

Teemu Haavisto

HYBRIDIVALMISTUS NC-TYÖSTÖKONEELLA

Menetelmien integrointi ja virtuaalinen malli

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Eric Coatanéa
Jorma Vihinen
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Teemu Haavisto: Hybridivalmistus NC- työstökoneella – menetelmien integrointi ja virtuaalinen malli

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Konetekniikan koulutusohjelma

Toukokuu 2021

Työn tarkoituksena on tehdä tutkimusympäristö hybridivalmistuksen tutkimista varten. Hybridivalmistuksella tarkoitetaan tässä prosessia, mikä yhdistää ainetta lisäävän ja poistavan valmistusmenetelmän. Ainetta lisäävänä menetelmänä on suorakerrostus ja poistavana sorvaus ja hionta. Hybridivalmistus on tutkimuskohteena yleistynyt viime vuosien aikana. Ainetta lisäävien menetelmien kehittyessä ja yleistyessä valmistusprosessiin on liitetty myös ainetta poistava menetelmä viimeistelytyönvaiheena. Yhdistämällä nämä prosessit tehtäväksi samalla koneella saavutetaan useita hyötyjä. Prosessi on kokonaisuudessa helpommin kontrolloitavissa ja välttää kappaleen uudelleen kiinnityksestä aiheutuvista epätarkkuuksista. Hybridivalmistuksen keinoin kappaleiden valmistusaikaa voidaan pienentää asetusajojen pienentyessä.

Hybridivalmistusmenetelmät integroidaan olemassa olevaan GF NDM 16/100 sorviin. Molemmat valmistusmenetelmät asettavat tiettyjä vaatimuksia hybridisorvin suunnittelulle. Hiontaprosessin kannalta suunnittelu ja muokkaukset liittyvät lastuamisnestejärjestelmään, työkalun kiinnitykseen koneeseen, työkalun tasapainotukseen ja timantointiin. Suorakerrostusprosessin kannalta tärkeimmät suunnittelua vaativat kohdat ovat suorakerrostuspään adapteri, kiinnitys sorvin työkalurevolveriin, laserkuidun ja muiden letkujen vienti suorakerrostuspäähän ja muut prosessiin vaadittavat laitteet.

Työssä tehdään hybridisorvista virtuaalinen malli, jonka avulla voidaan simuloida CAM-ohjelmia. Koneen CAM-ohjelmana käytetään Siemens NX:ää ja virtuaalinen malli tehdään sen Machine Tool Builder- lisäosan avulla. Hybridisorvia varten tehdään myös postprosessori, jonka tarkoituksena on tulkata CAM- ohjelman työstöradat sorville luettavaan muotoon G- koodiksi. Hybridivalmistus asettaa tiettyjä vaatimuksia postprosessorille, esimerkiksi toimilaitteiden ohjauksen osalta. Työssä tarkastellaan lisäksi kirjallisuuskatsauksen tasolla mahdollisuuksia kehittää hybridivalmistuksen prosessin digitaalista kaksosta.

Avainsanat: Hybridivalmistus, hionta, suorakerrostus, EHLA, postprosessori, CAM simulointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Teemu Haavisto: Hybrid manufacturing with NC lathe – integration of technologies and virtual model

Masters thesis

Tampere University

Masters degree programme in mechanical engineering

May 2021

Purpose of this work is to make a research environment for the study of hybrid manufacturing. Here hybrid manufacturing means a process that combines a manufacturing process that adds and removes material. The additive manufacturing method in this work is Directed Energy Deposition (DED) and the subtractive methods are turning and grinding. Hybrid manufacturing has become more common as a research topic in recent years. As additive manufacturing methods develop and become more common, a subtractive method has also been added to the manufacturing process as a finishing step. Combining these processes on a single machine achieves several benefits. The process becomes easier to control and inaccuracies decrease since re-clamping of the part is avoided. By means of hybrid manufacturing, the production time of parts can be reduced as the set-up times decrease. Hybrid manufacturing methods will be integrated into existing GF NDM 16/100 lathe. Both manufacturing methods impose certain requirements on the design of a hybrid lathe. From the point of view of the grinding process, the design and modifications are related to cutting fluid system, attaching tool to the machine and tool balancing and dressing. Important design points for the DED process are the deposition head adapter, connection of laser fibre and other hoses to the deposition head and defining needed external equipment. In this work, a hybrid lathe is made into a virtual model that can be used to simulate CAM programs. Siemens NX is used as CAM program and the virtual model is created using its expansion Machine Tool Builder. A postprocessor is also made for the hybrid lathe, the purpose of which is to interpret the toolpaths of the CAM program into a G-code readable format for the lathe. Hybrid manufacturing imposes certain requirements on the postprocessor, such as actuator control. The paper also examines the possibilities of developing a digital twin in the process of hybrid manufacturing at the level of literature review.

Keywords: Hybrid manufacturing, grinding, directed energy deposition, EHLA, postprocessor, CAM simulation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana laajempaa Tampereen yliopiston ja useiden alueen yritysten yhteistä älykkääseen valmistukseen liittyvää projektia. Työ tarjoaa toimivan järjestelmän hybridivalmistuksen tutkimus- ja opetustyötä varten. Kolme eri työstömenetelmää yhdistävä kone on ainutlaatuinen ja toivon siitä olevan hyötyä tulevaisuuden valmistustekniikkaa tutkittaessa ja opetettaessa.

Haluan kiittää työni ohjaajia Eric Coatanéaa ja Jorma Vihistä, joilta sain aina tarvittaessa apua ja neuvoja työn alusta loppuun. Suuri kiitos kuuluu Jouko Kiviölle, jonka työpanos oli korvaamaton työstökoneen muutosten ja työn tarkastamisen kannalta. Lisäksi haluan esittää lämpimän kiitoksen laboratoriohenkilökunnalle, joiden avustuksella suurin osa koneen muutoksista ja uusista komponenteista tehtiin.

Tampereella, 5.5.2021

Teemu Haavisto

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuskysymykset ja aiheen rajaus	1
1.2 Tutkimusstrategia ja työn tavoitteet	2
1.3 Hybridivalmistus	3
2. HIONTA	8
2.1 Hiomalaikan ominaisuudet	10
2.1.1 Abrasiivit	12
2.1.2 Sidosmateriaalit	13
2.1.3 Laikan adapterin suunnitteluperiaatteet.....	14
2.1.4 Laikan teroitus ja tasapainotus.....	16
2.2 Lastuamismesteen käyttö ja vaikutukset hionnassa	19
2.3 Värähtelyn vaikutukset hiottuun kappaleeseen.....	24
2.4 Hiontaparametrit	26
3. SUORAKERROSTUS	29
3.1 Suorakerrostusprosessin periaatteet.....	30
3.2 EHLA- prosessi	33
3.3 Soveltuvuus hybridivalmistukseen.....	35
3.4 Suorakerrostusparametrit.....	36
4. VIRTUAALINEN MALLI.....	39
4.1 Virtuaalisen mallin käyttötarkoitus	40
4.2 Mallintamisessa käytetyt menetelmät.....	41
4.3 Työstökoneen kinematiikka	42
4.4 Konekomponentit ja roolien määrittely	45
4.5 Liikeakseleiden määrittely	47
5. HYBRIDIVALMISTUSMENETELMIEN IMPLEMENTOINTI.....	49
5.1 PLC ja siihen liittyvät muokkaukset	52
5.2 Hionnan implementointi ja lisätyt komponentit.....	56

5.3	Suorakerrostuksen implementointi ja lisätyt komponentit	63
5.4	Postprosessori	70
5.5	Tapahtumien luominen.....	76
5.5.1	Hiontaohjelman rakenne	79
5.5.2	Suorakerrostusohjelman rakenne	81
6.	JATKOKEHITYSIDEAT	84
6.1	Hiontaprosessin jatkokehitysmahdollisuudet	84
6.2	Suorakerrostuksen jatkokehitysmahdollisuudet.....	85
6.3	Digitaalisen kaksosen kehitys tulevaisuudessa	86
7.	YHTEENVETO.....	89
	LÄHTEET	91
	LIITE A: ADAPTERIN ULKOLAIPPA.....	96
	LIITE B: ADAPTERIN SISÄLAIPPA	97
	LIITE C: SUORAKERROSTUSPÄÄN TEKNISET TIEDOT.....	98
	LIITE D: LASERIN OHJAUSJÄNNITYS TEHON FUNKTIONA.....	99
	LIITE E: LASERSÄTEEN LAATU	100
	LIITE F: LASTUAMISNESTEEN SUODATUSJÄRJESTELMÄ	101

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Three Dimensional
AM	Additive Manufacturing
BTF	By to Fly
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CBN	Cubic Boron Nitride
DED	Directed Energy Deposition
EHLA	Extreme High-Speed Laser Material Deposition (Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen)
HAZ	Heat Affected Zone
IT	International Tolerance
MTB	Machine Tool Builder
(C)NC	(Computer) Numerical Control
PBF	Powder Bed Fusion
PLC	Programmable Logic Control
SM	Subtractive Manufacturing
UDE	User Defined Event
NA	Numerical Aperture
LSP	Laser Shock Peening
a_e	Hionnan lastuamissyvyys
A_k	Hionnan kontaktipinta-ala
a_p	Sorvauksen lastuamissyvyys
A_{putki}	Lastuamisnesteputken poikkipinta-ala
A_{suutin}	Suuttimen poikkipinta-ala
b_d	Timantin leveys
c_{gw}	Hiomalaikan pintageometrian vakio
d_b	Laikan sisäreiän halkaisija
d_{eq}	Ekvivalenttihalkaisija
d_f	Säteen halkaisija fokuksessa
d_{gw}	Hiomalaikan halkaisija
D_l	Kollimoidun säteen halkaisija
d_x	Säteen halkaisija mielivaltaisessa kohdassa polttovälillä
d_{wo}	Työkappaleen halkaisija
e	Hionnan tyypistä riippuva eksponentti
f	Polttoväli
F_{hionta}	Hiontavoima
F_k	Vastapainon aiheuttama voima
F_{sorvaus}	Sorvauksen päälastuamisvoima
f_z	Z- suuntainen syöttö
G	G-arvo
H	Suorakerrostusradan korkeus
h_{cumax}	Lastun maksimipaksuus
h_{max}	Maksimi lastunpaksuus
j	Imaginääriyksikkö
k_c	Ominaislastuamisvoima
K_s	Jäykkyyserroin
l_g	Hionnan geometrinen kontaktipinta
M	Hiomalaikan radiaalinen leveys
M^2	Laserin laatua kuvaava suure

n_{gw}	Hiomalaikan pyörimisnopeus
P_{hionta}	Hionnan teho
Q_{ded}	Suorakerrostuksen kerrostusnopeus
q_{gw}	Laikkaan sitoutunut lämpö
q_{lastu}	Lastuihin sitoutunut lämpö
Q_{neste}	Lastuamisnesteeseen tilavuusvirta
q_{neste}	Nesteeseen sitoutunut lämpö
q_{wo}	Työkappaleeseen sitoutunut lämpö
Q'_w	Hionnan ominaislastuvirta
t_c	Hiontaan kuluva aika
U	Epätasapainosta aiheutuva voima
U_d	Päällekkäisyyskerroin
v_c	Työstönopeus
v_{putki}	Nesteeseen nopeus putkessa
v_s	Hiomalaikan pintanopeus
V_s	Hiomalaikasta poistetun materiaalin tilavuus
v_{suutin}	Nesteeseen nopeus suuttimella
v_{wo}	Työkappaleen pintanopeus
V_w	Työkappaleesta poistettu tilavuus
v_z	Z-suunnan syöttönopeus
V'_w	Ominais-tilavuus
W	Suorakerrostusradan leveys
x	Etäisyys fokuksesta
x_{gw}	Työkappaleen pintavirhe
x_0	Fokuksen sijainti
λ	Laserin aallonpituus
θ_x	Hajaantumiskulma
φ	Systeemin jäykkyyskerroin
ω	Värähtelyn taajuus

1. JOHDANTO

Perinteisten ainetta poistavien työstömenetelmien käyttö on viety huippuunsa viimeisten vuosikymmenten aikana vastaamaan kehittyvän teollisuuden tarpeita. Tuotannon volyymin ja variaation vaihtelun takia pelkästään perinteisten menetelmien hyödyntäminen saattaa olla tehotonta.

Työstömenetelminä hionta ja sorvaus ovat avainasemassa monille yrityksille ja ne saattavat olla yksittäisen prosessin parhaita osajia. Teollisuudessa toimintoja joudutaan tällä hetkellä keskittämään tehtäväksi samoilla konepajoille, jolloin useamman työstöprosessin erinomainen hallitseminen korostuu. Tällöin yritys pystyy hankkimaan kilpailuetua hallitsemalla useita työstövaiheita sulavasti. Nykyään edellä mainittuja työvaiheita tehdään pääsääntöisesti niitä varten suunnitelluilla työstökoneilla, mahdollisesti alihankintana muissa yrityksissä (Simpson, 2019). Erityisesti kompleksiset, geometrisilta ja toiminnallisilta ominaisuuksiltaan haastavat kappaleet vaativat useamman valmistusmenetelmän soveltamista valmistusprosessinsa aikana.

Ainetta lisäävien työstömenetelmien kehittyminen varteen otettaviksi osiksi kappaleiden valmistusprosessia on tapahtunut viimeisten vuosikymmenten aikana. Jo 1980-luvulla näitä menetelmiä käytettiin kappaleiden nopean koerakentamisen yhteydessä, kun digitaalista valmistusta pystyttiin käyttämään tietokoneiden laskentatehon kasvaessa ja tietoliikenteen nopeutuessa. Aluksi 3D-tulostamalla ei pystytty valmistamaan sellaisenaan laadullisia vaatimuksia täyttäviä kappaleita. Menetelmien kehittyessä ensin muovista pystyttiin eri pursotusmenetelmien avulla valmistamaan valmiita kappaleita. Nykyään 3D-tulostusmenetelmien avulla voidaan valmistaa valmiita kappaleita alumiinista titaanin ja nikkelpohjaisiin kompleksisiin seoksiin (Strong et al., 2017).

1.1 Tutkimuskysymykset ja aiheen raja

Tämä diplomityö on toteutettu osana Tampereen yliopiston projektia, jossa tutkimuksen kohteena on älykäs valmistus. Työn tarkoituksena on tukea projektissa suoritettavaa tutkimusta muokkaamalla olemassa olevaa sorvia siten, että sillä pystytään tekemään sorvauksen lisäksi hiontaa ja suorakerrostusta. Näin luodaan tutkimusympäristö hybridivalmistuksen tutkimiselle tai edellä mainituille valmistusmenetelmille erillisinä työvaiheina.

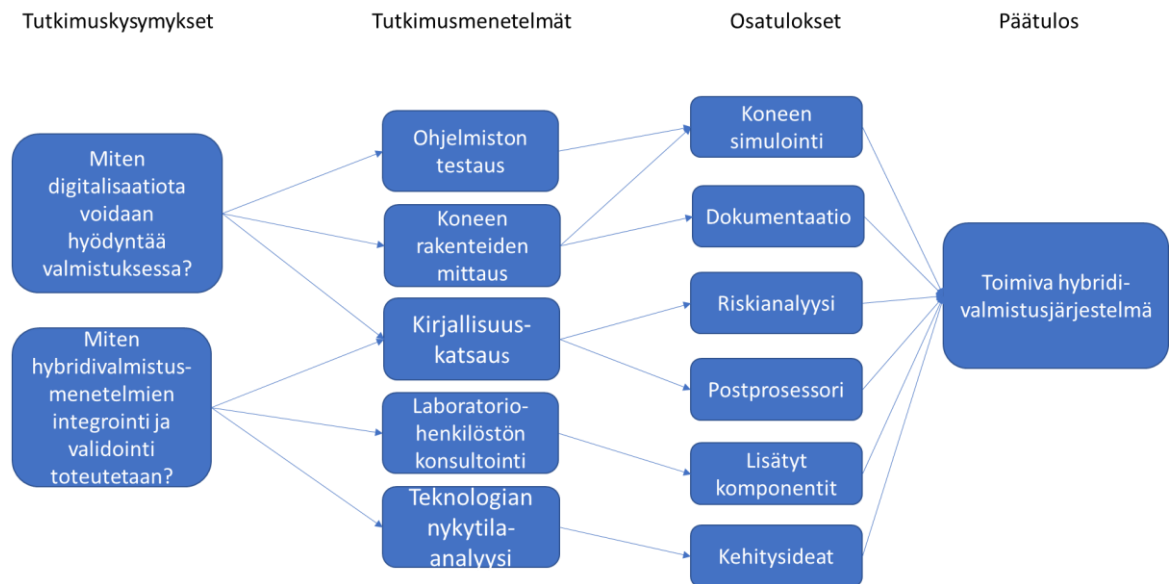
Työssä tutkitaan, riittävätkö sorvin mekaaniset ominaisuudet suorittamaan kahta muuta valmistusmenetelmää sorvauksen lisäksi. Sorvin kriittisten komponenttien validointi perustuu kirjallisuudesta löytyvään tietoon hiomakoneista ja suorakerrostuksesta. Lisäksi tutkitaan, mitä oheislaitteita ja mekaanisia ja ohjelmallisia muokkauksia sorviin tarvitsee tehdä lisäominaisuuksien toimivuuden kannalta. Hybridisorvilla pystytään projektin valmistuttua tekemään sorvausta, suorakerrostusta ja hiontaa pyörähdyssymmetrisille kappaleille, kuten akseleille, teloille ja kiekkoille.

Työn toisessa osuudessa tarkoitus on mallintaa hybridisorvi CAD- ohjelmalla ja lopulta rakentaa oikean koneen kanssa identtisesti toimiva virtuaalinen malli. Teoriaosuudessa tarkastellaan virtuaalisen mallin rakentamista Siemens NX- ohjelmiston Machine Tool Builder-lisäosan avulla. Mallintaminen alkaa sorvin toiminnan kannalta tärkeiden komponenttien mittaamisella, jotta mallista saadaan luotettava työkalun liikkeiden ja törmäystarkastelun kannalta. Komponenttien mittaus toteutetaan käsivarsimittalaitteella, johon on kytketty kiinni pallomainen mittapää tai laserskanneri. Mittaustulokset käsitellään Polyworks- ohjelmiston avulla, jotta mitatut geometriat voidaan siirtää Siemensin NX CAD-ohjelmaan sopivassa tiedostomuodossa. CAD ohjelman avulla sorvin mallinnetut osat liitetään toisiinsa ja rakennetaan koneen kinemaattinen malli. Tätä kinemaattista mallia käytetään myöhemmin CAM- ohjelmassa koneen liikkeiden simuloinnissa ja törmäystarkastelussa. Lopuksi mallinnetulle koneelle rakennetaan postprosessori, jonka avulla CAM- ohjelmalla tehdyt työstöohjelmat voidaan muuntaa työstökoneen logiikan tunnistamaksi G-koodiksi. Postprosessoreissa voidaan ottaa huomioon työstömenetelmäkohdaisia G- ja M- koodeja, alustaa käyttäjän haluamia työstön aikaisia tapahtumia oikein ja välttyä inhimillisiltä virheiltä alustettaessa modaaliset käskyt oikein.

1.2 Tutkimusstrategia ja työn tavoitteet

Tämän diplomityön aihe liittyy vahvasti hionnan perusteorioihin, suorakerrostuksen teoriaan, hybridivalmistukseen, numeerisesti ohjattavien koneiden logiikan toimintaan ja työstökoneen simulointiin CAM- ohjelmistossa. Näitä aiheita käsitellään kirjallisuuslähteiden avulla seuraavissa kappaleissa. Hiontaa ja suorakerrostusta käsitellään teoreettiselta pohjalta ja kirjallisuuden perusteella pyritään löytämään sopivat ratkaisut hybridisorvin komponenttivalintoihin ja lopulta valmiin koneen ajoparametreihin. NC- ohjelmoinnin tekniikat ja CAM-NC integrointi ovat menetelmien implementoinnin lisäksi työn suorittavan osan pääasialliset aihealueet. Näitä aiheita käsitellään kirjallisuudesta löytyvän tiedon perusteella, mutta myös omien kokemusten ja työn suorittamisen aikana tehtävien havaintojen perusteella. Hybridivalmistusmenetelmiä käsitellään yleisesti työn teoriaosiossa, jossa tarkastellaan kirjallisuuslähteiden perusteella hybridivalmistuksessa

käytettäviä valmistusmenetelmiä ja millä tavalla eri valmistusmenetelmien yhdistämistä hyödynnetään teollisuudessa.



Kuva 1. Tutkimuskysymykset, menetelmät ja tulokset.

Työn varsinaisena tavoitteena on sorvin modifikaatioprosessin tekeminen. Tässä modifikaatioprosessissa GF NDM 16/100- sorvia muokataan siten, että sillä voidaan tehdä ulkopuolista pyöröhiontaa ja suorakerrostusta pyrähdyssymmetrisille kappaleille tavallisen sorvauksen lisäksi. Laseria voidaan käyttää myös karkaisussa. Usein hybridi-valmistuksessa käytettyä työstökoneetta ei ole alun perin suunniteltu niin, että sillä voidaan tehdä kaikki hybridi-valmistuksen työvaiheet. Tästä syystä työstökoneeseen joudutaan tekemään erilaisia muutoksia, jotta voidaan vastata uusien työvaiheiden asettamiin vaatimuksiin toiminnallisuuden ja riittävän laadukkaan lopputuloksen kannalta.

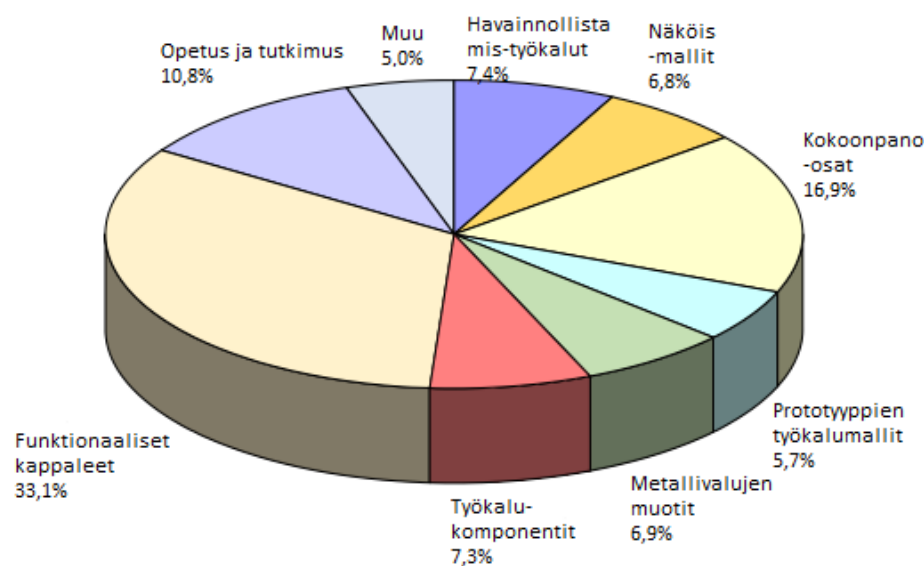
Tämän lisäksi työn aikana sorvin logiikkaohjaukseen tehdään muutoksia, jotka liittyvät hiontaan ja suorakerrostukseen. Näiden muokkausten käyttöä varten rakennetaan postprosessori. Tällöin työstön ja työkiertojen suunnittelussa voidaan hyödyntää sorvin virtuaalista mallia ja CAM-ohjelmistoa. Tässä työssä CAD/CAM-ohjelmistona on Siemens NX.

1.3 Hybridi-valmistus

Hybridi-valmistus voidaan määritellä useilla eri tavoilla, mutta yksinkertaisimmillaan se tarkoittaa useamman työstömenetelmän hyödyntämistä kappaleen valmistamisessa. Kirjallisuudessa se määritellään myös siten, että saman kappaleen valmistamisessa hyödynnetään ainetta lisäävää ja poistavaa menetelmää. Esimerkiksi jauhepetipoh-

jaista menetelmää tai suorakerrostusta laserin tai elektronisäteen avulla käytetään ainetta lisäävänä työvaiheena. Ainetta poistava menetelmä on useimmiten jokin lastuava työstömenetelmä. Nämä työvaiheet yhdistettäessä samaan työstökoneeseen puhutaan hybridityöstökoneesta. (Simpson, 2019) Yleisimmät käyttötarkoitukset tällaiselle koneelle ovat geometrialtaan vaativien kappaleiden valmistus tai kalliista materiaaleista valmistetun kappaleen korjaus. Korjaukset olemassa oleviin kappaleisiin onnistuvat siksi, että metalleja on saatavilla paljon jauhemaisessa muodossa, jolloin niitä voidaan myös 3D- tulostaa.

Jauheiden sekoittamisella saadaan tulostettua metallien seosta, mikä tuo uusia mahdollisuuksia komponenttien suunnittelun näkökulmasta. Seoksen tulostaminen kahdesta jauheesta on mahdollista ainakin suorakerrostuksen avulla. Erilaisia seoksia hyödynnetään erityisesti pinnoitteita tehdessä. Tutkittuja pinnoitteita ovat esimerkiksi nikkelpohjaiset Inconel- seokset, koboltti-kromiseokset ja erilaiset teräkset (Smoqi et al., 2020), (Wang et al., 2016) Wohlersin raportin (2018) mukaan funktionaalisten komponenttien osuus metalleista 3D- tulostettujen osien määrästä on yli 30%, kuten kuvasta 2 nähdään.



Kuva 2. Metallien AM menetelmien sovellukset aloittain. (Wohlers, 2018)

Monilla aloilla, missä hybridivalmistuksen sovelluksista olisi huomattava hyöty, ei sitä voida vielä välttämättä käyttää. Näitä aloja ovat esimerkiksi lääketieteen ja lentoteollisuuden alat. (Flynn et al., 2016) Näillä aloilla käytetyiltä komponenteilta vaaditaan tiukkojen laatuvaatimusten täyttymistä, eivätkä kaikki hybridivalmistuksen muodot ole saaneet tähän vaadittavaa laadullista hyväksyntää (Yamazaki, 2016). Tämän lisäksi noin neljännes käyttökohteista liittyy kokoonpano-osien tai työkalujen valmistamiseen. Myös näissä sovelluksissa on usein tiukat toleranssivaatimukset, joihin suorakerrostus ja muut ainetta lisäävät (engl. Additive Manufacturing, AM) menetelmät eivät vielä kykene.

Hybridivalmistusta on tutkittu jo akateemisissa laitoksissa 1990- luvun lopulta lähtien. Siirtyminen kaupallisiin sovelluksiin on ollut kuitenkin asteittaista. Viime vuosikymmenten aikana on kuitenkin opittu, että hybridivalmistusprosessien avulla voidaan valmistaa geometrisesti haastavia osia, joita ennen pidettiin liian aikaa vievinä tai mahdottomina. Hybridivalmistukseen suunniteltuja koneita onkin alettu 2000- luvun aikana kehittää ja valmistaa kaupallisessa tarkoituksessa. (Flynn et al., 2016) Hybridivalmistuksessa ainetta lisäävän menetelmän käyttö tuo kappaleen suunnitteluun vapauksia. Funktionaalisten kappaleiden valmistuksessa vaaditaan lopputuloksen tarkkuuden olevan tiettyjen toleranssien sisällä, mikä on ongelmallista käytettäessä pelkästään ainetta lisääviä menetelmiä. Näiden ongelmien poistamiseksi metallien 3D- tulostusmenetelmillä valmistetut tuotteet tarvitsevat jonkin perinteisen ainetta poistavan menetelmän lisäksi. (Flynn et al., 2016)

Hybridivalmistuksen hyötynä perinteiseen monivaiheiseen valmistukseen verrattuna on parempi mittatarkkuus valmiille kappaleille ja huolimattomuudesta johtuvien virheiden vähentyminen. Tämä saavutetaan siten, että työkappaletta voidaan työstää yhdellä koneella, eikä sitä tarvitse irrottaa kiinnityksistä ja siirtää koneelta toiselle työvaiheiden välillä. Valmistettava kappale voidaan ainetta lisäävän valmistuksen keinoin valmistaa oikeaan muotoon ja jollakin ainetta poistavalla menetelmällä sille saadaan vaaditut tarkkuudet. Hybridivalmistus myös säästää materiaalin turhaa siirtelyä ja lattiapinta-alaa tehtaalla. Lisäksi valmistusprosessin läpivienti on yksinkertaisempaa käyttäjille, kun käytettävien koneiden opettelu vähenee. (Cortina et al., 2018)

Joskus tuotantoteknisistä syistä on kannattavampaa valmistaa kappale useammalla eri työstökoneella. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun jokin työvaihe on huomattavasti hitaampi kuin muut, jolloin tämän työvaiheen kapasiteettia kannattaa kasvattaa pullonkaulan välttämiseksi. Hybridityöstön periaatteilla tämä tarkoittaisi kokonaan uuden hybridityöstökoneen hankkimista, mikä kasvattaisi samalla muidenkin työvaiheiden kapasiteettia. Kuitenkin on tilanteita, joissa työvaiheita joudutaan toistamaan useampaan kertaan haluttujen kappaleen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Tällöin on voi olla kannattavaa suorittaa työvaiheet hybridityöstökoneella, eikä useammalla eri työstökoneella. Tämä muutos vähentää kappaleen siirtelyyn kuluva aikaa ja sen asetusaikaa. Usean työstökoneen muodostaman funktionaalisen kokonaisuuden korvaaminen yhdellä hybridityöstökoneella tekisi tuotantotilan layoutin solumaiseksi, jossa hybridityöstökone muodostaisi yhden solun. Tällöin ei enää ole mahdollista suorittaa hybridityöstökoneella tehtäviä työvaiheita yhtä aikaa, eli tuotannon olemus muuttuu ”job shop” – tyyppiseksi. (Groover, 2008 s.39)

Hybridivalmistuksessa voidaan hyödyntää käytännössä kaikkia olemassa olevia AM menetelmiä. Suurin osa sovelluksista on kehitetty metalliosien valmistusta varten, mutta hybridivalmistusta voidaan soveltaa myös polymeereille, keraameille ja biomateriaaleille. (Manogharan et al., 2016) Erityisesti lentokoneen komponenttien valmistuksessa ja korjaamisessa ainetta lisäävien ja poistavien valmistusmenetelmien hybridejä on käytetty jossakin muodossa yli 20 vuoden ajan. (Hudson, 2016, s.47) Yleistymisen tällä alalla johtuu valmistettävien kappaleiden monimutkaisuudesta ja korkeasta hinnasta. Usein hajonnut kappale voi maksaa satoja tuhansia euroja, jolloin niiden korjaaminen on vain murto-osa tästä hinnasta. AM menetelmistä erityisesti suorakerrostus ja sen sovellukset sopivat hyvin kappaleiden korjaamiseen. Suorakerrostuksen etu kappaleiden korjaamisessa johtuu suuremmasta aineensiirtonopeudesta ja mahdollisuudesta tuottaa uutta materiaalia jo olemassa olevan geometrian päälle. Lisäksi suorakerrostuksessa lämpötilan vaikutus kappaleen ominaisuuksiin ja muotoon on suhteellisen pieni, mikä mahdollistaa menetelmän käyttämisen tarkkoihin kohteisiin. (Zhang et al., 2019) Tämä ei ole mahdollista jauhepetiteknologiaan pohjautuvissa menetelmissä.

Ainetta lisäävien ja poistavien menetelmien ominaisuudet ja niiden asettamat rajoitteet vaikuttavat paljon siihen, miten niitä käytetään hybridivalmistuksen sovelluksissa. Jotkin menetelmät sopivat yhteen korostaen kummankin hyviä puolia ja tukien heikkoja osia alueita. (Cortina et al., 2018) Yleinen AM menetelmiin liittyvä ongelma on niiden liian heikko pinnanlaatu, mittatarkkuus ja lisätyn materiaalin mekaanisten ominaisuuksien vaihtelu (J. Liu et al., 2017). SM (engl. Subtractive Manufacturing) menetelmillä puolestaan päästään hyviin pinnanlaatuihin hyvillä mittatarkkuuksilla. Heikkoutena SM menetelmillä on kuitenkin monimutkaiset geometriat, joita ei kyetä näillä menetelmillä valmistamaan. Tämän lisäksi SM menetelmät ovat huomattavasti vaikeampikäyttöisiä operattorin kannalta ja niiden tekemiseen vaadittava tietotaito on huomattavan suuri. (Gibson & Rosen, 2015) Hybridivalmistus antaa tiettyjä vapauksia suunnittelun osalta. Kappaleiden suunnittelussa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että se täytyy viimeistellä jollakin perinteisellä menetelmällä. Suunnitteluun vaikuttaa siis huomattavasti käytettävissä olevat AM ja SM menetelmät. Lisäksi suorakerrostusta ja muiden AM menetelmien käyttö jatkuessa tuotannossa on usein hitaampaa, mihin pelkillä perinteisillä SM menetelmillä päästään. (Petrick & Simpson, 2013) AM menetelmän hyödyntäminen on kuitenkin kannattavaa silloin, kun sen avulla saavutetaan parempi BTF- suhde (buy to fly). BTF suhde tarkoittaa sitä, että kappaleen valmistukseen kulutettu materiaali olisi mahdollisimman lähellä valmiin kappaleen materiaalin määrää. Tämä voidaan esimerkiksi määrittää kappaleen massan mukaan. Artikkelissaan Yilmaz & Uglu (2016) laskivat tarkastelemalleen

kappaleelle 10 kertaa paremman BTF suhteen hyödyntäen AM menetelmiä. Hybridivalmistuksessa kappaleen viimeistely vähentää BTF suhdetta, mutta on todennäköisesti silti kustannustehokkaampi vaihtoehto.

2. HIONTA

Hionta on materiaalin poistamiseen perustuva työstömenetelmä, joka on yleensä viimeisenä työvaiheena valmistusprosessissa. Hionnassa työstetään työkappaleen pintaa kovien partikkelien, eli abrasiivien avulla. Hiontaa voidaan tehdä rouhintamaisena tai viimeistelyhiontana. (Youssef, Helmi A., 2008 s.119)

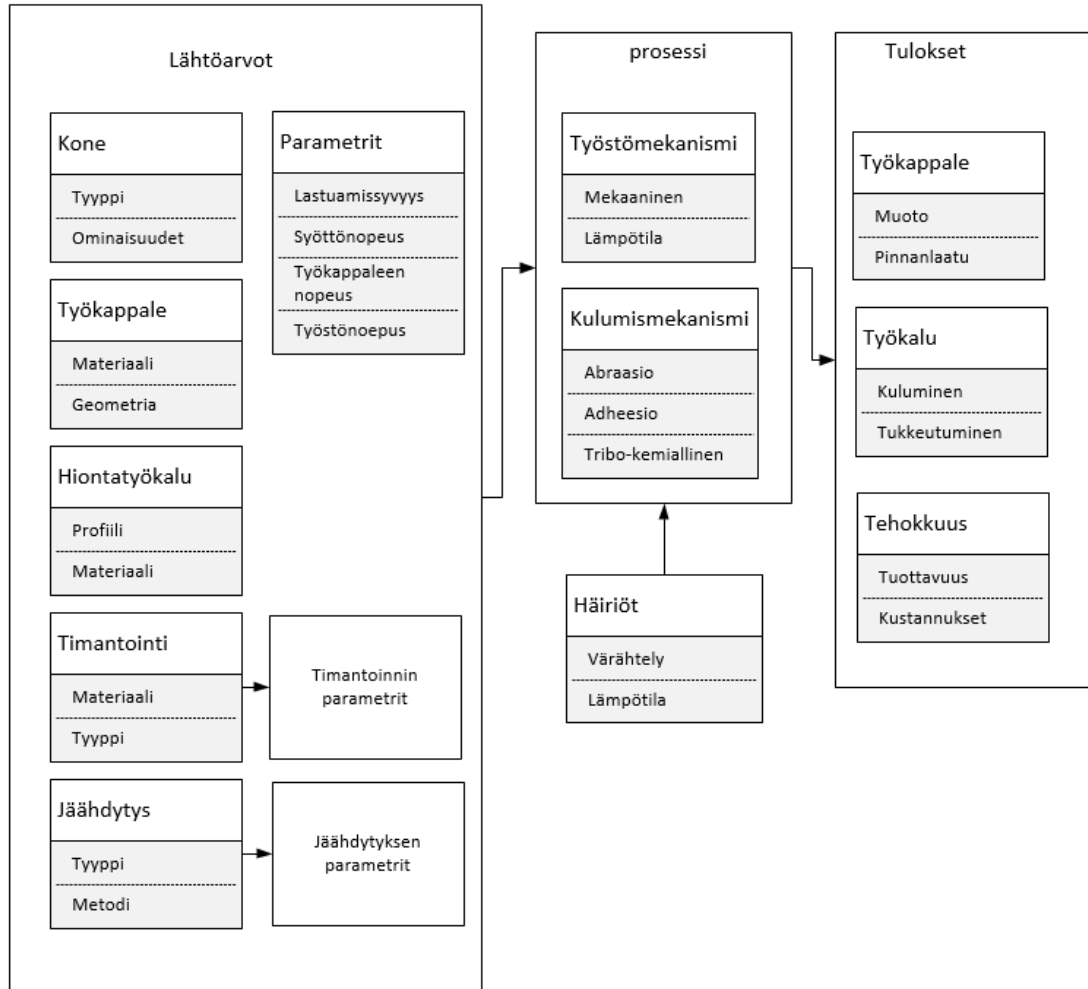
Hionnalla on olemassa useita eri alatyyppejä riippuen käytettävästä työkalusta ja työstettävästä kappaleesta. Yleisimpiä hiontamenetelmiä on listattuna taulukossa 1 ja sen lisäksi siinä on ilmoitettuna kyseisellä menetelmällä saavutettava pinnanlaatu ja IT- toleranssi. Hionta on hienotyöstömenetelmä ja usein sen onkin kappaleen valmistamisen viimeinen koneistamalla tehty vaihe. (Rowe, 2009 s.4) Pieni toleranssiaste tarkoittaa pientä toleranssia, eli tällaisia kappaleita suunniteltaessa on työstömenetelmien rajoitukset otettava huomioon tarkasti.

Taulukko 1. Hionnan IT- toleranssiasteet ja pinnankarheudet.

Menetelmä	IT-toleranssiaste (toleranssi [μm])							Pinnankarheus Ra (μm)				
	1 (1-2)	2 (2-3)	3 (3-5)	4 (4-10)	5 (5-12)	6 (6-20)	7 (12-35)	0,006	0,025	0,5	0,1	0,5
Pyöröhionta												
Sisähionta												
Tasohionta												

Tämän työn soveltavassa osuudessa sovelletaan ulkopuolisen pyöröhionnan tekemistä NC-ohjattavalla sorvilla. Pyöröhionta tarkoittaa nimensä mukaan pyörähdyssymmetrisen kappaleen, kuten akselin, telan tai männän hiomista. Pyöröhiontaa voidaan tehdä ulkotai sisäpuolisena. Hionta on yleisimmin käytettävä työstömenetelmä, kun valmiille kappaleelle asetetaan vaatimuksia pinnanlaadun ja mittatoleranssien suhteen.

Hionnan sovelluksia löytyy lukuisilta teollisuuden aloilta. Esimerkkejä näistä ovat autoteollisuus, ilmailuteollisuus, työkaluvalmistus, lääkinnällisten laitteiden valmistus, turbiinien valmistus ja moni muu. Autoteollisuuden yleisimpinä käyttökohtina ovat kampiakselien, venttiilien, vaihteiden ja kytkimen osien valmistus. Lento- ja turbiiniteollisuudessa hiontaa käytetään turbiinien siivekkeiden ja akseleiden valmistuksessa. Tämän lisäksi hionnan avulla vähennetään nesteiden aiheuttamaa virtausvastusta parantamalla näiden pintojen pinnanlaatua. Metallintyöstö- ja lääketeollisuuden työkalujen valmistamisessa tärkeää on riittävän tarkkuuden saavuttaminen, mikä voidaan saavuttaa hiomaproessin avulla. (RWTH Aachen, 2017)



Kuva 3. Hiontaprosessin kuvaus. (RWTH Aachen, 2017 mukailten)

Työssä tarkasteltavassa sorvissa on olemassa pääkaran lisäksi toinen pyörivä akseli pyöriville työkaluille, kuten poranterille. Hiomalaikan hitausmomentti on huomattavasti suurempi kuin poranterän. Pyöriviä työkaluja ohjaava servomoottori on konfiguroitu siten, että se saavuttaa ohjelmassa määritetyn pyörimisnopeuden mahdollisimman nopeasti. Tämä aiheuttaa ongelmia suurten hitausmomenttien kanssa, sillä servomoottori tai voimansiirtokomponentit saattavat hajota. Voimansiirto tapahtuu hihnäkäytöllä ja moottorin pyörimissuhde pyöriviin työkaluihin on 1:1.

