

Perttu Häyrinen

HIONTANESTEET JA SUUTTIMIT HION- NAN LÄMMÖNHALLINNASSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Elokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Perttu Häyrinen: Hiontanesteet ja suuttimet hionnan lämmönhallinnassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Kone- ja tuotantotekniikka
Elokuu 2020

Hiominen on tärkeässä asemassa monien tuotteiden valmistuksessa eri teollisuuden aloilla. Hiominen mahdollistaa korkean tarkkuuden ja pienen pinnankarheuden, sekä pienet toleranssit kappaleen koolle ja muodolle. Se suoritetaan yleensä valmistusprosessin loppupäässä, joka korostaa hionnan tärkeyttä.

Hiontaprosessi vaatii muihin lastuaviin menetelmiin verrattuna huomattavasti enemmän energiaa poistetun materiaalin määrään verrattuna. Suurin osa energiasta muuttuu lämmöksi hiontalaikean ja työstettävän kappaleen kosketuksessa. Lämpötila on hiontaprosessia rajoittava muuttuja. Hionnan aikana liian suureksi noussut lämpötila voi aiheuttaa vaurioita työstettävään kappaleeseen.

Tämän kirjallisuuskatsaukseen perustuvan työn tarkoituksena on esittää millaisia vaurioita liian suureksi noussut lämpötila voi aiheuttaa teräkseen hionnassa ja selvittää miten hiontaprosessin lämpötilaa voidaan hallita jäähdytysvoitelunesteiden avulla. Kirjallisuuden avulla esitellään erilaisia hionnassa käytettäviä nesteitä, sekä vertaillaan keinoja toimittaa neste suuttimen kautta tehokkaasti prosessiin.

Hionnassa käytettävät nesteet voidaan jakaa öljyihin ja vesipohjaisiin nesteisiin. Öljyjen pääasiallinen etu on hyvät voiteluominaisuudet, kun taas vesipohjaisten nesteiden etu on hyvät jäähdytysominaisuudet. Hiontanesteen valinta on tehtävä tapauskohtaisesti useista eri nesteistä ja otettava erilaiset tekijät huomioon valintaa tehdessä.

Suutinta käytetään säätämään nesteen virtausta prosessiin. Ne voidaan jakaa neljään perustyyppiin: konventionaalinen, painettakohottava, suurinopeus- ja spraysuutin. Suurinopeus-suuttimia kutsutaan myös pistesuihkusuuttimiksi. Perustyyppien suuttimet ovat rakenteeltaan hyvin erilaisia, mutta jokaisella on etunsa. Myös suutinjärjestelmän ja syöttöstrategian valinta on harvoin yleistettävissä. Kirjallisuuden perusteella suurinopeussuutin kuitenkin vaikuttaa olevan tällä hetkellä paras vaihtoehto teollisuuden sovelluksiin, kun halutaan toimittaa neste tehokkaasti kontaktialueelle.

Suuttimen suositeltu sijainti riippuu paljon käytettävästä suuttimesta. Suositellusta sijainnista on myös tutkimuksissa saatu ristiriitaisia tuloksia etenkin konventionaalisilla suuttimilla. Kirjallisuuden perusteella suuttimesta poistuvan suihkun nopeuden olisi hyvä olla lähellä hiontalaikean kehän pyörimisnopeutta.

Avainsanat: Pyöröhionta, Tasohionta, Hiontaneste

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HIONTAPROSESSI	2
2.1 Pyörö- ja tasohionta	3
2.2 Hionnan lämpötila	4
2.2.1 Teräksen lämpövauriot hionnassa	5
3. LÄMMÖN HALLINTA HIONTANESTEIDEN AVULLA	8
3.1 Hiontanesteen vaikutus hiontaprosessiin	8
3.2 Hiontaneesteet yleisesti	9
3.2.1 Vesipohjaiset nesteet	9
3.2.2 Öljyt	10
4. SUUTINJÄRJESTELMÄ HIONNASSA	12
4.1 Suutintyypit	13
4.2 Järjestelmän toteutus	15
4.2.1 Nesteen toimituksen haasteet	16
4.2.2 Suuttimen sijainti	17
4.2.3 Nesteen virtausnopeus	18
4.3 Ilmavirrankääntäjä	19
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	21
5.1 Ilmarajakerroksen vaikutuksen minimointi	21
5.2 Hiontanesteen valinta	21
5.3 Optimaalinen virtausnopeus ja suuttimen sijainti	22
5.4 Suuttimen valinta	23
6. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	27

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Hiontalaikan rakenne (Rowe 2009, s.80).....</i>	<i>2</i>
Kuva 2.	<i>Pyörö- ja tasohionta (Uddeholm 2018).....</i>	<i>3</i>
Kuva 3.	<i>a) ulkoinen pyöröhionta; b) sisäinen pyöröhionta (Sakabrasives 2017).</i>	<i>4</i>
Kuva 4.	<i>Poikkileikkaus päästyneestä (a) ja kareneesta alueesta (b). (Seidel et al. 2018).....</i>	<i>6</i>
Kuva 5.	<i>Erlaisia halkeamia purppuran väriseksi palaneella pinnalla (Lin et al. 2018).....</i>	<i>6</i>
Kuva 6.	<i>Yhteenveto hiontaneesten voitelu- ja jäähdytysvaikutuksista (Brinksmeier et al. 1999).</i>	<i>8</i>
Kuva 7.	<i>Jäähdytysvoitelunesteiden käytön parametrit, jotka vaikuttavat prosessiin ja sen lopputulokseen (mukaillen Brinksmeier et al. 1999)</i>	<i>12</i>
Kuva 8.	<i>Useita erilaisia suuttimia on kehitelty hionnan eri sovelluksille (mukaillen Brinksmeier et al. 1999).</i>	<i>13</i>
Kuva 9.	<i>Painettakohottavan suuttimen sijainti hiontalaikkaan nähden (Klocke et al. 2014).</i>	<i>14</i>
Kuva 10.	<i>Suurinopeussuutin (Huuha 1982).....</i>	<i>15</i>
Kuva 11.	<i>Ilmarajakerros aiheuttaa taipumisilmiön nestesuihkuun (Majumdar et al. 2018).....</i>	<i>16</i>
Kuva 12.	<i>Suutinten sijainnit Ebberel et al. (2000) kokeissa.</i>	<i>18</i>
Kuva 13.	<i>Ilmavirrankääntäjän vaikutus ilmarajakerrokseen (Majumdar et al. 2018).</i>	<i>20</i>

