävät leuat, jotka jyrsin väistää pitkän työkalun ansiosta. Mikäli paletin leuat olisivat säädetty isoille kappaleille, olisivat leuat paljon ulompana. Tämä tilanne aiheuttaisi vakavan törmäysvaaran ohjelmaa ajettaessa. Kuvassa 22 on havainnollistettu vaarallinen asetus, eli pieni lautaspöytä isolle säädetyssä paletissa.

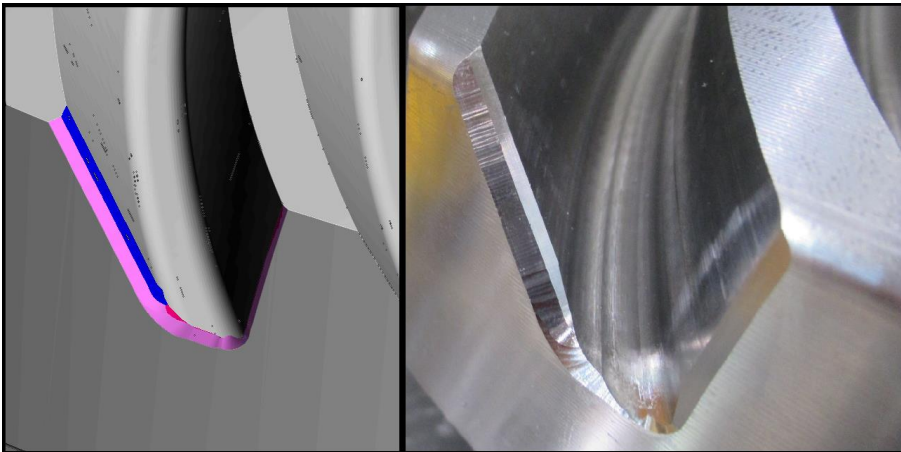


KUVA 22 Leukakelkat kappaleen ulkopuolella

Tämä koeajo kuitenkin osoitti, että viistäminen työkalu vaakasuorassa on mahdollista toteuttaa FMS-linjalla, mikäli kappaleen kiinnitys on suoritettu oikealla tavalla. Ennen lopullista päätöstä pitäisi kuitenkin miettiä tarkkaan, kannattaako vaakatasossa ajettava rata ottaa käyttöön turvallisuusriskin takia. Voisiko sellaisen asetuksen tekeminen jotenkin estää, jossa leukalaatikko tulee hammaspyörän ulkopuolelle?

6.2.2 Koeajo viistemuodon määrittelemiseksi

Sopivan koon ja muodon löytämiseksi koeajo tehtiin pienemmällä Heller työstökeskuksella. Tarkoituksena oli testata terän kulumista, pinnanlaatua ja erilaisia viistemuotoja. HPG-kovahammastuksessa terien kestävyuden parantamiseksi hammasaukon koveralle puolelle tehtiin kaksoisviiste (kuva 23) missä sisemmän viiستن tarkoituksena on suunnata terään kohdistuvan iskun vastaanottavaa pintaa enemmän kyljen suuntaiseksi, kuin se tavanomaisessa 45 asteen viisteessä olisi.



KUVA 23 Hammasaukon simuloitu ja valmis viiste

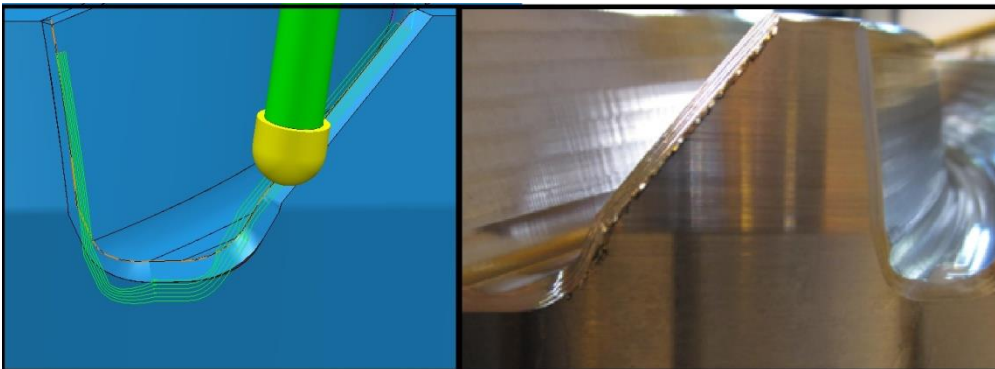
Yksi tärkeä huomio tässä testissä oli se, että pyöristykselle tehdyt kaavat eivät sovellu viistämiseen. Mikäli viiستن koko olisi määritelty vanhalla kaavalla, (kts. 5.1.1 Pyöristyksien vaatimukset ja kaavat) olisi viisteestä tullut liian iso.