Käytettävä GF NDM 16/100- sorvi on rungoltaan erittäin tukeva, sillä se on alun perin suunniteltu rouhintaa varten, jossa yleisesti lastuamisvoimat ja niistä aiheutuvat värähtely ovat suurempia kuin hionnassa. Koneella pystytään myös tarkkaan työstöön jäykän rungon avulla. Hionnassa syntyvä päälastuamisvoima voidaan laskea kaavalla

$$F_{\text{hionta}} = k_c * b * a_e * \frac{v_w}{v_s} *, \quad (1)$$

jossa k_c [N/mm] on materiaalille ominainen lastuamisvoima, b [mm] hiomalaikan leveys ja a_e [mm] lastun paksuus kuten kuvassa 4 on havainnollistettu. Hionnasta aiheutuva voima voidaan ilmoittaa myös yhtälön

$$F_{hionta} = K_s * a_e, \quad (2)$$

missä K_s on jäykkyyskerroin. Sorvauksesta aiheutuva päälastuamisvoima voidaan laskea yhtälöstä

$$F_{sorvaus} = k_c * a_p * f, \quad (3)$$

missä f on syöttö [mm/r] ja muut suureet samoja, kuin hionnan päälastuamisvoimaa laskeessa. Kaavoja 1 ja 2 voidaan verrata sorvauksessa ja hionnassa yleisesti käytetyillä lastuamisarvoilla, jolloin huomataan hionnasta aiheutuvan voiman olevan huomattavasti sorvauksesta aiheutuvaa voimaa pienempi. Hionnasta aiheutuvat värähtelyt täytyy ottaa huomioon suunnittelussa ja niiden vaikutuksia käydään läpi myöhemmin tässä luvussa.

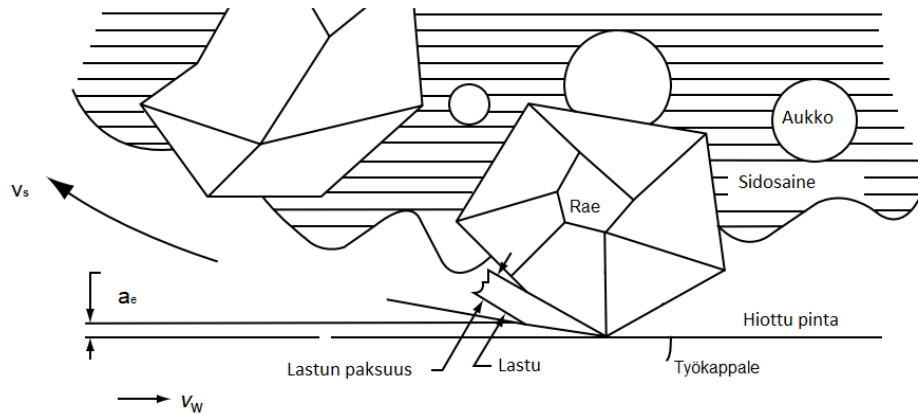
Ympäristön suojaus on otettava huomioon hiomakonetta tarkastellessa. (ISO-16089-2015) Hiomalaikan maksimi pyörimisnopeus käytetyllä moottorilla on 3000 rpm. Tämä aiheuttaa 200 mm hiomalaikalle noin 32 m/s kehänopeuden. Irronneen osan liike-energia riippuu irronneen palasen koosta, mutta riittää joka tapauksessa aiheuttamaan vakavaa vahinkoa, jos prosessia ei suojata mitenkään. Hiomalaikan hajoamista voidaan estää varmistamalla sorvin oikea kalibrointi. Kalibroinnin tarkoituksena on varmistaa, että akselien servomootoreilta saama paikka tieto on oikein komponenttien todellisen paikan kanssa.

2.1 Hiomalaikan ominaisuudet

Hionnan pinnanlaatu on parantunut viime vuosikymmenten aikana huomattavasti hiomalaikkojen kehittyessä. Samalla kasvanut materiaalin poistonopeus ja suurempien lastuamisvoimien käyttö on mahdollistanut uusien hiontatekniikoiden käytön. Tämä on osaltaan ollut mahdollista hiomalaikkojen materiaalien kehityksen takia. (Anand Ronald et al., 2009)

Hiomalaikka koostuu abrasiiveista ja sidosmateriaalista. Abrasiivit ovat pieniä epäsäännöllisen muotoisia kiteitä, jotka ovat hiontaprosessin aikana kosketuksissa työstettävän kappaleen pintaan aiheuttaen siihen abrasiivista kulumista. Sidosaineen tarkoitus on sitoa abrasiivit tasaisesti koko hiomalaikan alueelle ja kulua pois laikan teroitusvaiheessa. Pois kuluminen mahdollistaa vanhojen tylstyneiden abrasiivien poistumisen työkappa-

leen ja hiomalaikan kosketuspinnasta, jolloin pintaan tulee uusia teräviä abrasiiveja. Sidosaimeen ja abrasiivien väliin jää myös huokosia, joilla on vaikutusta hiomalaikan ominaisuuksiin.



Kuva 4. Hiomalaikan koostumus. (Youssef et al., 2009 s.121 mukailten)

Nadolnyn ja Hermanin (2015) artikkelissa todetaan hiomalaikan koostumuksessa olevan merkitystä hiontaprosessissa saavutettavaan pinnanlaatuun ja siihen kuluvaan tehoon hiottaessa. Artikkelin mukaan tehon kulutus hiomaprosessissa kasvaa huomattavasti, kun huokosten suhteellinen tilavuus hiomalaikassa kasvaa. Työkappaleena kokeessa on käytetty Inconel 600 seosta. Käytetyt laikat olivat kovuudeltaan keskikovia, eikä niissä ollut koostumuksen lisäksi muita eroja. Korkea huokoisuus aiheuttaa myös laikan nopeaa kulumista. Huokoisuus tekee laikan rakenteesta avoimen, jolloin hionnassa syntyvät lastut pääsevät helpommin tunkeutumaan laikan rakenteeseen, mikä aiheuttaa laikan nopeaa kulumista. Korkean huokoisuuden omaavia laikkoja tarvitaan kuitenkin sellaisissa sovelluksissa, joissa lämpötilaa halutaan hallita lastuamismesteen avulla. Lastuamismeste tunkeutuu helpommin hionnan kontaktipintaan huokoista laikkaa käytettäessä. (Rowe, 2009 s.125)

Hionnan eräs tärkeä tunnusluku on G-suhde. Se on dimensioton suure ja tarkoittaa poistetun materiaalin suhdetta hiomalaikan kulumiseen. Tämä kuvastaa hiomalaikan kykyä poistaa materiaalia omaan kulumiseensa nähden. Esimerkiksi kova hiomalaikka voi poistaa helposti hiottavaa materiaalia huomattavasti ilman, että se kuluu paljoa. Tällöin hionnan G- arvo on suuri. G- arvo voidaan ilmoittaa yhtälön

$$G = \frac{V_w}{V_s}, \quad (4)$$

missä V_w työkappaleesta poistettu materiaalin tilavuus ja V_s on hiomalaikasta kulunut materiaalin tilavuus. (Rowe, 2009 s. 84)

2.1.1 Abrasiivit

Hiontaprosessi perustuu abrasiiviseen kulumiseen, missä hiomarakeet, eli abrasiivit kulluttavat työkappaletta osuessaan siihen. Tällöin ne irrottavat työkappaleesta lastuja, jolloin ne kuluvat myös. Hiomalaikassa abrasiiveinä käytettävät materiaalit lajitellaan tavallisesti Knoopin kovuuden mukaan massaa neliösenttimetriä kohti. (Rowe, 2009 s.36) Kovimpia abrasiiveja kutsutaan superabrasiiveiksi ja näitä materiaaleja ovat timantti ja boorinitridi (CBN). Perinteisiä abrasiiveja ovat muun muassa piikarbidi, alumiinioksidi, kvartsi ja lasi. Taulukossa yksi on esitettyinä näiden materiaalien tavallisimpia Knoopin kovuuksia. Abrasiiveinä käytetyistä materiaaleista on useita mekaanisilta ominaisuuksiltaan eroavia versioita, joita käytetään erilaisille työstettäville materiaaleille. Taulukossa 1 on esitetty tavallisimmat hiomalaikoissa käytettävien abrasiivien mekaaniset ja termiset ominaisuudet ja niiden Knoopin kovuudet. Kovuuden lisäksi abrasiivien on tärkeää säilyttää ominaisuutensa korkeissa lämpötiloissa, mitä syntyy hionnan aikana kitkan vuoksi. Arvojen vaihtelut joissakin ominaisuuksissa selittyvät materiaalin puhtauden vaikutuksella kyseiseen ominaisuuteen.

Taulukko 2. Tavallisimpien abrasiivien Knoopin kovuuksia ja muita materiaalien ominaisuuksia. (Rowe, 2009 s.36)

Materiaali	Lämmönjohtavuus (W/m*K)	Knoopin kovuus (kg/cm ²)	Tiheys (kg/m ³)	Ominaislämpö (J/kg*K)	Diffusitiivisyys (mm ² /s)
Timantti	600–2000	6500	3520	511	333–1110
CBN	240–1300	4500	3480	506	136–738
Piikarbidi	100	2500	3210	710	44
Alumiinioksidi	35	1370– 2260	3980	765	11,5

Taulukosta 1 huomataan abrasiivien lämmönjohtavuuden kasvavan kovuuden kasvaessa. Timantti on kovin hionnassa yleisesti käytetty materiaali. Sen lämmönjohtavuus on korkea ja sillä pysytään energiatehokkaaseen työstöön, mutta sen mekaaniset ominai-

suudet heikkenevät lämpötilan noustessa. Timanttia lämpöä paremmin kestävä ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan stabiilimpi kova abrasiivivi boorinitridi (CBN), mitä käytetään yleisimmin haastavissa hiontakohteissa. (RWTH Aachen, 2017)

2.1.2 Sidosmateriaalit

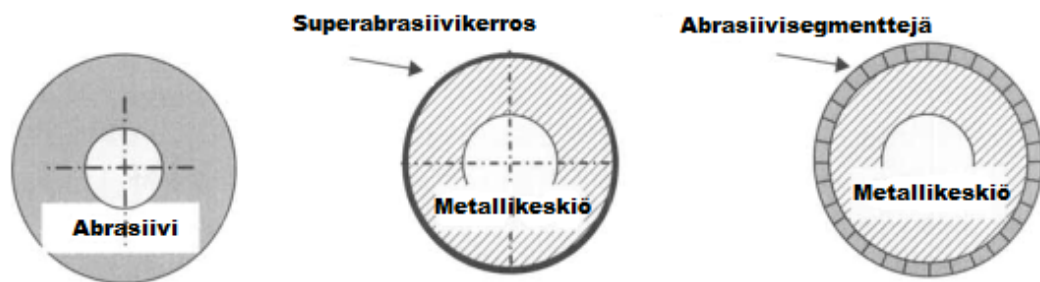
Abrasiivien lisäksi hiomalaikan suorituskykyyn vaikuttaa sen sidosmateriaali. Sidosmateriaalin tehtävä on sitoa yhteen hiomalaikan abrasiivit. Kuten abrasiivien kanssa, myös sidosaineelle on tärkeää, että se säilyttää mekaaniset ja termiset ominaisuutensa hionnasta aiheutuvissa korkeissa lämpötiloissa. Abrasiivit ovat sidosaineessa tarpeeksi etäällä toisistaan, jolloin ne lastuavat työkappaletta pistemäisesti. Tämä estää hiomalaikan tukkiutumisen hionnasta aiheutuneista lastuista. (Youssef. et. al, 2008) Sidosaine joustaa hionnan aikana laikkaan kohdistuvan normaalivoiman vuoksi. Tästä syystä sidosaine vaikuttaa huomattavasti laikan ja työkappaleen kontaktiin. Sidosaineen ja abrasiivien materiaalit vaikuttavat siihen, minkälaiselle materiaalille, minkälaisissa hiontaoperaatioissa ja minkälaisilla prosessiparametreilla laikkaa voidaan käyttää. Sidosmateriaalit voidaan luokitella orgaanisiin, lasittuneisiin ja metallisiin. Kaikilla on toisistaan poikkeavia mekaanisia ja termisiä ominaisuuksia ja niitä hyödynnetään erilaisissa tapauksissa.

Orgaaniset sidosmateriaalit ovat elastisempia kuin muut sidosainemateriaalit. Laikan elastisuus tekee prosessista turvallisemman korkeilla työstönopeuksilla ja tätä voidaan hyödyntää pinnan kiillottamisessa. Orgaanista sidosmateriaalia käytetään usein perinteisten abrasiivien, kuten alumiinioksidien tai piikarbidien kanssa. Orgaanisista sidosainesta valmistetuilla laikoilla on tietty käyttöikä, jonka jälkeen niitä ei voi käyttää aiheuttamatta turvallisuusriskiä tai työn laadun heikkenemistä. Ne myös kuluvat muita materiaaleja nopeammin lämpötilan vaikutuksesta. Usein hyvän pinnanlaadun saavuttamiseksi orgaanisen laikan täytyy lämmitä hiontaprosessissa, kun sen pintakerros kuluu pois paljastaen tuoreen leikkauspinnan. Yleisimmät orgaanisissa laikoissa käytetyt materiaalit ovat erilaiset muovit ja kumit, kuten epoksi, polyuretaani, fenolimuovi ja polyamidi. (Rowe, 2009 s.41)

Lasitetut sidosmateriaalit ovat kovempia kuin orgaaniset laikat ja pehmeämpiä kuin metalliset laikat. Niiden lastuamisominaisuudet ovat helposti muokattavissa sidosaineeseen lisättävien lisäaineiden ansiosta. Tästä syystä lasitetusta sidosaineesta valmistetut laikat soveltuvat hyvin monille materiaaleille, koska laikan työstöpintaan voidaan vaikuttaa tehokkaasti. Nämä laikat on myös mahdollista uudelleen teroittaa, kun niiden pinta on tylstynyt tai menettänyt muotonsa. Tämän onkin yksi syy siihen, että lasitettu sidosaine on

yleisimmin käytetty materiaali hiomalaikoissa. Usein lasitetun sidosaineen kanssa käytetään abrasiivina alumiinioksidia perinteisessä hionnassa ja CBN:ää, kun tarvitaan superabrasiivia. Lasitetut hiomalaikat on valmistettu lasin, saven, maasälvän ja booraksin seoksina. Valmis sidosaine laitetaan lopulta muottiin haluttujen abrasiivien kanssa ja näiden suhdetta säätämällä voidaan vaikuttaa lopullisen hiomalaikan ominaisuuksiin. (Rowe, 2009 s.42)

Kolmas yleinen hiomalaikoissa käytetty sidosmateriaali on metalli. Metallisia sidosmateriaaleja käytetään pääasiassa superabrasiivien, kuten boorinitridien ja timanttien kanssa. Abrasiivit voivat olla kiinni sidosaineessa yhtenä tai useampana kerroksena. Yksikerroksiset laikat ovat kalliita, sillä niitä ei voi teroittaa, vaan abrasiivit täytyy asetella huolellisesti laikan pintaan jo valmistusvaiheessa. Tämä tehdään yleisesti galvanoidulla, sillä siinä prosessin lämpötila voidaan pitää tarpeeksi matalana, ettei se vahingoita abrasiiveja. Erilaiset hiomalaikkatyypit on esitetty kuvassa 5.



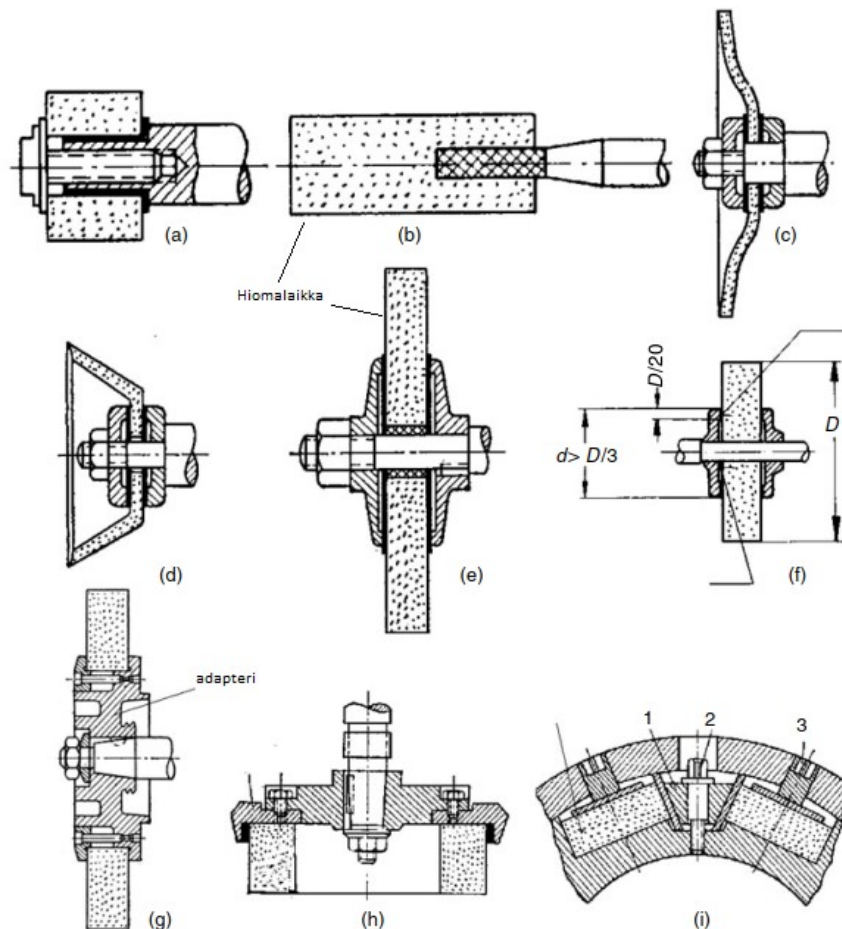
Kuva 5 Hiomalaikan rakenne (Youssef, Helmi A., 2008 mukailten).

Vasemmalla on perinteinen orgaanisesta tai lasitetusta sidosaineesta valmistetun laikan havainnekuva. Keskellä on metallikeskiöllinen superabrasiivilaikka ja oikealla työstävä pinta koostuu abrasiivisegmenteistä

2.1.3 Laikan adapterin suunnitteluperiaatteet

Hiomalaikka tarvitsee adapterin hiomakoneeseen kiinnittämistä varten. Markkinoilta löytyy valmiita adaptereita, joiden suunnittelussa on otettu huomioon hionnan tasapainovaatimukset. Joissain tapauksissa joudutaan kuitenkin adapteri suunnittelemaan ja valmistamaan itse omaa sovellusta varten. Näitä syitä voivat olla epästandardi adapterin kiinnitys hiomakoneeseen tai jokin muu koneen tai laikan rakenteellisesta syystä johtuva asia.

Adapterin suunnittelussa tulee ottaa huomioon hiomalaikan muoto ja koko. Esimerkiksi sisäpuoliseen pyöröhiontaan suunnitellulle laikalle tarvitaan erilainen adapteri, kuin ulkopuolista pyöröhiontaa varten. Sisäpuolista pyöröhiontaa tehdessä hiomalaikan halkaisija on usein pieni, jolloin laikan kiinnittämisessä adapteriin voidaan käyttää liimausta, kit-tausta, sementointia tai ruuviliitosta. Kuvassa 6 on havainnollistettu erilaisia adapteriratkaisuita sovellettuna eri muotoisiin ja kokoisii hiomalaikkoihin (Youssef et.al, 2008)



Kuva 6. Erilaisia hiomalaikkoja ja adaptereita (Youssef et al, 2008) mukaillen

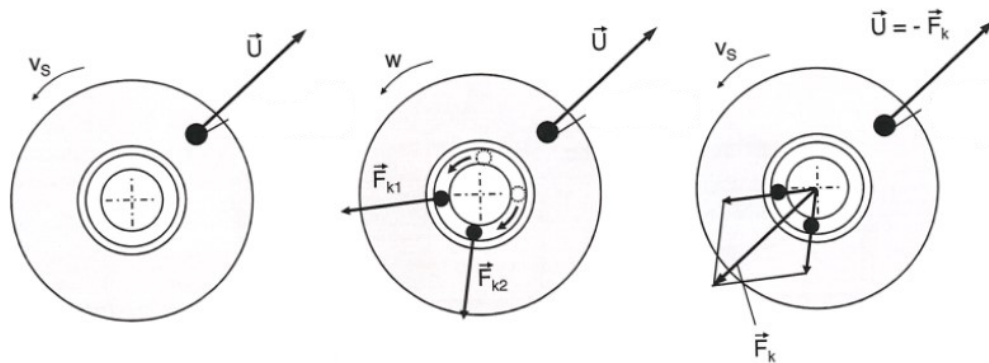
Adapterin suunnitteluun vaikuttaa myös sille suunniteltu käyttötarkoitus ja käytetty tasapainotusmenetelmä. Myös koneen prosessin aikana adapteriin kohdistamat voimat vaikuttavat suunnitteluun. Esimerkiksi adapterin kiinnitys tulee suunnitella siten, että mekanismi ei aukea itsestään prosessin aikana. Adapteri ei myöskään saa kohdistaa laikkaan liian suuria jännityksiä. Tämä tulee ottaa huomioon suunniteltaessa adapterin ja laikan välistä kontaktipintaa.

Standardissa ISO 16089:2015 *Metallin työstökoneet. Turvallisuus. Kiinteät hiomakoneet* on määritelty vaatimuksia hiomalaikan adapterille ja hiomakoneelle yleensä. Tästä standardista on huomioitu tärkeimmät kohdat ja tehty suunnittelupäätöksiä sen mukaan.

Suunnitteluun on vaikuttanut standardin vaatimukset koneen suojauksesta tietyillä hiontaprosessin ominaisuuksilla. Suojauksen vaatimuksiin vaikuttaa laikan geometria, prosessiparametrit ja arvio laikan hajoamistavasta. Standardin laskuissa käsitellään hiomalaikan hajoamisessa syntyvää energiaa ja sen kohdistumista suojarakenteisiin. Samassa standardissa on määritelty hiomaproessin luonteen ja laikan dimensioiden mukaan määritettyjä vaatimuksia adapterin laippojen halkaisijoille. Vaatimuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

2.1.4 Laikan teroitus ja tasapainotus

Hiomalaikan tasapainotuksella tarkoitetaan toimenpidettä, jossa laikka tasapainotetaan tasapainotuslaitteella sen adapterissa olevien liikkuvien painojen avulla. Tasapainotus tulee tehdä aina ennen jokaista erillistä hiomaproessia, jotta laikka kykenee siltä vaadittuihin tarkkuuksiin ja se ei hajoa käytössä. (Rowe, 2009 s.59) Hiomakonetta ei saa edes käynnistää tasapainottamattoman laikan kanssa hajoamisvaaran vuoksi. (Youssef et.al, 2008, s.129) Kuvassa 7 on esitetty hiomalaikan tasapainotus vastapainojen avulla. Yleisimmät hiomalaikan tasapainotusmenetelmät ovat manuaalinen ja dynaaminen tasapainotus.



Kuva 7. Hiomalaikan tasapainotuksen periaate (RWTH Aachen, 2017)

Manuaalisessa tasapainotustelineessä laikan painavin kohta jää tasapainossa osoittamaan alas painovoiman vaikutuksen suuntaan, jolloin painoja voidaan siirtää kuvan 7

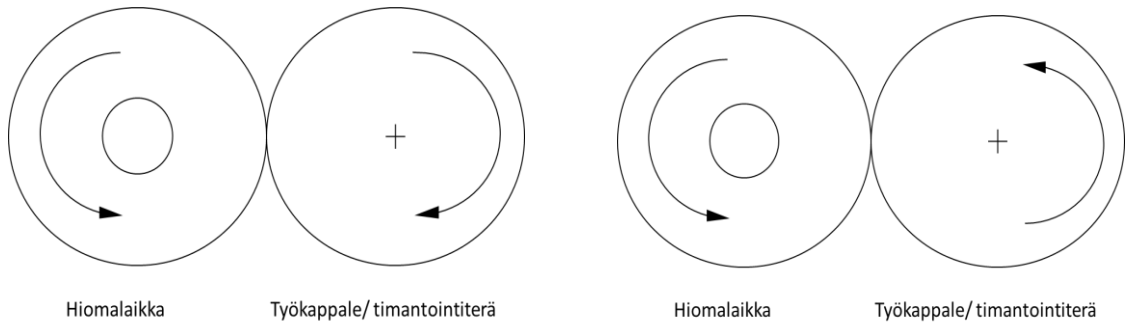
keskimmäisen kohdan mukaisesti kompensoimaan epätasapainoa. Vastapainojen aiheuttamat voimat $\sum F_k$ muodostuu kuvan 7 oikeanpuoleisen kohdan mukaisesti ja hiomalaikka on tasapainossa, kun yhtälö

$$U = -F_{k1} - F_{k2} - \dots - F_{kn} = -F_k \quad (5)$$

toteutuu. Voimien F_{kn} määrä riippuu adapterissa käytetyistä vastapainojen määrästä. Vastapainoista aiheutuvat voimat ovat vastakkaissuuntaiset epätasapainokohdasta johutuvaan voimaan nähden, kunhan vastapainot ovat sijoitettu laikan vastakkaiselle puolelle. Tarvittavien vastapainojen määrää riippuu niiden massasta, hiomalaikan massasta ja siitä kuinka kauas adapterin keskiöstä ne ovat sijoitettu.

Hiomalaikka tulee timantoida ennen hiontaa, jotta sen pintageometria on tarpeeksi karhea aiheuttamaan abrasiivista kulumista työstettävän kappaleen pintaan. Timantoinnilla tarkoitetaan tässä työssä sekä laikan teroittamista, että muotoon ajamista. Englanninkielisessä tekstissä timantoinnista käytetään nimeä *dressing*. laikan muotoon ajamisesta *truing* ja teroittamisesta *sharpening*. Staattista timantointia käytettäessä tulee käyttää lastuamismestettä, jotta se huuhtelee laikasta irronneen materiaalin pois, eikä se tuki laikkaa. (Winter et al., 2015) Timantointi voidaan tehdä pyörivän tai staattisen timantointityökalun avulla. Sopivan pintageometrian lisäksi hiomarakeilta vaaditaan tarpeeksi suurta kovuutta. Teroituksella korjataan pintageometrian lisäksi hiomalaikan suoruus, jolloin teroitettu pinta osuu koko hiomalaikan leveydeltä työkappaleen pintaan. Lasiteuista ja orgaanisista sidosaineesta valmistetut hiomalaikat teroitetaan aina ennen käyttöä, olivat ne uusia tai käytettyjä. Galvanoituja metallisesta sidosaineesta valmistettuja laikkoja teroitetaan vain laikan muodon suoristamiseksi. Silloin laikasta otetaan 10–20 µm suuruinen kerros pois pinnasta. Näissä hiomalaikoissa abrasiivit ovat ohuessa kerroksessa pinnassa, joten teroitusta ei voida tehdä yhtä montaa kertaa kuin muihin laikoihin.

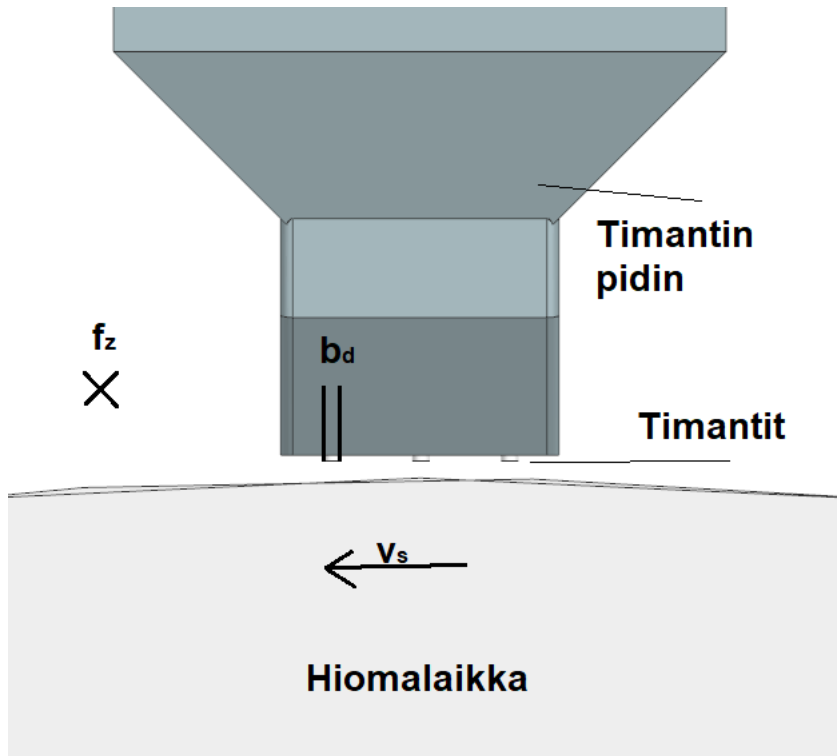
Pyöröhionnan nopeussuhde tarkoittaa pyörivän työkalun ja pyörivän työkappaleen nopeuksia toistensa suhteen (Rowe, 2009 s.99). Suhde on positiivinen, jos työkappale ja hiomalaikka pyörivät eri suuntiin, eli toinen vastapäivään ja toinen myötäpäivään kuvan 2 mukaisesti. Nopeussuhteella on vaikutusta hiomalaikan timantointiin.



Kuva 8. Positiivinen ja negatiivinen nopeussuhde.

Nopeussuhteella on merkitystä työkappaleen hionnan ja hiomalaikan timantoinnin kannalta. Hiomalaikan timantoinnissa nopeussuhde vaikuttaa paljon laikkaan timanttiterästä kopioituvaan topografiaan. Tällä puolestaan on suuri vaikutus hionnasta aiheutuviin lastumisvoimiin, koneelta vaadittavaan tehoon ja syntyvään pinnanlaatuun (Daneshi et al., 2014). Timantoinnissa käytetty hiomalaikan nopeus on syytä olla lähellä prosessissa käytettävää laikan nopeutta, sillä se vähentää pienestä epätasapainosta johtuvaa muodon epätasaisuutta. Tämän lisäksi tulee ottaa huomioon teroituksesta aiheutuvat koneen värähtelyt. Laikan nopeus pitääkin valita siten, että se ei aiheuta resonointia koneen komponenttien kanssa. Tämä voidaan tarkistaa asentamalla värähtelyantureita koneen kriittisiin paikkoihin (Rowe 2009, s.66).

Laikan teroitus on mahdollista tehdä yksittäisen tai useamman kiinteän timantin avulla. Myös pyörivien timantointityökalujen käyttö on mahdollista. Kiinteää timantointityökalua käytettäessä timantit ovat yleensä sijoitettuna metallisen putken päähän. Tällöin teroitustapahtuman kinematiikka on verrattavissa perinteiseen sorvaukseen ja lainalaisuudet ovat samoja. Kuva 9 havainnollistaa staattista teroitusta kolmiteräisen timantin avulla.



Kuva 9. Sauvatimantti ja timantoinnin työstöarvot.

Staattisessa teroituksessa tärkeimpiä teroituksen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat timantin leveys (b_d), syöttönopeus (v_z), ja laikan pintaanopeus (v_s). Pintaanopeus voidaan laskennassa ilmoittaa laikan kierrosnopeuden avulla. Oikean profiilin luominen hiomalaikan pintaan timantilla ei onnistu, ellei timantin työstöradat laikan pinnalla mene hie-man päällekkäin. Tätä päällekkäisyyttä kuvataan termillä U_d , joka voidaan laskea yhtälön

$$U_d = \frac{b_d}{f_z} = \frac{b_d * n_{gw}}{v_z} \quad (6)$$

missä b_d on timantin kosketuspinnan leveys millimetreissä ja f_d on syöttönopeus millimetreinä kierrosta kohti. Yhtälön avulla voidaan laskea myös syöttönopeus millimetreinä minuutissa, kun hiomalaikan pyörimisnopeus tiedetään. U_d :n arvo vaihtelee kiinteässä hionnassa tavallisesti välillä 2–6. Laikan timantoinnissa käytetään myös lastuamisnestettä itse hiontaprosessin tapaan. (RWTH Aachen, 2017)

2.2 Lastuamisnesteen käyttö ja vaikutukset hionnassa

Hionnassa suositellaan aina käytettävän jonkinlaista lastuamisnestettä, riippuen hiottavasta materiaalista ja käytettävästä työkalusta. Ilman lastuamisnestettä hionnassa syntyy helposti lämpötilasta aiheutuvaa vauriota kappaleen pintaan, jolloin pinnanlaatu ja muut materiaalin ominaisuudet kärsivät (Nadolny & Herman, 2015). Lastuamisnesteen

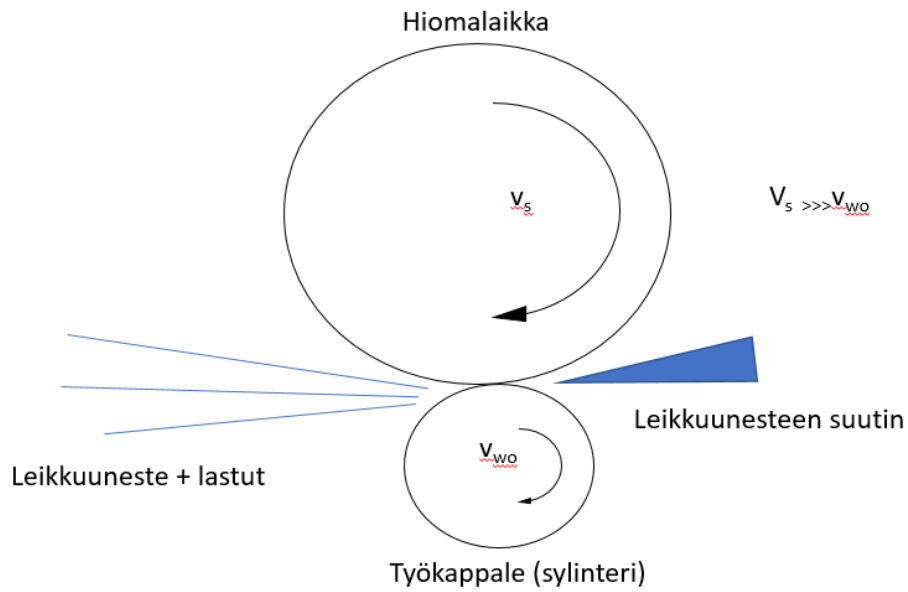
valinnalla on hionnassa vaikutuksia työkalun käyttöikään, valmiin työkappaleen ominaisuuksiin, hiontaprosessin taloudellisuuteen ja ekologisuuteen. Sopivan lastuamislain valinta ei ole yksiselitteinen minkään työstömenetelmän kohdalla. (Axinte et al., 2003, s.1341) Sopivan lastuamislain valintaa vaikuttaa työstettävän kappaleen materiaali, käytettävä työkalu ja tarkkuusvaatimukset. Hionnassa tavallisimmin käytettävät lastuamislainat ovat veden ja öljyn seoksia, eli emulsioita, mineraaliöljyjä tai synteettisiä öljyjä (Rowe, 2009 s.118) Ympäristövaatimukset vaikuttavat myös paljon lastuamislainan käyttöön ja niiden elinkaaren hallintaan on keskitytty kasvavissa määrin.

Lastuamislainat käytetään useissa aineita poistavissa työstömenetelmissä jäähdyttämään työkappaletta, voitelemaan työstörajpintaa ja poistamaan työstön aikana työkappaleesta irtoavia lastuja. Voitelulla tarkoitetaan hionnan tapauksessa sekä hiomalaikan rakeen, että sidosaineen ja työkappaleen välisen kitkan vähentämistä. Tämän lisäksi lastuamislainan tehtävänä on pitää hiomalaikka puhtaana, poistaa lastut työstön kontaktipinnalta ja suojata työkappaletta korroosiolta. Lastuamislainan avulla myös työympäristö voidaan pitää turvallisena työntekijöille lastuamislainan sijoittamisessa työstön aikana työkappaleesta irtoavia haitallisia partikkeleita. (Youssef et.al, 2008, s.501)

Työstömenetelmänä hionta on epäjatkuvaa, eli materiaalia työstävä terä ei ole jatkuvassa kosketuksessa työkappaleeseen. Epäjatkuvaa työstöä aiheuttaa suurempia lämpötilan vaihteluita työkappaleeseen ja työkaluun kuin jatkuva työstö. Tästä syystä lastuamislainat on aina käytettävä hiontaa tehdessä hiomakoneella. Jatkuvaa työstöä, kuten sorvausta voidaan tehdä joillekin materiaaleille hyvin ilman lastuamislainat. Sorvauksessa työkalu on jatkuvassa kosketuksessa työkappaleeseen, mutta hionnassa rae osuu vain hetken työkappaleen pintaan kerrallaan. Hiontatyyppin mukaan työkalun ja työkappaleen kosketuspinnan lämpötila saattaa nousta jopa 1300 C. Tällaiset lämpötilat aiheuttavat lastuamislainat käyttäessäkin monia ongelmia työkappaleen lopullisissa käyttökohteissa, mutta lastuamislainan kanssa niihin voidaan vaikuttaa hieman.

Hiontaprosessi aiheuttaa kappaleeseen korkeita paikallisia lämpötilagradientteja ja tämän takia työkappaleeseen jää jälkijännitystiloja. Nämä jälkijännitystilat aiheuttavat epäedullista käyttäytymistä valmistettavan kappaleen elinkaaren myöhemmissä vaiheissa (Winter et al., 2015) Työkappaleen liiallinen lämpeneminen vaikuttaa myös sen muihin ominaisuuksiin, kuten kovuuteen, pinnan muotoon ja laatuun, jolloin työstön laatu heikkenee. Lastuamislainan tarkoitus hionnassa on myös voidella työkappaleen ja työkalun kontaktipintaa, jolloin hionnan ominaisenergia pienenee, hyötysuhde kasvaa ja työkalun kulumista tapahtuu vähemmän. Hyötysuhteen kasvaminen vähentää osaltaan työkappaleen ja työkalun lämpenemistä, joten hyvin voiteleva lastuamislainat auttaa epäsuorasti niiden jäähdyttämistä. (Rowe, 2009, s.113)

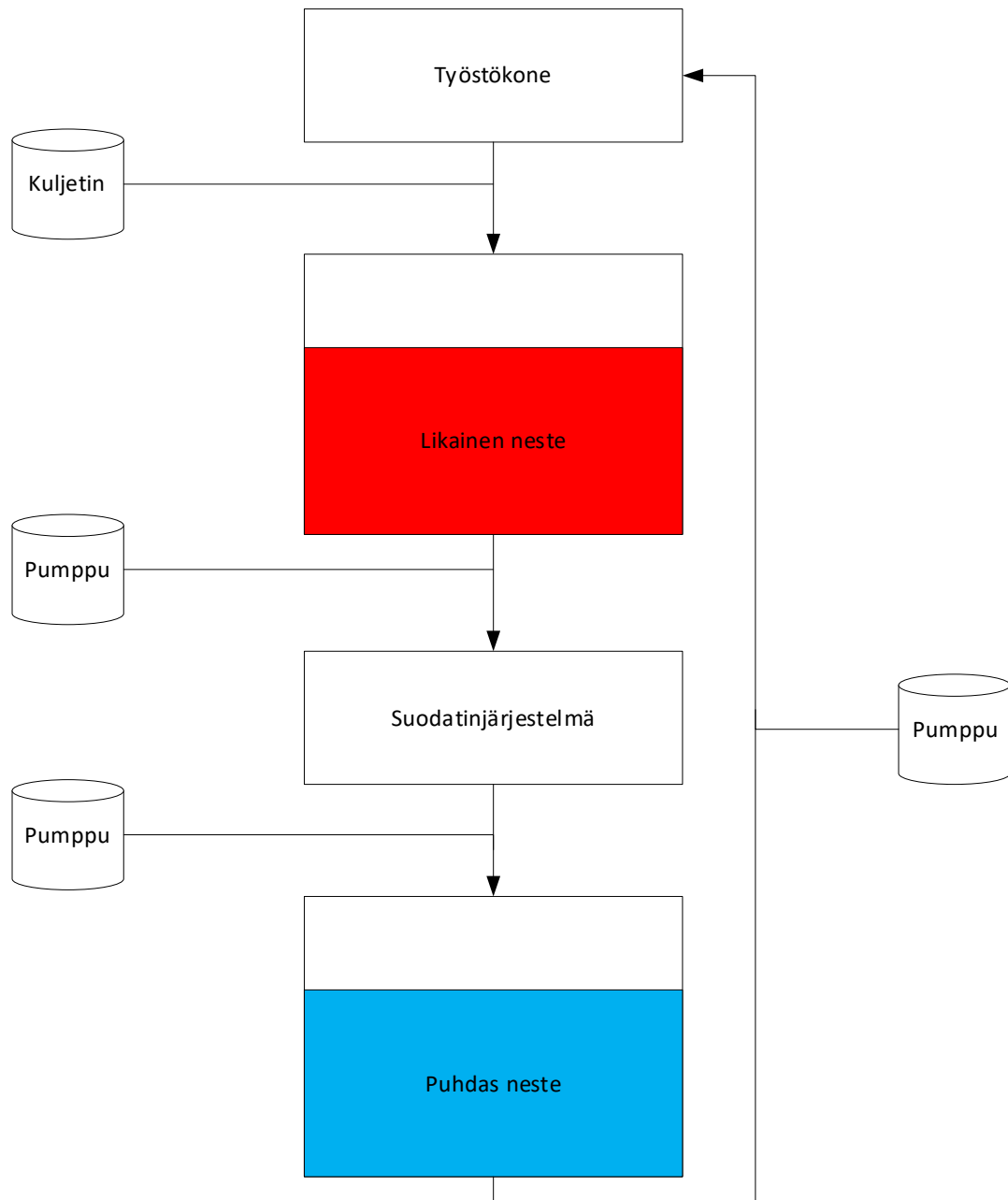
Hionnassa eräs voitelun onnistumisen kannalta kriittinen komponentti on lastuamises-teen suutin. Suuttimelta lähtevän lastuamisesneen nopeuden vaatimukset riippuvat hionnassa käytettävästä työstönopeudesta. Kuvassa 10 on havainnollistettu lastuamisesneen käyttöä ulkopuolisessa pyöröhionnassa. Tärkeimmät tekijät lastuamisesneen syötössä ovat nesteen nopeus ja tilavuusvirta. Lastuamisesneen optimaalisen nopeuden määrittämiseen on vaikea löytää yksiselitteistä sääntöä. Hiontaa, jossa materiaalin poisto on suurta, tarvitaan yleisesti suurempi lastuamisesneen tilavuusvirta poistamaan hiontajäte ja pitämään lämpötila prosessille edullisena. Lastuamisesneen syöttäminen korkealla paineella ja tilavuusvirralla johtaa viskoosisiin häviöihin, mikä näkyy lastuamisesneen lämpötilan nousuna suuttimella. Tämä on usein huono asia hiontaprosessin kannalta, eli lastuamisesnejärjestelmää ei kannata mitoittaa liian suureksi. Liian suuresta lastuamisesneen syöttönopeudesta ei myöskään ole hyötyä hiontaprosessin kannalta, sillä kaikki syötetty lastuamisesne ei päädy hiomalaikan ja työkappaleen kosketuspintaan. Vastaavasti liian hitaalla nopeudella lastuamisesne ei pääse kiinni kontaktipintaan. Kirjassaan Rowe (2009 s. 135) kutsuu kontaktipintaan pääsevää osaa virtauksesta hyödylliseksi virtaukseksi. Hyödyllisen virtauksen osuus on perinteisiä suuttimia käytettäessä 5–30 % koko virtauksesta. Hyödyllisen virtauksen määrään vaikuttavat kokonaisvirtauksen lisäksi suuttimen asento, lastuamisesnesuihkun nopeus ja hiomalaikan huokoisuus. Nämä seikat tulee ottaa huomioon lastuamisesnepumppujen ja suuttimien suunnitteluvaiheessa. Hyvä tapa mitoittaa suutin ja pumppujen tuottama virtaus siten, että lastuamisesnesuihkun nopeus on yhtä suuri, kuin laikan pyörimisen tangentiaalinen nopeus.