1. JOHDANTO

Hiominen on työstöä geometrisesti epämääräisellä kappaleella. Hiomista voidaan soveltaa lähes kaikille materiaaleille ja sitä käytetään paljon kovien materiaalien koneistamiseen. Hiominen on yleensä osana lähes jokaisen tuotteen valmistusta, sillä se mahdollistaa korkean tarkkuuden, sekä pienet toleranssit kappaleen koolle, muodolle ja pinnalle. Monipuolisuuden takia hiontaa voidaan käyttää esimerkiksi suurien työkappaleiden koneistamiseen, kun pinnalta vaaditaan suoruutta tai pieniin kappaleisiin, kun tarvitaan tarkkuutta. Hionta suoritetaan yleensä valmistuksen loppupäässä, jolloin virheet tulevat kalliiksi. (Rowe 2009, s. 1-4)

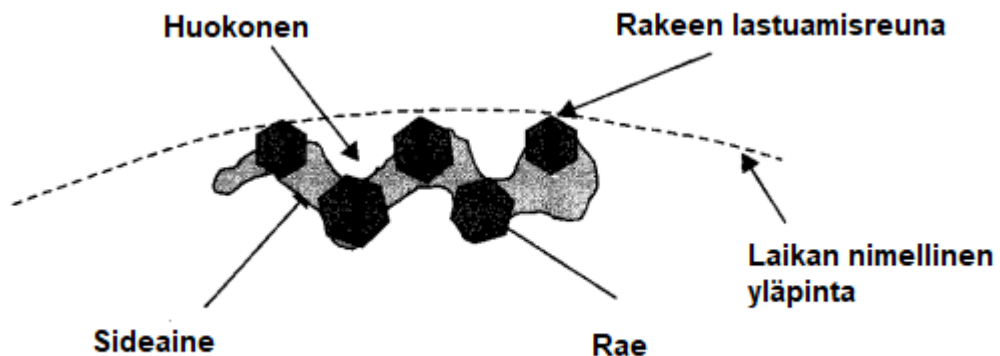
Lämpötilan nouseminen liian korkeaksi hiomaprosessissa on yksi tärkeimmistä työkappaleen laatuun vaikuttavista tekijöistä, joka rajoittaa myös tuotannon tehokkuutta. Hionnan aikana liian suureksi noussut lämpötila voi aiheuttaa vaurioita työstettävään kappaleeseen. Jäähdytysvoitelu on tärkeässä osassa hionnan lämmönhallinnassa. Voitelulla ja jäähdytyksellä pystytään vähentämään laikan ja työkappaleen välistä kitkaa, sekä johdamaan lämpöä pois työkappaleesta. Ympäristöhuolet ja jäähdytysvoitelunesteiden käytöstä syntyvät kulut ajavat kehittämään nesteiden käyttöä tehokkaammaksi. (Klocke et al. 2014)

Tämän työn tarkoituksena on tutustua vaurioihin, joita liian korkeaksi noussut lämpötila aiheuttaa työkappaleeseen. Kirjallisuuden avulla selvitetään, miten hiontaprosessin lämpötilaa voidaan hallita hiontanesteiden avulla ja esitellään nesteen toimittamiseen käytettäviä suuttimia. Työ on rajattu koskemaan pyörö- ja tasohiontaa. Työssä vertaillaan hiontanesteiden ominaisuuksia ja erilaisia suutinmalleja. Kirjallisuudesta löytyvien tutkimusten avulla käydään läpi nesteen virtausnopeuden ja suuttimen sijoittelun vaikutusta hionnan voitelun ja jäähdytyksen tehokkuuteen.

2. HIONTAPROSESSI

Hiominen on lastuava valmistusmenetelmä, jossa hiontalaikan yksittäiset rakeet toimivat lastuavana teränä. Rakeiden muoto on geometrisesti epämääräinen ja ainetta poistavia särmiä on useita, joka erottaa hionnan muista lastuavista menetelmistä. Hionta suoritetaan yleensä pyörivällä hiontalaikalla yhdensuuntaisesti työkappaleeseen nähden. Rakeella tapahtuvan lastuamisen nopeus on suurempi ja lastuamissyvyys pienempi terällä tapahtuvaan lastuamiseen verrattuna. Hiomista käytetään yleensä silloin, kun työstöltä vaaditaan kahta tai kaikkia seuraavista ominaisuuksista: korkea tarkkuus, korkea aineenpoistonopeus ja kovien materiaalien lastuaminen. (Klocke et al. 2014; Marinescu et al. 2016, s. 4)

Hiominen on tärkeässä asemassa edistyneiden tuotteiden ja pintojen tuotannossa monilla aloilla. Modernissa teollisuudessa hiontatekniikka on kehitetty vastamaan tietyn tuotteen ja prosessin vaatimuksia tarkasti. Se voidaan suorittaa laajalle kirjolle materiaaleja ja työstettävän komponentin koko voi vaihdella pienestä hyvin suureen. Komponentin muoto taas voi olla taso tai pyörähdyspinta. (Marinescu 2016, s. 3-6) Pinnan laatu on hionnalla mahdollista saada erinomaiselle tasolle, tyyppinen hionnan pinnankarheus on välillä Ra 0.1 μm - 2 μm (Puerto et al. 2013).