6.3 Tuotantotesti

Viimeisessä koeajossa testipyörinä olivat yleisesti tuotannossa valmistettavia nimikkeitä. Tuotantotestin tarkoituksena oli kokeilla jo etukäteen testattujen menetelmien toimivuutta yhtenä kokonaisuutena.

Vanhan työstötavan aika samoilla pyörillä oli mitattu nykytila-analyyysissa, joten sitä voidaan verrata uuteen tapaan. Uudella hampaanavauksen työstöstrategialla ja jäysteenpoistotavan muuttamisella tavoiteltiin n. 100 minuutin (1 h ja 40 min) leikkausta työstöajasta.

Jäysteenpoisto päätettiin tehdä pystyasennosta pallopäisellä työkalulla, jotta rata olisi yhtä turvallinen kuin aikaisemmin käytössä ollut pystypupo. Tämä menetelmä oli jonkin verran hitaampi kuin kartioterällä tehtävä viiste, mutta nopeampi kuin alkuperäinen pyöristystapa. Haasteena pallopäisen tapin käytössä oli uuden jäysteen syntyminen jäysteenpoistovaiheessa. Tämä ilmiö on nk. sisäänmeno-jäyste, jossa pallon jyrssiessä aukon reunalla se työntää uuden leikkautumattoman lastun kappaleen reunalle (kuva 24). Tätä ongelmaa ei kartiotapilla ollut, koska leikkaaminen oli siistiä. Jäysteen syntyminen saatiin ehkäistyä lisäämällä työstöratojen tiheyttä työstettävällä pinnalla.



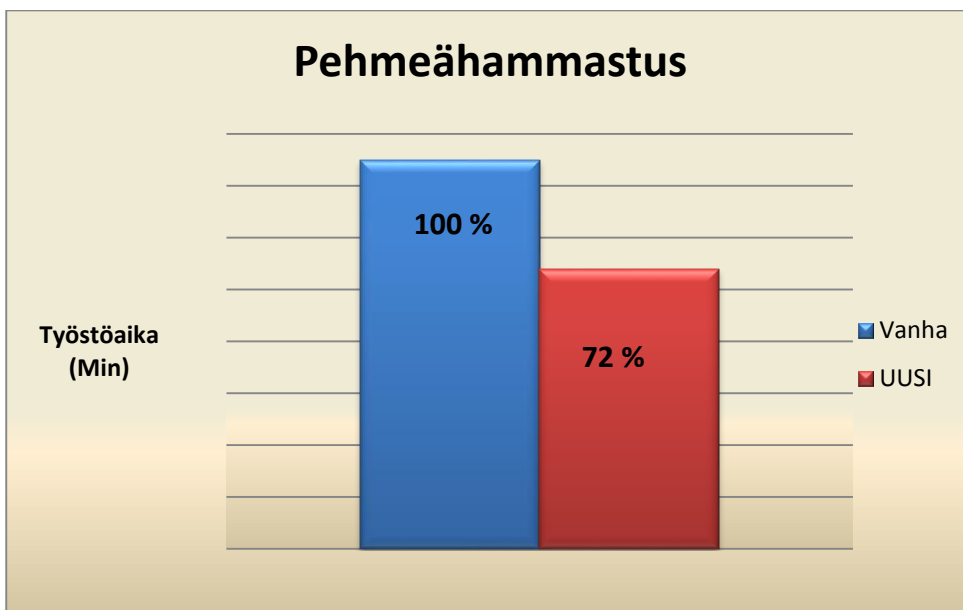
KUVA 24 Sisäänmenojäyste hammasaukolla pupon jälkeen

7 TULOKSET

Ensimmäisissä testeissä poistettiin avausradoissa tehdyt pyöritykset, mitkä hidastivat työstöä huomattavasti. Tuloksena testipyörän hampaan avausaika lyheni 43%.