Kuva 10. Lastuamisnesteen suuttimen sijoittelu pyöröhionnassa.

Hionnalta vaadittujen pinnanlaatutarkkuuksien saavuttamisen kannalta on tärkeää, että hiomalaikka pysyy puhtaana koko prosessin ajan. Tässä kriittisenä tekijänä on lastuamisnesteen virtausnopeuden ja paineen lisäksi suuttimien oikea asemointi.

Hionnassa lastuamisnesteen tulee olla puhdasta, sillä epäpuhtaudet aiheuttavat pinnanlaadun heikkenemistä ja saattavat vahingoittaa muita komponentteja korkean paineen vuoksi. Tähän ongelmaan voidaan vastata puhdistamalla lastuamisnestettä hionnan aikana. Kuvassa 11 on esitettyä lastuamisnesteen puhdistus- ja syöttöjärjestelmä periaatteellisella tasolla.



Kuva 11. Lastuamismesteen yleinen rakenne. (RWTH Aachen, 2017)

Todellisuudessa järjestelmään tarvitaan antureita ja muita oheislaitteita jatkuvan puhtaan lastuamismesteen syötön takaamiseksi.

Lastuamismesteen nopeus suuttimelta tullessa voidaan laskea Venturi- ilmiön perusteella. Nesteiden tilavuusvirran jatkuvuusyhtälön mukaan putken läpi kulkeva tilavuusvirta pysyy vakiona kokoon puristumattomalle nesteelle, jollaiseksi lastuamismeste tässä oletetaan. Tällöin tilavuusvirta voidaan ilmoittaa yhtälön (Young, 2015 s.408)

$$Q_{neste} = A_{suutin} * v_{suutin} = A_{putki} * v_{putki} \quad (7)$$

avulla, missä Q_{neste} on lastuamisnesteen tilavuusvirta, A_{suutin} on suuttimen poikkipinta-ala, A_{putki} on hydraulikkaletkun poikkipinta-ala, v_{suutin} on suuttimella oleva nesteen nopeus ja v_{putki} on letkussa olevan nesteen nopeus. Yhtälöstä 8 voidaan päätellä, että suuttimelta lähtevän nesteen nopeus voidaan määrittää sen tilavuusvirran ja suuttimen poikkipinta-alan osamääränä, eli

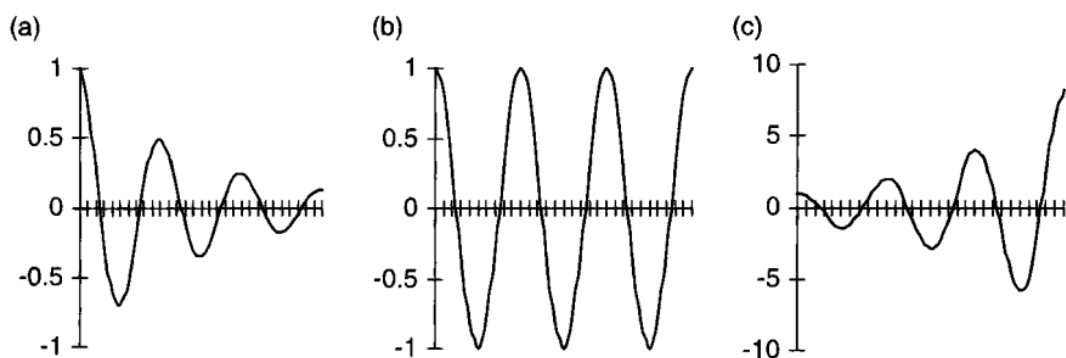
$$v_{\text{suutin}} = \frac{Q_{\text{neste}}}{A_{\text{suutin}}}. \quad (8)$$

Nyt nesteen nopeus riippuu suuttimen poikkipinta-alasta. Nesteen nopeutta voidaan tarvittaessa säätää muuttamalla pumppujen tilavuusvirtaa.

Lastuamisnesteeseen lisätään joissakin tapauksissa prosessia hyödyttäviä lisäaineita. Lisäaineilla vaikutetaan lastuamisnesteen viskositeettiin, lämpöominaisuuksiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Tyypillisiä lisäaineita ovat emulsiot, antioksidantit, ruosteen estoineet ja tensidit. (Youssef, Helmi A., 2008 s. 501)

2.3 Värähtelyn vaikutukset hiottuun kappaleeseen

Värähtely on yksi suurimmista virhetekijöistä hionnassa. Rowe (2009 s.223) lajittelee hionnassa esiintyvät värähtelytyypit kolmeen eri kategoriaan. Nämä ovat kuvassa 12 näkyvät impulsiiviset, pakotetut ja itsestään kasvavat värähtelyt. Kaikki värähtelyt ovat haitaksi hiomakoneen toiminnalle ja niiden välttäminen tuleekin ottaa huomioon jo koneen suunnitteluvaiheessa ja hiontaoperaatioita suunniteltaessa. (Rowe, 2009 s.234) Esimerkiksi koneella ei tule tehdä suunnan muutoksia täydestä nopeudesta. Lisäksi työkalujen kiihdytykset ja kiihdytys käytettyyn syöttönopeuteen tulee tehdä hallitusti.



Kuva 12. Erilaiset värähtelytyypit. (Rowe, 2009 s.223)

Kuvassa 7 on esitettyinä nämä värähtelytyypit siten, että liikkeen amplitudi on pystyakselilla ja aika vaaka-akselilla.

Kuvan 7 kohdassa (a) kuvataan impulsiivista värähtelyä. Tässä värähtelyn aiheuttaja on usein ulkopuolinen tekijä, kuten törmäys hiomakoneeseen. Syy voi olla kuitenkin myös koneen sisäisissä toiminnoissa. Äkillinen kuormitus koneen jollakin akselilla voi saada aikaan impulsiivista värähtelyä. Kohdassa (b) kuvataan pakotettua värähtelyä. Pakotettu värähtely ei vaimene itsestään, mutta ei myöskään laajene. Syitä pakotettuun värähtelyyn ovat muun muassa karan, hiomalaikan, tai servomootoreiden epätasapainoisuus. Myös karan epäkeskoisuus aiheuttaa pakotettua värähtelyä ja sen mahdollisuus tulisikin sulkea pois. Tämä värähtelyn muoto paljastuu usein värähtelytaajuuksia tarkasteltaessa, joka voidaan löytää työkappaleen laadunvarmistusvaiheessa. Ongelmia pakotetun värähtelyn kanssa saattaa ilmetä, jos hiomalaikan ja työkappaleen pyörimisnopeuksien suhde on 10:1, eli hiomalaikka pyörii 10 kertaa nopeammin kuin työkappale. (Rowe, 2009 s. 234)

Kolmas värähtelyn tyyppi on kuvassa 12 kohdassa c) näkyvä itseherätteen värähtely. Tämä värähtelytyyppi liittyy useimmiten lastuamissyvyyteen. Itseherätteen värähtely ei ole huomattavissa heti prosessin alettua, kuten kaksi edellistä värähtelytyyppiä. Tämän vuoksi se aiheuttaa eniten virheitä valmiissa kappaleissa. Itseherätteen värähtely voidaan jakaa vielä kahteen alatyypin; työkappale-regeneratiiviseen ja työkalu-regeneratiiviseen värähtelyyn. Työ-regeneratiiviset värähtelyt kehittyvät työkappaleeseen, kun sen pintaan muodostuu aaltomaisuutta. Työkappaleen pintaan muodostuvat aallot ovat seuraus vaihtelevasta hionnan lastuamissyvyydestä (a_e). Tämä aiheuttaa uuden aallon syntymisen jokaisella työkappaleen pyörähdyksellä ja värähtelyn amplitudin vaiheen siirtymisen aiheuttaa lastuamissyvyyden vaihtelun. Työkappaleeseen kohdistuvat värähtelyt rakentuvat nopeammin suurilla työstönopeuksilla. Tätä ongelmaa voi lievittää käyttämällä pienentämällä hiontavoimia, esimerkiksi käyttämällä pehmeämpiä laikkoja tai parametrejä siten, että voimat ovat pienempiä. (Rowe, 2009 s.236) Yhtälö

$$x_{gw} = \frac{1}{\varphi(j\omega)} * F_{hionta} \quad (9)$$

kuva hionnasta aiheutuvan voiman vaikutusta työkappaleen pintavirheisiin x_{gw} [mm]. Nimittäjässä oleva φ kuvaa sellaisenaan koko systeemin jäykkyyttä ja tarkempaa määrittämistä varten se pitää erotella. Termi ω kuvaa pintavirheen riippumista taajuudesta ja kompleksimuuttuja j kuvaa voiman ja pintavirheen välisen muutoksen vaihe-eroa. (Rowe 2009 s. 238)

Työkalu-regeneratiivinen värähtely on luonteeltaan saman kaltainen kuin työkappale-regeneratiivinen, mutta ilmiöt kohdistuvat työkaluun, eli hiomalaikkaan. Värähtelyn amplitudi kasvaa työstön edetessä, kun aaltomuodon huiput kasvavat hiomalaikan pinnalla hionnan edetessä. Työkalu-regeneratiivisesta värähtelystä pääsee eroon timanttoimalla

hiomalaikan uudesta. Korkea G- arvo auttaa ehkäisemään työkalu-regeneratiivista värähtelyä hiomalaikan ollessa kestävämpi kulumista kohtaan. Värähtelytyypit eroavat huomattavasti hiontatyyppin mukaan. Sisäpuolisessa pyöröhionnassa värähtelytyyppi liittyy usein työkalun luonnollisiin värähtelytaajuuksiin, koska työkappaleen ja karan dynaaminen jäykkyys on usein suurempi. Ulkopuolisessa pyöröhionnassa puolestaan hiomalaikka saattaa olla dynaamisesti jäykempi kuin työkappale. (Rowe, 2009 s.236)

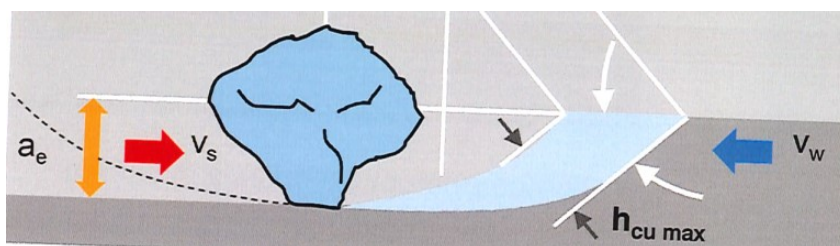
2.4 Hiontaparametrit

Hiomaparametrien valinnassa tärkeintä on saavuttaa kappaleelta vaaditut geometriatoleranssit ja pinnanlaatutavoitteet. Toisin kuin sorvauksessa ja muissa suureen materiaalin poistonopeuteen pyrkivissä työvaiheissa, hionnassa ei voida optimoida ominaislas-tuvirtaa säätämällä lastuamisnopeutta ja radiaalista/aksiaalista syöttöä. Hiontaa käytetään viimeistelytyönvaiheena, jolloin lähtökohtana parametrien valinnalle täytyy olla kappaleen pinnanlaatu ja mittatarkkuus. Näiden ollessa laadun puolesta vaaditulla tasolla on kuitenkin tärkeää optimoida myös tuottavuus hiontaprosessissa. Hionnassa tärkeimät NC-ohjauksella säädettävissä olevat parametrit ovat lastuamisnopeus, lastuamissyvyys ja syöttö. Parametrit liittyvät käytettävän työstökoneen lisäksi muihin hiontaprosessissa käytettäviin komponentteihin, kuten lastuamismestjärjestelmään ja hiomalaikkaan. Hiontaan vaikuttavat säädettävissä olevat parametrit ovat

Hiontaprosessissa lastun maksimipaksuutta voidaan kuvata yhtälöllä, joka sitoo useita hionnan kannalta tärkeitä prosessiparametreja. Yhtälössä 3 on esitetty eräs tapa laskea maksimi lastunpaksuus.

$$h_{cu_max} = c_{gw} * \left(\frac{v_w}{v_s}\right)^e * \left(\frac{a_e}{d_{eq}}\right)^{\frac{e}{2}}, \quad (10)$$

missä c_{gw} on hiomalaikan pintageometriasta riippuva vakio, v_w työkappaleen nopeus, v_s hiomalaikan pinnanopeus, a_e lastuamissyvyys, d_{eq} ekvivalenttihalkaisija ja e hionnan tyy-pistä riippuva eksponentti, jonka arvo on aina kuitenkin suurempi kuin nolla. (Klocke et al., 1997) Lastun maksimipaksuuteen liittyvät termit on esitetty ilmiön havainnollistamiseksi kuvassa 13.



Kuva 13. Lastunpaksuuden muodostuminen. (RWTH Aachen, 2017)

Yhtälöstä 10 voidaan arvioida monien hionnan parametrien vaikutuksia lopulliseen hiotuun kappaleeseen. Voidaan tarkastella tilannetta, jossa hiomalaikan pintanopeutta kasvatetaan. Tällöin muiden parametrien pysyessä vakiona tuloksena on vähentynyt lastunpaksuus ja samalla hiontavoima pienenee. Hiontavoiman väheneminen johtaa pienempään laikan kulumiseen Lastunpaksuuden vähentyminen johtaa parantuneeseen pinnanlaatuun. Hiontaa kannattaakin tehdä niin suurella työstönopeudella kuin toimilaitteet tai muut rajoitteet sallivat.

Kuvassa 13 hiontaparametrit ovat määritetty tasohionnan tapauksessa, jolloin hiomalaikan ja työkappaleen kontaktipinta on erilainen kuin ulkopuolisessa pyöröhionnassa. Tämä voidaan korjata ekvivalenttihalkaisijan avulla. Tasohionnassa ekvivalenttihalkaisijan arvo on suoraan hiomalaikan halkaisija, sillä tasomaisen kappaleen halkaisija lähesyy ääretöntä. Pyöröhionnassa ekvivalenttihalkaisija voidaan määrittellä yhtälön

$$d_{eq} = \frac{d_{wo} * d_{gw}}{d_{wo} \pm d_{gw}}, \quad (11)$$

missä d_s on hiomalaikan halkaisija ja d_{wo} työkappaleen halkaisija. Ulkopuolisessa pyöröhionnassa käytetään yhtälön 11 nimittäjän summaa ja sisäpuolisessa erotusta. (Rowe, 2009 s. 87) Tämän lisäksi hionnassa hiomalaikan ja työkappaleen geometristä kontaktipintaa voidaan kuvata yhtälöllä

$$l_g = \sqrt{a_e * d_{eq}}, \quad (12)$$

mikä saadaan lastuamissyvyyden ja ekvivalenttihalkaisijan avulla (RWTH Aachen, 2017) Geometrinen kontaktipinta voidaan kertoa hiomalaikan leveydellä, jolloin tulokseksi saadaan kontaktipinta-ala. Kontaktipinta-alaa voidaan hyödyntää hiontaprosessin tehontarpeen laskemisessa ja johtuvan lämmön arvioimisessa. Hiontaprosessin kuluttama teho johtuu osittain hiomalaikkaan ja työkappaleeseen. Osa syntyneestä lämmöstä kulkeutuu lastuamisnesteeseen ja irrotettujen lastujen mukana pois. Tätä voidaan kuvata yhtälöllä

$$P_{hionta} = \frac{F_{hionta} * v_c}{A_k} = q_{neste} + q_{gw} + q_{wo} + q_{lastu} \quad (13)$$

missä F_t hionnasta aiheutuva tangentialinen voima: Yhtälössä 13 esitetyt lämpövirrat q_x viittaavat kuhunkin hionnan komponenttiin johtuvaan lämpövirtaan. Johtuvaan lämpöön voidaan vaikuttaa valitsemalla hiomalaikka, lastuamisneste ja sen syöttöparametrit sopiviksi hiontaprosessiin. (RWTH Aachen, 2017)

Lastuamisnopeuden kasvaessa kappaleeseen siirtyvä lämpö kasvaa. Vaikka voiman vähentyessä samassa suhteessa tehon kulutuksen tulisi yhtälön 13 mukaan pysyä samana, ei hiontavoima laske täysin samassa suhteessa lastuamisnopeuden kasvamisen kanssa, kuten Klocke et al., (1997) on artikkelissaan osoittanut.

Materiaalin ominaispoistonopeus hionnassa vaikuttaa prosessin kannattavuuteen ja se pyritään maksimoimaan pinnanlaadun ja mittatoleranssien puitteissa. Ominaispoistonopeus voidaan esittää yhtälön

$$Q'_w = a_e * v_{wo} = \frac{V'_w}{t_c} = \frac{\pi * d_{wo} * z}{2}, \quad (14)$$

missä V'_w on materiaalin ominaispoistotilavuus, d_{wo} on valmiin kappaleen halkaisija ja z on aihion halkaisijan ja lopullisen halkaisijan erotus.

Pinnanlaatuun tärkein vaikuttava tekijä on käytettävän hiomalaikan pintageometria, mikä on saatu timantoinnin jälkeen. Timantin koko vaikuttaa siis yhdessä hiomalaikan abrasiivien kanssa lopputulokseen. Timantoinnin parametreja säätämällä voidaan vaikuttaa pinnanlaatuun, kuten aiemmin tässä luvussa todettiin. Tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ominaispoistonopeus ja työstöön kuluva aika. Taulukkoon 3 on koottu hionnan tärkeimpien parametrien vaikutukset mitattaviin prosessiparametreihin ja lopputuloksiin. (RWTH Aachen, 2017)

Taulukko 3. Hionnan prosessiparametrien vaikutukset lopputuloksiin (RWTH Aachen, 2017)

Asetettavat arvot	Prosessiparametrit			Lopputulokset		
	Hiontavoima	Työkalun kuluminen	Hionta-aika	Lämpötila	Pinnan karheus	Mittatoleranssin virhe
Q' (mm ³ /s)	↑↑	↑↑	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑
v_c (m/min)	↓↓	↓↓	-	↑↑	↓↓	↓↓
v_w (m/min)	↓	↓	-	↓↓	↑	↓
a_e (mm)	↓	↓	-	↓↓	↑	↓

Yllä olevassa taulukossa lastuvirran oletetaan pysyvän vakiona, kun tarkastellaan työkalun nopeutta ja lastuamissyvyyttä.

3. SUORAKERROSTUS

Suorakerrostus (engl. *Directed Energy Deposition*, DED) on yksi ainetta lisäävän valmistuksen muoto. Tässä menetelmässä materiaalia sulatetaan laserin avulla olemassa olevalle pinnalle luoden uutta geometriaa, tai luodaan uutta geometriaa rakennusalan päälle. (Jinoop et al., 2019), (Zhang et al., 2019) Materiaali voi olla keraami, polymeeri, tai metalli. Selvästi yleisimmät kaupallisten sovellusten käytössä olevat materiaalit ovat kuitenkin erilaiset metallit. Tästä syystä suorakerrostuksesta käytetään usein englanninkielisissä teksteissä nimitystä *Directed Metal Deposition*, DMD. (Gibson et al., 2015, s.245) Suorakerrostussovelluksia on olemassa jauhemaisille ja kiinteille materiaaleille. Terminä ”suorakerrostus” voi viitata useampaa eri metallien ainetta lisäävään valmistusmenetelmään, jotka voidaan luokitella edelleen niissä käytettävien tekniikoiden perusteella. Näistä ainakin DMD, LENS (engl. Laser Engineered Net Shaping), EBM (engl. Electron Beam Additive Manufacturing) ja EBF³ (engl. Electron Beam Free Form Fabrication) voidaan luokitella kuuluvan suorakerrostuksen eri muodoiksi. (Yilmaz & Ugla, 2016)

Yleisimmät käyttökohteet suorakerrostukselle ovat erilaiset pinnoitukset ja korjaukset kompleksisiin tai kalliisiin kappaleisiin.(Cortina et al., 2018) Esimerkiksi lääketieteessä suorakerrostukselle löytyy sovelluksia nivelten korjauksissa. Artikkelissaan Ryu et al. (2020) toteavat suorakerrostuksen avulla tehdyn titaanipinnoitteen olevan hyvä ratkaisu mekaanisten implanttien ja luun kiinnityskohdassa käytettävässä nivelessä.

Suorakerrostuksen lisäksi on olemassa useita muitakin AM menetelmiä, joissa lopputulos on samankaltainen pinnanlaadun ja mittatarkkuuksien osalta. Eroavaisuudet menetelmien välillä liittyvät käytettävän laserin tehoon, sulatuslammikon kokoon, laserin tyyppiin, jauheen syöttömekanismiin, kuljetin- ja suojakaasun tyyppiin, ohjauksen automaation tasoon ja siihen, millä menetelmällä laserin liikettä ohjataan.

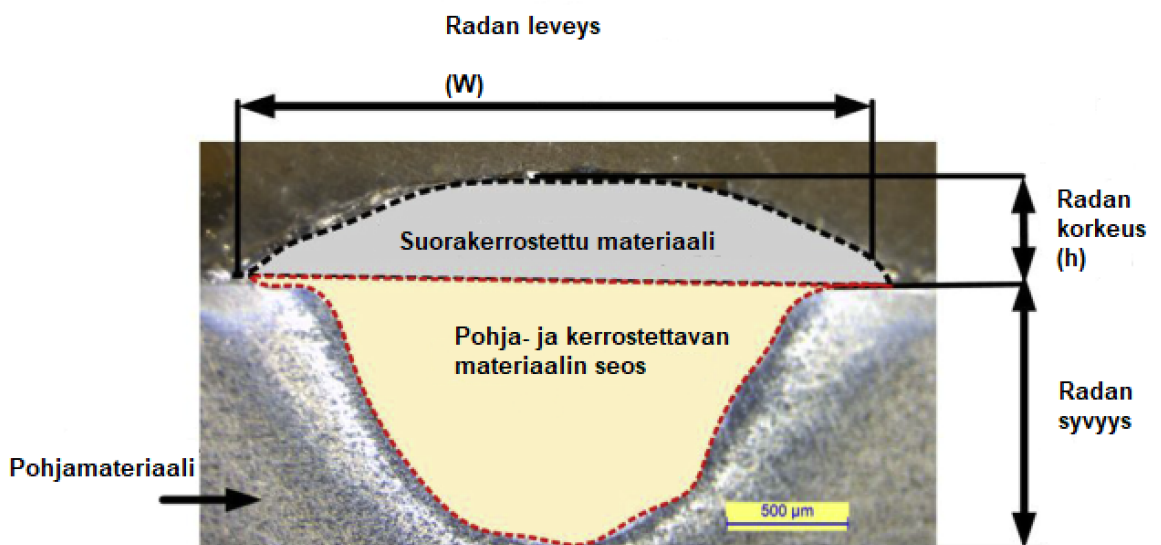
Metallien 3D- tulostusmenetelmät voidaan jaotella sulatusmenetelmän tai materiaalin tuontimenetelmän perusteella. (Jinoop et al., 2019) Yleisimmin jauheen sulattamiseen käytetään erityyppisiä lasereita tai elektronisuihkua. Elektronisuihkua käytettäessä suorakerrostuksen täytyy tapahtua tyhjiössä, mikä asettaa haasteita sovelluksen ympäristölle (Yilmaz & Ugla, 2016). Metallijauheen tuonti tapahtuu joko suoraan sulatuskohtaan ruiskuttamalla tai kohdistamalla sulatusmenetelmä suoraan tulostuspinnassa valmiina olevaan jauheeseen.

3.1 Suorakerrostusprosessin periaatteet

Suorakerrostusprosessissa yleisimmin käytettyjä laitteita ovat laser, jäähdytin, suorakerrostuspää, kuljetin- ja suojakaasu, jauheensyötin ja manipulaattori, joka liikuttaa suorakerrostuspäätä. Laitteiden arkkitehtuuri vaihtelee suuresti riippuen kustakin sovelluksesta. Kirjassaan Gibson et al. (2015, s.256) esittelevät useita suorakerrostussovelluksia, joita käytetään muun muassa monimutkaisten kappaleiden valmistamisessa tai kalliiden komponenttien korjauksissa. Menetelmän tehonlähteenä käytetään yleisimmin laseria, mutta elektronisuihkun käyttäminen on myös mahdollista. Kerrostettavana materiaalina käytetään yleisimmin jauhetta tai kiinteää metallilankaa.

Suorakerrostuksen avulla voidaan valmistaa hyvin monimutkaisia geometrioita kompleksilla materiaaleilla tulostetun materiaalin säilyttäessä tasaisen tiheyden. Tuotettu materiaali on kuitenkin rakenteeltaan anisotrooppinen, mikä täytyy ottaa huomioon sovelluksen käyttökohteiden valinnassa. Anisotrooppisuus johtuu kerrostuksen suunnasta ja millaisella skannausprofiililla se on tehty.

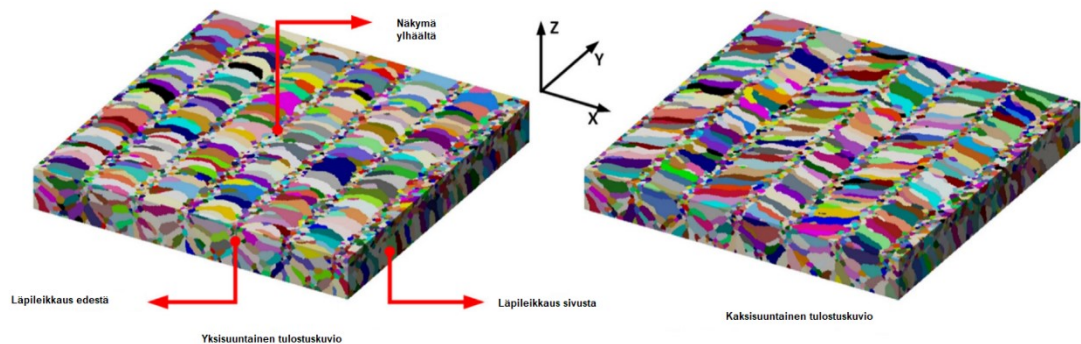
Suorakerrostusta voidaan tehdä kerrostusalustan päälle tai johonkin valmiin geometrian päälle, joka on valmistettu eri materiaalista kuin kerrostettava metalli. Tällöin ensimmäinen kerros sekoittuu pohjamateriaalin kanssa luoden seosalueen, joka koostuu kerrostettavasta materiaalista ja pohjamateriaalista. Tätä on havainnollistettu kuvassa 14. Joissain tapauksissa on syytä tehdä ensimmäinen kerros erilaisilla prosessiparametreilla kuin muut kerrokset. (Jinoop et al., 2019) Kerrostussuunnalla ei ole suorakerrostuksessa rajoituksia, eli prosessi voidaan suorittaa kääntämällä kerrostustasoa tai -päätä. Suorakerrostuksessa ei yleensä myöskään ole tarvetta erilaisille tukimateriaaleille. (Ostendorf et al., 2010)



Kuva 14. Suorakerrostetun radan poikkileikkaus (Smoqi et al., 2021 mukailten).

Suorakerrostusprosessissa syntyy siis kerrostettua materiaalia ja pohjamateriaalin ja kerrostuksen seosta. Tämän lisäksi prosessiin liittyy pohjamateriaalin osa, mikä ei ole sekoittunut kerrostettavan materiaalin kanssa, mutta siihen on vaikuttanut prosessissa syntyvä lämpö. Tätä aluetta kutsutaan kirjallisuudessa lämpövaikuttuneeksi alueeksi (HAZ). Tällä alueella materiaalin ominaisuudet, kuten kovuus ovat erilaiset kuin muualla kappaleessa. (Smoqi et al., 2021) Myös pohjamateriaalin ja kerrostetun materiaalin lämpökäsittelyllä on merkitystä suorakerrostetun materiaalin ominaisuuksien kannalta. Esimerkiksi kerrostetun materiaalin vetolujuus saadaan lähelle alkuperäisen materiaalin vetolujuutta sopivalla lämpökäsittelyllä, muuten sen jäädessä huomattavasti pienemmäksi. (Zhang et al., 2019)

Li & Soshi (2019) tutkivat laserin liiketyypin vaikutusta suorakerrostuksen lopputulokseen. Tutkimuksen mukaan sulan jäädyttyä pinnanmuodot ovat erilaisia riippuen laserin liiketyypistä. Tutkittavina liiketyypeinä käytettiin yksi- ja kaksisuuntaista kuviota. Sorvin tapauksessa kaksisuuntainen pintakuviointi vaatisi pääkaran jatkuvaa suunnanmuutosta ja suorakerrostuspään synkronointia siihen, mikä tekisi työstöohjelmien tekemisestä hankalaa. Havainnekuva eri liiketyypin tuottamasta pinnasta on esitetty kuvassa 15. EHLA- prosessia (saks. Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen) tutkittaessa on käytetty kuvan oikeanpuoleista liiketyppiä. (T. Li et al., 2019)



Kuva 15 Skannausprofiilit.

Parametrejä säätämällä voidaan vaikuttaa tulostetun materiaalin ominaisuuksiin, kuten jäännösjännitysten suuntaan. Jäännösjännitysten suunta tarkoittaa, onko jännitys puristavaa vai vetävää. Niillä voidaan vaikuttaa myös materiaalin mikrokovuuteen.

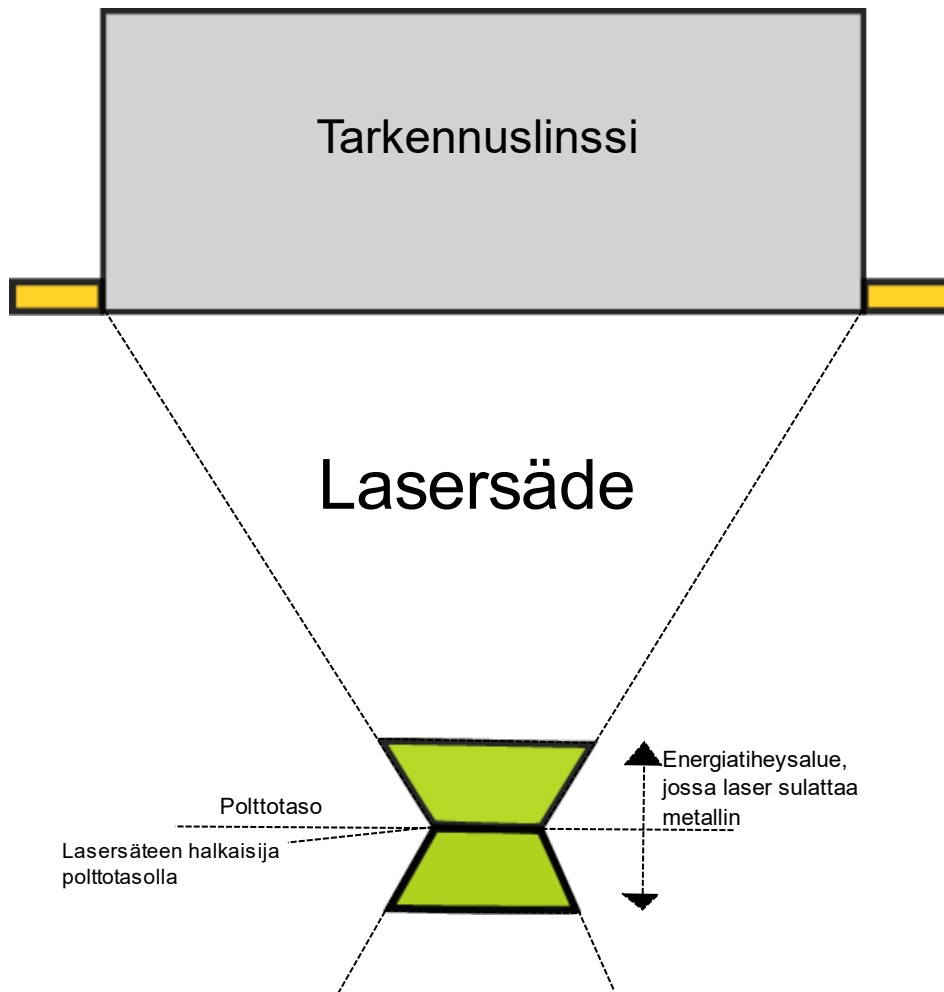
Suorakerrostusprosessin aikana kappaleeseen kohdistuu suuria lämpötilagradientteja. Tämä aiheuttaa osaltaan jäännösjännityksiä, sillä kerrostetun materiaalin mekaaniset

ominaisuudet muuttuvat lämpötilan funktiona. Suorakerrostusprosessin aikana kerrostettava materiaali ja pohjamateriaali lämpenevät ja jäähtyvät useaan otteeseen. Tällöin jäännösjännitysten lisäksi kerrostettuun kappaleeseen saattaa tulla säröjä tai muita virheitä, jotka vaikuttavat kappaleen mittatarkkuuteen. Tällöin jäännösjännitykset täytyy mitata jälkikäteen laboratorioissa ja varmistaa ettei niistä ole haittaa kappaleen toiminnan kannalta. (L. Li et al., 2020)

Jauheen syöttämiseen on kaksi sovelluksissa yleisimmin esiintyvää tapaa. Ensimmäinen tapa on syöttää metallijauhe koaksiaalisesti laserin tai elektronisäteen kanssa. Toisessa tavassa jauhe puolestaan syötetään jossakin kulmassa laseriin nähden, jolloin jauhe-suuttimia voi olla useampia. (Gibson & Rosen, 2015) Tämän lisäksi kerrostustapa vaihtelee, eli jauhe voidaan sulattaa laserin avulla ennen kuin se törmää työkappaleen pintaan tai se voidaan sulattaa sen jo osuttua kappaleeseen. Menetelmän perusideana on tehdä laserin avulla pieni sulalammikko työkappaleen pintaan ja kohdistaa kerrostettava materiaalia siihen. Suorakerrostuksessa sulatetaan kerroksia toistensa päälle luoden uutta geometriaa, samaan tapaan kuin pursotuspohjaisissa menetelmissä.

Jauhepetipohjaisissa menetelmissä periaate on samankaltainen, mutta ero on siinä, että kerrostettava materiaali ei ole valmiiksi kerrostuspinnalla. (Gibson et al. 2015 s. 245) Tämä mahdollistaa moniakselisten työstökoneiden hyödyntämisen suorakerrostussovelluksissa, kun tulostettavan kappaleen lisäksi ei tarvita erillisiä tukirakenteita ja työkappale voidaan viimeistellä samalla työstökoneella. Tämän vuoksi suorakerrostus on potentiaalinen menetelmä hybridivalmistuksessa, kun valmistettava kappale on geometrialtaan monimutkainen (Yamazaki, 2016). Suorakerrostuksessa jauhepartikkelien liikeenergia on riittävän suuri kumoamaan painovoiman niihin kohdistaman vaikutuksen, joten menetelmää voidaan hyödyntää myös vaakasuorissa sovelluksissa. (Gibson et al., 2015 s. 248)

Perinteisessä suorakerrostusprosessissa halutaan tuottaa sulalammikko, jonka halkaisija on tyypillisesti 0,25–1 mm ja syvyys 0,1–0,5 mm. Suorakerrostuksessa saavutetaan usein suuria kerrostetun materiaalin jäähtymisnopeuksia, jotka voivat olla $10^3 - 10^5$ °C/s. Jäähtymisnopeuden suuruus riippuu käytettävän laserin tehosta ja sen skannausnopeudesta, eli siitä kuinka nopeasti säde liikkuu työkappaleen pinnalla. Joillakin materiaaleilla suuret jäähtymisnopeudet aiheuttavat sellaisia kiderakenteita, jotka eivät ole mahdollisia perinteisiä menetelmiä hyödyntämällä. (Diegel et al., 2019, s.248)



Kuva 16. Lasersäteen kohdistamisen ääriarvot (Gibson & Rosen, 2015 s.250)

Kuvassa 16 vihreällä näkyvää metallin sulattamiseen vaadittavaa energiateiheysaluetta voidaan hyödyntää sulalammikon koon säätämisessä. Jos sulalammikon kokoa halutaan kasvattaa, voidaan laserpään suutinta siirtää kauemmas työkappaleesta tai tuoda se lähemmäksi sitä.

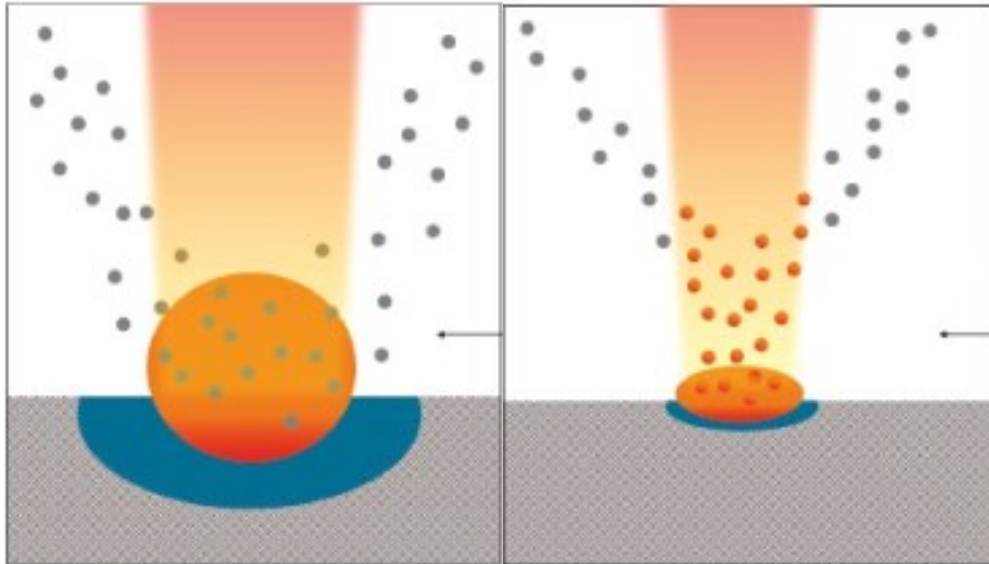
Suorakerrostus ainetta lisäävänä valmistusmenetelmänä on teollisissa jo tarkoituksissa laajalti käytössä. (Wohlert, 2018) Useissa tapauksissa syötettävä materiaali ja lasersäde tulevat eri suuttimista, jolloin sulan pisaran muodostumiskorkeuden säätäminen on vaikeaa. (W. Li & Soshi, 2019) Ja suorakerrostuksen jälki riippuu suunnasta. Useissa sovelluksissa laser ja jauhe tuodaan kuitenkin koaksiaalisesti, jolloin tulosteen jälki on suunnasta riippumaton.