Kuva 1. Hiontalaikan rakenne (Rowe 2009, s. 80).

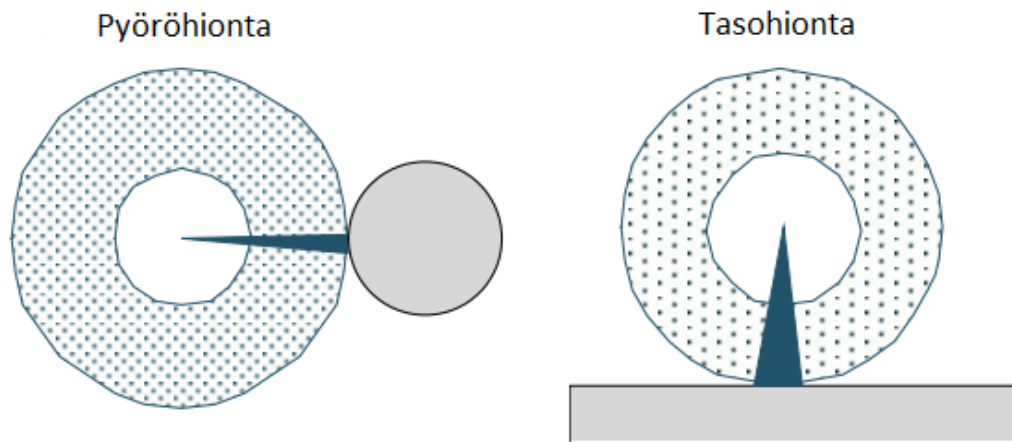
Hiomalaikan rakenne koostuu hioma-aineesta, sideaineesta ja huokosista. Hioma-aineista teräksen hionnassa yleisin on alumiinioksidi. Piikarbidiä käytetään epärautamalleille, boorinitridiä (CBN) taas superseoksille ja pikateräksille. Kovametallien hiomiseen käytetään timanttia. Yksittäiset rakeet on sidottu hiontalaikkaan kiinni sideaineen avulla kuvassa 1 esitetyllä tavalla. Terästen hionnassa käytetään eniten keraamisia si-

deaineita. Hiontalaikan kovuus ja huokoisuus riippuu sideaineen määrästä. Korkea huokoisuus mahdollistaa tehokkaamman nesteen kuljetuksen kontaktialueelle ja suuremman aineenpoistonopeuden. Korkeahuokoiset laikat kuitenkin kuluvat nopeammin verrattuna laikkoihin, joissa on käytetty enemmän sideainetta. (Rowe 2009, s. 2, 80).

2.1 Pyörö- ja tasohionta

Hiontamenetelmät jaotellaan yleisesti työstettävän kappaleen mukaan pyörö- tai tasohionnaksi. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen malli pyörö- ja tasohionnasta. Tasohionta voidaan jakaa menetelmien perusteella otsa- ja kehähionnaksi. Pyöröhionta voidaan vielä eritellä sisä- ja ulkopuoliseen hiontaan. (Rowe 2009, s. 5)

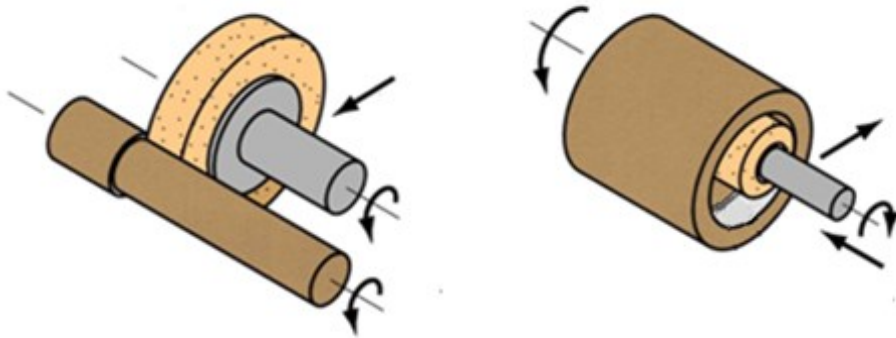
Syöttöliikkeen perusteella hiontamenetelmät voidaan vielä jakaa pituus- ja pistohiontaan. Pituushionnassa laikka ja työkappale liikkuvat ja hionta suoritetaan koko kappaleen yli suurella läpikulujen määrällä. Pistohionnassa hiotaan vain yhtä kohtaa kappaleesta eli hiontalaikka pysyy paikoillaan. Se myös eroaa pituushionnasta suuremmalla asetus- syvyydellä ja pienemmällä laikan syöttönopeudella. (Klocke et al. 2014)



Kuva 2. Pyörö- ja tasohionta (Uddeholm 2018).