Suoristettu hammastusrata jätti hammasaukon reunan teräväksi, jolloin vanhan jäysteenpoistomenetelmän työkalut hajosivat. Tämä ei kuitenkaan tullut yllätyksenä, sillä muutenkin hitaaseen menetelmään piti keksiä uusi ratkaisu.

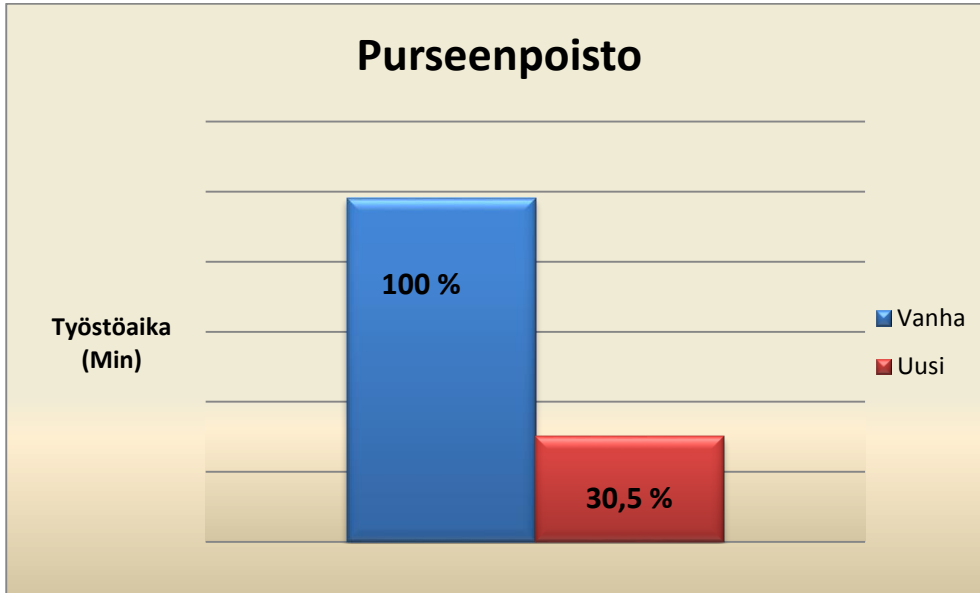
Yhteensä pehmeähammastusajasta pystyttiin vähentämään 23,8 % kokonaisajasta. Tämä muutos todettiin testipyörillä, jotka olivat identtisiä asiakkaille myytäviin tuotteisiin verrattuna. Kuviossa 3 on havainnollistettu koko pehmeähammastusvaiheen työstöajan muutosta. Uudella ja vanhalla menetelmällä on eroa n. 28 %.



KUVIO 3 Kokonaishyöty pehmeähammastuksessa (yksiköt muutettu julkisessa raportissa)

Jäysteenpoiston menetelmäkehityksestä löytyi kaksi toteutuskelpoista vaihtoehtoa, joita lähdettiin kokeilemaan käytännössä. Päätaivoite oli lyhentää 58 minuutin työstöaika 15 minuuttiin. Koska koneistajan huolimattomuus olisi voinut aiheuttaa vakavan törmäysriskin, päätettiin uusista menetelmistä ottaa käyttöön vähän hitaampi, mutta turvallisempi vaihtoehto.

Kuviossa 4 on havainnollistettu jäysteenpoistoajan muutosta. Sininen palkki on vanhan purseenpoistotavan työstöaika. Uuden purseenpoistotavan työstöaika samalla hammaspyörällä kesti n. 70%:ia vähemmän.



KUVIO 4 Uudessa jäysteenpoistossa päästiin tavoiteltuun työstöaikaan (yksiköt muutettu julkisessa raportissa)

Jos uusi menetelmä otettaisiin käyttöön 5:lle – 10:lle yleisimmälle tuotteelle, olisi vuosittaiset säästöt yhteensä 30 000 – 60 000 € (taulukko 11). Tämä arvio perustuu vuosina 2013 ja 2014 valmistettujen lautaspyörien keskiarvoon.