3.2 EHLA- prosessi

EHLA on akronyyminä saksankielisestä nimestään ja tarkoittaa Erittäin nopeaa laserin avulla tehtävää suorakerrostusta. EHLA- prosessi on samankaltainen kuin perinteinen

suorakerrostusprosessi, mutta tietyt parametrit ovat eroavaisia. Tämä menetelmä vaatii laserilta suuren skannausnopeuden. Perinteisessä DED- prosessissa skannausnopeudet ovat noin kymmenesosan EHLA- prosessin skannausnopeuteen verrattuna (T. Li et al., 2019) (Schopphoven et al. 2017). Tämä on haastavaa toteuttaa NC- koneella siten, että suorakerrostuspäätä liikutellaan servomoottorien pikaliikkeellä. Usein EHLA- prosessissa liikkuva komponentti onkin suorakerrostusalusta. Tähän hyvin sopeutuva alusta on sylinteri, joka pinnoitetaan EHLA- prosessin avulla.

Perinteisessä suorakerrostusprosessissa kerrostettava materiaali voidaan sulattaa sulalammikossa, joka on tehty työkappaleen pintaan käytettävän energialähteen avulla. EHLA- prosessissa kuitenkin kerrostettava materiaali sulatetaan jo ennen kuin se kerrostetaan kappaleen pintaan.



Kuva 17. Perinteisen suorakerrostus (vasen) ja EHLA (oikea).

Kuvasta 17 huomataan perinteisen suorakerrostusprosessin ja EHLA- prosessin erot. Perinteisessä prosessissa tehdään sulalammikko kappaleen pintaan ja metallijauhe kerrostetaan siihen. EHLA- prosessissa puolestaan metallijauhe sulatetaan jo ennen kuin se osuu materiaalin pintaan. EHLA- prosessi tuottaa perinteistä prosessia pienemmän sulalammikon ja radan leveyden. (Schopphoven et al., 2017) EHLA- prosessissa myös yhden kerroksen paksuus on perinteistä prosessia pienempi.

EHLA- prosessi tarjoaa vaihtoehdon kromipinnoitteiden tekemiselle olemalla perinteisiä menetelmiä huomattavasti taloudellisempi ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempi vaihtoehto. Perinteisin kromipinnoitusmenetelmin tehty pinnoite ei kiinnity pinnoitettavan kappaleen pintaan riittävän hyvin, jolloin pinnoite irtoaa ja lohkeilee helposti. Tämä johtaa mikromurtumiin pinnoitteessa, mikä vähentää sen kestävyyttä korroosiota ja kulumista

vastaan. Toinen etu EHLA- prosessilla perinteiseen elektrokemialliseen prosessiin verrattuna on sen myrkyttömyys, sillä kemikaaleja ei tarvita EHLA- prosessissa. Tämän vuoksi EHLA- prosessilla tehdyt pinnoitteet ovat ympäristöystävällisempiä, eikä niitä tekevä yritys tarvitse erillistä lupaa, kuten perinteistä menetelmää käytettäessä. (Schopphoven et al., 2017) EHLA- prosessin avulla tehdyt pinnoitteet ovat korvanneet perinteiset kromipinnoitteet joissakin avomerellä sijaitsevilla rakennelmissa, kuten öljylautoissa. (T. Li et al., 2019)

EHLA- prosessin hyötysuhde on lisäksi hyvä. Vain noin 10 % metallijauheesta menee hukkaan prosessin aikana, joka sekin on mahdollista kerätä talteen tai suodattaa, ettei jauhe kulkeudu hengitysilmaan. Uudelleen käytettäessä jauhe on puhdistettava, tai oltava varma sen riittävästä puhtaudesta.

3.3 Soveltuvuus hybrdivalmistukseen

Suorakerrostus on yksi käytetyimmistä ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä hybrdivalmistuksessa. Suurin osa kaupallisessa valmistuksessa olevista laitteista hyödyntävät sitä. Tämä johtuu suorakerrostuksen tuomista vapauksista, kun se on liitettävissä moniakselisiin työstökoneisiin. Tällöin ohjaus on saman kaltainen, kuin muidenkin perinteisten työstökoneiden työkaluilla. (Sealy et al., 2018)

Suorakerrostuksella valmistettujen kappaleiden pinnanlaatu ja mittatarkkuus eivät yleensä ole riittäviä sellaisenaan. Artikkelissaan Cortina et al. (2018) esittää suorakerrostuksen pinnanlaadun Ra arvon olevan 40 μm ja mittatarkkuuden olevan $\pm 0,13\text{mm}$, mikä on hieman huonompi kuin jauhepetimenetelmillä. Useimmissa tapauksissa suorakerrostettua kappaletta tarvitsee työstää tarkemmalla menetelmällä, jos valmiilla kappaleella on funktionaalisia toiminnallisuuksia. Tämän vuoksi suorakerrostusprosessin jälkeen työkappale viimeistellään jollakin ainetta poistavalla menetelmällä. Artikkelissaan Song et al. (2005) Lisäksi on huomattu, että jokaisen tulostuskerroksen jälkeinen tasojyrsintä vähentää kappaleen huokoisuutta ja parantaa pinnanlaatua. (Flynn et al., 2016) Hybrdivalmistukseen suorakerrostus sopii erityisesti suuren kerrostusnopeutensa suhteen. Lyhyessä ajassa saadaan kerrostettua paljon materiaalia ja se voidaan viimeistellä jollakin muulla menetelmällä. (Riipinen et al., 2018)

Yleisimmin suorakerrostuksen kanssa käytetään työstökeskusta, sillä suorakerrostusta sovelletaan prosessin ominaisuuksien vuoksi tällaisella koneella. *Hybrid Manufacturing Technologies* julkaisi vuonna 2013 ensimmäisen kaupallisessa tarkoituksessa olevan suorakerrostusta tekevän numeerisesti ohjatun työstökoneen. Tässä koneessa on integroitu vaihdettava *Ambient tool* suorakerrostuspää, joka käyttää kerrostusmateriaalina

jauhemaista metallia. Useat laitevalmistajat ovat julkaisseet ainetta lisäävään ja poistavaan valmistukseen kykeneviä koneita tämän jälkeen. Tunnetuimpia näistä ovat DMG Mori, Hermle, Hurco ja Mazak. (Wohlers 2018)

Suorakerrostus soveltuukin hyvin käytettäväksi hybridityöstökoneessa, sillä suorakerrostettava kappale voidaan valmistaa suoraan CAD mallista. Tämä ominaisuus tukee CAD-CAM integraatiota, jolloin ainetta lisäävien ja poistavien työvaiheiden ohjelmat voidaan tehdä samalla ohjelmistolla. (Jinoop et al., 2019)

DMG Mori on kehittänyt viime vuosien aikana hybridityöstökoneen, joka yhdistää suorakerrostuksen 5 akseliseen työstökeskukseen (Simpson, 2019). Monet konepajoilla olevat hybridikoneet eivät ole kuitenkaan peräisin suoraan valmistajalta, vaan perinteisiä työstökoneita tai robotteja muokataan siten, että niillä voidaan suorittaa hybridivalmistusta. (Manogharan et al., 2016) Suorakerrostuksen soveltuvuutta hybridivalmistuksessa on tutkittu viime aikoina useissa yrityksissä ja yliopistoissa. Artikkelissaan Yamazaki (2016) käsittelee hybridityöstökoneen kehitysprosessia. Kyseinen hybridityöstökone hyödyntää AM menetelmänään suorakerrostusta, joka on integroitu 5- akseliseen työstökeskukseen.

3.4 Suorakerrostusparametrit

Suorakerrostusta ja sen eri muotoja on tutkittu jo kauan ja monet akateemiset tahot ovat tehneet omaa tutkimustaan sopivien parametrien valinnasta erilaisissa tilanteissa eri materiaaleille. Artikkeleissaan (Jinoop et al., 2019), (Grguraš & Kramar, 2017), (Smoqi et al., 2021), (Wang et al., 2016) ja (Schopphoven et al., 2017) tutkivat suorakerrostuksen säädettävissä olevien parametrien vaikutusta valmistetun kappaleen ominaisuuksiin, niin perinteisin menetelmien kuin EHLA- prosessinkin kannalta. Suorakerrostuksessa tärkeimpiä säädettäviä parametreja ovat laserin teho, työstönopeus (laserin liikenopeus työkappaleeseen nähden), kuljetinkaasun tilavuusvirta, syöttö, suojakaasun tilavuusvirta, jauheen massavirta, lasersäteen fokuksen halkaisija, säteen intensiteetti ja laserin aallonpituus. Myös kerrostettavan materiaalin ominaisuuksilla on merkitystä lopputulokseen, mutta niitä ei varsinaisesti säädetä prosessiparametreina. Suorakerrostuksen tärkeimpiä parametreja ovat kerrostusnopeus Q_{DED} [mm^3/s] ja kerrostukseen käytetty aika t [s]. Mittatoleranssi on tärkeä varsinkin useaa kerrosta kerrostettaessa.

Parametrien sopivuutta on tarkasteltu pääasiassa EHLA- prosessin kannalta, sillä se tulee olemaan tutkimusympäristön pääasiallinen käytettävä prosessi. Pinnanlaatua ei ole hyödyllistä tarkastella tässä tapauksessa, sillä kerrostetut pinnat viimeistellään joka ta-

pauksessa ainetta poistavalla menetelmällä. Säädettyjen parametrien vaikutusta lopputulokseen on vaikea määrittää yksiselitteisesti. Lopputulokseen vaikuttaa paljon myös käytetty materiaali ja sen ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, partikkelikoko ja koivuus.

Materiaalin kerrostusnopeus suorakerrostuksessa voidaan laskea yhtälön

$$Q'_{DED} = v_c * W * H \quad (15)$$

mukaan, missä v_c on suorakerrostuksen skannausnopeus, W on radan leveys ja H sen korkeus. Artikkelissaan Li et al., (2019) on tehnyt testejä EHLA- prosessiin liittyen. Tässä käytetty skannausnopeus on ollut 30 m/s. Artikkelista selviää myös muita prosessiparametrejä, kuten laserin teho ja tehotiheys, kuljetuskaasun tilavuusvirta, suojakaasun tilavuusvirta ja jauheen massavirta. Käytetyn jauheen partikkelien koko oli 25–50 μm , jolloin yhden kerrosteen korkeus on noin 140 μm .

Laser säteen halkaisijan leveys riippuu käytettävän laserin laadusta, tyypistä ja käytettävästä optiikasta. Säteen halkaisija on tärkeää tuntea, jotta suorakerrostusparametrit voidaan asettaa oikein. Säteen halkaisija polttovälillä voidaan laskea yhtälöstä

$$d_x = \sqrt{d_f^2 + (x - x_0)^2 * \theta_x^2} \quad (16)$$

missä d_f on säteen halkaisija fokuksessa, x on etäisyys fokuksesta, x_0 on fokuksen sijainti linssiltä ja θ_x on hajaantumiskulma. Suorakerrostuksen ja erityisesti EHLA- prosessin kannalta on kiinnostavaa tietää, kuinka kaukana säteen fokus, eli pienin halkaisija sijaitsee linssistä ja millä vaihteluvälillä sillä on riittävä tehointensiteetti jauheen sulattamiseen. Tämän tiedon avulla suorakerrostuspää voidaan asemoida oikealle etäisyydelle kappaleen pinnasta.

Säteen halkaisija fokuksessa voidaan ilmoittaa yhtälön

$$d_f = \frac{4M^2 f \lambda}{\pi D_L} \quad (17)$$

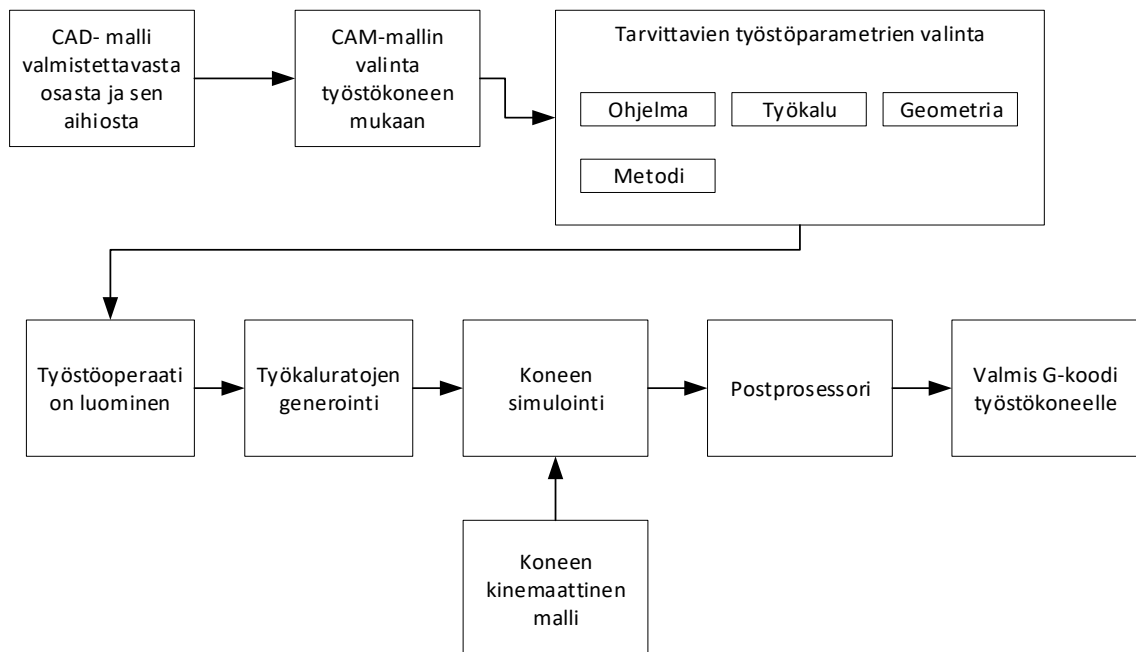
avulla, missä M^2 kuvaa lasersäteen laatua, f on polttoväli, λ on laserin aallonpituus ja D_L kollimoidun säteen halkaisija. Pienimmän säteen halkaisijan, sen vaihtelun ja hajautumiskulman Θ avulla, voidaan määrittää suorakerrostukselle sopiva syöttöliike, jotta laserin radat saadaan osittain päällekkäin. (Steen & Mazumder, 2013 s.106)

Edellä mainittujen parametrien avulla saadaan tehtyä prosessi-ikkuna suorakerrostusprosessille samaan tapaan kuin Jinoop et al. (2019) ovat artikkelissaan tehneet. Tässä artikkelissa määrittävät parametrit ovat suorakerrostusradan leveys, laserin teho pituus-

yksikköä kohti ja jauheen massavirta pituusyksikköä kohti. Tästä voidaan päätellä jauheen massavirran, laserin tehon ja säteen skannausnopeuden olevan riippuvaisia keskenään prosessin kannalta. Esimerkiksi laserin tehoa ja jauheen massavirtaa kasvatettaessa voidaan nostaa myös skannausnopeutta. Sopivat parametrit testauksiin on valittu näiden tietojen perusteella ja ne ovat esitetty luvussa 5.

4. VIRTUAALINEN MALLI

Tässä luvussa käsitellään hybridisorvin virtuaalisen mallin CAD ja CAM mallintamista ja simulointia. Kuvassa 18 on esiteltyä kappaleen valmistuksessa käytettävän CAM-ohjelman tekemisen vaiheet, johon on liitetty virtuaalinen malli ja postprossori. Virtuaalinen malli antaa mahdollisuuden simuloida työstökoneen liikkeitä CAM-ohjelmasta. Itse kirjoitettua G-koodia virtuaalisen mallin avulla ei pysytä simuloimaan, vaan simulointi onnistuu ainoastaan CAM-ohjelmalle. CAM-ohjelman generoimat liikekäskyt eivät sellaisenaan sovellu työstökoneen luettavaksi. Tätä ongelmaa varten on olemassa postprossori, joka kääntää liikekäskyt NC-koodiksi. Postprossorin rakennetta käsitellään myöhemmässä luvussa.



Kuva 18. Virtuaalisen mallin soveltaminen (Wan & Ding, 2014 mukailen)

Tässä työssä rakennettu kinemaattinen malli perustuu Siemens NX:n valmiisiin työstökoneille. Valmiin mallin päälle voidaan määrittää itse mitatut komponenttien geometriat ja liikeakselien rajat. Tämä mahdollistaa simuloinnissa tarvittavan virtuaalisen NC-ohjaimen käytön, eikä sitä tarvitse ohjelmoida itse. CAM-mallissa voidaan tehdä haluttuja työstöratoja eri työkaluilla ja työstöstrategioilla, kun valmis kappale ja sen aihio on määritetty. Osaa hionnan ja suorakerrostuksen työstöstrategiaan liittyviä parametreja voidaan säätää suoraan CAM-ohjelmassa. Näitä ovat pikaliikkeen nopeus, syöttöliikkeen tyyppi, lastuamissyvyys- tai etäisyys suorakerrostuksen tapauksessa. CAM-ohjelmassa

voidaan säätää lähestymis- lähtöliikkeet käytettävän työkalun mittojen mukaan ja ne voidaan lopulta verifioida tuomalla sorvin konemalli CAM-ohjelmaan. Tällöin työstötapahtuma nähdään visuaalisesti ja voidaan havaita mahdolliset komponenttien tai työkalun törmäykset.

4.1 Virtuaalisen mallin käyttötarkoitus

Teollisuudessa mekaaniset osat voivat olla geometrialtaan hyvin monimutkaisia ja valmistettava tuoteisto on usein laaja (Wan & Ding, 2014). Tämä johtaa väistämättä työstöohjelmien suureen määrään, jolloin ohjelmien manuaalinen muokkaaminen olisi erittäin työlästä. Monimutkaisten kappaleiden kanssa työstöohjelman muokkaaminen manuaalisesti altistaa virheiden tekemiselle, jolloin seurauksena voi olla virheellisiä kappaleita tai pahimmassa tapauksessa työkalu- tai konerikko. CAD/CAM ohjelman avulla voidaan luoda uusia tai muokata vanhoja työstöohjelmia huomattavasti nopeammin ja niiden käytön yleistyessä myös niihin liittyvät sovellukset lisääntyvät ja kehittyvät. Tässä työssä testikappaleena hionnalle käytetään yksinkertaista sylinteriä, jolle suoritetaan pyöröhiontaa. Tulevaisuudessa koneella voidaan kuitenkin valmistaa monimutkaisempia kappaleita, joita työstön suunnittelua varten virtuaalinen malli antaa hyvät lähtökohdat.

Koneen virtuaalisen mallin rakentaminen voidaan jakaa kolmeen osaan. Ensin mallinnettava työstökone täytyy mallintaa riittävällä tarkkuudella. Mallintamista varten koneen komponentit kannattaa mitata jollakin menetelmällä, jotta malli olisi riittävän tarkka törmäystarkastelun kannalta. (Sanchez Gomez et al., 2017) Mittavälineiden valinta riippuu halutusta tarkkuudesta. Yksinkertaisimmillaan mittaus voidaan suorittaa rulla- ja työntömitan avulla. Edistyneempiä menetelmiä mittaamiseen ovat koordinaatti- ja käsivarsimitalaitteet ja erilaiset skannerit.

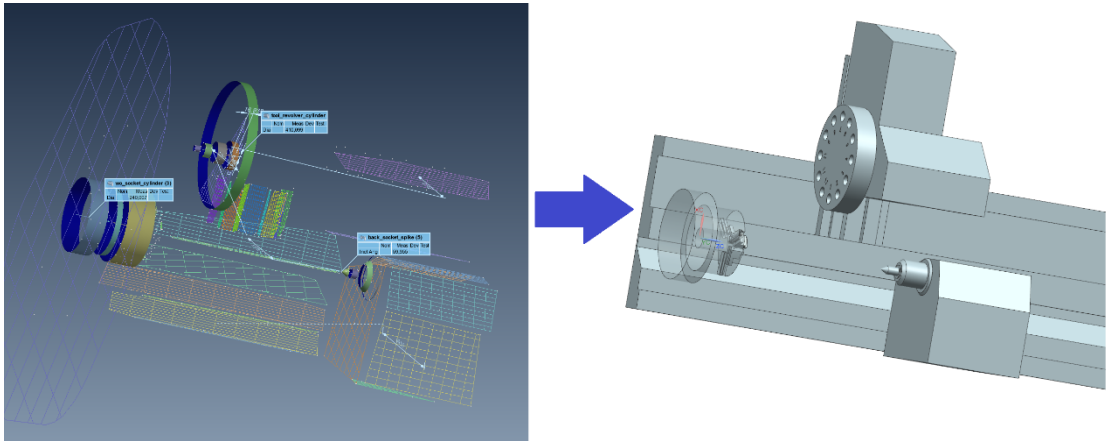
Virtuaalisesta mallista saadaan hyötyä lukuisissa eri tarkoituksissa koneen elinkaaren aikana. Sen avulla saadaan tehostettua tuotannon ja tuotekehityksen rajapinnan toimivuutta ja sen avulla voidaan saada huomattavia säästöjä, kun kappaleen ongelmat tuotannon näkökulmasta voidaan havaita jo suunnitteluvaiheessa. Samalla tuotteen ”suunnittelusta tuotantoon” aika lyhenee, kun suunnitteluvaiheessa suunnittelijan on helpompi selvittää valmistusmenetelmien asettamat rajoitukset suunnittelulle. Lisäksi CAD ja CAM mallien avulla tehty testaus mahdollistaa tuotteiden mallien nopean muokkauksen. Tämän lisäksi tietomallien ja tuotannosuunnitteluun liittyvien ohjelmien avulla helpotetaan tiedon jakamista tuotekehitysprosessissa ja parantaa suunnittelun laatua. Tiedonsiirto tuotesuunnittelusta rakenteiden optimointiin ja lopulta tuotantoteknisiin suunnitelmiin hel-

pottuu. Virtuaalisen mallin avulla tieto on helpommin saatavissa ja jäseneltävissä. Tällöin ”CAD to part”- prosessista tulee selkeämpi. Koneen virtuaalisen mallin hyödyntäminen mahdollista valmistuksen testaamisen ennen tuotantoon siirtymistä ja testaamista fyysisellä koneella ei välttämättä tarvita. Virtuaalinen malli saattaa parhaassa tapauksessa ilmoittaa kriittisestä suunnitteluvirheestä valmistuksen näkökannalta, tai NC ohjelmassa tapahtuneesta virheestä, jolloin vältytään jopa mahdolliselta koneen hajoamiselta. Myös uusien käyttäjien kouluttaminen on huomattavasti halvempaa ja helpompaa hyvin rakennetun virtuaalimallin avulla, sillä virheet eivät riko konetta ja oppiminen voi tapahtua ”yritys ja erehdys” periaatteen mukaan. (Sanchez Gomez et al., 2017)

4.2 Mallintamisessa käytetyt menetelmät

Luotettavan virtuaalisen mallin rakentamista varten mallinnettujen komponenttien tulee vastata alkuperäistä konetta mahdollisimman tarkasti. Komponentit voidaan mallintaa koneen mukana tulevan dokumentaation mukaan, jolloin virtuaalinen malli vastaa nimellisesti alkuperäistä konetta. Tässä työssä käsiteltävä kone on kuitenkin melko vanha ja siihen on tehty joitakin muutoksia, jotka ovat mahdollisesti jääneet päivittämättä dokumentaatioon. Nimellismittojen käyttö saattaa johtaa virtuaalisen mallin käytössä virheisiin törmäystarkastelussa. Tästä syystä tämä vaihe suoritetaan mittaamalla koordinaattimitakäsivarren avulla koneen toiminnan kannalta kriittisiä pintoja niiden suhdetta toisiinsa. Koneen liikkeiden kannalta merkityksettömät mitat on kuitenkin mallinnettu dokumentaation mukaan. Mitattu data muokataan ensin helpommin käsiteltävään muotoon *Polyworks*- ohjelmiston avulla, jonka tuloksena saadut geometriat ja piirteet siirretään *Siemens NX* ohjelmistoon. Tässä työssä komponenttien mittauksessa käytettiin Hexagonin Romer käsivarsimittalaitetta, johon oli yhdistetty pallomainen kosketusanturi. Polyworks-ohjelmistoympäristössä voidaan luoda erilaisia muotoja mitattavasta kohteesta, kuten tasoja, sylintereitä, palloja ja kaksoiskaarevia pintoja. Mittauksen jälkeen näiden geometrioiden välisiä etäisyyksiä voidaan mitata. Ne voidaan myös siirtää Polyworks Modeleriin, jossa niitä voidaan muokata halutulla tavalla. Esimerkiksi tasoja voidaan yhdistää, jolloin niistä saadaan erilaisia profileja.

Hybridisorvin simuloinnin kannalta tärkeimmät piirteet ovat karan nollapisteen paikka Z-akselilla kärkipylkkään nähden ja X- ja Z- akseleiden johteiden paikat, joita pitkin työkalurevolveri kulkee. Sorvin kriittisten piirteiden mittaamisessa voidaan tarkkuusvaatimuksen mukaan käyttää useita erilaisia mittausmenetelmiä. Kuvassa 19 on esitetty mitattuja tasoja Polyworksissa ja NX:ssä.



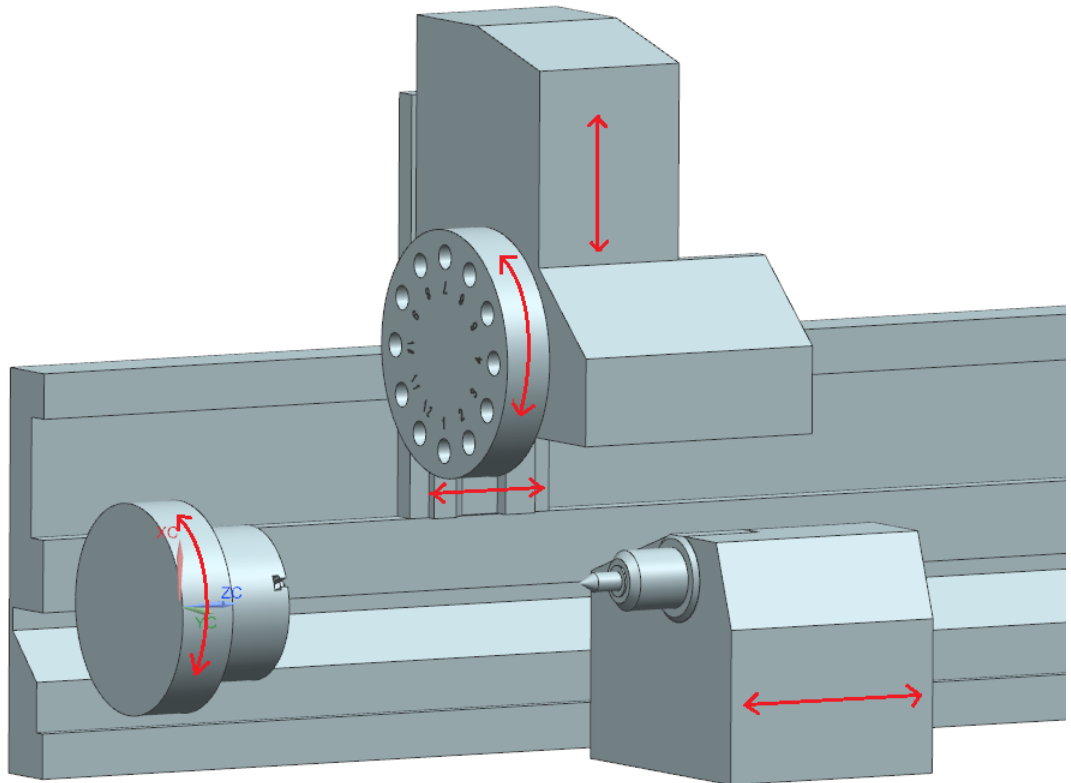
Kuva 19. Mittakäsivarrella mitatut tasot Polyworksissa ja valmis malli NX:ssä.

Polyworksissa on mahdollista mitata mitattujen komponenttien välisiä etäisyyksiä. Mittatarkkuus riippuu käytetystä mittalaitteesta. Mittaukset voidaan siirtää Polyworks Modeleriin, jossa niitä voidaan muokata parempaan muotoon. Esimerkiksi tasoja voidaan yhdistää, jotta ne muodostaisivat profiileita. Nämä profiilit voidaan siirtää sopivassa tiedostomuodossa johonkin CAD- ohjelmistoon, jossa niitä voidaan siistiä ja niiden avulla voidaan mallintaa valmiita komponentteja, jotka vastaavat alkuperäistä mittauskohdetta.

Vaikeammissa paikoissa, mihin mittakäsivarren avulla ei pääse käsiksi, voidaan käyttää erilaisia käsimittavälineitä komponenttien mittaamiseen. Tässä työssä käytettyjä käsimittavälineitä ovat mikrometri ja perinteinen työntömitta

4.3 Työstökoneen kinematiikka

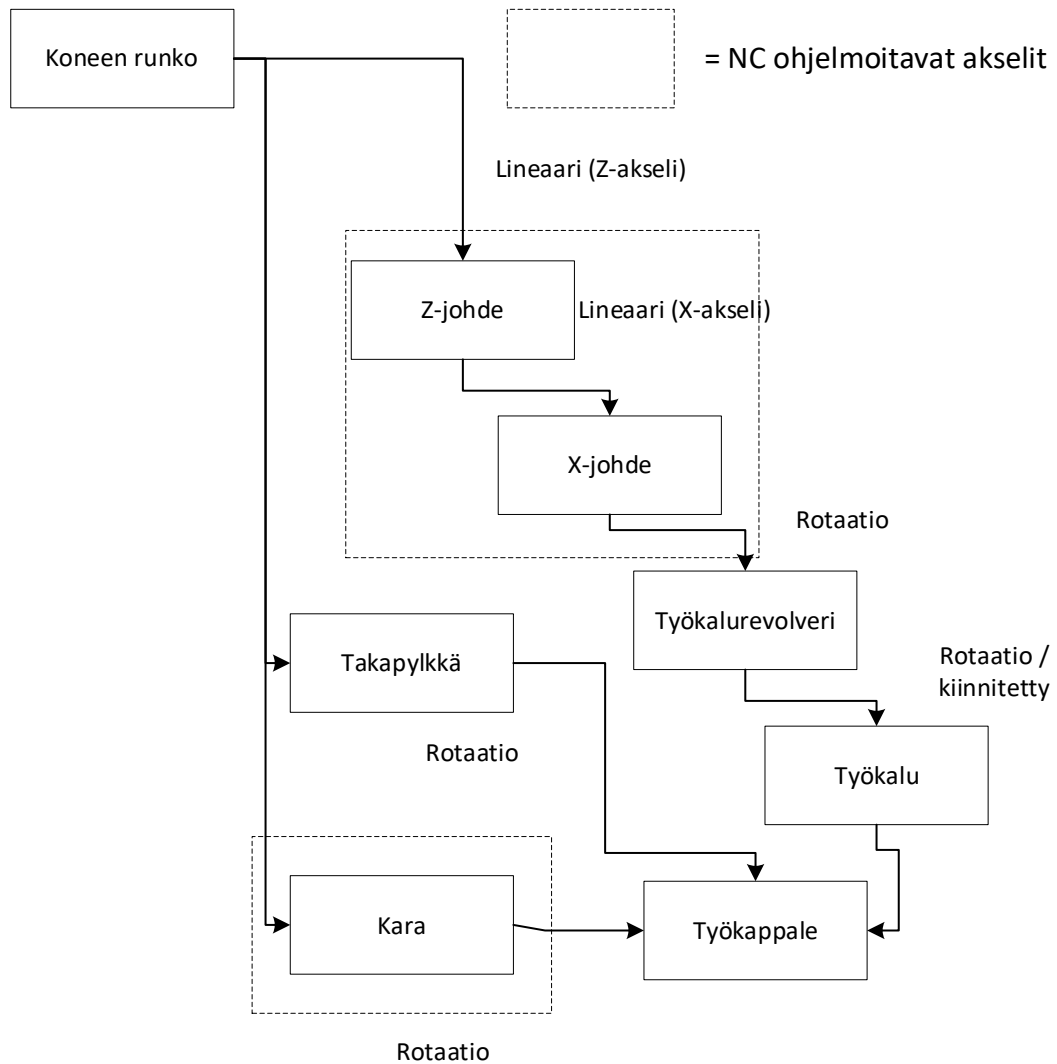
Työstökoneissa on useita sen toiminnan kannalta tärkeitä komponentteja, jotka liikkuvat tietyllä tavalla toistensa suhteen. Nämä relaatiot on syytä määritellä tarkasti mallia tehdessä, jotta koneen virtuaalinen malli toimisi samalla tavalla kuin fyysinen kone. Työstökoneen kinemaattinen tarkastelu tarkoittaa komponenttien liikkeiden tutkimista toistensa suhteen. Tämä tarkastelu ei ota kantaa siihen, miten liikkeet saadaan aikaan ja mitä voimia komponentteihin aiheutuu. Eri työstökoneita ja robotteja mallintavat kinematiikat voivat olla sarja-, rinnakkais-, tai hybridikinematiikkoja. (Janosik, 2005) 3- akselisen sorvin tapauksessa kinematiikkatyyppi on sarjamainen, sillä kuhunkin NC- ohjattavaan komponenttiin vaikuttaa vain yksi liikkeen aikaan saava aktuaattori. Työstökoneiden kinematiikat ovatkin yleensä sarjamaisia, kuten kiertyvänivelisissä roboteissa. Erona on työstökoneiden liikkeiden tapahtuminen tasossa, jolloin niillä on vähemmän vapausasteita. Kuvassa 20 on esitettyä työssä tarkasteltavan sorvin vapausasteet. Työkalurevolveriin kiinnitetään kuvasta puuttuva pyörivien työkalujen työkalupidin, joka lisää yhden pyörivän akselin.



Kuva 20. GF NDM 16/100- sorvin vapausasteet.

Kinemaattisen ketjun avulla voidaan määrittellä koneen eri komponenttien relaatiot. Esimerkiksi kinemaattisen ketjun viimeisen komponentin liike ei aiheuta muiden komponenttien liikkumista, mutta ketjun aikaisempien komponenttien liike aiheuttaa aina myös ketjun kaikkien seuraavien komponenttien liikkumisen. (Sanchez Gomez et al., 2017)

Kinemaattisen ketjun avulla voidaan kuvata havainnollistavasti koneen komponenttien kinemaattista hierarkiaa. Kinemaattisen ketjun ensimmäinen osa on MTB- lisäosassa määritetty nimellä koneen runkokomponentti (Machine Base Component). Tämän komponentin mukaan määritetään koneen nollakoordinaatiston paikka. Nollakoordinaatiston paikka kannattaa selvittää oikeassa koneessa ja liittää virtuaalisen mallin nollakoordinaatisto samaan paikkaan. Muut koneen kinemaattisessa ketjussa määritellyt osat ovat alikomponentteja ketjun edelliselle komponentille, periytyen aina koneen runkokomponenttiin. Kinemaattisen ketjun rakenne vaihtelee luonnollisesti sen mukaan, minkälaista työstökoneita sillä kuvataan.



Kuva 21. Hybridisorvin kinemaattinen ketju ja hierarkian määrittely.

Kuvasta 21 voidaan todeta sorvissa olevan kaksi erillistä kinemaattista ketjua, jotka johtavat koneen rungosta työkappaleeseen. Simuloinnin kannalta molemmat ketjut ovat relevantteja. Nämä ketjut ovat koneen rungosta karan kautta työkappaleeseen menevä ketju ja koneen rungosta johteiden kautta työkaluun kulkeva ketju. Jälkimmäinen on tässä tapauksessa pääketju, sillä se on simuloinnin kannalta mielekkäämpi. Todellisuudessa sorvissa on kuvassa 21 mainittuiden komponenttien lisäksi koneen rungossa kiinni oleva takapylkkä, jonka tehtävä on auttaa kappaleen kiinnittämisessä. Se ei kuitenkaan ole olennainen osa simulointimallia, eikä sitä pystytä ohjaamaan numeerisesti. Tämän vuoksi takapylkkä ei ole kinemaattisessa ketjussa, mutta se täytyy huomioida törmäystarkastelua tehdessä.

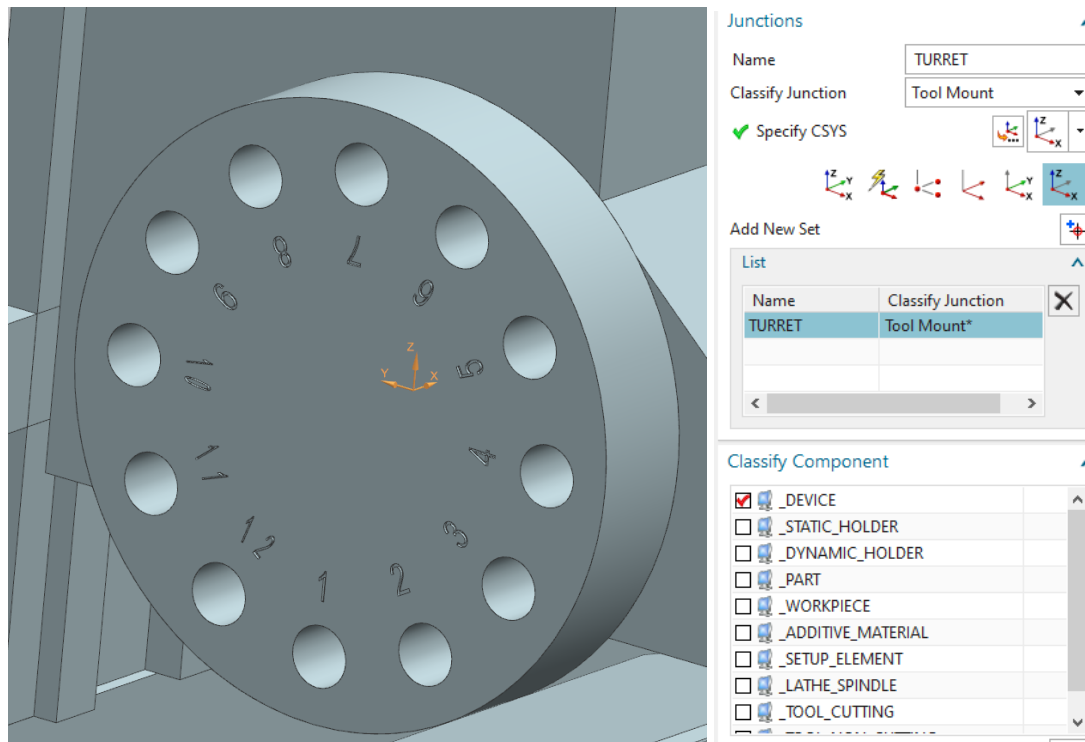
4.4 Konekomponentit ja roolien määrittely

Kinemaattisen ketjun komponenteille tulee määrittää oikeat roolit, jotta ne toimivat työstön simuloinnissa oikein. Eri rooleissa oleville komponenteille tulee määrittää myös geometria ja mahdollinen liityntärajapinta, jotta liike voidaan kuvata oikein. Jokaiselle komponentille ei välttämättä määritellä kumpaakaan. Seuraavassa käydään läpi, miten komponentit määritellään.

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, virtuaalisen koneen tärkein komponentti on sen runkokomponentti. Runkokomponentti pysyy simuloinnissa paikallaan ja muut komponentit liikkuvat suhteessa siihen, aivan kuten fyysisessäkin koneessa. Koneen runkokomponentiksi ei kuitenkaan tarvitse valita koneen varsinaista runkoa, vaan se komponentti, mikä on aina paikallaan suhteessa koneen runkoon ja mihin kinemaattisen ketjun seuraava komponentti fyysisesti kiinnittyy. Kaikkien muiden komponenttien lineaariliikkeet voidaan esittää tämän komponentin koordinaatiston mukaan. Runkokomponenttiin liitettävä koneen nollakoordinaatisto on liitetty tähän komponenttiin, vaikka sen määrittämisessä on hyödynnetty pääkaraa.

Sorvin kinemaattisessa ketjussa runkokomponentin jälkeen tulee Z- akselin suunnassa liikkeen aikaan saava komponentti. Tämä komponentti on todellisuudessa X- suunnan johde, joka liikkuu Z- johteen päällä servomoottorin avulla. Seuraavana kinemaattisessa ketjussa on X- akselin suuntaisen liikkeen aikaan saava työkalurevolverin runko, joka on kiinnittynyt X- johteeseen. Lineaariset liikkeet aikaan saavat komponentit eivät vaadi erillisiä referenssikoordinaatistoja, vaan niiden liikkeet voidaan ilmoittaa koneen nollakoordinaatiston avulla. Näille komponenteille ei tarvitse antaa erityisiä rooleja, vaan niille riittää geometrian määrittely.