Tasohionta on tasaisen tai profiloituneen pinnan hiontaa lineaarisella liikkeellä, joka suoritetaan pyörivällä hiontalaikalla. Laikka on suunnattu yhdensuuntaisesti työkappaleeseen nähden. Työstö tapahtuu yleensä laikan kehäpinnalla, mutta harvinaisemmin käytetyssä otsahionnassa laikan etuosalla. Tasohiontaa käytetään yleensä pinta-alaltaan isoille tasisille pinoille. Tasohionnassa työstettävä kappale liikkuu yleensä hitaasti pituussuunnassa hiontapöydällä. (Marinescu 2016, s. 409-415)

Lieriömäisen kappaleen hiomista kutsutaan sisä- tai ulkopuoliseksi pyöröhionnaksi. Ulkoisessa pyöröhionnassa hiotaan kappaleen ulkopintaa pyörimisakselin ympäri. Se on yksi yleisimmistä käytössä olevista hiontamenetelmistä. Ulkoisessa pyöröhionnassa työkalu tuetaan sen molemmista tai toisesta päästä pyörimisakselin kohdalta. Prosessi onnistuu monenlaisille pinnoille, muuttumattomasta halkaisijasta aina kierteitettyihin ja profiilipintoihin. Sisäistä pyöröhiontaa käytetään pääasiassa sisäisten pyörähdyspintojen ja reikien viimeistelyyn. Kuvassa 3 on esitetty ulkoisen ja sisäisen pyöröhionnan prosessi. (Marinescu 2016, s. 6, 493, 531)



Kuva 3. a) ulkoinen pyöröhionta; b) sisäinen pyöröhionta (Sakabrasives 2017).

2.2 Hionnan lämpötila

Hiontaprosessi vaatii huomattavan suuren määrän energiaa suhteutettuna poistetun materiaalin määrään, kun sitä verrataan muihin lastuaviin menetelmiin. Hionnan kuluttama energia ja teho ovat yleensä vaikeasti hallittavissa, koska kokonaisenergian kulutus riippuu useista parametreista. Parametrien ja parametriyhdistelmien vaikutusten selvittäminen on vaikeaa johtuen erityisen nopeasta lastun muodostuksesta ja monimutkaisista kitka- ja kosketusolosuhteista. Energia riippuu esimerkiksi työstettävästä materiaalista ja leikkaussyvyydestä, mutta myös muuttuvista parametreista kuten laikan kulumasta ja puhtaudesta. (Malkin & Guo 2007)

Suurin osa hionnan mekaanisesta energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Lämpö syntyy kappaleen ja hiontalaikan välisessä kosketuksessa. Suurin osa lämmöstä keskittyy kontaktialueelle, mutta lämpöä johtuu myös muualle työkappaleeseen ja laikkaan, sekä kulkeutuu lastujen ja hiontaneesten mukana pois. Lämpötilan nouseminen liian korkeaksi voi aiheuttaa vaurioita työkappaleeseen ja laskea valmistustarkkuutta, sekä nopeuttaa laikan kulumista. Kontaktialueen lämpötila on näistä syistä tärkeä prosessimuuttuja. (Malkin & Guo 2007)

Kontaktialueen lämpötilan mittaaminen on haasteellista. Sitä on vaikea mitata nopeiden lämpötilan muutosten takia. Lämpötilaa olisi myös tarpeen mitata mahdollisimman läheltä kontaktialuetta, mutta sinne ei ole helppoa pääsyä. Lämpötilan mittaussuunnitelmat eivät tarjoa käytännöllistä keinoa tunnistaa ja kontrolloida lämpötiloja tuotantoympäristössä. Hionnan tehon seuranta ja lämpöominaisuuksien arviointi tarjoavat paljon käytännöllisemmän tavan arvioida ja seurata lämpövaurioiden syntymistä. (Tönshoff & Denkena 2013, s. 276)

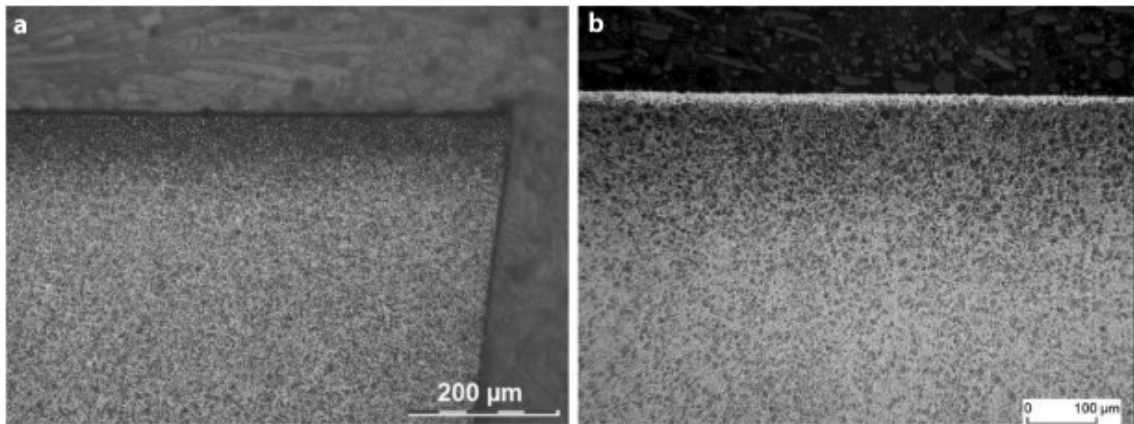
2.2.1 Teräksen lämpövauriot hionnassa

Liiallinen työkappaleen lämmön nousu hionnan aikana voi aiheuttaa kappaleeseen vaurioita. Vaurion syntyessä työkappaleen pintakerros ylittää hetkellisesti teräksen karkaisu- tai päästörajan kontaktialueen kitkan, vajavaisen jäähtymisen ja materiaalin muodonmuutosvastustuksen takia. Lämmön aiheuttamat muutokset riippuvat terästä hiottaessa työkappaleen materiaalin hiilen määrästä ja muista seossuhteista. (Guo & Malkin 2000)

Hionnassa esiintyy työkappaleen pinnan liiallisen lämpenemisen seurauksena jäännösjännityksiä, halkeilua ja palojälkiä. Lämmön aiheuttamat vauriot eivät kuitenkaan ole aina nähtävissä työkappaleen pinnalla. (Irani et al. 2005)