TAULUKKO 8 Vuosisäästöarvio

Arvio uuden menetelmän säästöistä		
Nimikkeitten lukumäärä	5	10
Vuosittainen säästö	n. 35 000 €	n. 60 000 €

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Nykytila-analyysissä löytyneet, suurta kehityspotentiaalia sisältäneet kohdat olivat avausradan muoto hammastuksessa ja sen jälkeen tehtävä jäysteenpoistotapa. Menetelmäkehityksessä otettiin päätavoitteeksi keskittyä näihin kahteen asiaan. Kustannustehokkuutta haettiin pääasiassa konetuntiajan lyhenemisestä mm. yksinkertaistamalla työstettäviä muotoja. Jäysteenpoisto päätettiin toteuttaa In-machine- periaatteella, eli samalla koneella millä itse pehmeähammastuskin.

Tätä opinnäytetyötä aloitettaessa arvio suurimmasta mahdollisesta työstöajan leikkauksesta oli n. 40 minuuttia per tuote. Kustannussäästö oli tarkoitus saada jäysteenpoiston menetelmäkehityksestä. Laaja nykytila-analyysi ja tuloksien tulkinta paljasti kuitenkin huomattavan kehittymahdollisuuden myös hammastusvaiheessa. Tähän mahdollisuuteen tartuttiin ja lopputuloksena oli yli kaksinkertainen kustannussäästö ensimmäiseen tehtävänantoon verrattuna. Tästä syystä voitaneen todeta, että tavoitteet saavutettiin. Aikaisempi käytännön kokemukseni jäysteenpoistosta yhdistettynä konetekniikan tuntemukseeni sai minut pitämään kiinni periaatteesta, jossa jäysteenpoisto olisi järkevintä toteuttaa samalla koneella kuin pehmeähammastuskin. Tämä osoittautui oikeaksi ratkaisuksi.

Parhaat tulokset jäysteenpoistossa saavutettiin kartionmuotoisella tapilla, mutta työkalun vaatiman työstöasennon takia sitä ei voitu ottaa käyttöön. Vaikka testikappaleilla terä toimi erinomaisesti, eikä välitöntä törmäysvaaraa ollut, huolimaton asetus ja normaalista poikkeava kappaleen muoto saattaisi aiheuttaa törmäyksen. FMS-linjan on tarkoitus työstää vuorokauden ympäri riippumatta koneen käyttäjien läsnäolosta. Tämän tuo työstöratasuunnitteluun haastetta, sillä toimintatapojen pitää olla sellaisia, jotka soveltuvat kaiken muotoisten kappaleiden työstöön. Näin riski huolimattomuudesta aiheutuville virheille jää minimaaliseksi. Testituloksia voidaan pitää luotettavina koska niissä käytettävät koekappaleet olivat identtisiä asiakkaille menevien tuotteiden kanssa.

Jatkokehityskohteita voisi olla mm. suuntaa antavan kaavan kehittäminen, joka antaisi koon valmiille viisteelle. Tässä työssä mainitut vanhat aukkopyörästysten kaavat eivät soveltuneet viisteiden tekemiseen. Toisena jatkokehityskohteena on turvallisuusongelmien ratkaiseminen kartioterällä tehtävälle viisteradalle. Mikäli tämä ongelma saataisiin ratkaistua, viisteen pinnanlaatu ja työstönopeus paranee huomattavasti.

9 LÄHTEET

Airila M, Karjalainen J, Mantovaara U, Nurmi L, Ranta A, Verho A, 1985 Koneenosien suunnittelu 3 Porvoo: WSOY

Kukkonen, J. linjapäällikkö. 2015 Haastattelu 11.6.2015. Haastattelija Aaro Väisänen

Gillespie, LaRoux K, 1999, Deburring and edge finishing handbook

Kuisma, VM, 2007, Joustavan konepaja-automaation käyttöönoton onnistumisen edellytykset.

Aaltonen, K. & Torvinen, S 1997. Konepaja-automaatio. Porvoo:WSOY

Suhonen, S, 2010. Jäysteenpoistoaseman suunnittelu ja toteutus.