Seuraava komponentti kinemaattisessa ketjussa on sorvin työkalurevolveri. Revolverissa on 12 paikkaa työkalun pitimille, jotka voivat olla staattisia tai dynaamisia. Revolverille tarvitsee määrittää oma koordinaatistonsa, jonka X- akseli kulkee sen pyörähdyskeskiön läpi, kuten kuvassa 22 näkyy. Tätä ei voida toteuttaa sitomalla liikettä koneen nollakoordinaatistoon. Rooliksi revolverille valitaan listasta `_DEVICE` ja sen koordinaatiston rooliksi *Tool Mount*. Tämä mahdollistaa työkalujen ja pitimien kiinnittämisen työstön simuloinnissa.



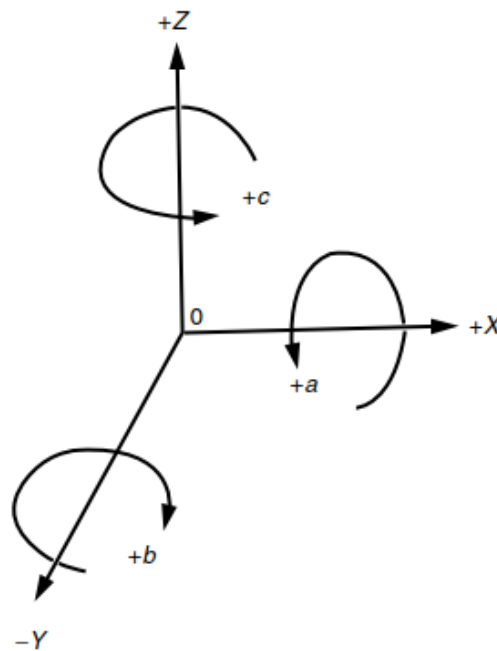
Kuva 22. Nollakoordinaatistosta eroava referenssikoordinaatisto.

Samaan tapaan määritellään koordinaatit jokaiselle työkalun pitimen paikalle. Niiden komponenteille ei määritetä erillistä geometriaa, mutta niille määritellään koordinaatisto, jonka rooliksi valitaan kohta `_STATIC HOLDER`. Jokaisen paikan ID merkitään työkalupaikan numeron mukaan. Näihin liitosrajapintoihin kiinnitetään työkalupitimiä, joille täytyy mallintaa vastaava rakenne MTB- lisäosan avulla. Työkalupitimille määritellään kaksi liitosrajapintaa. Ensimmäinen määrittää kiinnityskohdan työstökoneeseen ja toinen työkalun kiinnityksen.

Koneen karan avulla määritetään koneen työstötaso. Karan tietopaikkaa kuvataan virtuaalisessa mallissa komponentti, jolla ei ole geometriaa, mutta sillä on oma koordinaatistonsa, jonka rooliksi valitaan *Lathe Work Plane Z/X*. Koordinaatiston origo laitetaan esimerkiksi siihen, mihin irrotettava kara laitetaan oikeassa koneessa. Karakomponentin rooliksi valitaan `_LATHE_SPINDLE`. Tämän komponentille tehdään geometriaton lapsikomponentti, jolla on oma koordinaatisto. Tämän rooliksi asetetaan `_SETUP_ELEMENT`. Tämä kuvaa todellisuudessa työkappaleen kiinnityksessä käytettävää kiinnintä.

4.5 Liikeakseleiden määrittely

Työstökoneet toimivat lähes aina karteesisissa koordinaatistoissa, eli suorakulmakoordinaatistoissa. Työstökoneita ohjataan erilaisia liikekäskyjä käyttämällä tämän koordinaatiston eri pisteisiin. Esimerkki karteesisesta koordinaatistosta on esitetty kuvassa 23. Eri työstökoneissa koordinaatistot voivat olla eri asennoissa.



Kuva 23 Karteesinen koordinaatisto (Youssef 2008, s.290)

Työstökoneen oikeanlaisen toiminnan kannalta on tärkeää, että liikeakselit ovat määritetty oikein. Liikeakseleiden oikein määrittely vaikuttaa esimerkiksi siihen, liikkuuko kone simulaatiossa oikealla tavalla ja generoiko se G- koodia oikeassa muodossa. Lisäksi mallin avulla voidaan huomata liikerajojen ylitykset, jos akselit ja niiden rajat ovat määritetty oikein.

Liikeakselit tulee määrittää kinemaattisessa mallissa kaikille liikkuville komponenteille. Akselit voidaan määrittää komponentteihin niiden määrittämisvaiheessa sidottujen koordinaatistojen avulla. Kaikki lineaariakselit voidaan ilmoittaa koneen nollakoordinaatiston avulla. Nämä akselit määritetään samoihin komponentteihin, mille edellisessä kappaleessa määritettiin geometria, mutta ei omaa koordinaatistoa. Nämä komponentit ovat tässä tapauksessa Z- ja X- johteet.

Liikeakselia määrittäessä sen nimeäminen on tärkeää, jotta virtuaalinen NC- ohjain osaa käsitellä sitä oikein. Muita tärkeitä määrittäviä ominaisuuksia ovat määrittämiseen käytettävä koordinaatisto, suunta, akselin numero, tyyppi ja onko se NC- ohjattava. Kuvassa 24 on esitettyä liikeakseleiden määrittämiseen käytettävä käyttöliittymä ja miten akselin määritysdialogi vaikuttaa koneen kuvaukseen MTB:ssä. Samassa dialogissa määritetään koneen alkuperäinen asema (initial position). Tämä piste saadaan mittamalla etäisyys koneen nollakoordinaatiston (machine zero junction) ja työkalun kiinnitys-rajapinnan (tool mount junction) välillä sekä X, että Z suunnassa.

Machine Tool Navigator - Machine Tool Builder

Name	Classification	Junctions	Axis Name	Initial ...	NC Axis
GF_HYBRID					
MACHINE_BASE	_MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO*			
SPINDLE	_LATHE_SPINDLE	WORKPLANE	C	0	✓
SETUP	_SETUP_ELEMENT	PART_MOUNT_JCT			
FIXTURE	_SETUP_ELEMENT				
PART	_PART_SETUP_ELEMENT				
BLANK	_WORKPIECE_SETUP_ELEMENT				
CHUCK HOLDER	_STATIC HOLDER	CHUCK_MOUNT_JCT			
Z_SLIDE			Z	502	✓
X_SLIDE			X	231.422	✓
TURRET	_DEVICE	TURRET*	TURRET	0	
POCKET_01	_STATIC HOLDER	T1			
POCKET_02	_STATIC HOLDER	T2			
POCKET_03	_STATIC HOLDER	T3			
POCKET_04	_STATIC HOLDER	T4			
POCKET_05	_STATIC HOLDER	T5			
POCKET_06	_STATIC HOLDER	T6			
POCKET_07	_STATIC HOLDER	T7			
POCKET_08	_STATIC HOLDER	T8			
POCKET_09	_STATIC HOLDER	T9			
POCKET_10	_STATIC HOLDER	T10			
POCKET_11	_STATIC HOLDER	T11			
POCKET_12	_STATIC HOLDER	T12			

Edit Axis

Name: Z

Axis Name: Z

Junction: MACHINE_BASE@MA

Direction: Z↑

Axis Settings

Axis Type: Linear

NC Axis:

Axis Number: 3

Initial Value [mm]: 502.0000

Upper Limit [mm]: 1185.0000

Upper Soft Limit [mm]: 1185.0000

Lower Soft Limit [mm]: 0.0000

Lower Limit [mm]: 0.0000

Dynamic Properties

Preview Motion

Step Size: 10.0000

Current Value: 502.0000

Kuva 24 Kinemaattisen ketjun muokkaus MTB:ssä

Kuvauksesta tulee myös ilmi edellisessä kappaleessa määritetyt eri komponenttien roolit sarakkeessa "Classification" ja niiden liitosrajapinnat sarakkeessa "Junctions". Kuvan 24 mukainen akselien määrittäminen tehdään kaikille liikkuville komponenteille. Tässä tapauksessa ne ovat kara, Z- johde, X- johde ja työkalurevolveri. Liitosrajapinnat vaativat kappaleelle määritetyn referenssikoordinaatiston, johon liitosrajapinta voidaan määrittää.

Akselien dynaamisia ominaisuuksia tarvitaan, kun mallia halutaan määrittää vielä tarkemmin. Tähän voidaan määrittää kunkin akselin maksimi nopeudet, kiihtyvyydet, syysäykset ja karkea- ja hienotarkkuudet. Tämä vaatii kuitenkin syvempää perehtymistä sorvin servomootoreihin ja muihin toimilaitteisiin, eikä se kuulu tämän työn osa-alueisiin.

5. HYBRIDIVALMISTUSMENETELMIEN IMPLEMENTOINTI

Tässä luvussa käsitellään aiemmissa luvuissa läpikäytyjä teorioita ja menetelmiä ja tarkastellaan, kuinka niitä voidaan soveltaa sorvin tapauksessa. Ensimmäisessä luvussa käsitellään hiontaa varten tehtyjä muokkauksia ja tarkastellaan lastuamismesteen puhdistusjärjestelmän tarkempaa toimintaa.

Toisessa kappaleessa käsitellään suorakerrostuksessa käytettävän laserpään kiinnitysratkaisuja, sen säilyttämistä muun työstön aikana ja tarkastellaan suorakerrostuksessa käytettävän metallijauheen suodattamisjärjestelmää. Lisäksi pohditaan teorian perusteella sopivia suorakerrostusparametrejä ja kuinka niitä voidaan säätää sopiviksi.

Kolmannessa kappaleessa keskitytään aiemmin tarkastellun virtuaalisen mallin soveltamiseen GF NDM 16/100- sorvin työstöprosessien simuloinnissa. Tässä kappaleessa käydään läpi tärkeimpiä määritettäviä asioita virtuaalisen mallin toiminnan kannalta sorvin tapauksessa. Näitä ovat esimerkiksi työstökonekohtainen kinemaattinen ketju, koneen nollakoordinaatiston paikka, työkalun ja työkappaleen kiinnitysrapiinat.

Sorviin täytyy tehdä useita muokkauksia, jotta se pystyy vastaamaan uusien työstömenetelmien asettamiin vaatimuksiin. Näitä vaatimuksia tarkasteltiin luvuissa 2 ja 3. Alla olevaan taulukkoon on listattuna menetelmien implementoinnista aiheutuvia riskejä ja menetelmiä niihin vastaamiseksi.

Taulukko 4 Hybridisorvin riskianalyysi.

Ongelma	Riski	Ratkaisu
Laikan kiinnitys koneeseen	Adapteri irtaoo koneesta työstön aikana	Adapteri, joka on suunniteltu koneen kiinnityksen ja käytettävien hiomalaikkojen mukaan.
Laikan tasapainotus	Laikka hajoaa epätasapainon vuoksi	Laikan tasapainotus tehdään tässä työssä manuaalisesti tasapainotusjakkia käyttäen. Laikan adapteri on suunniteltu siten, että tasapainotuksen jälkeen systeemi voidaan sellaisenaan siirtää suoraan sorviin ja teroitaa muotoonsa.

Laikan muotoon teroitus	Pinnanlaadun heikkeneminen	Muotoon teroitus tapahtuu kaaraan paikoittuvalla työkalulla, jossa on kiinni timanttinen kärki. Muotoon teroitus tapahtuu NC-ohjatusti.
Hiomalaikan mittaus	Hiomalaikan nimellismitan arvo vaihtelee todellisesta. Arvon vaihtelun suuruus on iso verrattuna käytettävään lastuamissyvyteen.	Käytetään esiasetuslaitetta mahdollisuuksien mukaan, jotta voidaan laskea kunkin hiomalaikan todellinen X- ja Z- suunnan offset- arvo.
Koneen tarkkuus	Mittatarkkuuden vaihtelu	Koneen NC- akseleiden kalibrointi. Pyörivien työkalujen pyörähdyskeskiö on asetettu heittokellon avulla keskeiseksi C- akselin pyörimiskeskiön kanssa.
Laikan pyöritys	Moottori ei riitä pyörittämään hiomalaikkaa sen suuren hitausmomentin vuoksi	Pyöriville työkaluille tarvitaan tarpeeksi tehokas moottori. Moottorin mitoitus tehdään liikkeellelähtömomentin ja hionta-voimista aiheutuvan momentin perusteella. Toinen vaihtoehto on tehdä laikan kiihdyttämistä varten aliohjelma, joka kiihdyttää laikkaa diskreetisti.
Lastuamisnesteen puhdistus	Pinnanlaadun heikkeneminen likaisen lastuamisnesteen vuoksi	Hionnan lastuamisneste puhdistetaan suodattimen avulla, sillä hiomaprosessiin ja kiven puhdistamiseen on käytettävä puhdasta lastuamisnestettä
Lastuamisnesteen tuominen hiontaprosessiin	Puhdistettu lastuamisneste loppuu kesken hiontaprosessin	Hiontaprosessille mitoitettut lastuamisnestepumput ja suuttimet, joiden avulla saadaan sopiva ti-

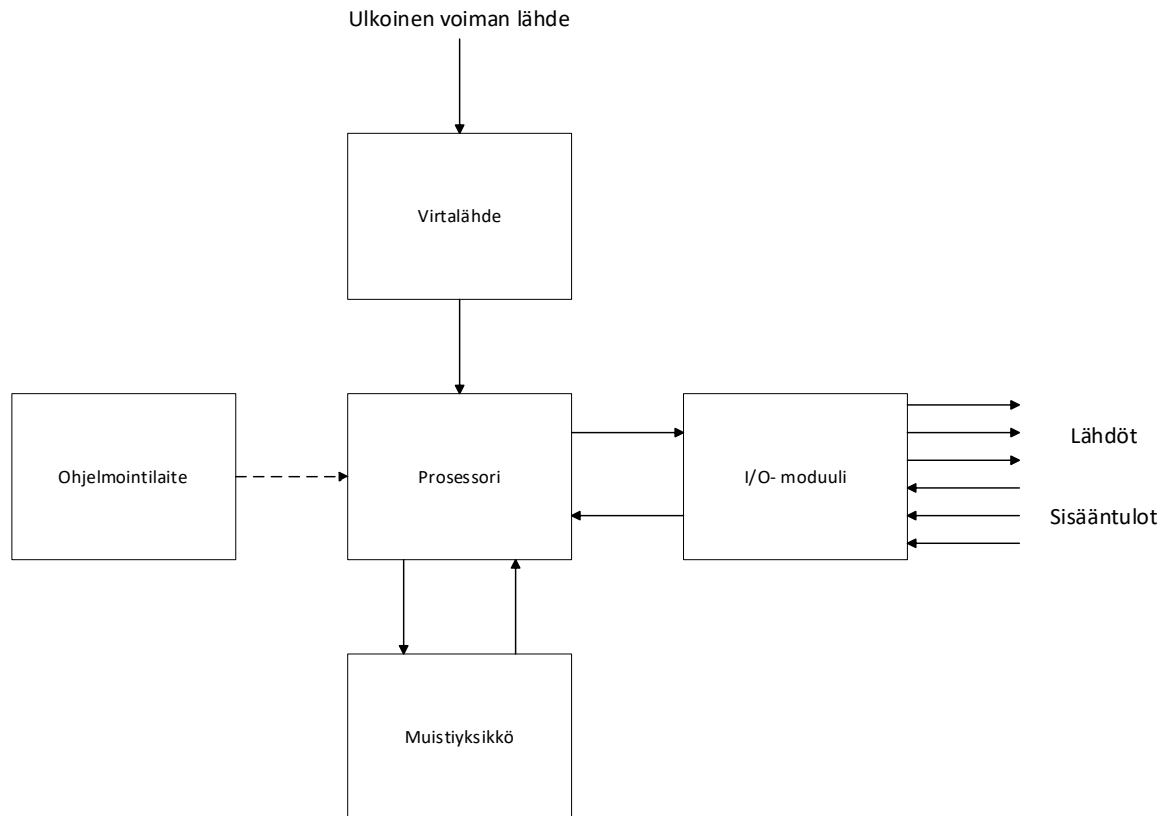
		lavuusvirta ja suihkunopeus hionmalaikan ja työkappaleen kontaktipintaan.
Komponenttien suojaus jauheelta ja hiontajätteeltä	Suorakerrostuksessa käytettävä metallijauhe ja hionnan hienot lastut päätyvät johteisiin aiheuttaen ongelmia ajan myötä	Suojataan Z ja X- johteet esimerkiksi haitarimaisella suojalla hionmalastuilta ja erityisesti suorakerrostusprosessin metallijauheelta. Metallijauhetta varten rakennetaan lisäksi imu- ja suodatusjärjestelmä sorvin katolle.
Koneen ulkopuolen suojaus hionnasta ja suorakerrostuksesta aiheutuvasta hienosta metalliaineksesta	Käyttäjän loukkaantuminen hiomakiven hajoitessa tai hengitystieongelmat metallijauheen joutuessa sisäilmaan	Hionnasta ja suorakerrostuksesta aiheutuvia pienhiukkasia suodatetaan sorvin katolle asennettavan pienhiukkassuodattimen avulla. Suodatin mitoitetaan suodattamaan vähintään 50µm halkaisijaltaan olevia hiukkasia
Käyttäjien suojaus laserivalolta suorakerrostusprosessin aikana	Käyttäjät saavat näkövaurioita laserista	Koneen suoja-pleksin eteen laitetään laserin aallonpituudet suodattava erillinen pleksi, joka on standardin EN 60825-1 mukainen.
Laserpään kiinnitys koneeseen ja suoja-asemaan vienti muiden työvaiheiden ajaksi	Laserpään kohdistuu kiinnittimestä huolimatta liian suuria voimia ja laserkuidun liitosvaurioituu. Tai laserpää on kiinnitetty kiinnittimeen huonosti ja se irtoaa siitä kesken työstön.	Laserpäästä varten rakennetaan kustomoitu kiinnitin, mikä sopii sorvin revolveriin ja sen avulla voidaan estää voimien kohdistuminen herkkään laserkuidun liitokseen laserpäässä. Lisäksi järjestelmä täytyy pystyä kuljettamaan suojaan ergonomisesti sen ollessa pois käytöstä.
Laserkuidun, veden, jauheen ja argonin tuonti suorakerrostusprosessiin	Kuitu ja letkut kuluvat sorvin jatkuvassa liikkeessä, kun ne ovat kosketuksissa työstötilan lian kanssa	Kuitu ja letkut suljetaan suoja-putken sisään, joka on eristetty työstötilan lialta. Lisäksi suoja-

		putki ripustetaan kiskossa liikkuviin kelkkoihin, jotta sen liikuttaminen on helpompaa.
Laserpään suojaus muiden työvaiheiden aikana	Laserpää saattaa vaurioitua kipinöiden ja lastuamisjätteen vuoksi muiden työvaiheiden aikana	Sorvin työstötilan ja komponenttitilan väliseen seinään tehdään ovi ja sorvin kattoon asennetaan tukeva kiskosysteemi. Näiden avulla laserpää voidaan kuljettaa komponenttitilaan nopeasti ja turvallisesti, kun sitä ei käytetä.

Hybridisorvilla pitää pystyä hiomaan, sorvaamaan ja suorakerrostamaan vähintään 120 mm halkaisijaltaan olevia työkappaleita.

5.1 PLC ja siihen liittyvät muokkaukset

Kaikkia hiontaa ja suorakerrostusta varten lisättyjä komponentteja ei voida käyttää tekemättä joitakin muokkauksia sorvin logiikkaan. Rakennetusta järjestelmästä saadaan dataa asennettujen antureiden avulla ja tätä anturidataa täytyy käsitellä jotenkin ohjelmassa. Tätä antureilta saatavaa dataa käsitellään koneen ohjelmoitavassa logiikassa, eli PLC:ssä (Programmable Logic Control). Logiikkaan on myös lisättävä uusia apukäskyjä hybridivalmistusmenetelmien vaatimille toiminnoille ja ohjattava ne kytkentöjen avulla vaikuttamaan oikeaan laitteeseen. PLC:n lähtöjen tai sisääntulojen data voi olla binääristä tai se voi saada numeroarvoja määrättyltä väliltä. Lisäksi PLC:n ominaisuuksiin voi kuulua analoginen tai digitaalinen ohjaus, esimerkiksi PID- säädin. PLC:llä voi suorittaa myös aritmeettisia tai matriisien laskutoimituksia, joita ohjelma muokkaan sisääntulojen mukaan uusiksi lähdoiksi. (Groover, 2008 s.266)



Kuva 25 PLC:n komponentit. (Groover, 2008 s. 264 mukailten).

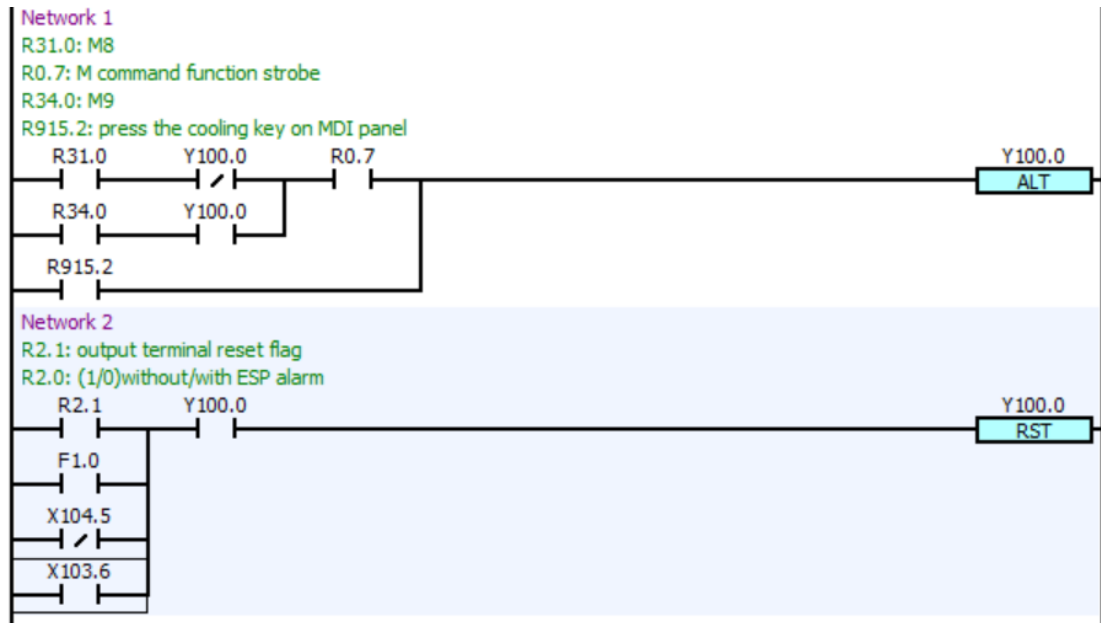
järjestelmään asennettavat komponentit ja niiden anturit antavat PLC:lle tietoa erilaisissa muodoissa. Yleisimpiä antureita ovat rajakytkimet, painonappulat, ajastimet, viivereleet ja fotodiodit. Nämä liittyvät diskreettiin prosessin ohjaukseen, eli ne antavat informaatiota binäärisessä muodossa. PLC- ohjelma itsessään hyödyntää näiltä antureilta saamaansa dataa käyttäjän ohjelmoimalla tavalla. Esimerkiksi niistä voi tehdä erilaisia laskureita tai asettaa ajastimia päälle, kun jokin tietty signaali tulee voimaan.

Logiikka vastaanottaa esimerkiksi binäärisiä signaaleita 1 ja 0. Tämä voidaan tulkita tarkoittavan ON/OFF, tosi/epätosi, korkea jännite/matala jännite, riippuen sovelluksesta. Mahdollista on myös liittää numeerista dataa jatkuvaa analogista dataa signaaliin, minkä suuruus riippuu käytettävän muistin koosta. Nämä signaalit tulevat sisääntuloina antureilta I/O moduuliin, josta ne menevät prosessorille. Prosessori suorittaa ennalta määrättyjä loogisia operaatioita ja muokkaa lähtösignaaleita sen mukaan, mitä siihen ohjelmoitu. Yhden PLC- syklin jälkeen prosessori on laskenut lähtösignaalien arvon sisään tulevien signaalien perusteella ja siihen kytketyt toimilaitteet menevät toimivat sen mukaisesti. Syklin kesto on tavallisesti 25-1000ms. Tässä ajassa koko PLC- ohjelma täytyy käydä läpi, mikä tulee ottaa huomioon ohjelmaa tehdessä. (Groover, 2008 s. 264) Las-tuamistestien puhdistusjärjestelmän tapauksessa säiliöiden pinnantasoanturilta saatu

tilatieto toimii systeemin sisääntulona, jonka perusteella prosessori asettaa lähtösignaalin, joka kytkee siirtopumpun toimimaan.

Suodattamattoman ja suodatetun lastuamismesteen säiliöissä on kummassakin pinnantasoaanturit. Suodattamattoman mesteen säiliön anturissa on 3 erillistä tapausta, joiden tieto täytyy saada välitettyä ohjauksen logiikalle. Suodatetun mesteen säiliössä tarvitaan vain kaksi rajaa, minimi ja maksimi. Lastuamismesteen suodatusjärjestelmän toiminta on kuvattu tarkemmin kappaleessa 5.1. Järjestelmältä saatavan tilannedatan avulla voidaan saada systeemistä automaattinen. Lastuamismesteen suodatusjärjestelmä toimii anturidata avulla automaattisesti, sillä PLC osaa kytkeä siirtopumpun päälle ja pois kummankin säiliön antureiden datan avulla. Itse puhdistusyksikössä on lisäksi anturointia, mutta se on toimitettu valmiina kokonaisuutena, jossa on oma ohjausyksikkönsä. Sitä ei siis tarvitse kytkeä sorvin logiikkaan. Puhdistusyksikön toiminta on selitetty lyhyesti kappaleessa 5.1.

Työssä tarkasteltavan sorvin logiikka on ohjelmoitu tikapuukaaviolla (Ladder logic, LD). Tämä PLC ohjelmointikieli on yleisesti hyvin käytetty, sillä ohjelmoinnissa ei tarvita välttämättä kirjaimista koostuvaa näppäimistöä. Muut IEC 1131-3 standardin mukaiset ohjelmointikieliset ovat *Function block diagram* (FBD), *sequential function chart* (SFC), *instruction list* (IL) ja *structured text* (ST). PLC- kielenä LD on graafinen ja helppolukuinen selaiselle, joka työskentelee sähkökaavioiden parissa, mutta ei välttämättä ymmärrä ohjelmistoista ja perinteisistä ohjelmointikielistä. Yleisimmät LD- ohjelman komponentit ovat käämit (coil), NO ja NC kontaktorit. Käämit kuvaavat ohjelmassa fyysisen systeemin moottoreita, solenoideja, releitä, ajastimia tai laskureita. NO ja NC kontaktorit puolestaan kuvaavat sisääntulojen kytkimiä, relekontaktoreita ja muita saman kaltaisia komponentteja. (Groover, 2008 s.267) Tämän työn tapauksessa ohjelmiin lisätään NC- ohjauksessa käytettäviä M- käskyjä, eli apukäskyjä. NC- ohjelmaan kirjoitettu M- käsky voidaan PLC- ohjelmassa asettaa muuttamaan jonkin bitin binääristä arvoa, joka on yhteydessä I/O- moduuliin ja sen kautta ohjaa jotain fyysistä toimilaitetta. M- käskyyn voidaan lisätä myös jokin ei binäärinen arvo. Tällainen tapaus tulee tässä työssä kyseeseen laseria ja sen tehoa ohjatessa. Tällaista tapausta varten tarvitaan analogiaohjaus fyysisen toimilaitteen ja PLC:n välille. Kuvassa 26 on esiteltynä muokattu lastuamismesteen käytön PLC- ohjelma



Kuva 26. Lastuamismesteen PLC- ohjelma.

Ohjelman rakenne on molemmille lastuamismestekäyttöille sama. Ainoastaan ohjelmoinnissa käytettävien bittien nimet muuttuvat, joten ei ole mielekäs esitellä tässä molempia ohjelmia. Lastuamismesteen ohjelma koostuu NO – ja NC – porteista ja halutun ulostulon manipulaattorilohkoista. Ulostulona lastuamismesteen PLC- ohjelmassa on bitti Y100.0, mikä kuvaa toista lastuamismestepumppua. Pumppua ohjataan päälle ja pois päältä NC- ohjelmassa käskyillä M08 ja M09. Ohjelman rungosta nähdään myös, että pumppua voidaan ohjata käyttäjäpaneelin painikkeella.

Lastuamismesteen lisäksi PLC- ohjelmaa pitää muokata laserin ja jauheensyöttimien käytön osalta. Jauheensyöttö voidaan toteuttaa yhdellä tai kahdella materiaalilla samanaikaisesti. Tällöin molemmille jauheensyöttimille tarvitaan omat M- käskynsä. Jauheensyöttimen logiikassa ohjataan jauhetta ja kuljetuskaasua erillisillä signaaleilla, mutta niiden käyttö voidaan toteuttaa käyttäjän kannalta helpommin ohjaamalla kuljetinkaasua ja jauhetta yhdellä käskyllä.

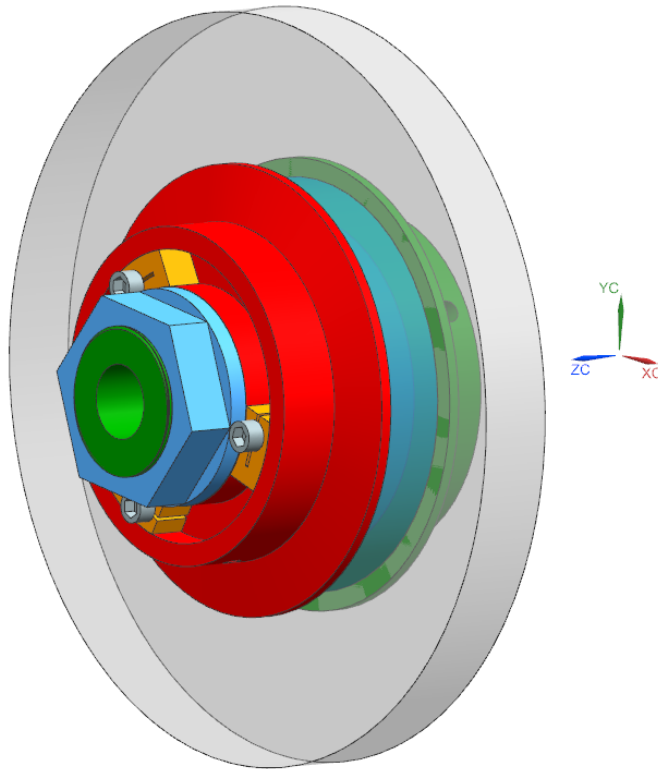
Laser toimii sorvin logiikassa olevan kolmannen pyörivän akselin analogiohjauksella. GF NDM 16/100 sorvissa ei ole todellisuudessa kolmatta pyörivää akselia, joten sitä on hyvä käyttää laserin ohjaukseen. Ohjaus toteutetaan siten, että laser laitetaan päälle akselin päälle kytkevällä M- käskyllä ja sen teho määritetään akselin pyörimisnopeutena. Tämän lisäksi laserin ohjauksen päälle kytkeminen vaatii manuaalisen bitin päälle kytkemisen. Tätä hyödynnetään siten, että laser- moodin ollessa käytössä revolveria ei voida käyttää. Revolverin käyttö rikkoisi suorakerrostuspään.

5.2 Hionnan implementointi ja lisätyt komponentit

Hiomalaikan koneeseen kiinnittämistä varten tarvitsee suunnitella ja valmistaa uniikki laikan adapteri, sillä koneessa oleva pyörivien työkalujen kiinnitys ei vastaa muiden valmistajien kiinnitystä. Tarkat työkuvat hiomalaikan komponenteista ja muista valmistetuista osista löytyvät työn liitteistä. Adapteri valmistetaan kokonaisuudessaan laboratoriossa olevilla työstökoneilla. Tällä tavoin säästetään aikaa, jos adapteriin tarvitsee tehdä muutoksia, joiden tarvetta ei huomata suunnitteluvaiheessa. Valmistuksessa hyödynnetään sorvia, jrsinkonetta ja työstökeskusta. Hiomalaikan CAD- malli on esitetty kuvassa 27 ja sen jokainen komponentti on värjätty eri värillä. Taulukossa 5 on selitetty adapterin komponenttien tarkoitukset.

Taulukko 5. Hiomalaikan adapterin osien selitykset

Komponentti	Väri	Tarkoitus
Kiinnitinruuvi	Sininen	Puristaa ulko- ja sisälaippaa hiomalaikkaa vasten, jolloin hiomalaikka ei pääse pyörimään hionnan aiheutuvien voimien takia.
Sisälaippa	vihreä	Toimii kiinnityspintana laikalla ja auttaa sen paikallaanpitämisessä. Sisäpuolinen profiili kiinnittyy sorvin pyöriviin työkaluihin.
Ulkolaippa	Punainen	Puristuu ruuvien voimasta hiomalaikkaa vasten ja pitää sen paikallaan. Lisäksi toimii kiinnityspintana vastapainoille
Vastapainot	Oranssi	Tasapainottavat hiomalaikan.



Kuva 27. Hiomalaikan ja adapterin CAD-malli.

Tärkeä osa hiomalaikan toiminnan kannalta on kuvassa 27 sinisellä näkyvä kiinnitinruuvi. Kiinnitinruuvi kiristää adapterin ulko- ja sisälaipan hiomalaikkaa vasten. On tärkeää, että se on riittävän kireällä, mutta ei liian. Lisäksi kuvassa 27 punaisella ja vihreällä näkyvien laippojen vähimmäisulkohalkaisija on määritetty standardissa ISO 16089-2015 sivulla 102. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat laikan sisäreiän koko ja ulkohalkaisija.

Laikan ulkohalkaisija on testausvaiheessa 200 mm ja sisäreiän halkaisija on 50,8 mm. Sisäreiän halkaisijan ollessa enemmän kuin 0,2 kertaan laikan ulkohalkaisijan mitta, tulee laipan ulkohalkaisija d_{gw} suunnitella siten että se on kaavan

$$d_{gw} > d_b + 2 * (0,17 * M)^a \quad (18)$$

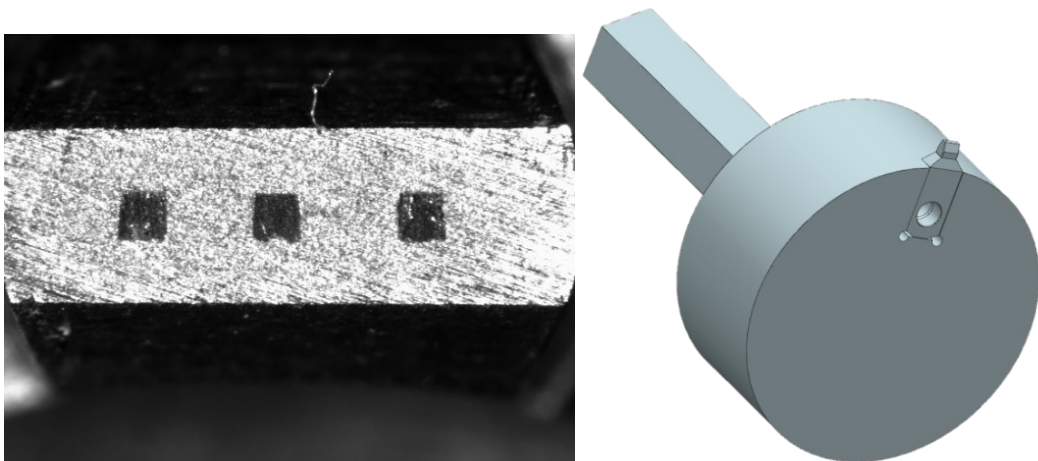
mukainen, missä M hiomalaikan radiaalinen leveys, d_b on sisäreiän halkaisija, ja a standardista ISO-666-2012 sivulta saatava eksponentti, joka saa arvoja 0 ja 1 väliltä.

Näiden avulla voidaan laskea laikan radiaalinen leveys kaavalla

$$M = \frac{d_{gw} - d_b}{2}, \quad (19)$$

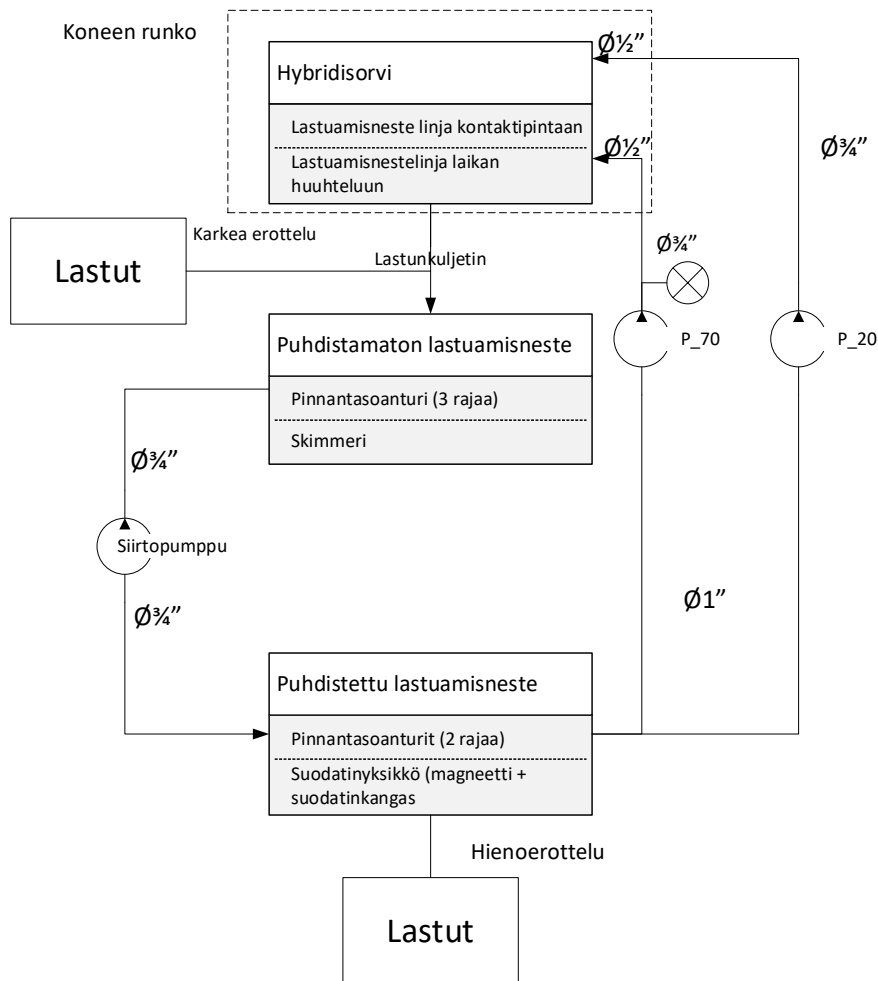
missä d_{gw} on laikan halkaisija ja d_b on sisäreiän halkaisija. Laikan minimi ulkohalkaisijan laskeminen riippuu vain edellä mainituista tekijöistä, eikä siihen vaikuta esimerkiksi käytetty sidosmateriaali tai työstönopeus. Yhtälöiden 18 ja 19 mukaan laskettuna laipan minimihalkaisijaksi saadaan 76,16 mm. Testeissä käytettävien laippojen maksimihalkaisija on 120 mm, joten se on standardin ISO-16089-2015 mukainen.

Hiomalaikan timantoinnissa käytetään tarkoitukseen suunniteltua ja valmistettua timantointipäätä, joka voidaan kiinnittää sorvin pääkaraan vetokärjen paikalle. Varsinainen timantti kiinnitetään timantointipäähän ja se asemoidaan oikein sorvin työstötasoon nähdessä. Testausvaiheessa käytettävä on kolmitimanttinen Winterin valmistama kiinteä timantointityökalu. Timantointityökalu on esitetty kuvassa 28. Kuvassa oikealla näkyy timantointityökalun pidike, mikä voidaan asentaa sorvin karaan kiinni. Kuusikulmaisen profiilin ansiosta pidike kiinnittyy karaan samaan asentoon, kun C- akselin asema tiedetään. C- akseli ajetaan asemaan käyttämällä paikotusmoodia ja se asemoidaan siten, että timantointityökalu on kohtisuorassa hiomalaikan pinnan kanssa.



Kuva 28. Winter kiinteä timantti mikroskoopilla kuvattuna.

Lastuamisneste- ja sen suodatusjärjestelmän implementointi on näkyvin ja työläin yksittäinen osa hybridisorvin rakennusprojektia. Lastuamisnestejärjestelmää ei ole määritelty hiomakoneita koskevissa standardeissa, mutta sen avulla voidaan säästää kustannuksissa, kun käytetty lastuamisneste voidaan käyttää uudelleen. Likainen lastuamisneste siirretään sorvin lastunkuljettimen avulla tankkiin, josta siirtopumppu siirtää puhdistamattoman nesteen puhdistusyksikölle. Ennen tätä vaihetta lastuamisnesteestä erotellaan isoimmat lastut painovoiman avulla. Sorvin kuljetinjärjestelmän hihna nousee lopussa ylöspäin, jolloin lastut kulkeutuvat kuljettimen mukana pois ja neste jää alas ja siirtyy tankkiin. Kuva 29 havainnollistaa lastuamisnesteiden puhdistusjärjestelmää ja sen toimintaa.