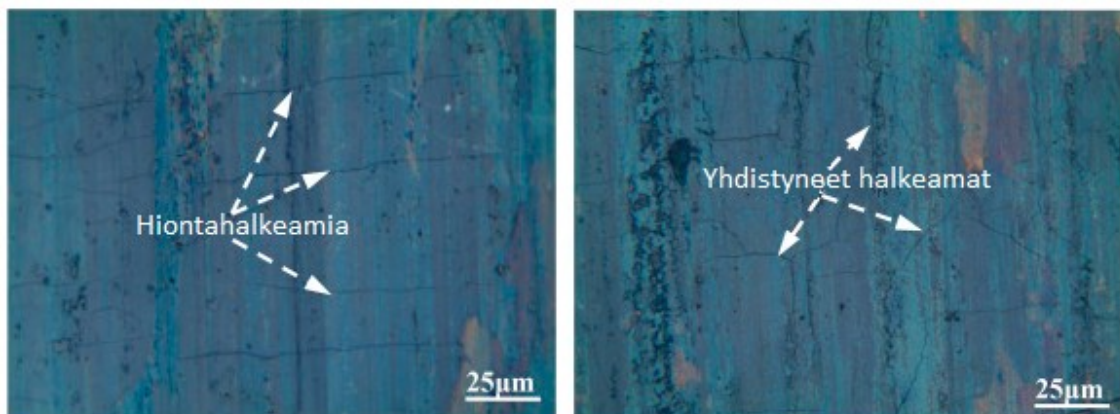
Palamisjäljet voi tunnistaa sinisestä väristä kappaleen pinnalla. Ne aiheutuvat nopeasta lämpötilan noususta, tai hitaan työstön nopeuden aiheuttamasta hetkellisestä liian suuresta lämmöstä. Ne ovat lähinnä kosmeettinen haitta ja suhteellisen vaarattomia vaikutetun kerroksen ollessa pieni. Jäljet on mahdollista poistaa pinnasta, mutta niiden yhteydessä voi esiintyä uudelleen karkenemista ja halkeilua. Palamisjälkiä on helppo olla huomaamatta viimeistelyyn käytettävän kipinätyöstö vaiheen takia. (Rowe 2009, s. 106-107)

Uudelleen karkeneminen on palamisen muoto, jossa jälkiä ei välttämättä ole nähtävissä. Työkappaleen pinnan lämpötilan ylittäessä teräksen austenoitumisrajan tapahtuu uudelleen karkeneminen. Se aiheuttaa hiilen diffuusiota teräksestä. Hiili tulee ulos teräksestä ja näkyy tummentumina kappaleen pinnalla. Lämpötilan jäädessä austenoitumisrajan alapuolelle ja ylittäessä päästölämpötilan tapahtuu päästyminen. Päästyminen ei ole suuri ongelma vähähiilisillä teräksillä, sillä ne ovat uudelleen karkaistavissa. Päästymistä esiintyy myös aina uudelleen karkenemien kohtien ympäristössä. (Huuhka 1982, s. 12) Kuvassa 4 on poikkileikkaus päästyneestä ja karkenneesta alueesta.



Kuva 4. Poikkileikkaus päästyneestä (a) ja karsuneesta alueesta (b). (Seidel et al. 2018)

Uudelleen karseneminen ja päästyminen aiheuttaa halkeilua työkappaleeseen. Hionta-halkeamat ovat vahingollisimpia liiallisen lämmön aiheuttamista vaurioista, koska niistä muodostuu käytön aikana murtumien ydinkohtia. (Rowe 2009, s. 106-110) Esimerkkejä hiontahalkeamista on kuvassa 5. Jos kappaleessa esiintyy karsenemisen jälkeen paljon jäännösausteniittia, syntyy halkeama austeniitin raerajalle. Pelkkä päästyminen kappaleen pinnalla aiheuttaa halkeamia päästyneiden kohtien keskustassa. Kun työkappaleessa esiintyy uudelleen karsenemista ja päästymistä, ydintyvät halkeamat näiden kerrosten välissä. (Huuhka 1982, s. 12-13)



Kuva 5. Erilaisia halkeamia purppuran väriseksi palaneella pinnalla (Lin et al. 2018).

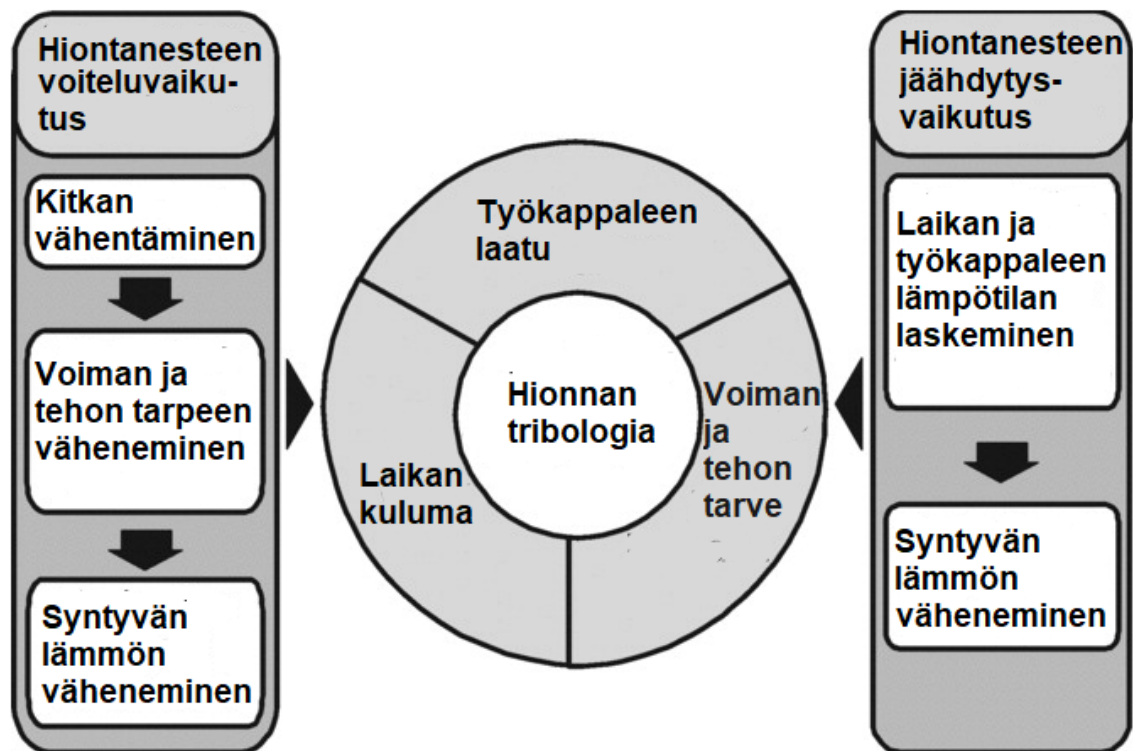
Lämmön aiheuttamia jäännösjännityksiä ovat faasimuutosjännitykset ja lämpöjännitykset. Pintakerroksen lämpenemisellä on yleisesti suurin vaikutus siihen, onko jäännösjännitys veto- tai puristusjännitystä. Näistä vetojäännösjännitys on haitallista ja voi heikentää väsymismurtumakestoja, sekä aiheuttaa muodonmuutoksia ja halkeamia. Faasimuutosjännityksiä syntyy työkappaleen tilavuuden muuttuessa uudelleen karsenemisen ja