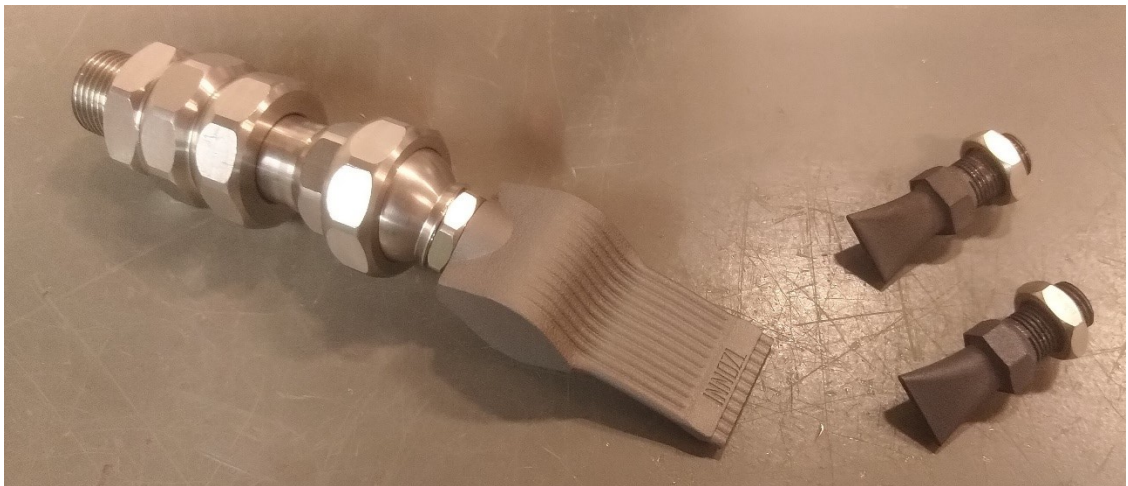
Kuva 29. Lastuamisnesteen suodatuksen kaavio.

Likaisen nesteen säiliössä on pinnantasomittari, johon voi ohjelmoida eri pinnankorkeus-rajaja. Näiden rajojen perusteella sorvin logiikka ohjaa siirtopumppua siten, että se ei pumpkaa säiliötä liian tyhjäksi. Tämä johtaisi pumpun käymiseen ilman nestettä ja se aiheuttaa pumpun ylimääräistä kulumista. Suodattamattoman nesteen säiliössä on lisäksi skimmeri, jonka tehtävä on poistaa johteiden voitelussa käytettävä öljy lastuamisnesteestä. Kuvia järjestelmästä ja sen laitteista on esitettyä liitteessä F.

Likainen lastuamisneste pumpataan siirtopumpun avulla suodatinjärjestelmään, missä nesteestä erotellaan ensin jäljelle jääneet metallihiukkasen magneettisen erottelijan avulla. Tämän jälkeen neste kulkeutuu suodatinkankaan läpi säiliöön, mistä se voidaan jälleen pumpata takaisin työstöprosessiin. Puhdistetun nesteen säiliössä on myös pinnantasianturit, jotka tarkastelevat, onko puhdas neste säiliön ylä- vai alarajalla. Tämä tieto lähetetään jälleen sorvin logiikalle, joka ohjaa pumppuja. Jos puhtaan nesteen säiliön anturi on ylärajalla, logiikka sammuttaa siirtopumpun, kunnes ylärajalta on poistuttu. Jos anturi on alarajalla, ei prosessiin nestettä pumpaavia pumppuja voida käyttää, ennen kuin likaista nestettä on puhdistettu tarpeeksi. Anturidatan perusteella annetaan

käyttäjälle tieto siitä, onko järjestelmässä liikaa vai liian vähän lastuamismestettä. Lastuamismestettä on liikaa silloin, jos puhdistetun nesteen säiliö on täynnä ja likaisen nesteen säiliö on vähintään korkeudessa, josta siirtopumppu aloittaa pumppaamisen. Liian vähän lastuamismestettä on silloin, kun puhdistamatonta nestettä on säiliössä anturin alarajalla ja puhdistetun nesteen säiliön ylärajaa ei ole saavutettu.

Sorvissa on valmiina kanava lastuamismestelle, joka syötetään revolverin läpi työkapaleelle. Tämän kanavan alkuperäinen pumppu pystyy tuottamaan noin 5 baarin paineen. Tämä ei kuitenkaan ole riittävä painetaso hiontaprosessin vaatimuksiin. Alkuperäistä pumppua käytetään siirtopumppuna siirtämään puhdistamatonta nestettä puhdistimelle. Hiontaprosessin jäähdytystä ja voitelua varten tarvitaan kaksi korkeamman painetaso pumppua. Nämä näkyvät kuvassa 30 nimillä *P_20* ja *P_70*. Numero tarkoittaa kyseisen pumpun antamaa maksimipainetta baareina. Puhdistusjärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää, että varsinaisen puhdistusjärjestelmän ja likaista nestettä siirtävän pumpun kapasiteetit riittävät ylläpitämään puhtaan nesteen määrää hiontaprosessille. Lisäksi siirtopumpun ja suodattimen kapasiteettien tulisi olla lähellä toisiaan. Varmuuden kannalta suodattimen kapasiteetin tulee olla hieman suurempi, jotta se ehtii suodattamaan kaiken likaisen nesteen. Suodatusjärjestelmän toimittajan ilmoittama kapasiteetti on 50 l/min. Siirtopumpun tilavuusvirran kapasiteetti on ilmoitettu samaksi, ja testeissä suodatusjärjestelmä on toiminut hyvin siirtopumpun kanssa.

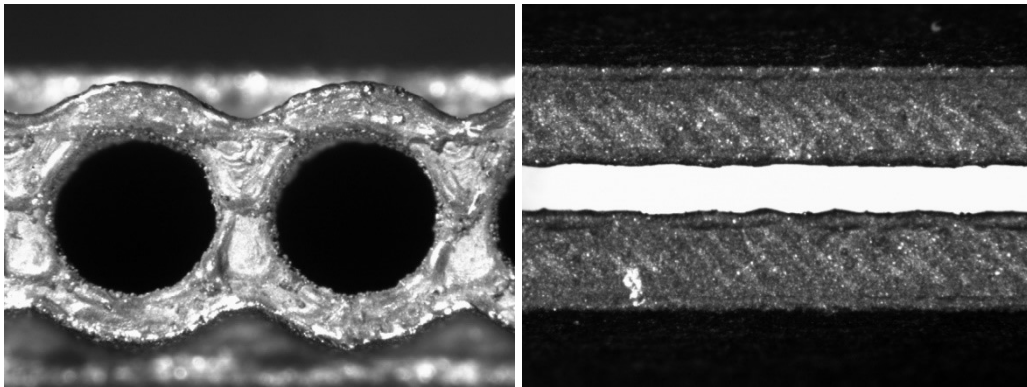


Kuva 30. Lastuamismesteen suuttimet.

Lastuamismesteen tilavuusvirran kohdistaminen sopivalla nopeudella ja paineella tehdään erityisten suuttimien avulla. Nämä suuttimet ovat suunniteltu erityisesti hiontaa varten ja ne ovat valmistettu PBF- menetelmällä (engl. Powder Bed Fusion). Kuvan 30 vasemmanpuoleinen suutin kohdistaa lastuamismesteen hionnan kontaktipintaan, kun taas

kaksi oikeanpuoleista suuttinta puhdistavat hiomalaikkaa. Vasemmanpuoleisen suuttimen valmistusmenetelmänä PBF on toimiva, sillä suuttimen nokkaan johtavat putket ovat ohuuden lisäksi kaarevia. Tällaisen valmistaminen perinteisiä työstömenetelmiä hyödyntäen olisi erittäin haastavaa ja kallista. Suuttimien kohdistaminen oikeaan asentoon onnistuu metallisten putkien avulla, joissa on pallonivel päässä.

Suuttimilta tulevan lastuamisnesteen nopeus on tärkeä tekijä hionnan onnistumisen kannalta, kuten luvussa 2 todettiin. Suuttimien aukkojen poikkipinta-alat mitattiin mikroskoopin avulla.



Kuva 31. Lastuamisnestesuuttimet.

Kuvassa 31 vasemmalla näkyvän kontaktipinnan voiteluun käytettävän suuttimen reiän halkaisijaksi mitattiin 1,9 mm ja reikien lukumäärä on 11. Oikealla näkyvän suuttimen aukon korkeus on 0,55 mm ja leveys 12,6 mm. Näitä jälkimmäisiä hiomalaikan huuhteluun käytettäviä suuttimia on kaksi kappaletta.

Tämän perusteella voidaan arvioida suuttimilta lähtevän nesteen nopeudeksi kuvassa 30 olevalle suuttimelle 1

$$Q_{p70} = \frac{11 * v_{suutin_1} \pi d_{suutin_1}^2}{4} \quad (20)$$

ja vastaavasti suuttimille 2 yhteensä

$$Q_{p20} = 2v_{suutin_2} (h_{suutin_2} b_{suutin_2}). \quad (21)$$

Lastuamisnesteen nopeus pyritään pitämään mahdollisimman lähellä hiomalaikan pintanopeutta, jolloin $v_{suutin_1} = v_s$. Sopivaksi tilavuusvirraksi lastuamisnestepumpulle tulee suuttimen poikkipinta-ala huomioon otettuna noin 40 l/min. Tämä jää alle suodatusjärjestelmän kapasiteetin 50 l/min, jolloin prosessi voi olla jatkuva. Huuhteluun tarkoitettun

pumpun ei tarvitse tuottaa vastaavaa nesteen nopeutta kiveen, vaan sen tapauksessa paine on ratkaiseva. Tällöin sen tuottama tilavuusvirta jää huomattavasti pienemmäksi.

Hiomalaikan tasapainotus tapahtuu manuaalisesti tasapainotusjakissa. Adapterin ulkolaipassa olevien vastapainojen avulla hiomalaikka saadaan tasapainotettua luvussa 2.1.4 esitettyjen periaatteiden mukaan. Tasapainotusmenetelmää lukuun ottamatta tasapainotusprosessi on tässä tapauksessa uniikki, sillä tasapainotusta ei voida tehdä laikan ollessa kiinni koneessa. Tasapainotusprosessi etenee seuraavasti Youssef, (2008)

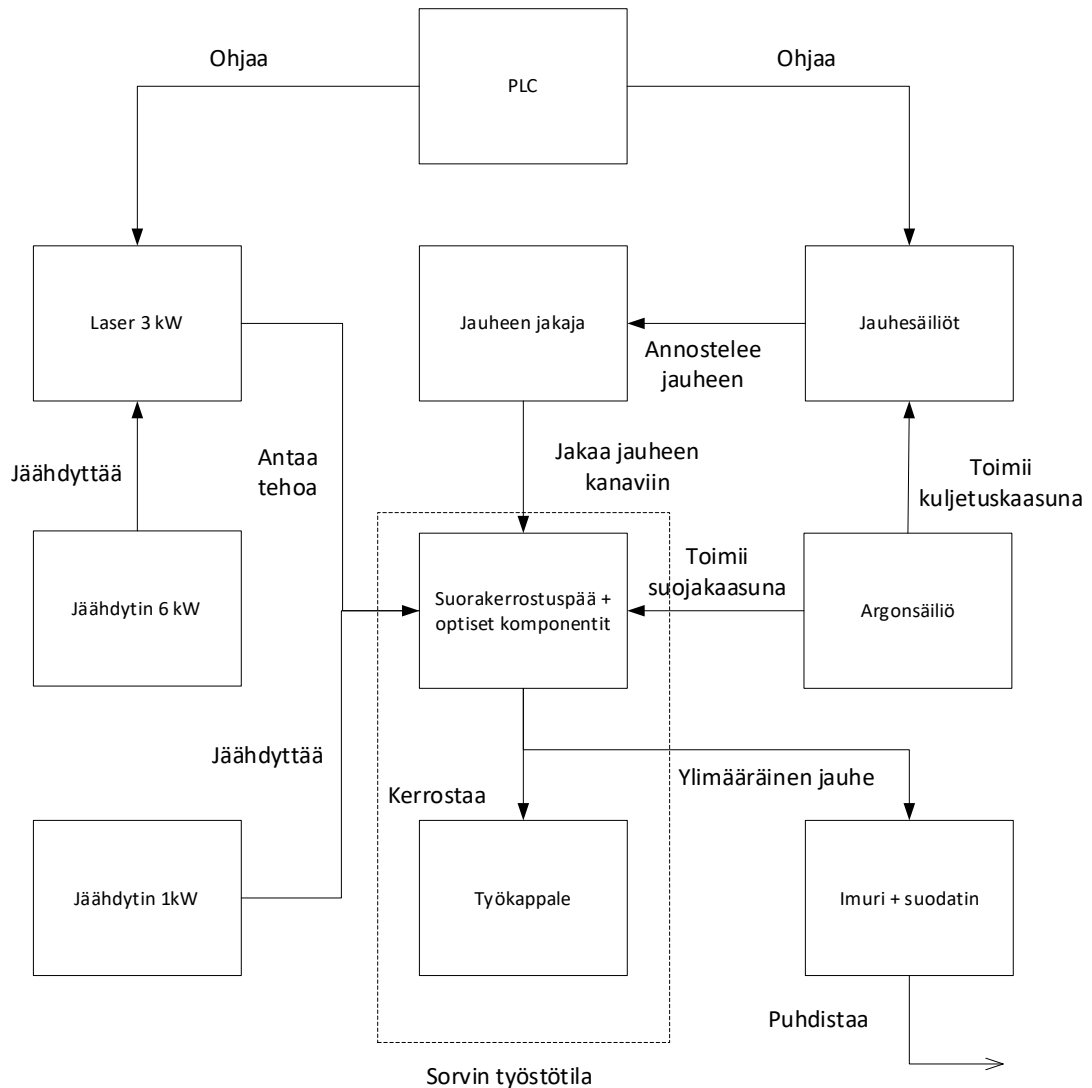
1. Sointikoe hiomalaikalle. Hiomalaikalle tulee tehdä sointikoe aina, kun sitä ollaan asettamassa koneeseen. Sointikokeessa laikkaa kilautetaan jollakin kovalla esineellä. Jos ääni vaimenee nopeasti, laikka on rikki eikä sitä voida käyttää.
2. Kiinnitys adapteriin ja adapterin kiristys sopivaan momenttiin hiomalaikan tyyppin mukaan. Tämän jälkeen hiomalaikkaa ei irroteta adapterista, ennen hionnan päättymistä.
3. Adapteri ja laikka kiinnitetään tarkoitusta varten valmistettuun tasapainotusakseliin, joka voidaan asettaa tasapainotusjakkiin. Tasapainotusakselin kiinnitysprofiili on samanlainen kuin kiinnitysprofiili sorvin pyörivissä työkaluissa. Tämä mahdollistaa luotettavan tasapainotuksen koneen ulkopuolella.
4. Ulkolaipassa olevia vastapainoja siirretään sopivasti, jotta tasapainokohta saadaan laikan keskelle, eikä se pyörähdä pois asetetusta asennosta.
5. Hiomalaikka siirretään esiasetuslaitteeseen, jonka avulla voidaan todeta laikan muotovirhe 1 μm lukematarkkuudella
6. Tasapainotettu hiomalaikka kiinnitetään pyörivien työkalujen kiinnittimeen. Sorvin karaan kiinnitetään erikseen suunniteltu ja valmistettu timantointikärki, joka muotonsa ansiosta kiinnittyy tiettyyn asentoon. Oikeaan asentoon kiinnittyminen vaatii sorvin C- akselin tarkkaa paikoitusta.
7. Pyörivät työkalut käynnistetään ja laikan pyörimisnopeus kiihdytetään noin kolmasosaan maksimista. Tällä nopeudella hiomalaikasta hiotaan timantin avulla pois kohdassa 5. mitatun muotovirheen mukaan. Tämän avulla hiomalaikasta poistetaan suurin epäkeskoisuus ennen pyörimisnopeuden kiihdyttämistä.
8. Laikka tasapainotetaan uudestaan kohdan 4. mukaan.
9. Laikka timantoidaan uudestaan kohdan 6. mukaan, sillä pyörimisnopeudella, mikä hiontaprosessia varten on suunniteltu. Sopiva lastuamissyvyys on noin 10 μm (RWTH Aachen, 2017) Tämän jälkeen hiomalaikka on valmis hiontaa varten.

Pyörivien työkalujen tämänhetkinen moottori pystyy tuottamaan 3000 rpm kierrosnopeuden. Moottori on suunniteltu sorvien pieniä pyöriviä työkaluja, kuten poria ja jysintappeja varten. Hiomalaikan aiheuttama hitausmomentti on huomattavasti näitä työkaluja suurempi, joten laikan kiihdytys täytyy suorittaa hallitusti. Moottori kykenee tuottamaan 200 mm halkaisijaltaan olevalla laikalla noin 30 m/s suuruisen työstönopeuden. Tarkkuushionnasta puhutaan kirjallisuuden mukaan vasta, kun laikan pyörimänopeus on noin 45m/s (Stephenson et al., 2002). Tulevaisuudessa on kuitenkin mahdollista, että koneella tutkitaan suurnopeushiontaa.

Hiomalaikan nopeuden vuoksi on tärkeää huomioida tilanteet, joissa laikka syystä tai toisesta hajoaa. Standardissa ISO-16089-2015 on määritetty suojarakenteiden vähimmäispaksuudet, kun niiden materiaali tunnetaan.

5.3 Suorakerrostuksen implementointi ja lisätyt komponentit

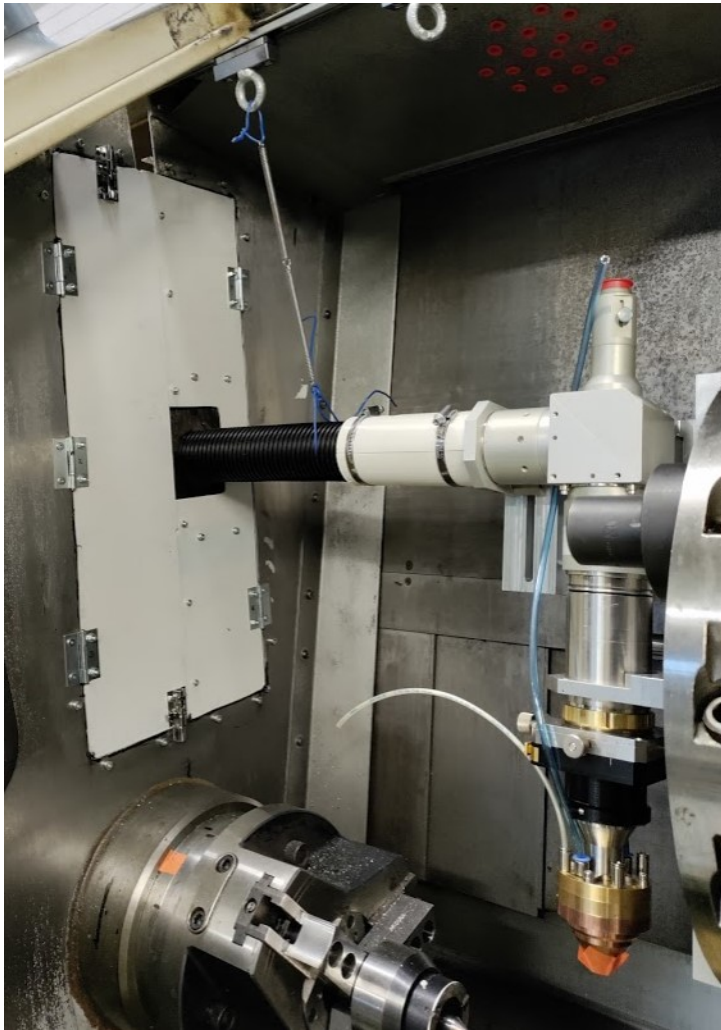
Suorakerrostuksen pääperiaatteet ja laitteistoon liittyvät osat esiteltiin suorakerrostusta käsittelevässä luvussa. Tässä kappaleessa käsitellään, mitä komponentteja hybridisorvin tapauksessa lisättiin ja miten erilaisiin suunnitteluratkaisuihin päädyttiin. Kuvassa 32 on esitetty yleiskuva suorakerrostuksen komponenteista kaavion avulla.



Kuva 32. Suorakerrostuksen komponentit ja niiden tehtävät.

Suorakerrostusprosessia varten joudutaan hionnan tapaan suunnittelemaan ja valmistamaan uniikkeja komponentteja. Varsinainen suorakerrostuspää on Fraunhoferin valmistama ja sen tekniset tiedot löytyvät tämän työn liitteistä. Suorakerrostuksessa käytettävä laser on C-LASE 3000, jonka tekniset tiedot löytyvät niin ikään työn liitteistä. Muut suorakerrostusprosessin asettamat vaatimukset liittyvä pääasiassa koneen, suorakerrostuksessa käytettävien komponenttien ja käyttäjän suojaamiseen. Esimerkiksi koneen lineaarijohteet tulee suojata tarvittaessa hienolta metallijauheelta, suorakerrostuspään ja siihen voimanlähteestä tuleva liitos tulee suojata hyvin. Lisäksi metallijauheen pääsy koneen muihin osiin, kuten hydrauliikkatilaan ja hihnoinhin tulee estää. Koneen käyttäjää tulee suojata myös laservalon haitoilta ja metallijauheelta. Koneen työstötilan tulee olla sellainen, että metallijauhe ei pysty vahingoittamaan koneen rakennetta eikä se päädy koneen ulkopuolelle hengitysilmaan. Suorakerrostuspää voidaan viedä suojaan pois

työstötilasta muiden työnvaiheiden ajaksi. Tätä varten työstötilan seinään tehtiin ovi, josta suorakerrostuspää voidaan viedä kiskosysteemin avulla helposti suojaan.



Kuva 33. Suorakerrostuspään ovi suojatilaan.

Sorvin päälle on asennettu ilmansuodatin, jonka tehtävä on imeä itseensä suorakerrostusprosessin hukkajauhe ja suodattaa se, jotta jauhe ei päädy laboratorion hengitysilmaan

Laserpään tehtävä on manipuloida kuidulta tulevaa lasersädettä halutulla tavalla. Lisäksi suorakerrostuspään läpi ohjataan kerrostettavia metallipartikkeleita. Suorakerrostuspää on suunniteltu siten, että laser ja metallijauhe tulevat suuttimiltaan koaksiaalisesti toisiinsa nähden. Suorakerrostusprosessi määrittää suunnittelun lähtökohdat käytettävälle laserille ja suorakerrostuspäälle, kuten luvussa 3 todettiin. Nämä laitteet tarvitsevat toimiakseen sopivan jäähdytysjärjestelmän. Suorakerrostuspään vaatimukset jäähdytysvedelle ovat ilmoitettu valmistajan tarjoamassa teknisissä tiedoissa. Tekniset tiedot ovat koottuna työn lähteissä. Käytetty suorakerrostuspää vaatii jäähdytysvedeltä vähintään

1,5 l/min tilavuusvirran veden maksimilämpötilan ollessa 20°C. Staattinen maksimipaine on 6 bar ja suositeltu dynaaminen paine 4,5 bar.



Kuva 34 Jauheen ja jäähdytysveden paikat suorakerrostuspäässä.

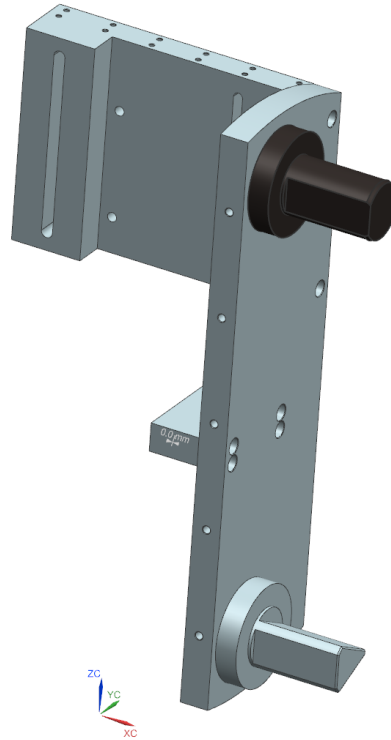
Jauhetta on syötettävä suorakerrostuspäähän kaikista neljästä sisääntulosta huolimatta siitä, käytetäänkö yhtä vai useampaa eri jauhetta. Syöttäminen vain osasta jauheen sisääntulosta aiheuttaa jauheen epätasaisen jakautumisen suuttimesta suorakerrostusta tehdessä.

Jauheen syöttämiseen käytetään Oerlikon Metcon valmistamaa kaksisäiliöistä jauheen-syötintä. Kahden jauhesäiliön käyttö mahdollistaa kahden eri materiaalin kerrostuksen seoksena.



Kuva 35. Oerlikon Metco jauheen syötin.

Adapteri on esitelty kuvassa 36. Adapteri on suunniteltu erityisesti tähän tarkoitukseen ja se on koneistettu laboratorion protopajalla. Adapterin tehtävä on kiinnittää suorakerrostuspään suutin oikealle korkeudelle työkappaleen pinnasta. Tämä korkeus on määritetty suorakerrostuspään teknisissä tiedoissa välille 7–13 mm. Adapteri on suunniteltu siten, että korkeutta voi säätää vähintään tuolla välillä. Kulmapeilin ja säteenkohdistimen välistä korotussyylinteriä voidaan tarvittaessa myös lyhentää. Tämä on otettu myös huomioon adapterin suunnittelussa hahlomaisen kiinnityksen avulla, joka sallii ylemmän kiinnikkeen liikkeen kuvan 36 Z- suunnassa. Adapterin kiinnitys sorvin työkalurevolveriin tapahtuu kahdella VDI-40 työkalukiinnittimellä. Ylempi kiinnitin on mitoiltaan samanlainen kuin sorvin työkalupitimien kiinnityspinnat, mutta alempaa on helpotettu tekemällä sen profiilista kolmiomainen. Kolmiomaisuuden ansiosta suorakerrostuspään adapteri on helppo kiinnittää revolveriin ja kiristää paikalleen. Kiinnittäminen olisi huomattavan vaikeaa, jos molemmat kiinnittimet olisivat perinteisen VDI-40 mukaiset.



Kuva 36. Adapterin kiinnitys revolveriin.

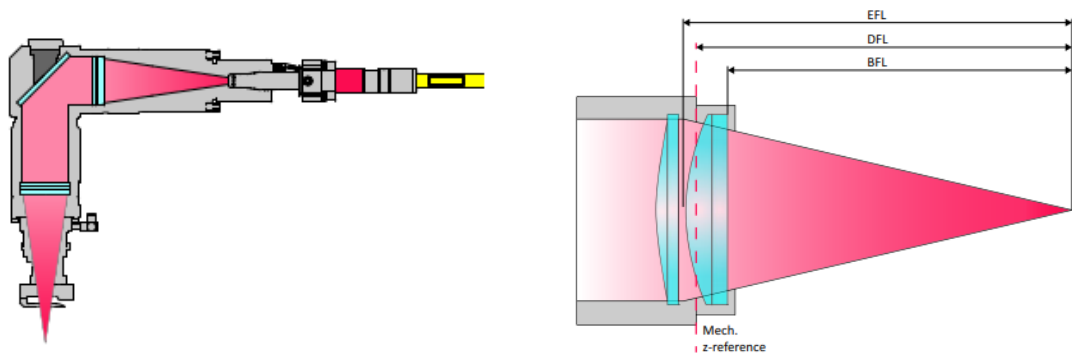
Suorakerrostuspää sisältää useita toiminnan kannalta tärkeitä optisia komponentteja. Optiset komponentit ovat Coherentin valmistamia ja sen spesifikaatioiden perusteella voidaan määrittää suorakerrostuksen kannalta tärkeitä prosessin tunnuslukuja. Suorakerrostuspään optiikka koostuu kollimaattorista, keskitysoptiikasta, välioptiikasta, erilaisista pitimistä ja adaptereista.

Kollimaattorin tehtävä on yhdensuuntaistaa kuidulta tuleva lasersäde. Tämän sovelluksen kollimaattorin linssi on valmistettu kvartsilasista. Kollimaattori lämpenee prosessin aikana huomattavasti, joten sitä täytyy jäähdyttää. Tässä jäähdytys on toteutettu kierto-veden avulla, jonka minimi tilavuusvirta on 2 l/min. Jäähdyttämiseen ei tarvitse laserin tavoin käyttää de-ionisoitua vettä, vaan tavallinen hanavesi on riittävä. Veden lämpötilan tulee olla välillä 15–35 °C. Kuidun liitos kollimaattoriin on toteutettu QBH- liittimen avulla. Kollimaattorin tehohäviöitä tulee välttää, joten täytyy tutkia lasersäteen NA- arvoa (Numerical Aperture). Liitteestä F voidaan lukea lasersäteen maksimi hajaantumiskulmaksi noin 29 mrad. Kollimaattorille määritetty maksimi polttoväli on 250 mm, jota vastaa 20 mrad taittokulmalle enintään 0,066 lasersäteen mitattua NA- arvoa. Liitteen F mukaan säteen mitattu NA- arvo on 0,061, joten se on riittävän hyvä.

Kollimaattorin jälkeen tarvitaan kulmapeili. Siinä on liittimet, jotka kiinnittyvät kollimaattoriin ja keskitysoptiikkaan. Kulmapeili koostuu dielektrisestä peilistä, joka kääntää laser-

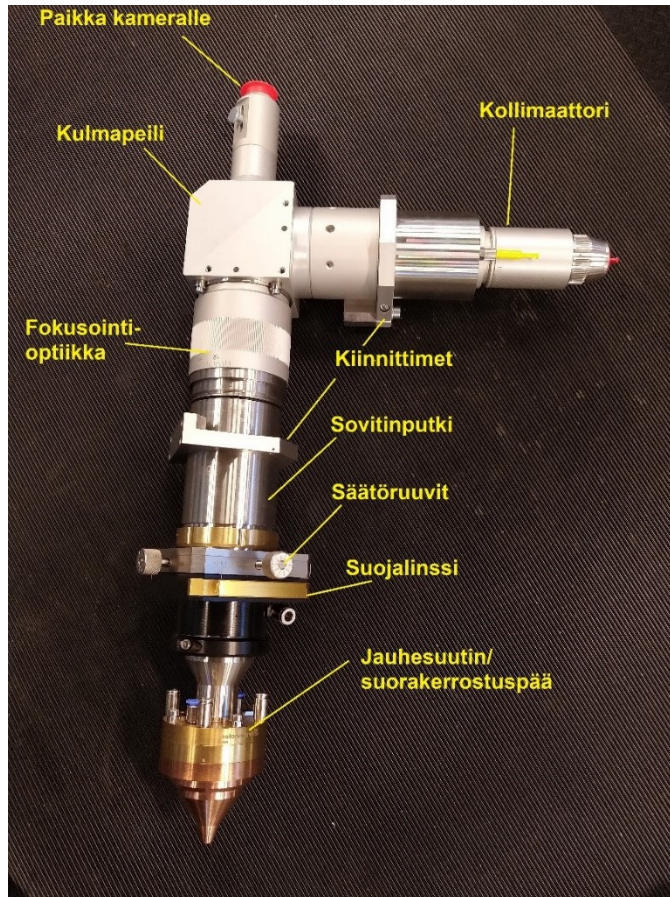
säteen suuntaa 90° . Kulmapeilin perään asennetaan fokusointioptiikka. Fokusointioptiikan tehtävä on kohdistaa kulmapeililtä tuleva leveä säde haluttuun polttopisteeseen, mikä määräytyy suorakerrostusprosessin mukaan. Tässä sovelluksessa käytetty fokusointioptiikka on ilmajäähdytteinen ja säädettävissä ± 5 mm sorvin X-suunnassa. Fokusointioptiikkaan kiinnitetään sovitinputki, jonka tarkoitus on pitää fokusointioptiikka sopivalla etäisyydellä työkappaleesta, jotta laserin polttopiste saadaan oikeaan kohtaan. Säteen halkaisija polttotasolla voidaan laskea luvun 3 yhtälöiden mukaan, tai optisten komponenttien toimittajan mukaan kertomalla säteen kuidun halkaisija fokusoptiikan tehollisen polttovälin ja kollimaattorin tehollisen polttovälin suhteella. Tehollinen polttoväli (EFL) on havainnollistettu kuvassa 37.

Aiemmin esitelty suorakerrostuspää kiinnittyy tähän sovitinkappaleeseen kiinnittimillä. Suorakerrostuspää sisältää suojalinssin, mikä estää jauheen pääsyn fokusointioptiikkaan (Coherent, 2019)



Kuva 37. Yksinkertaistettu optiikan poikkileikkaus.

Laserpään optiikkakomponentit ja suorakerrostuspää kiinnitetään valmistettuun adapteriin Coherentin valmistamilla kiinnittimillä, jotka varmistavat komponenttien varman kiinnityksen ilman, että optiikkaan tulee vaurioita.



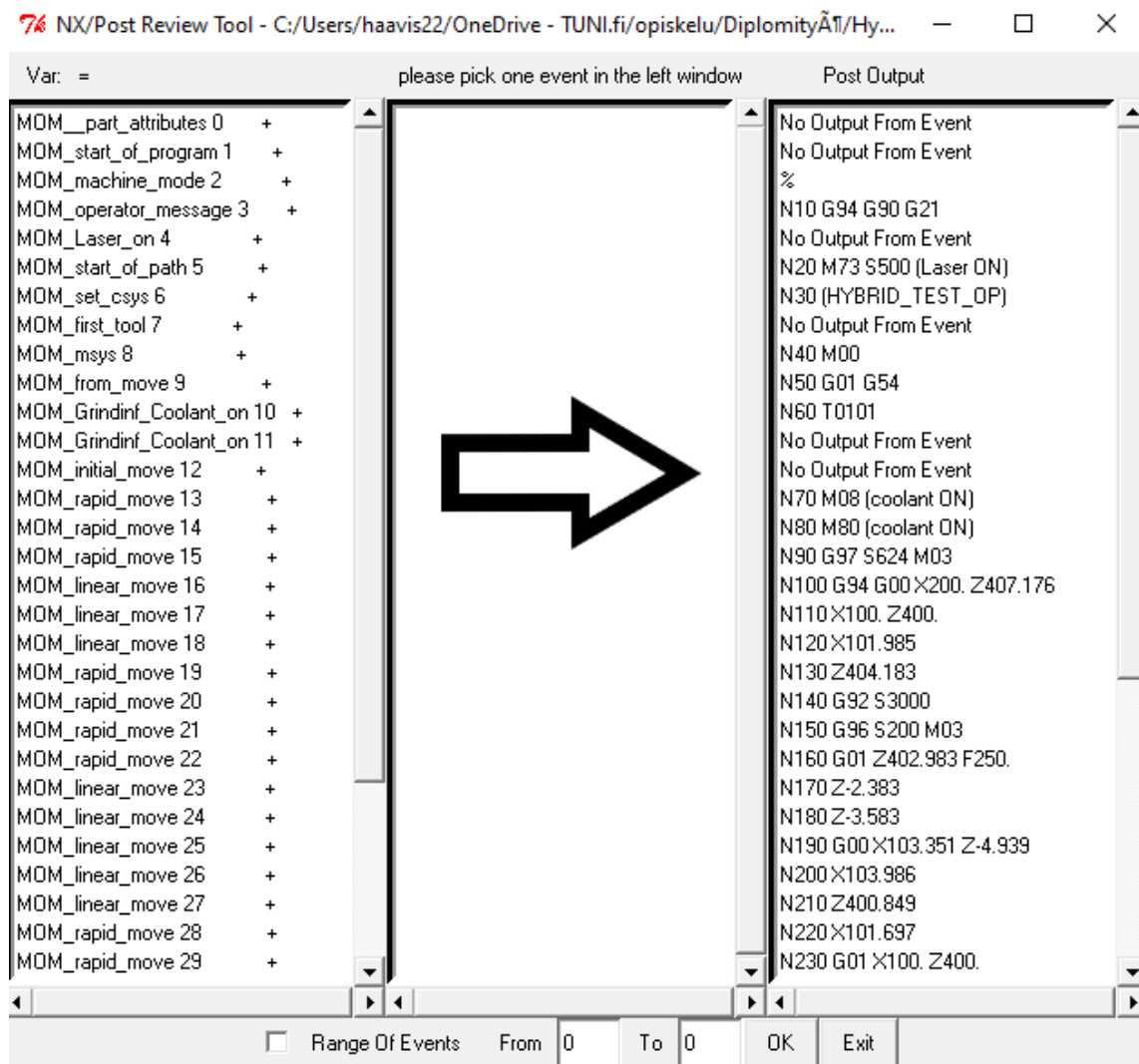
Kuva 38. Laserpään komponentit

Suorakerrostuspään heikoin kohta on laserkuidun kiinnitys kollimaattoriin. Tämä kohta näkyy kuvassa 38. Laserilta tuleva kuitu on suojattu putken avulla, joka pitää sisällään myös jauheputket, jäähdytysvesiputket ja suojakaasun putket. Tämä putki on kiinnitetty adapterilla kollimaattorin jäähdytysvesisäiliöön. Kiinnitys jäähdytysvesiputkeen estää voimien kohdistumisen herkkään laserkuidun liittimeen. Myös tämä adapteri on erikseen suunniteltu tarkoitustaan varten ja se on valmistettu laboratorion 3D- tulostimella pehmeästä PVC muovista.

5.4 Postprosessori

CAD ja CAM-mallista saatuja työstöratoja ja työkalutietoja ei voi sellaisenaan käyttää NC-koneen ohjaamiseen. Tätä varten tarvitsee rakentaa koneen ohjelmointikielelle ominainen postprosessori, jonka tehtävänä on tulkita CAM-mallin tiedot työstökoneelle luettavaan muotoon, yleensä G-koodiksi. Tätä on havainnollistettu kuvassa 39. GF NDM 16/100 sorvi on muokattu toimivaksi Fanucin logiikalla, johon löytyy valmis postproses-

soripohja Siemensin Post Builder- lisäosasta. Tätä pohjaa joudutaan kuitenkin muokkaa-
maan hybridityöstövaiheiden asettaminen vaatimusten vuoksi. Sekä suorakerrostus, että
hionta asettavat omat vaatimuksensa postprosessorille. Vaatimukset perustuvat M- käs-
kyihin, mitä CAM-ohjelma ei tunnista.



Kuva 39. Liikekäskyjen muuntaminen G-koodiksi.

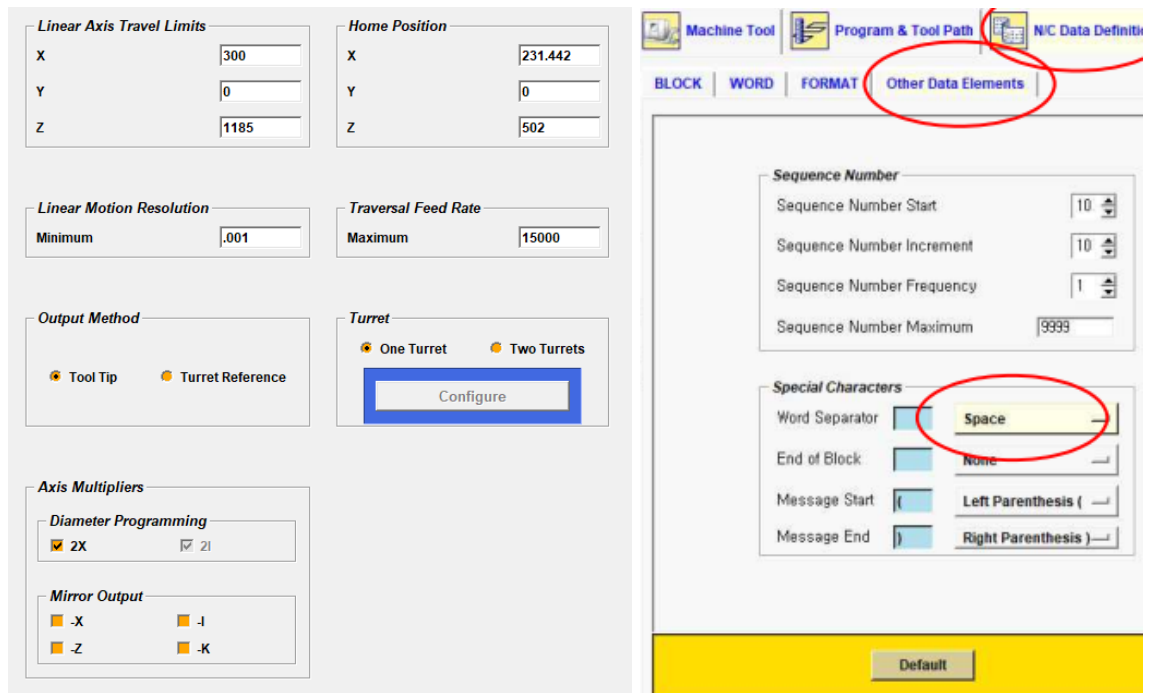
Siemensin NX:n mukana tuleva Post Builder- ohjelmisto sisältää kirjastoja, jotka on tehty eri valmistajien koodirungon mukaan. Näitä valmistajia ovat Siemensin Sinumerik- logiikan lisäksi tunnettuja työstökonevalmistajia, kuten Fanuc, Heidenhein ja Haas. Post Builder ohjelmassa määritetään uutta ohjelmaa luodessa koneen tyyppi ja vapausasteiden, eli NC- ohjattavien akseleiden määrä Post Builderissa on määritetty konevalmistajakoh-
teisesti sille ominaiset G- ja M- käskyjen notaatiot ja niiden toiminnallisuudet. Hybridival-
mistusta varten tarvitsee määrittää joitakin uusia M- käskyjä. Nämä käskyt on koottu tau-
lukkoon 6.