päästymisen seurauksena. Työkappaleen materiaalin tilavuutta pienentävät faasimuutokset aiheuttavat vetojäännösjännityksiä ja rakennetilavuutta lisäävät muutokset puristusjännityksiä. (Huuhka 1982, s. 14-17)

3. LÄMMÖN HALLINTA HIONTANESTEIDEN AVULLA

3.1 Hiontaneesteiden vaikutus hiontaprosessiin

Hiontaneesteillä on tärkeä rooli hionnan lämmönhallinnassa. Hiontaneesteiden tärkein tehtävä on hiontalaikan ja työkappaleen välisen kontaktialueen jäähdytys. Kontaktialueen jäähdytys tapahtuu suoraan laikan ja työkappaleen kosketuksen jäähdytyksellä, sekä pitämällä yllä hiomalaikan tehokkuutta voitelun avulla. Oikeanlainen nesteiden käyttö johtaa yleensä parempaan työkappaleen laatuun, hiontalaikan käyttöikään ja prosessin tehokkuuteen. Kuvassa 6 on esitetty yhteenveto nesteiden vaikutuksesta hiontaprosessiin. (Brinksmeier et al. 1999)



Kuva 6. Yhteenveto hiontaneesteiden voitelu- ja jäähdytysvaikutuksista (Brinksmeier et al. 1999).

Hiontalaikan ja työkappaleen välinen kitka kehittää lämpöä kontaktialueelle. Voitelulla voidaan vähentää kitkaa laikan ja työkappaleen välillä, sekä laikan ja irrotettavien lastujen välillä. Voitelu on tärkeä tapa vähentää hiontalaikan kulumaa. Kitkaa ja kulumaa vähentämällä tarvitaan vähemmän tehoa hionnan suorittamiseen. (Rowe 2009, s. 113)

Kontaktialueen jäähditys tapahtuu johtamalla lämpöä työkappaleen sijasta nesteeseen. Tämän takia neste toimii tehokkaammin mitä kylmempänä se pystytään pitämään. Jos lämmön annetaan nousta nesteessä liian korkeaksi ei lämmönsiirto nesteeseen ole enää mahdollista. (Irani et al. 2005)

Jäähditysvoitelunesteellä on kontaktialueen jäähdityksen ja voitelun lisäksi myös muita tehtäviä, kuten laikan puhdistaminen ja lastujen kuljettaminen pois kontaktialueen läheisyydestä. Työkappaleesta irrotetut lastut voivat tukkia laikan huokoset ja tylsyttää laikkaa, sekä naarmuttaa työkappaletta. Nesteiden tehtävä on myös suojata työkappaletta ja järjestelmää korroosiolta. (Klocke et al. 2014)

3.2 Hiontaneesteet yleisesti

Hiontanesteinä käytetään yleensä vesipohjaisia nesteitä, mineraaliöljyjä tai synteettisiä öljyjä. Hiontaneesteet koostuvat synteettisiä nesteitä lukuun ottamatta perusöljystä, johon voidaan lisätä muita nesteitä ja lisäaineita. Hiontanesteen jäähditys- ja voiteluvaatimukset vaihtelevat hionnan sovelluksen ja vallitsevien olosuhteiden mukaan. Neste ja sen koostumus tulisi valita tapauskohtaisesti jokaiselle hionnan erityistapaukselle. (Brinksmeier et al. 1999)

Fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat vahvasti nesteen toiminallisiin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. Lämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja viskositeetti riippuvat perusnesteestä ja sen suhteesta muihin käytettyihin aineisiin. Lisäaineilla voidaan parantaa nesteen suorituskykyä niin voitelun kuin nesteen käyttöön osalta. Lisäaineet jaetaan yleensä paineen kestoa lisääviin ja kulumista ehkäiseviin aineisiin. Lisäksi nesteissä käytetään korroosion estoaineita ja säilöntäaineita, jotka pidentävät nesteen käyttöikä. (Marinescu 2016, s. 247-248)

3.2.1 Vesipohjaiset nesteet

Vesipohjaiset nesteet voidaan jakaa emulsioihin, puolisynteettisiin lastuamislasteihin ja synteettisiin lastuamislasteihin. Emulsiot ovat näistä nesteistä yleisimmin käytettyjä metallien hionnassa. Niiden perusta on öljy, joka on yleensä mineraaliöljyä, mutta myös synteettisiä- ja kasviöljyjä käytetään. Puolisynteettiset nesteet ovat rakenteeltaan emulsioita, mutta eroavat niistä pienemmällä mineraaliöljypitoisuudella. Synteettiset nesteet eivät sisällä lainkaan öljyä, vaan ominaisuudet saadaan aikaan esimerkiksi amiinien ja saippuoiden avulla. (Hörner 2014)

Emulsiossa luonnostaan toisiinsa sekoittumattomat öljy ja vesi muodostavat seoksen. Tasaisen ja pysyvän seoksen saamiseksi käytetään yleensä emulgaattoreita. Ne vähentävät pintaenergiaa ja muodostavat kalvon öljypisaran ympärille estäen pisaroita yhdistymästä. Emulgaattorin tyyppi ja määrä määritetään halutun öljypisaran koon perusteella. Emulgaattoreita voidaan käyttää myös yhdistelminä. Vesipohjaisten nesteiden kestävyys riippuu vedenkovuudesta. Korkea määrä kovuuskomponentteja voi johtaa reaktioihin anionisten emulgaattoreiden kanssa (Tönshoff & Denkena 2013, s. 375-377)

Emulsioita voidaan käyttää melkein kaikkien metallien kanssa. Öljyn osuus on emulsiossa ratkaiseva korroosion suojauksessa. (Tönshoff & Denkena 2013, s. 377) Lisäaineita käytetään parantamaan nesteen ominaisuuksia työstötilanteessa. Emulgaattoreiden lisäksi vesipohjaisissa nesteissä käytetään esimerkiksi vaahdonestoaineita ja mikrobienestoaineita (Hörner 2014).

Taulukko 1. Veden ja mineraaliöljyn termodynaamiset ominaisuudet (Tönshoff & Denkena 2013, s. 376).

	Mineraaliöljy	Vesi
Kinemaattinen viskositeetti mm^2/s	9,50	0,66
Tiheys g/cm^3	0,85	0,99
Lämmönjohtavuus W/mK	0,13	0,63
Ominaishöyrystymislämpö J/g	200	2250
Ominaislämpökapasiteetti J/gK	1,95	4,2

Vesipohjaisten nesteiden termodynaamisten ominaisuuksien takia niillä on suoria öljyjä parempi jäähdytysteho. Vedellä on suurempi lämpökapasiteetti ja korkeampi lämmönjohtavuus kuin mineraaliöljyillä, kuten taulukosta 1 voidaan nähdä. Vesi vie myös suuren määrän lämpöä haihtumisprosessissa. Emulsion voitelu määräytyy öljyosuuden perusteella veden olemattomien voiteluominaisuuksien takia. Vesipohjaisten nesteiden tärkeimpiä huonoja puolia ovat heikkojen voiteluominaisuuksien lisäksi herkkyys bakteereille ja sienille, sekä alttius vuotoöljyille. Ne nostavat vesipohjaisten nesteiden ylläpito-kustannukset korkeiksi. (Brinksmeier et al. 1999)

3.2.2 Öljyt

Öljyt ovat yleensä mineraaliöljyjä, mutta myös synteettisiä ja kasviöljyjä käytetään hionnassa. Öljyt eivät sisällä lainkaan vettä. Rikkiä, fosforia, klooria ja muita lisäaineita voidaan käyttää lämmön ja paineensietokyvyn parantamiseksi (Singh & Bajpai 2015).

Öljyillä on hyvät voiteluominaisuudet johtuen vesipohjaisia nesteitä korkeammasta viskositeetista, kuten taulukosta 1 voidaan nähdä. Öljyjen suurin etu on hiontalaikan pie-

nempi kuluma ja pidempi käyttöikä, joka on seurausta hyvästä voitelusta kontaktialueella. Ne ovat erityisen hyödyllisiä korkeanopeuksisessa hionnassa korkean kiehumislämpötilan takia, sekä suurilla materiaalinpoistomäärillä pienemmän hiontalaikan kulumisen ja siitä johtuvan pienemmän työkappaleen pinnankarheuden suhteen. (Rowe 2009 s. 118-119) Öljyjen etuna voidaan pitää myös suojausta korroosiolta, sekä bakteerien ja sienten kasvulta, jonka takia mahdollinen käyttöikä on vesipohjaisia nesteitä pidempi (Tönshoff et al. 2013, s. 376).

Öljyjen suurin heikkous on vesipohjaisia nesteitä huonommat jäähdytysominaisuudet. Öljy on hinnaltaan kallein hionnassa käytettävistä nesteistä ja etenkin suuri viskositeetisillä öljyillä voi öljyä kulkeutua lastujen ja työkappaleen mukana pois järjestelmästä suuriakin määriä (Hörner 2014).

4. SUUTINJÄRJESTELMÄ HIONNASSA

Kuten aiemmissa luvuissa selviää, kontaktialueella kehittyvä lämpö on hiontaprosessia rajoittava tekijä. Lämmön kehittymisen torjumiseksi käytetään hiontaneiteitä. Nesteen kontaktialueelle toimittamiseen on kehitetty ja käytetty erilaisia järjestelmiä (Irani et al. 2005). Nesteen virtaus on hyödyllistä vain, kun se saavuttaa kontaktialueen. Ainoastaan hyödyllinen virtaus voi vaikuttaa hionnan lämpötilaan. Suutinjärjestelmän suunnittelulla pyritään maksimoimaan hyödyllinen virtaus. (Morgan et al. 2008)