Taulukko 6. Hybridivalmistuksen lisätyt M- käskyt

Hionnan M- käskyt	Selite	Suorakerrostuksen M- käskyt	Selite
M08/M09	20 bar pumppu on/off	M73/M75	Laser on/off
M80/M81	70 bar pumppu on/off	M82/M83	Jauheensyötin 1 on/off
		M84/M85	Jauheensyötin 2 on/off

Ohjelmien suorittamiseen tarvitaan muitakin M- käskyjä, mutta ne ovat valmiiksi ohjelmoituja koneen logiikkaan. Laserin päälle kytkemisen M- käskyn yhteyteen lisätään tieto halutusta tehosta.

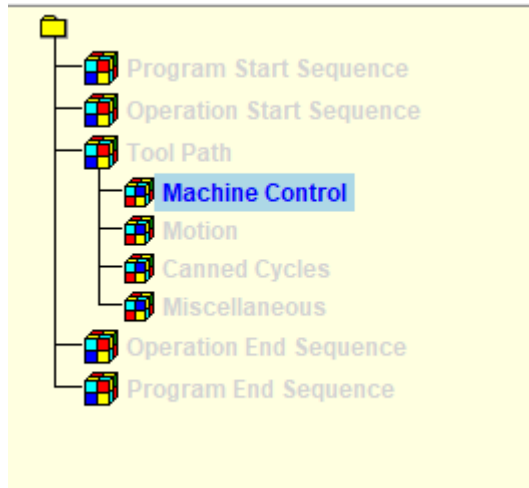
Postprosessorin toiminnan kannalta on tärkeää määrittää työstökoneen perustiedot oikein. Niitä voi muokata Post Builderissa milloin vain, eli niitä ei tarvitse tietää vielä ensimmäistä postprosessoria luodessa. Määriteltäviä perustietoja ovat lineaaristen akselien rajat, lineaarisen liikkeen resoluutio, X- ja Z- koordinaattien ilmoittaminen työkalun kärjen tai työkalurevolverin suhteen, ilmoitetaanko X- koordinaatit halkaisijan vai säteen mukaan, akselien peilaus, kotiaseman koordinaatit, maksimi syöttönopeus ja työkalurevolverien määrä. Myös generoitavan NC- ohjelman syntaksia tulee muokata siten, että se vastaa työstökoneen tulkitsemaa koodia. Tällaisia muokkauksia ovat esimerkiksi lauseen loppuun tuleva merkki, käskyjen väliin tuleva merkki, lauseissa käytettävät kirjaimet ja niiden järjestys. Koneen tietojen määrittävä valikko Post Builderissa on esitetty kuvassa 40. Kotiaseman määrittely tapahtuu samalla tavalla kuin alkuperäisen pisteen määrittely virtuaalisessa mallissa.



Kuva 40. Työstökoneen perustietojen määrittäminen.

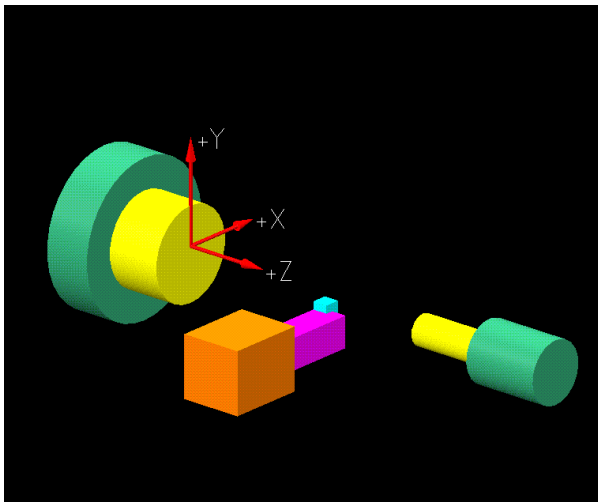
Post Builderissa on tulostettavalle NC- koodille tietty hierarkia. Hierarkia vaikuttaa siihen, missä kohdassa generoitua koodia mikäkin Post Builderissa oleva kohta vastaa. Hierarkiaan kuuluu ohjelman ja operaatioiden aloitus sekvenssi, työkaluratoihin liittyvät asetukset ja ohjelman ja operaatioiden lopetussekvenssi. Ohjelman aloitussekvenssi suoritetaan ainoastaan yhden kerran, silloin kun valittu NC- ohjelma suoritetaan ensimmäisen kerran. Aloitussekvenssissä määritetään työstötapahtuman yleisiä asetuksia. Tässä vaiheessa esimerkiksi asetetaan sekvenssinumerot nolnaan, mikäli ne ovat jääneet nollaamatta edellisen ohjelman jäljiltä. Lisäksi tässä vaiheessa kannattaa alustaa kaikki ohjelman modaaliset G-käskyt, jotta liikekäskyjen lukeminen olisi helpompaa. Modaaliset käskyt ovat voimassa esiintymisestään siihen asti, kunnes ne kumotaan jollakin muulla saman luokan käskyllä. Epämodaaliset käskyt ovat puolestaan voimassa vain lauseessa, jossa ne esiintyvät. (Siemens, 2010) Modaalisia käskyjä voidaan tarvittaessa muokata missä tahansa vaiheessa ohjelmaa.

Operaation aloitussekvenssissä määritellään työkalun lähestymisliikkeeseen liittyvät tapahtumat. Esimerkiksi lähestymisessä voidaan tarvittaessa sammuttaa jokin kara tai muu toimilaite. *Machine control*- kohdassa voidaan määrittää käyttäjän määrittämiä tapahtumia, *Motion*- kohdassa määritetään pika, lineaari- ja ympyräliikkeen notaatio. Operaation lopetussekvenssi tehdään jokaisen operaation lopussa. Tähän voidaan liittää koneen ajo työkalun vaihtopisteeseen, mikäli sellainen on tulossa. Operaation aloitus- ja lopetusliikkeitä hallinnoidaan CAM-ohjelmaa.



Kuva 41. Sekvenssien hierarkia Post Builderissa.

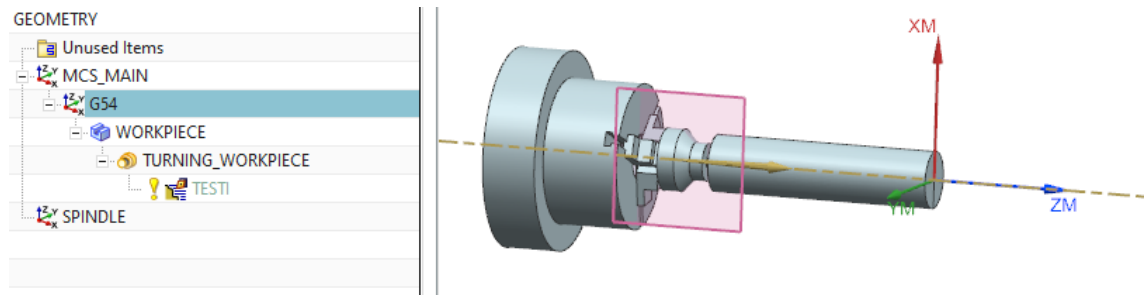
Työstökoneen perustietojen ja tyyppin valinnan jälkeen ohjelmassa voi tarkistaa, vastaako virtuaalisen koneen geometria mallinnettavaa fyysistä konetta. Kuvassa 42 on esitettyä sorvin konfiguraatio ja koneen nollakoordinaatiston sijainti. Nollakoordinaatisto sijaitsee pääkaran pinnassa, johon fyysisessä koneessa voidaan kiinnittää erilaisia karoja tarvittavasta työkappaleen kiinnityksen mukaan. Lisäksi kuvassa positiivisen X- akselin suuntaisesti on kuvattuna työkalu ja pääkaraa vastapäätä on karapyykkä, jota voidaan hyödyntää työkappaleen kiinnittämisessä. Post Builderissa kaikki sorvit on luokiteltu 2- akselisiksi, mutta todellisuudessa mallinnettava sorvi on 3- akselinen, jossa on akselit X, Z ja C.



Kuva 42. 2- akselisen sorvin konfiguraatio Post Builderissa.

Kuva 42 on suoraan Post Builderin generoima konfiguraatio määritetyille sorville. Kuvassa näkyvä Y- akseli ei todellisuudessa ole mukana koneen ohjelmoinnissa, vaan kaikki liikkeet määritellään tapahtuvaksi XZ- tasossa.

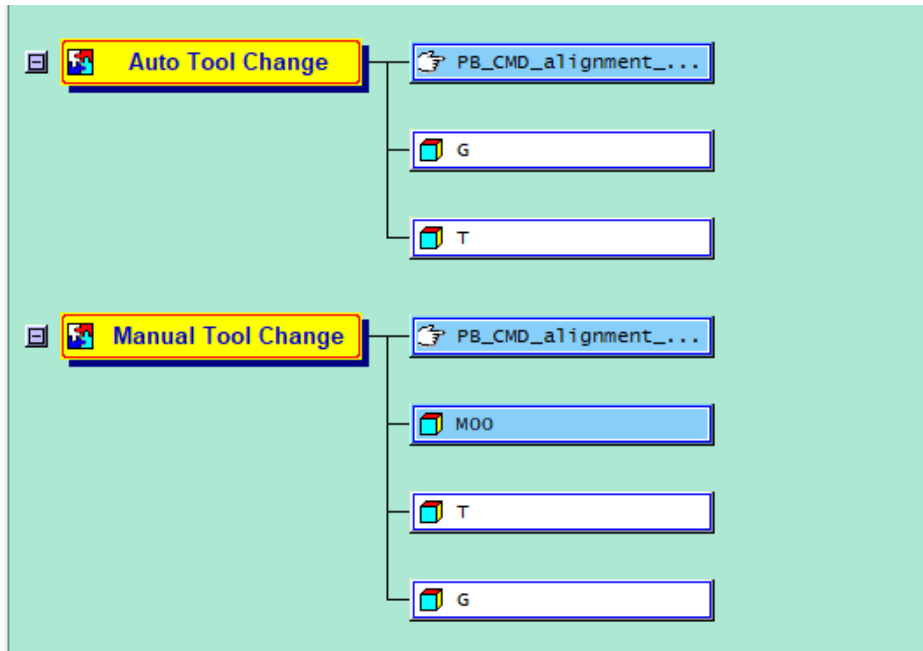
Offsetkoordinaatistojen asetus täytyy tehdä Post Builderissa siten, että se vastaa todellisen koneen koordinaatistoja. Tämä tarkoittaa Fanuc- pohjaisessa ohjaimessa sitä, että offsetkoordinaatistoja kutsutaan käskyillä G54-G59. Käytettävä offsetkoordinaatisto määritetään CAM-ohjelmassa esimerkiksi numerolle 1. Tällöin Post Builderissa offsetkoordinaatisto määritellään muodossa G"53+offset_fixture_number", jolloin siitä tulee G54.



Kuva 43. G54 koordinaatisto CAM-ohjelmassa.

Kuvasta 43 nähdään tämän lisäksi sorvin työstötaso, mikä on asetettu XZ- tasoon. Tähän viitataan NC- koodissa käskyllä G18 ja se määritettävä vielä postprosessoria konfiguroitaessa. Lisäksi simulaatioon lisättävät työkalut asemoituvat tämän tason mukaan.

Työkalun kutsumisen notaatio on myös tärkeää huomioida hybridisorvin tapauksessa. Oletuksena Post Builderin työkalunvaihdon kutsu tehdään Työkalun numeron ja kompensaaation avulla muodossa T01 H01 ja toteutetaan käskyllä M06, jos tarkastellaan työkalua numero 1 kompensaaatiopaikalla 1. Hybridisorvissa työkalunvaihto tehdään käskyllä T0101 ilman, että sitä toteutetaan millään M- käskyllä. Myöskään työkalun esi-asetusta ei voida käyttää, sillä se kutsuisi suoraan seuraavaan työkalua. Tämä voidaan korjata poistamalla operation aloitussekvenssissä olevista automaattisesta ja manuaalisesta työkalun vaihdosta jälkimmäinen T- lohko. Oikea notaatio näkyy kuvassa 44.

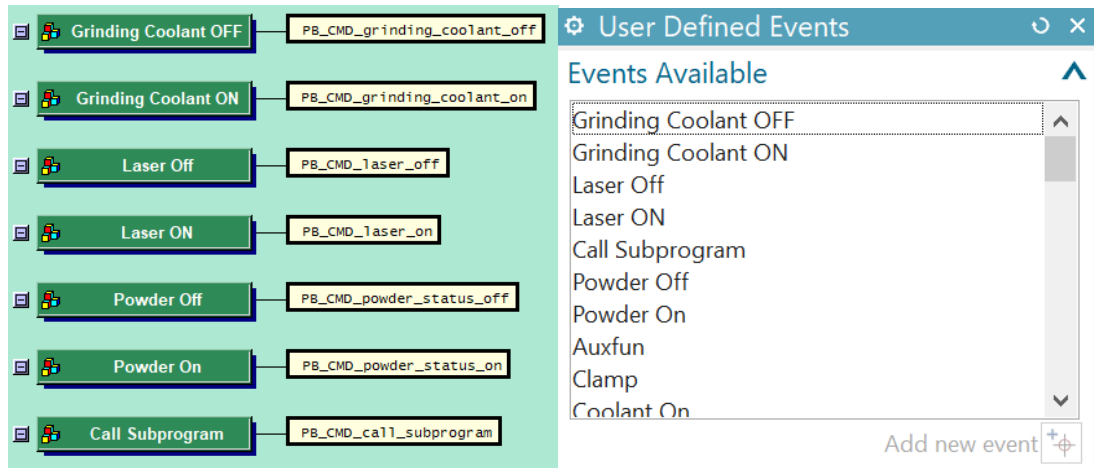


Kuva 44. Työkalun vaihdon oikea notaatio Post Builderissa.

manuaaliseen työkalunvaihtoon on lisätty myös CAM ohjelmasta riippumaton ohjelman tauko käskyllä M00. Tällöin sitä ei tarvitse määrittää CAM-ohjelmassa, sillä manuaalissa vaihdossa kone täytyy muutenkin pysäyttää.

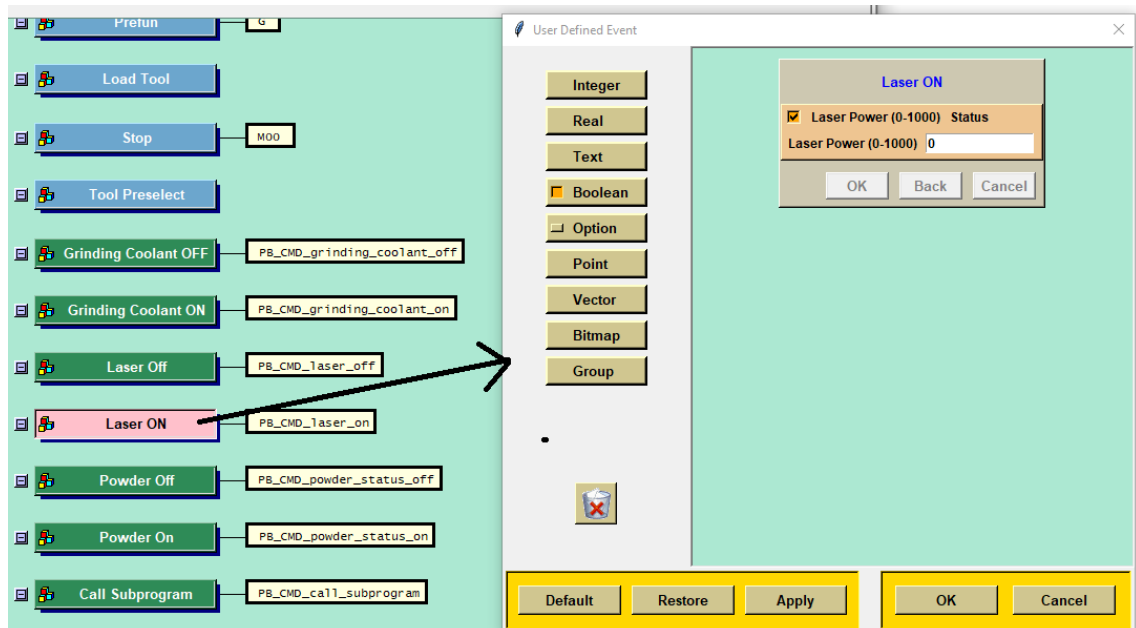
5.5 Tapahtumien luominen

Hiontaa ja suorakerrostusta varten lisättyjä laitteita ohjataan M- käskyjen, eli apukäskyjen avulla. Näitä M- käskyjä määritellään CAM-ohjelmassa UDE:jen (User Defined Events) avulla. CAM-ohjelmassa UDE:ja voidaan liittää ohjelman eri kohtiin, jolloin ne esiintyvät kyseisessä kohdassa NC- ohjelmaa, kun se on postprosessoitu. UDE:ja voi lisätä suoraan operaation navigaationauhasta haluamalleen kohteelle tai operaation asetuksista *machine control* kohdan alapuolelta.



Kuva 45. UDE:t Post Builderissa ja NX CAM-ohjelmassa.

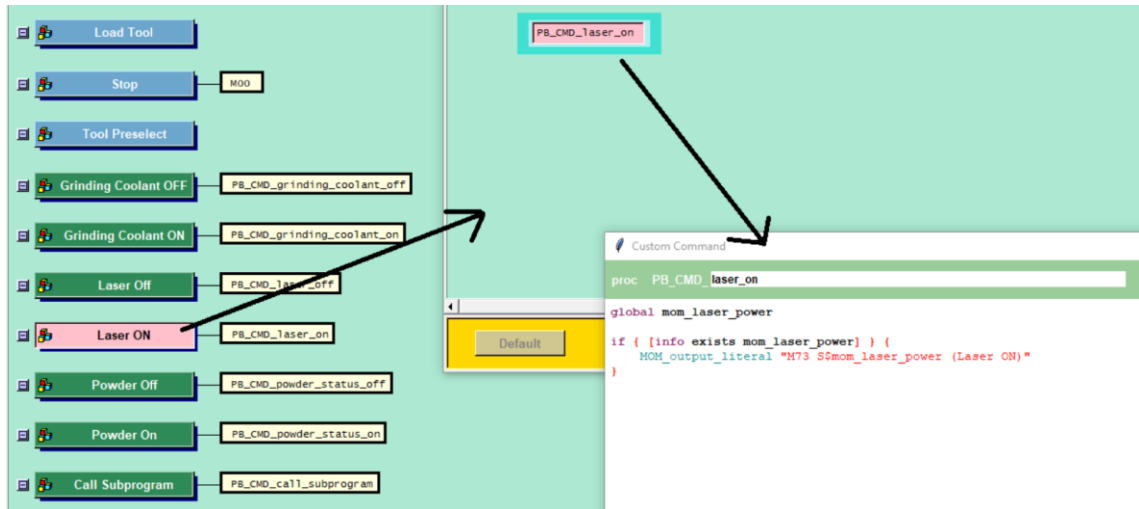
Erilaisia UDE:ja voi myös luoda itse Post Builderin käyttöliittymän avulla. Tämä on kätevää, jos generoituun ohjelmaan halutaan tulostaa jotakin erityistä, mitä ei ole valmiiksi määritetyissä UDE:issa. Esimerkki tästä voisi olla asiakkaan nimi, jolle kyseisellä ohjelmalla tehty kappale menee. Tässä työssä määritetään itse tehty UDE laserin ja jauheiden päälle laittamiselle ja hiomalaikan kiihdytykselle.



Kuva 46. UDE:n dialogi Post Builderissa.

UDE:n tarkoitus on kerätä haluttu tieto CAM-ohjelmoijalta, jonka jälkeen sitä voidaan hyödyntää halutuissa komennoissa, jotka voivat olla itse tai valmiiksi määritettyjä Post Builderissa. Kuvassa 46 näkyy laserin päälle laittavan UDE:n toiminta. Siinä käyttäjä ilmoittaa halutun laserin tehon. Kuvasta 47 nähdään, kuinka tätä tietoa hyödynnetään. Laserin päälle laittava UDE tulostaa laserin päälle laittavan M- käskyn M73 ja tehon

muodossa S "tehon annettu arvo". Samaan tapaan voidaan käyttää lastuamisesnestettä, jauhimia ja aliohjelman kutsua.



Kuva 47. UDE:n dialogin avulla saatu tieto voidaan hyödyntää Post Builderissa.

UDE voidaan asettaa CAM-ohjelmoinnissa haluttuun paikkaan. Jokaisella paikalla, missä UDE voidaan määrittää, on vastaava kohta Post Builderin tapahtumahierarkiassa. Tämä vaikuttaa siihen, mihin kohtaan NC-koodia halutun UDE:n perusteella luotu koodi tulostetaan ja halutaanko sen kanssa määritellä jokin muu koodin pätkä suoraan Post Post Builderissa. Taulukossa 7 on kerrottu, missä kohdassa Post Builderin tapahtumasekvenssiä haluttu UDE näkyy tulostetussa NC-koodissa. Tämä vastaa kuvassa 40 näkyvää sekvenssien hierarkiaa.

Taulukko 7. UDE:n tulostus Post Builderin tapahtumasekvensseihin verrattuna.

1	Ohjelman alku
2	Ohjelmaan liitetyt aloitustapahtumat
3	Geometriaan, metodiin, työkaluun ja työstökoneeseen liitetyt aloitustapahtumat
4	Operaation alku
5	Operaation alkuun liitetyt aloitustapahtumat
6	Aloituliike/ensimmäinen liike (riippuen, tehtiinkö työkalunvaihtoa)
7	Operaation alkuun liitetyt lopetustapahtumat
8	Operaation lopetus
9	Geometriaan, metodiin, työkaluun ja työstökoneeseen liitetyt lopetustapahtumat
10	Ohjelmaan liitetyt lopetustapahtumat
11	Ohjelman lopetus

Tämä tieto auttaa selvittämään CAM-ohjelman avulla postprosessoria tehdessä, missä kohdassa UDE:t tulostetaan suhteessa Post Builderin tapahtumiin. Postprosessorin toiminnassa oikein, voidaan CAM-ohjelmasta saatu NC- koodi käyttää sellaisenaan työstökoneella. Generoitu NC- koodi kannattaa kuitenkin aina tarkastaa virheiden varalta ennen syöttämistä työstökoneelle.

5.5.1 Hiontaohjelman rakenne

Hiomalaikan timantointi on tässä tapauksessa suoritettava ohjelmallisesti, pyörivään hiomalaikkaan ei pääse käsiksi, ellei suojaovi ole auki. Tämä puolestaan olisi standardin ISO-16089-2015 vastaista. Timantoinnin voi myös suorittaa manuaalisesti akseleita ohjaamalla, mutta timantoinnissa tarkkuudet ovat niin pieniä, että manuaalisella ohjauksella virheet ovat iso riskitekijä. Timantoinnin testaamisessa käytetään U_d :n arvoa 4. Lisäksi sorvin C- akselin täytyy olla paikotusmoodissa ja oikeassa asennossa timantoinnin ajan, joten syötön muotona ei voida käyttää millimetriä kierrosta kohden. Syöttö voidaan laskea nopeutena [mm/min]. Tällöin sopivaksi syöttö voidaan laskea yhtälöstä

$$f_d = \frac{b_d * n_{gw}}{U_d}, \quad (9)$$

missä n_{gw} on laikan pyörimisnopeus. Timantoinnissa käytettävä pyörimisnopeus tulee olla sama kuin varsinaisessa hionnassa. (Youssef, Helmi A., 2008) Testausvaiheessa timantointi suoritetaan laikan kierrosnopeudella 1000 rpm, jolloin sopivaksi syöttönopeudeksi saadaan 100 mm/min, kun timantin leveys on 0,4 mm.

Hiontaohjelmassa hiomalaikkaa ohjataan työkalukoordinaatiston avulla samaan tapaan, kuin tavallista sorvin työkaluakin. Laikka kiinnitetään pyörivien työkalujen adapteriin, joka kiinnittyy työkalurevolveriin VDI-40-kiinnityksellä. Tämän adapterin paikka kannattaa valita siten, että se ei ole suorakerrostuspään tiellä sitä käytettäessä. Alla on esitetty hiontaohjelma, jolla testataan hiontaominaisuuden toimintaa hybridisorvissa. Testiohjelmassa työstetään halkaisijaltaan 100 mm olevaa sylinteriä. Hionnan testeissä syöttöliikkeen muotona käytetään mm/min.

G96 G94 G40 G18 G90 G21;	(modaaliset komennot)
G54;	(valitaan referenssikoordinaatisto)
T0512;	(Valitaan työkalupaikka oikealla kompensatiolla)
G00 Z-5. X125.;	(Pikaliike aloituspaikan yläpuolelle)
S5 M04;	(Pääkara päälle 5 rpm vastapäivään)
M98 P0125;	(Aliohjelman 00125 kutsu laikan kiihdytykselle)

G01 X99.07;	(Syöttöliike työstön aloituskohtaan)
M08;	(20 bar pumppu päälle)
M80;	(70 bar pumppu päälle)
G01 Z-50. F25;	(50 mm työstömatka 25 mm/min syötöllä)
M09;	(20 bar pumppu pois päältä)
M81;	(70 bar pumppu pois päältä)
G01 X125.;	(Nousu X- suunnassa)
G00 Z50.;	(Paluu kotiasemaan)
G05;	(Pääkaran pysäytys)
G04 X60;	(1 min odotus, jotta ylimääräinen neste poistuu laikasta)
M98 P0126;	(Aliohjelman 00126 kutsu laikan hidastukselle)
G00 Z-10;	(Paluu aloituspisteeseen)
M30;	(Ohjelman lopetus)

Ohjelma 1. *Hiontaohjelman esimerkki*

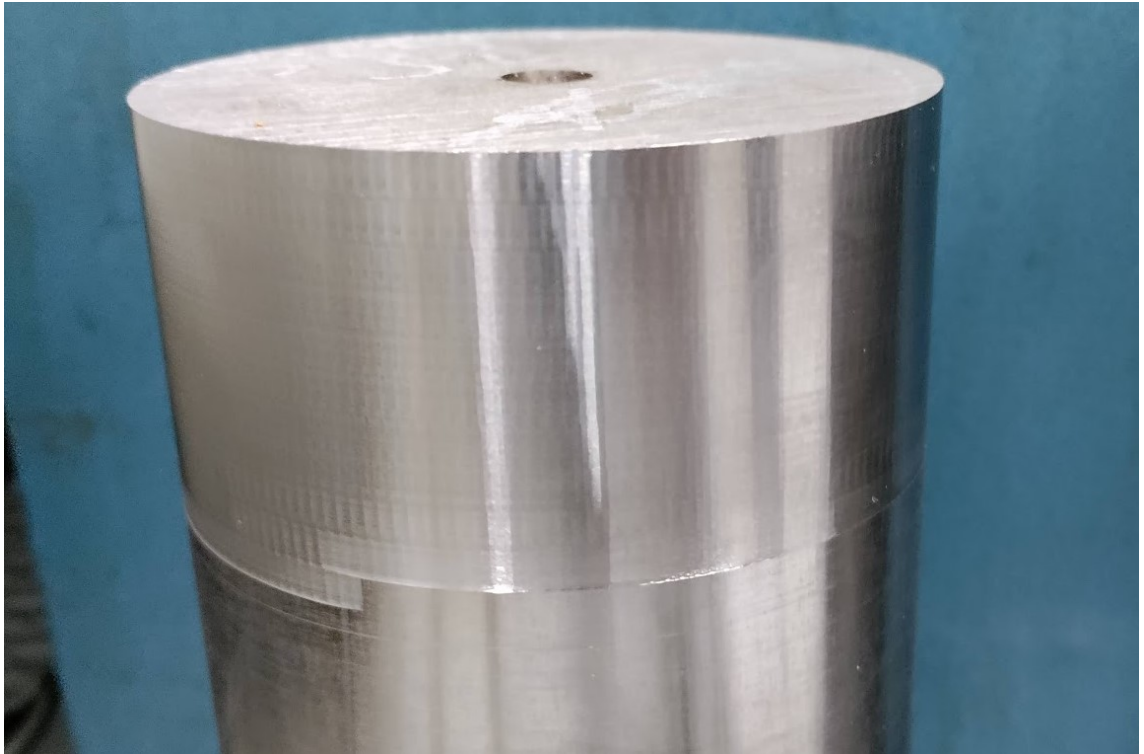
Laikan kiihdytyksessä käytettävä ohjelma on tehty siten, että sitä kiihdytetään asteittain 200 rpm kerrallaan. Jokaisen askeleen välissä on 1 sekunnin tauko, jotta moottoriin tai laikkaan ei kohdistu liian suurta momenttia. Lastuamissyvyys on määritetty lisäämällä lastuamissyvyys X- suunnan arvoon, joka on saatu laikan kosketuksesta työkappaleeseen. Todellisuudessa laikan täytyy kuivua pidempään kuin ohjelmassa 1 esitetty minuutti. Testin jälkeen laikka jätettyyn pyörimään matalilla kierroksissa noin 45 min ajaksi, jonka jälkeen se oli melko kuiva.

Testikappale on valittu siten, että Akseleiden toiminta-alueet riittävät hyvin työstöön halkaisijaltaan 200 mm hiomalaikan kanssa. Maksimi työkappaleen halkaisija on tällöin noin 120 mm. Toinen testeissä käytettävä hiomalaikan koko on 180 mm. Tällä laikalla voidaan työstää hieman suurempaa työkappaletta, mutta laikkaa pyörittävän moottorin vuoksi työstönopeus jää tällöin pienemmäksi. Hionnan testauksessa käytettiin 99,07 mm halkaisijaan sorvattua terässylinteriä. Hiontaparametrit ovat koottuna alla olevaan taulukoon 8.

Taulukko 8. *Hiontatestin parametrit.*

Lastu	a_e (mm)	f_z (mm/min)	v_w (rpm)	v_c (rpm)	d (mm)
1	0,05	25	5	1000	99,07
2	0,075	25	5	1000	98,95

Hiontatestin tulos näkyy kuvassa 48. Hiotun ja sorvatun pinnan ero on selkeä. Hiontatesti tehtiin samaan kohtaan yllä olevan taulukon mukaan. Pinnanlaadultaan parempiin tuloksiin päästäisiin, jos käytetään suurempaa laikan pyörimisnopeutta.



Kuva 48. *Hiottu työkappale.*

Työkappaleen pinnassa on selvästi erotettavissa säännöllistä epätasaisuutta. Tämä johtuu siitä, että hiomalaikka irrotettiin koneesta viimeisen timantointikerran jälkeen mitausta varten. Uudelleen kiinnittäminen aiheuttaa heittoa hiomalaikkaan, sillä se ei kiinnity enää täysin keskeisesti. Jatkossa onkin tärkeää, että viimeisen timantointikerran jälkeen hiomalaikkaa ei irroteta koneesta ennen hiontaa.

5.5.2 Suorakerrostusohjelman rakenne

Suorakerrostuspäätä voidaan ohjata samalla periaatteella kuin sorvin tavallista työkalua. Ainoa ero tavallisen työkalun ohjaukseen on se, että suorakerrostuspään suutinta pidetään operaation ajan 7–13 mm etäisyydellä kappaleen pinnasta. Jokaisen kerroksen jälkeen suutinta siirretään kerroksen paksuuden verran ylöspäin. Suorakerrostusradat on lisäksi laitettava menemään jonkin verran päällekkäin pinnoitusta tehdessä. Tämä tarkoittaa ohjelman kannalta sitä, että syöttö f_r [mm/r] pitää olla pienempi kuin tulostetun radan leveys b_{DED} [mm].

Suorakerrostuksen postprosessorissa on tärkeää määrittää käytettävä työkalupaikka siten, että siihen ei voi vaikuttaa CAM-ohjelmaa tehdessä. Suorakerrostuspäälle valitaan

tietty paikka sorvin työkalurevolverissa, johon se kiinnitetään aina. Tässä tapauksessa käytetään työkalupaikkaa numero 3. Mikäli postprosessori lukisi työkalupaikan CAM-ohjelmasta, on riskinä ohjelmoijan virhe asettaa se vääräksi, jolloin työkalurevolveri asetuisi väärään asentoon ja rikkoisi suorakerrostuspään, tai vaurioittaisi sen liitoksia. Toisaalta on myös tärkeää, että käyttäjä osaa laittaa suorakerrostuspään oikeaan työkalupaikkaan.

Liitteestä E nähdään laserin tehon olevan lineaarisesti riippuva laserille tulevasta ohjausjännityksestä. Laserin ja PLC:n välinen analogiohjaus mahdollistaa ohjausjännitteen säätämisen NC- ohjelmassa erillisellä apufunktiolla. Lisäksi molempia jauheensyöttimiä voidaan ohjata ohjelmallisesti apufunktion avulla. Alla on esitetty testauksessa käytetty NC- ohjelma. Ohjelma on laadittu hiontaohjelman tapaan terästangolle, jonka halkaisija on tässä tapauksessa 103,4 mm.

G96 G95 G40 G18 G90 G21;	(modaaliset komennot)
G54;	(valitaan referenssikoordinaatisto)
T0305;	(työkalu ja oikea kompensatiomuistipaikka)
G00 X103.4 Z-10.;	(pikaliike aloituspaikkaan)
S250 M04;	(pääkara pyörimään pintanopeudella 250 m/min)
S500 M73;	(Laser päälle teholla 1,5kW)
M82;	(jauhin 1 päälle)
G01 Z-60. F0.1;	(syöttöliike, jonka aikana kerrostus tapahtuu. Tässä kerrostetaan yksi kerros 50 mm matkalta)
M83;	(jauhin 1 pois päältä)
M75;	(laser pois päältä)
M00;	(mahdollinen tauko, jotta varmistutaan laserin sammuminen-> kuittaus käyttäjältä jatkamiseksi)
G01 Z-10;	(ajo alkuperäiseen lähtöpisteeseen pikaliikkeellä)
M30;	(ohjelman lopetus)

Ohjelma 2. Suorakerrostusohjelman esimerkki.

Ohjelma on rakennettu siten, että sillä kerrostetaan AISI355 terästankoa. Ohjelman rivinumerot on jätetty pois selkeyden vuoksi. Kerrostettavana materiaalina käytetään kobolttipohjaista Stellite HRC53- materiaalia. Ensimmäisen testin tulokset ovat esitetty alla olevassa taulukossa 9.

Taulukko 9. EHLA- prosessin testiparametrit.

nro	P (kW)	v_c (m/min)	f_z (mm/r)	Q_{ar} (l/min)	Q_{sh} (l/min)	Q_p %	D_{blank} (mm)	kerrokset
1	2,1	50	0,25	10	15	10	103,4	1
2	2,1	100	0,25	10	15	10	103,4	1
3	2,1	30	0,25	10	15	30	106,35	1
4	2,1	30	0,25	10	15	30	106,35	1
5	2,1	30	0,25	10	15	30	106,35	2
6	1	30	0,25	10	15	30	106,35	1
7	1	100	0,25	10	15	30	106,35	1
8	2,1	100	0,25	10	15	30	106,35	1

**Kuva 49. EHLA testikappale**

6. JATKOKEHITYSIDEAT

Tässä kappaleessa keskitytään hybridivalmistuksen tulevaisuudennäkymiin kirjallisuuden ja uusien alan julkaisujen perusteella. Lisäksi pohditaan mahdollisia tulevaisuuden haasteita ja tapoja, miten niistä voidaan selvitä.

6.1 Hiontaprosessin jatkokehitysmahdollisuudet

Työn aikana tehtyjen muokkausten jälkeen hybridisorvilla pystytään tekemään hiontaa perinteisin menetelmin. Suurnopeushionnan tutkimista varten sorviin tulee asentaa tehokkaampi servomoottori hiomalaikan pyörittämistä varten. Samoin karajarrun asentaminen ja käyttäminen timantoinnin aikana parantavat sen onnistumista. Molemmat näistä ollaan aikeissa toteuttaa lähitulevaisuudessa. Hiomalaikkaa pyörittävän moottorin kierrosnopeuden noston avulla hybridisorvilla voidaan tulevaisuudessa tutkia suurnopeushionnan eri tekniikoita. Nykyisellä pyörivien työkalujen moottorilla päästään 200 mm halkaisijalta olevan laikan kanssa noin 32 m/s pintanopeuteen, suurnopeushionnan alkavan 45 m/s pintanopeudesta (Rowe, 2009 s.97)

Lastuamismesteen käytön todettiin olevan ratkaisevassa roolissa hionnan onnistumisen kannalta. Asennetuissa lastuamismestepumpuissa ei ole säätömahdollisuutta niiden tuottamalle tilavuusvirrälle. Tilavuusvirran säätö voidaan toteuttaa virtauksensäätöventtiilin avulla tai asentamalla taajuusmuunnin pumpuille. Tällöin on helpompaa tutkia lastuamismesteen nopeuden vaikutuksia hionnan lopputulokseen.

Lastuamismeste on ympäristölle usein haitallista. Tämän vuoksi on tutkittu erilaisia tekniikoita lastuamismestelle, jotka tarjoaisivat perinteisen menetelmän hyödyt, mutta sitä tarvitsisi käyttää nykyistä vähemmän. Eräs tällainen menetelmä on minimimesteinen voitelu, eli MQL (engl. Minimum Quantity Lubrication). Vähimmäismäärävoitelussa tarkoituksena on kohdistaa lastuamismeste korkealla paineella sumuna työstön kontaktipintaan. Artikkelissaan Javaroni et al. (2019) on tutkinut vähimmäismäärävoitelua keraamisten materiaalien hionnassa. Artikkelin mukaan vähimmäismäärävoitelun avulla päästään hyviin lopputuloksiin pinnanlaadun kannalta, kun lastun paksuus pidetään mahdollisimman pienenä. Muotovirheisiin voitelumenetelmällä ei ollut suurta merkitystä. Sen sijaan perinteistä voitelua käytettäessä hiomalaikan kuluminen on vähäisempää ja prosessi pysyy lämpötilan kannalta stabiilimpana. Vähimmäismäärävoitelua käytettäessä lastuamismesteen tulee ominaisuuksiltaan sopia hiontaprosessiin. Lastuamismesteenä

voidaan käyttää synteettisiä öljyjä, tislattua vettä ja luonnollisia öljyjä. (Sharma et al., 2016)

Hiontaa voidaan tehdä perinteisen menetelmän lisäksi usealla eri suurnopeushionnan menetelmällä. Nämä menetelmät jaotellaan eri hiontaparametrien mukaan, esimerkiksi hiomalaikan pintanopeuden ja lastuamissyvyyden mukaan. Erilaisia suurnopeushionnan muotoja ovat ryömimissyötehionta (Creep feed grinding), korkeatehohionta (High Efficiency Grinding, HEG), korkeatehoista syvähiontaa (High Efficiency Deep grinding, HEDG) ja nopeusiskuhionta (Speed stroke grinding). Artikkelissaan Stephenson et al. (2002) on tutkinut korkeatehoista syvähiontaa CBN- hiomalaikoilla. Testeissä on artikkelin mukaan käytetty 100–146 m/s laikan pintanopeutta, mikä on noin nelinkertainen tällä hetkellä hybridisorviin verrattuna. Tehokkaamman pyörivien työkalujen servomoottorin avulla päästään kuitenkin jatkossa suurempiin laikan kierrosnopeuksiin. Suurnopeushionnan menetelmiä hyödyntäen voidaan pienentää hionnan ominaisenergiaa, päästään suurempiin materiaalin poistonopeuksiin ja parempiin G- suhteisiin. (Stephenson et al., 2002)

6.2 Suorakerrostuksen jatkokehitysmahdollisuudet

Suorakerrostusprosessia voidaan kehittää jatkossa lisäämällä antureita oheislaitteisiin. Prosessin kehittämisen kannalta on hyödyllistä pystyä mittaamaan syötetyn jauheen tarkka tilavuusvirta. Myös prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa, kun tiedetään jauheen käyttäytyminen suuttimen ulostulossa. Hyötysuhteen parantaminen tarkoittaa tässä sitä, kuinka paljon syötetystä jauheesta päätyy sulana kappaleen pintaan ja kuinka paljon sitä menee hukkaan. Artikkelissaan Schopphoven et al. (2020) on tutkinut jauheen käyttäytymistä suorakerrostusprosessin aikana suurnopeuskameran avulla. Tämän perusteella voidaan tehdä malli, jonka avulla tiedetään suorakerrostuspäältä tulevan jauheen massavirran ja jauhesyöttimen kiekon pyörimisnopeuden suhde. Lopulta voidaan laskea myös partikkelien nopeus. Näiden tietojen avulla prosessin parametreja voidaan säätää tarkemmin.

Suorakerrostuspään asentamisesta voidaan helpoilla muokkauksilla tehdä ergonomisempaa. Sorvin katolle voidaan asentaa kevennin, johon suorakerrostuspää voidaan kiinnittää ennen sen irrottamista työkalurevolverista. Tällöin sen koko painoa ei tarvitse kannatella siirron aikana ja riski loukkaantumisista ja laitteiden rikkoutumisesta pienenee. Suorakerrostuspäätä varten hankittiin projektissa kevennin, mutta sitä ei asennettu vielä. Lisäksi koneen työstötilassa olevia johteita tulee suojata paremmin. Jo lyhyiden testien aikana ylijäämäjauhetta kertyi johteisiin kiinni. Pitkällä aikavälillä pienet partikkelit

voivat aiheuttaa ongelmia johteissa. Johteet voidaan suojata esimerkiksi haitarimaisella suojuksella.

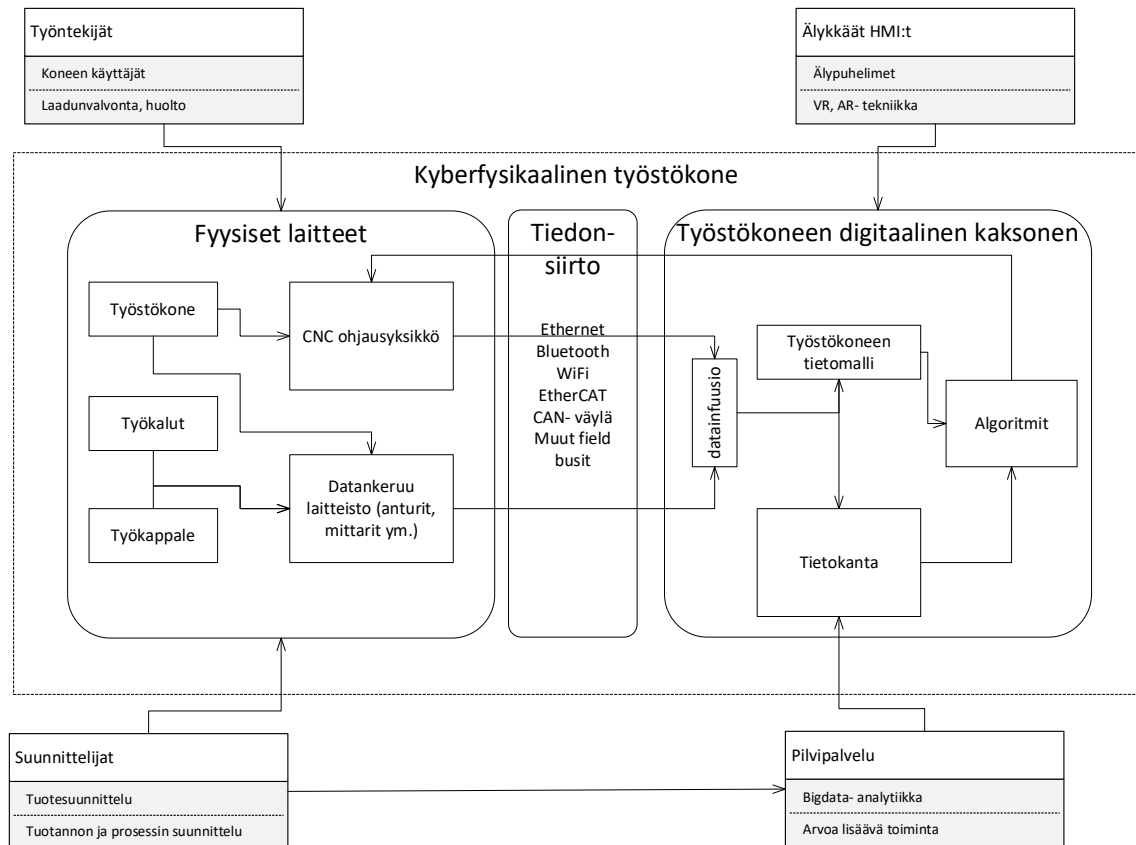
Suorakerrostuksessa käytettävää laseria voidaan hyödyntää kappaleen karkaisussa. Jäännösjännityksiä voidaan muokata lasershokkivasaroinnin (Laser Shock Peening, LSP) avulla. Tämän menetelmän voi integroida sorviin samaan tapaan kuin suorakerrostuksen, sillä käytettävää työkalua ohjataan samaan tapaan kuin muitakin sorvin työkaluja. (Sealy et al., 2018)

6.3 Digitaalisen kaksosen kehitys tulevaisuudessa

Tässä työssä rakennettavan virtuaalisen mallin avulla voidaan tulevaisuudessa rakentaa hybridisorvin digitaalinen kaksonen tai kyberfysikaalinen malli. Esineiden internetin ja pilvipohjaisen datansiirron yleistyttyä teollisuudessa Teollisuus 4.0:n myötä, on älykkäiden työstökoneiden ja niistä kerättävän tuotannon aikaisen datan määrä kasvanut huomattavasti. (C. Liu et al., 2018) Tätä dataa voidaan käyttää hyväksi tuotannon suunnittelussa tai kehitysprojekteissa. Työstökoneen digitaalinen kaksonen on joukko matemaattisia malleja sillä tehtävien prosessien suhteita. Tämä ei rajoitu pelkästään yksittäiseen koneeseen, vaan se on kattavampi kokonaisuus koko yritystasolla, jota kuvataan big data-analyysien ja koneoppimisen avulla. (Kabaldin et al., 2019)

Koneen virtuaalisen mallin rakentamisessa käytetään Siemens NX:n Machine tool builder- lisäosaa, jossa mallinnetut komponentit voidaan määrittää työstökeskuksen tai sorvin eri komponenteiksi ja antaa niille tiettyjä toiminnallisuuksia. Virtuaalista mallia voidaan myöhemmin käyttää hyväksi hybridisorvin digitaalista kaksosta rakentaessa. Virtuaalinen malli itsessään ei vielä ole digitaalinen kaksonen, vaikka sen liikeradat ja -nopeudet olisivatkin samat. Digitaalisen kaksosen tulee olla aina samassa tilassa todellisen mallin kanssa, jolloin todellinen laite pitäisi linkittää jollakin tavalla virtuaaliseen malliin, jotta liikkeet tapahtuisivat samaan aikaan molemmissa. Fyysiseen koneeseen joudutaan lisäämään erilaisia paikka-antureita, jotta sen ja 3D-mallin liikkeet saadaan yhteneviksi. Tämän lisäksi hyvän digitaalisen kaksosen mallintamiseksi tarvitaan hyvin suoritettu prosessin mallinnus, joka pyrkii kuvastamaan todellisen hiontaprosessin kulkua ja sillä saavutettuja pinnanlaatuparametreja. Antureilta ja servomootoreilta saatua dataa voidaan verrata koneen tieto- ja virtuaalisessa mallissa olevaan dataan. Esimerkiksi akseleille voi virtuaalisessa mallissa määrittää nopeuden, kiihtyvyyden ja nykyksen arvoja. Jos nämä poikkeavat verrattuna antureiden dataan, voidaan päätellä jonkin olevan pielessä.

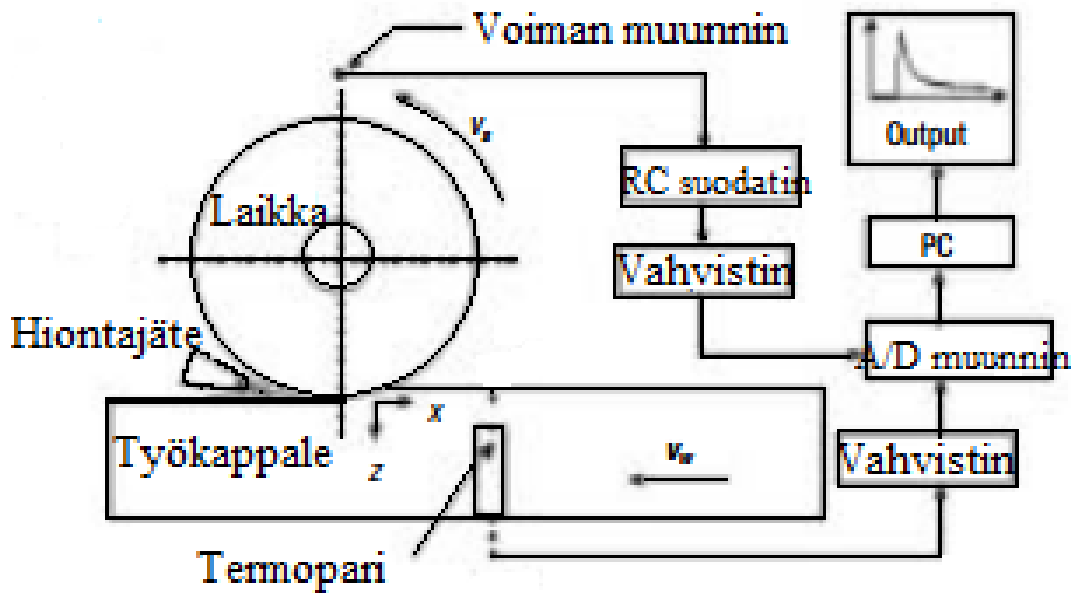
Artikkeleissaan C. Liu et al. (2018) ja Kabaldin et al. (2019) ovat tutkineet kyberfysikaalisten työstökoneiden hyödyntämistä digitaalisena kaksosena. Kyberfysikaalisen työstökoneen hierarkia on kuvattu kuvassa 50.



Kuva 50. Kyberfysikaalinen työstökone (C. Liu et al. 2018 mukailten).

Kyberfysikaalisen koneen mallissa fyysiset laitteet voidaan jaotella koneistusta tekeviin ja dataa kerääviin laitteisiin. Koneistusta tekevät laitteet ovat siis koneistuksessa käytettäviä työkaluja, kiinnittimiä, itse työstökone ja työkappale. Näihin komponentteihin voidaan halutun datan mukaan kiinnittää sensoreita, jotka keräävät niistä dataa. Datan keruussa voidaan hyödyntää erilaisia sensoreita, kiihtyvyyssantureita ja koordinaattimittalaitteita. Nämä laitteet mittavaan dataa reaaliajassa ja lähettävät sitä eteenpäin analysoitavaksi tietoverkostoa pitkin.

Guo & Malkin, (2000) ovat artikkelissaan tutkineet lämpötilan ja jäähtymisen mittaamista ja jakautumista hiontaprosessin aikana. Lämpötila vaikuttaa kappaleeseen syntyviin jäännösjännityksiin huomattavasti. Artikkelissa esitetään malli, jolla lämpötilaa voidaan mitata prosessista. Samaan tapaan voidaan mitata myös muita suureita, kuten värähtelyä ja painetta. Malli on esitetty kuvassa 51.



Kuva 51. Lämpötilan mittaus hiontaprosessissa (Guo & Malkin, 2000 mukailleen).

Tietoverkostona voidaan käyttää teollisessa ympäristössä yleisesti käytettyjä tiedonsiirtoprotokollia. Varsinainen työstökoneen digitaalinen kaksonen sisältää sille saapuvan tiedon käsittelyn sopivaan muotoon, koneen tietomallin, tietokannan ja algoritmit. Nämä pitävät sisällään tietoa koneen halutusta toiminnasta, sillä tehtävästä prosessista ja työstön valittavien parametrien vaikutuksesta työstön lopputulokseen. Näitä voidaan antureilta saadun datan avulla hyödyntää prosessin valvomisessa. Käynnissä olevan prosessin aikana voidaan esimerkiksi huomata laatuvirheitä ja ennustaa työkalujen kulumista. Yleisesti huomataan helposti, jos prosessi ei toimi niin kuin sen pitäisi.

7. YHTEENVETO

Hybridivalmistuksen todettiin olevan kasvava trendi valmistavan teollisuuden alalla monimutkaisten ja tarkkuutta vaativien kappaleiden valmistamisessa ja korjauksissa. Aihetta on tutkittu viimeisten vuosien aikana paljon. Suurimmat työstökonevalmistajat tarjoavat hybridityöstökoneita jo kaupallisessa tarkoituksessa. Kirjallisuuskatsauksen jälkeen voidaan kuitenkin todeta hybridisorvin, joka yhdistää sorvauksen, suorakerrostuksen, hionnan ja karkaisun olevan hyvin ainutlaatuinen tapaus. Usein suorakerrostusmenetelmä on yhdistetty työstökeskukseen, jolloin ainetta poistava työvaihe on jyrshintä.

Tämän työn lopputuloksena on valmis hybridityöstöön soveltuva NC-työstökone. Molemmat integroidut valmistusmenetelmät, hionta ja suorakerrostus pystyttiin testaamaan kirjallisuuskatsauksen mukaisilla testiparametreilla ja niiden avulla saatiin käytön kannalta lupaavia tuloksia. Työn perusteella voidaan siis sanoa, että näitä valmistusmenetelmiä voidaan soveltaa suhteellisin pienin kustannuksin olemassa olevalla koneella. Rakenteeltaan sorvi sopii sellaisenaan hiomakoneeksi, jolla pystytään tekemään ulkopuolista pyöröhiontaa. Painava ja jäykkä runko kestää hyvin hionnasta aiheutuvat värähtelyt. Värähtelyiden kannalta kriittisempiä kohtia ovat työkalun kiinnitys, laikan adapteri, karamoottori ja johteiden kiinnityskohdat. Hionnan kannalta oleellimmat koneen muokkaukset liittyvät työkalun adapteriin ja lastuamisnestejärjestelmään. Adapteri on suunniteltu alan standardien mukaan. Lastuamisnestejärjestelmä mitoitettiin kirjallisuudesta löytyvän tiedon mukaan. Järjestelmä on mitoitettu kapasiteetiltaan sellaiseksi, että sitä voidaan käyttää prosessia katkaisematta.

Suorakerrostusta varten tärkein valmistettava komponentti on sen adapteri, millä se voidaan kiinnittää sorvin työkalurevolveriin. Suunnittelua vaadittiin myös laserkuidun ja letkujen tuonnissa suorakerrostuspäälle siten, että prosessia voidaan käyttää koneen ollessa suljettu muusta laboratoriosta. Suorakerrostuksen komponentit mitoitettiin pääasiassa EHLA- prosessia varten. Prosessin suuri pintanopeus saavutetaan pyörittämällä sorvin pääkaraa ja tältä osin prosessia voidaan säätää hyvin paljon. Muut suorakerrostusprosessiin liittyvät komponentit jauhesuodatinta lukuun ottamatta ovat koneesta irrallisia ja ne voidaan vaihtaa toisiksi, kunhan ne voidaan liittää suorakerrostuspäähän. Suorakerrostuksen implementoinnissa on erityisen tärkeää ottaa huomioon käyttäjien suojukseen liittyvät asiat. Esimerkiksi laservaloon ei saa prosessin aikana olla suoraa näköyhteyttä, vaan sorvin läpinäkyvään suojukseen lisätään haitalliset aallonpituudet suodattava suojus.

Sorvin virtuaalisen mallin luominen alkaa komponenttien mallintamisella. Tässä käytettiin käsivarsimittalaitetta, jotta komponenttien mittaustulokset ovat luotettavia. Joitakin komponentteja mitattiin myös käsimittavälineillä. Virtuaalisen mallin tekeminen onnistuu muokkaamalla MTB:ssä valmiina olevia malleja. Pohjana voidaan käyttää mallia, joka on kinematiikaltaan vastaava tarkasteltavan koneen kanssa. Virtuaalisen mallin avulla voidaan tehdä törmäystarkastelu CAM-ohjelmalle, eli voidaan todentaa koneen liikkeet työstön aikana. Mallia voi hyödyntää myös opetustarkoituksessa. Törmäystarkastelu on erityisen hyödyllinen suorakerrostusprosessin kanssa, sillä työkalun törmäykset ovat kalliita. Itse kirjoitettua G-koodia mallin avulla ei pystytä simuloimaan.

Postproessorin avulla CAM-ohjelma voidaan kääntää käytettävän koneen lukemaksi G-koodiksi. Postproessoreita voidaan muokata ja luoda Siemensin Post Builderin avulla. Post Builderissa voidaan muokata tulostettavan koodin muotoa halutuksi. Hybridityöstöä varten postproessoriin lisättiin UDE:ja, jotka mahdollistavat lisättyjen toimilaitteiden käytön CAM-ohjelman halutussa kohdassa.

Hybridityöstömenetelmien integroiminen samaan koneeseen ja Siemens NX:n käyttäminen CAM-ohjelmistona helpottaa ”CAD to part”- prosessia, kun kappale voidaan valmistaa digitaalisesti alusta loppuun. Sorvin virtuaalista mallia voidaan hyödyntää myöhemmin koneen ja koko tuotantoprosessin digitaalisen kaksosen kehittämisessä. Digitaalista kaksosta varten hybridisorvista ja valmistusprosessista tulee saada enemmän dataa antureiden avulla.

LÄHTEET

- Anand Ronald, B., Vijayaraghavan, L., & Krishnamurthy, R. (2009). Studies on the influence of grinding wheel bond material on the grindability of metal matrix composites. *Materials and Design*, 30(3), pp.679–686.
- Axinte, D., Axinte, M., & Tannock, J. D. T. (2003). A multicriteria model for cutting fluid evaluation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(10), pp.1341–1353.
- Cortina, M., Arrizubieta, J. I., Ruiz, J. E., Ukar, E., & Lamikiz, A. (2018). Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations. *Materials*, 11(12).
- Daneshi, A., Jandaghi, N., & Tawakoli, T. (2014). Effect of dressing on internal cylindrical grinding. *Procedia CIRP*, 14, pp.37–41.
- Flynn, J. M., Shokrani, A., Newman, S. T., & Dhokia, V. (2016). Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, pp.79–101.
- Gibson, I., & Rosen, D. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. pp. 245-258
- Grguraš, D., & Kramar, D. (2017). Optimization of hybrid manufacturing for surface quality, material consumption and productivity improvement. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 63(10), pp.567–576.
- Groover, M. P. (2008). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (3rd ed.). pp. 39-270.
- Guo, C., & Malkin, S. (2000). Energy partition and cooling during grinding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2(3), pp.151–157.
- Hudson, R. (2016). Hybrid Manufacturing Opens Door to New Manufacturing Future. *Aerospace & Defense Manufacturing, Supplement to Advanced Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers (SME)*, 47.
- ISO-16089-2015, Machine tools. Safety. Stationary grinding machines
- Janosik, S. M. (2005). Advanced Mmanufacturing Systems and Technology. In *NASPA Journal* (Vol. 42, Issue 4).

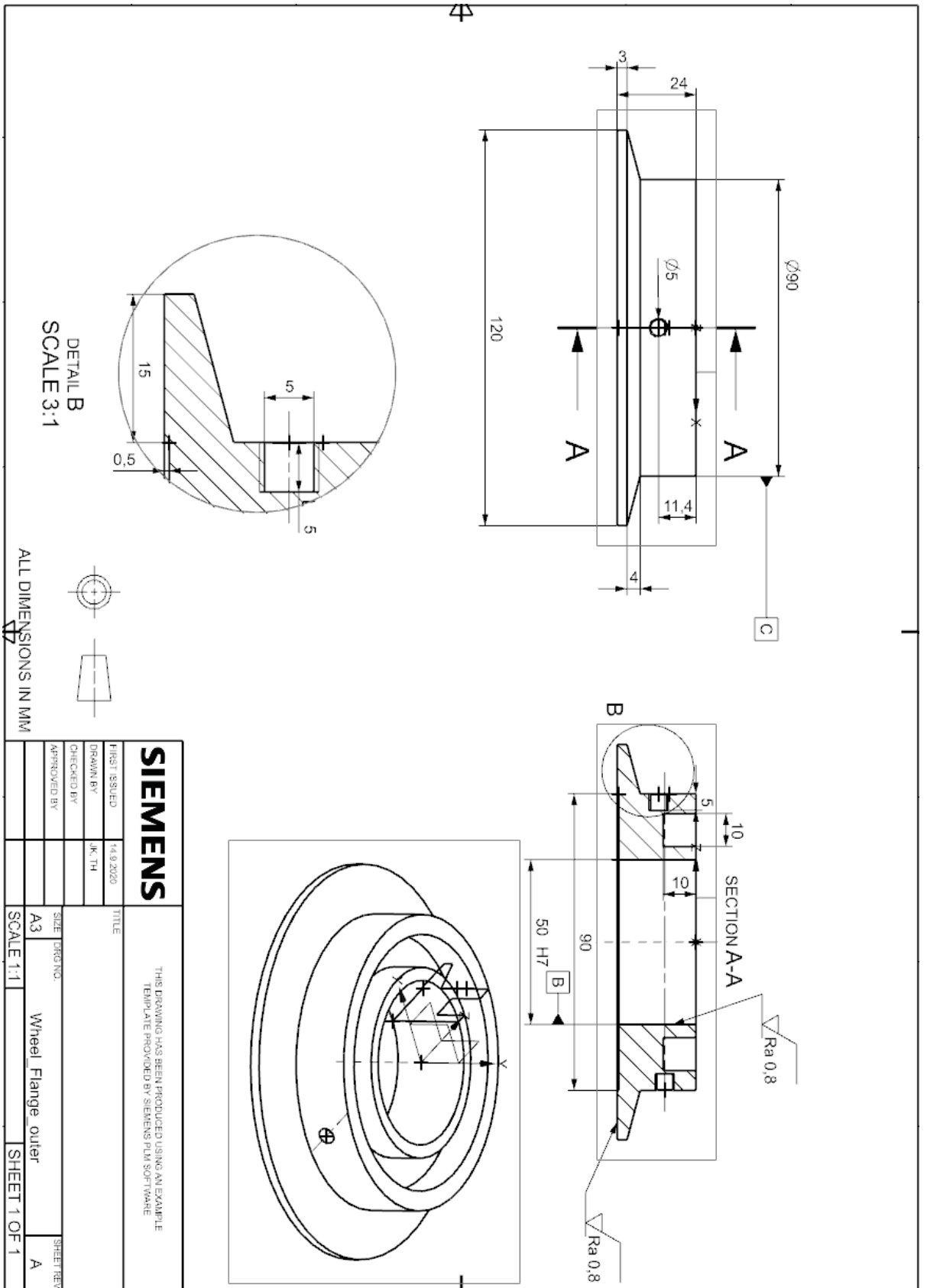
- Javaroni, R. L., Lopes, J. C., Sato, B. K., Sanchez, L. E. A., Mello, H. J., Aguiar, P. R., & Bianchi, E. C. (2019). Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), pp.2809–2819.
- Jinoop, A. N., Paul, C. P., Mishra, S. K., & Bindra, K. S. (2019a). Laser Additive Manufacturing using directed energy deposition of Inconel-718 wall structures with tailored characteristics. *Vacuum*, 166(May), pp.270–278.
- Kabaldin, Y. G., Shatagin, D. A., Anosov, M. S., Kolchin, P. V., & Kuz'mishina, A. M. (2019). CNC Machine Tools and Digital Twins. *Russian Engineering Research*, 39(8), pp.637–644.
- Klocke, F., Brinksmeier, E., Evans, C., Howes, T., Inasaki, I., Minke, E., Tönshoff, H. K., Webster, J. A., & Stuff, D. (1997). High-speed grinding - Fundamentals and state of the art in Europe, Japan, and the USA. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46(2), pp.715–724.
- Li, L., Zhang, X., Cui, W., Liou, F., Deng, W., & Li, W. (2020). Temperature and residual stress distribution of FGM parts by DED process: modeling and experimental validation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1–2), pp.451–462.
- Li, T., Zhang, L., Bultel, G. G. P., Schopphoven, T., Gasser, A., Schleifenbaum, J. H., & Poprawe, R. (2019). Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA) of AISI 4340 Steel. *Coatings*, 9(12), pp.778.
- Li, W., & Soshi, M. (2019). Modeling analysis of grain morphologies in Directed energy deposition (DED) coating with different laser scanning patterns. *Materials Letters*, 251, 8–12.
- Liu, C., Vengayil, H., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp.13–24.
- Liu, J., Wang, X., & Wang, Y. (2017). A complete study on satellite thruster structure (STS) manufactured by a hybrid manufacturing (HM) process with integration of additive and subtractive manufacture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9–12), pp.4367–4377.
- Manogharan, G., Wysk, R. A., & Harrysson, O. L. A. (2016). Additive manufacturing-integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: Economic model and

- analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(5), pp.473–488.
- Nadolny, K., & Herman, D. (2015). Effect of vitrified bond microstructure and volume fraction in the grinding wheel on traverse internal cylindrical grinding of inconel® alloy 600. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(5–8), pp.905–915.
- Ostendorf, A., Claußen, S., & Jones, M. G. (2010). Laser material processing. In *Intelligent Energy Field Manufacturing: Interdisciplinary Process Innovations*.
- Petrick, I. J., & Simpson, T. W. (2013). 3D printing disrupts manufacturing. *Research Technology Management*, 56(6), pp.12–16.
- Riipinen, T., Kujanpää, V., Komi, E., Kilpeläinen, P., Savolainen, M., Puukko, P., Vihinen, J., Coatanea, E., & Mokhtarian, H. (2018). *Industrialization of hybrid and additive manufacturing - Implementation to Finnish industry (HYBRAM)*, 66.
- Rowe, W. B. (2009). *Principles of Modern Grinding Technology*, pp.1-369.
- Ryu, D. J., Ban, H. Y., Jung, E. Y., Sonn, C.-H., Hong, D. H., Ahmad, S., Gweon, B., Lim, D., & Wang, J. H. (2020). Osteo-Compatibility of 3D Titanium Porous Coating Applied by Direct Energy Deposition (DED) for a Cementless Total Knee Arthroplasty Implant: In Vitro and In Vivo Study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), 478.
- RWTH Aachen (2017). Seminar on Basics of Grinding Technology. (Rajoitettu käyttö)
- Sanchez Gomez, C. A., Gil Castiblanco, L. E., & Arroyo Osorio, J. M. (2017). Building a virtual machine tool in a standard PLM platform. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(2), pp.445–455.
- Schopphoven, T., Gasser, A., & Backes, G. (2017). EHLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition. *Laser Technik Journal*, 14(4), pp.26–29.
- Schopphoven, T., Pirch, N., Mann, S., Poprawe, R., Häfner, C. L., & Schleifenbaum, J. H. (2020). Statistical/numerical model of the powder-gas jet for extreme high-speed laser material deposition. *Coatings*, 10(4).
- Sealy, M. P., Madireddy, G., Williams, R. E., Rao, P., & Toursangsaraki, M. (2018). Hybrid processes in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140(6).

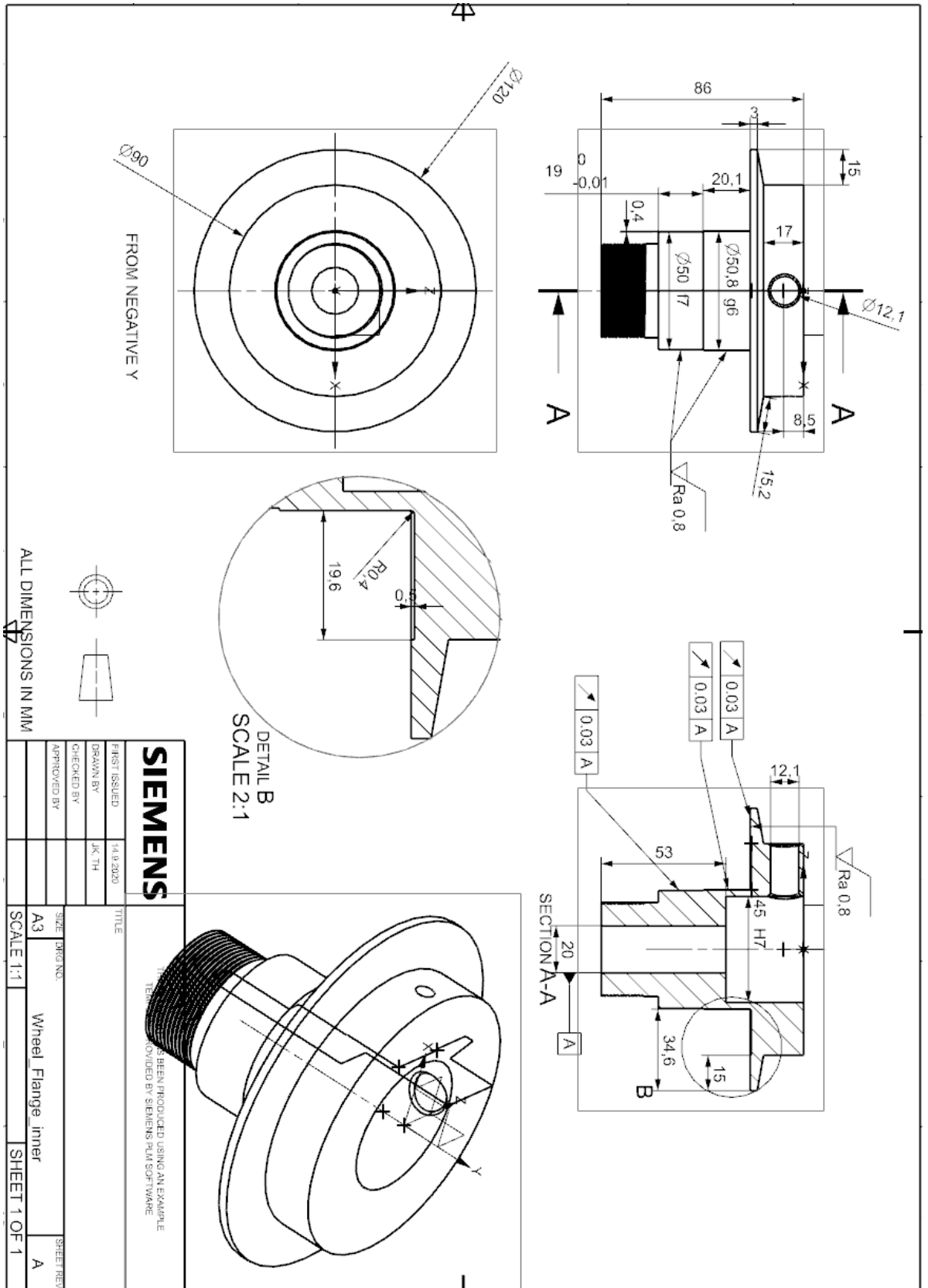
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 1–18.
- Simpson, T. (2019). *Additive + Subtractive = Hybrid Manufacturing*. Understanding Industrial 3D printing. *Additive Insights*, pp.3–5.
- Smoqi, Z., Toddy, J., Halliday, H. (Scott), Shield, J. E., & Rao, P. (2021). Process-structure relationship in the directed energy deposition of cobalt-chromium alloy (Stellite 21) coatings. *Materials and Design*, 197.
- Song, Y. A., Park, S., Choi, D., & Jee, H. (2005). 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), pp.1057–1062.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2013). Laser Material Processing. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Stephenson, D. J., Jin, T., & Corbett, J. (2002). High efficiency deep grinding of a low alloy steel with plated CBN wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1), pp.241–244.
- Strong, D., Sirichakwal, I., Manogharan, G. P., & Wakefield, T. (2017). Current state and potential of additive - Hybrid manufacturing for metal parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(3), pp.577–588.
- Wan, J. G., & Ding, W. (2014). Research and application of CAD/CAM technology in NC machining of part with complex surface. *Applied Mechanics and Materials*, 602–605, pp.111–116.
- Wang, Z., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2016). Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 110, pp.226–235.
- Winter, M., Thiede, S., & Herrmann, C. (2015). Influence of the cutting fluid on process energy demand and surface roughness in grinding—a technological, environmental and economic examination. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9–12), pp.2005–2017.
- Yamazaki, T. (2016). Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining. *Procedia CIRP*, 42(Isem Xviii), pp.81–86.

- Yilmaz, O., & Uglu, A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(10), pp.1781–1798.
- Youssef, Helmi A., and H. E.-H. (2008). *Machining Technology Machine Tools and Operations*. pp.119-131.
- Zhang, X., Cui, W., Li, W., & Liou, F. (2019). A hybrid process integrating reverse engineering, pre-repair processing, additive manufacturing, and material testing for component remanufacturing. *Materials*, 12(12).

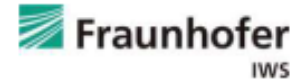
LIITE A: ADAPTERIN ULKOLAIPPA



LIITE B: ADAPTERIN SISÄLAIPPA



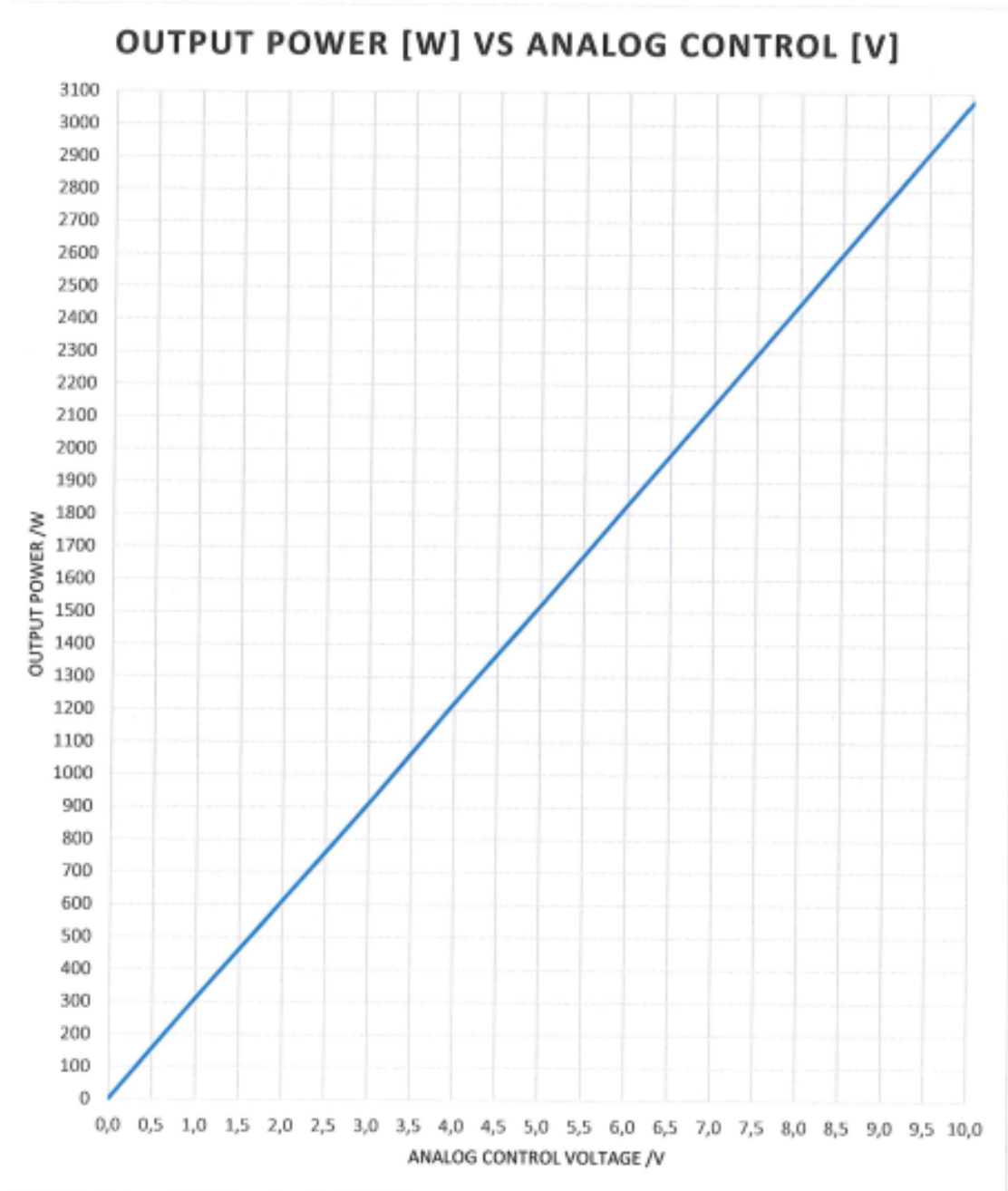
LIITE C: SUORAKERROSTUSPÄÄN TEKNISET TIEDOT



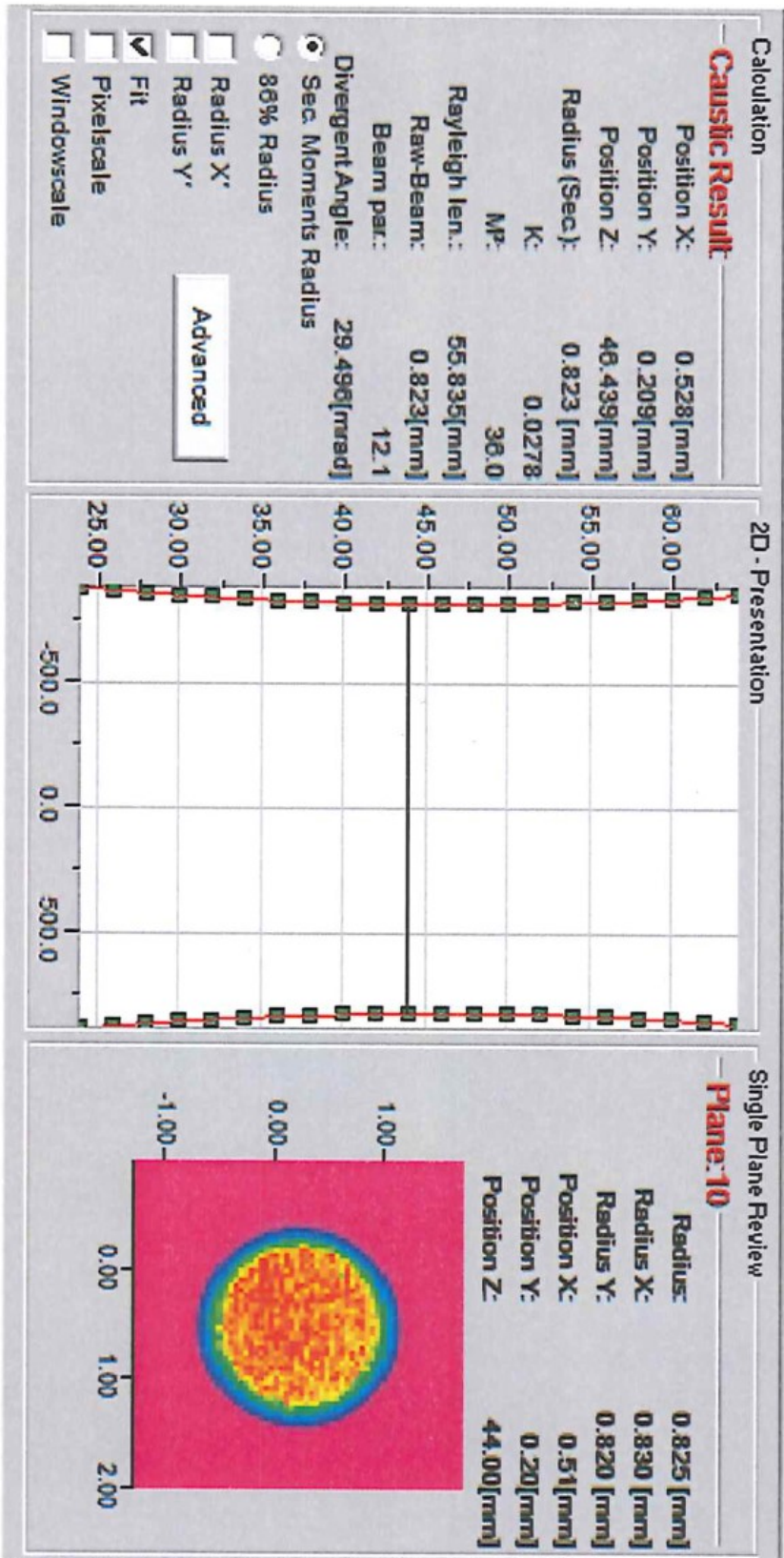
Technical Data

Optimal powder grain size	10...60 µm for WD7 10...150 µm for WD13	Larger powder grain sizes can plug up the nozzle tip
Recommended powder feed rates	1..20 g/min	Feeding systems of Sulzer-Metco or GTV are well-proven and can be recommended.
Minimum powder focus	1..2 mm	Depending on powder, powder feed rate, nozzle tip selected.
Distance nozzle-surface	7.5 mm, 13 mm	Other working distances on request.
Maximum laser power	3000 W	Higher laser power at increased working distance (i.e. larger powder focus diameter)
Nozzle displacement	0° - 20°	With stronger inclination interference may occur.

LIITE D: LASERIN OHJAUSJÄNNITYS TEHON FUNKTIONA



LIITE E: LASERSÄTEEN LAATU



Measured Beam NA = 0.061.

LIITE F: LASTUAMISNESTEEN SUODATUSJÄRJESTELMÄ