Jäähdytysnesteen koostumuksen ja suodatuksen lisäksi suutinjärjestelmällä on merkittävä vaikutus prosessin tuottavuuteen työkappaleen laatuun ja hiontalaikan kulumiseen. Kuvassa 7 on esitettyjä nesteiden käytön parametrejä, jotka vaikuttavat hiontaprosessin lopputulokseen. Suutinjärjestelmän ja jäähdytysvoitelunesteiden valinnat ovat harvoin yleistettävissä. Käyttäjän on valittava useista jäähdytysnesteistä, suuttimista ja syöttöstrategioista ja otettava erilaiset tekijät huomioon valintaa tehdessään. (Brinksmeier et al. 1999)

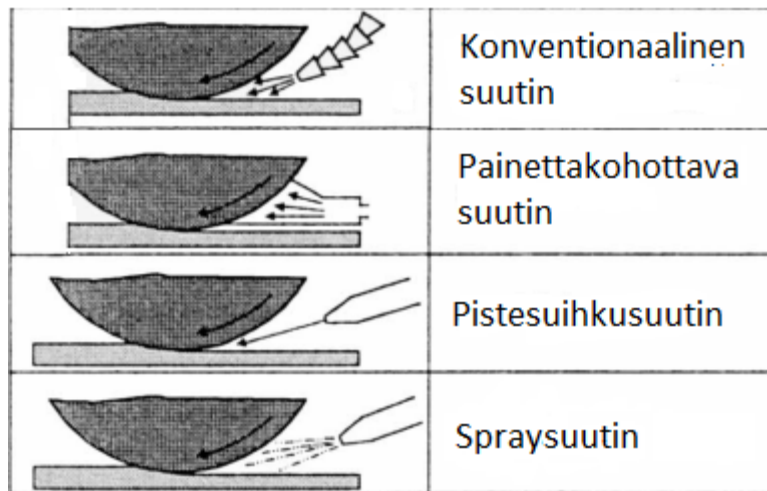


Kuva 7. Jäähdytysvoitelunesteiden käytön parametrit, jotka vaikuttavat prosessiin ja sen lopputulokseen (mukaillen Brinksmeier et al. 1999)

Webster et al. (1995) mukaan suurin osa suuttimiin liittyvästä tutkimustyöstä on tehty muilla kuin hiontaan liittyvillä suuttimilla. Paloletkujen suuttimilla tehdyissä tutkimuksissa huomattiin suihkussa esiintyvän turbulenteja pyörteitä ja toissijaista virtausta, jotka syntyvät virtauksen poistuessa suuttimesta. Hionnassa suuttimen ja putkiston suunnittelussa olisi tärkeää minimoida väärin suuntautuneet virtaukset ennen kuin neste kulkee suuttimen läpi.

4.1 Suutintyypit

Suuttimia käytetään säätämään hiontanesteen virtausta hiontaprosessissa. Suuttimella voidaan säätää virtauksen profilia, nopeutta ja painetta, sekä neste voidaan suunnata tiettyyn suuntaan. Hionnassa käytetään yleensä neljää eri suutintyyppiä Kuva 8. Näiden neljän suuttimen rakenne on hyvin erilainen, mutta niillä jokaisella on omat etunsa. Suuttimen tärkein tehtävä on mahdollistaa nesteen toimitus kontaktialueelle korkeimman mahdollisen jäähdytyksen ja voitelun saavuttamiseksi. (Webster 2019)

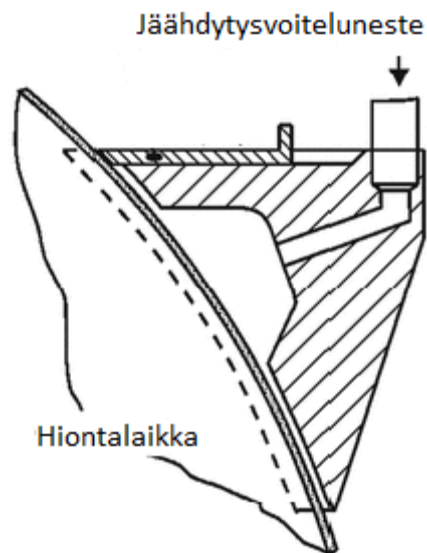


Kuva 8. Useita erilaisia suuttimia on kehitelty hionnan eri sovelluksille (mukaan Brinksmeier et al. 1999).

Suuri osa uusista hiomakoneista toimitetaan konventionaalisilla suuttimilla, koska ne ovat edullisia ja antavat käyttäjälle mahdollisuuden hyödyntää suuren osan koneen ominaisuuksista. Usein konventionaalisten suuttimien kohdistaminen on helppoa, koska ne on valmistettu joustavasta modulaarisesta putkesta tai ohuesta teräs- tai kupariputkesta. Joustavuus voi olla toivottavaa, mutta se tuo myös mukanaan haittavaikutuksia. Putki voi taipua ja suuttimen kohdistus voi muuttua liian suuren paineen tai paineen nousun aiheuttaman reaktiovoiman seurauksena. Konventionaalisen suuttimen suihku on myös erittäin turbulenti johtuen suuttimen yksinkertaisesta sisäisestä geometriasta. Turbulentin ja tehottoman suihkun takia konventionaalinen suutin joudutaan sijoittamaan hyvin lähelle hiontalaikkaa. (Webster 2019)

Painettakohottavan suuttimen toiminta perustuu sisäiseen paineeseen suihkun nopeuden sijaan ja on metodi matalapaineiselle nesteen toimitukselle. Painettakohottava suutin sijoitetaan lähelle hiontalaikkaa niin, että se muodostaa kammion laikan kehälle. Suuttimen sijoittelu ja laikan kehälle muodostuva kammio näkyvät hyvin kuvassa 9. Neste toimitetaan suuttimeen jakoputkesta laikan nopeudella ja laikan pyörimisliike kohottaa

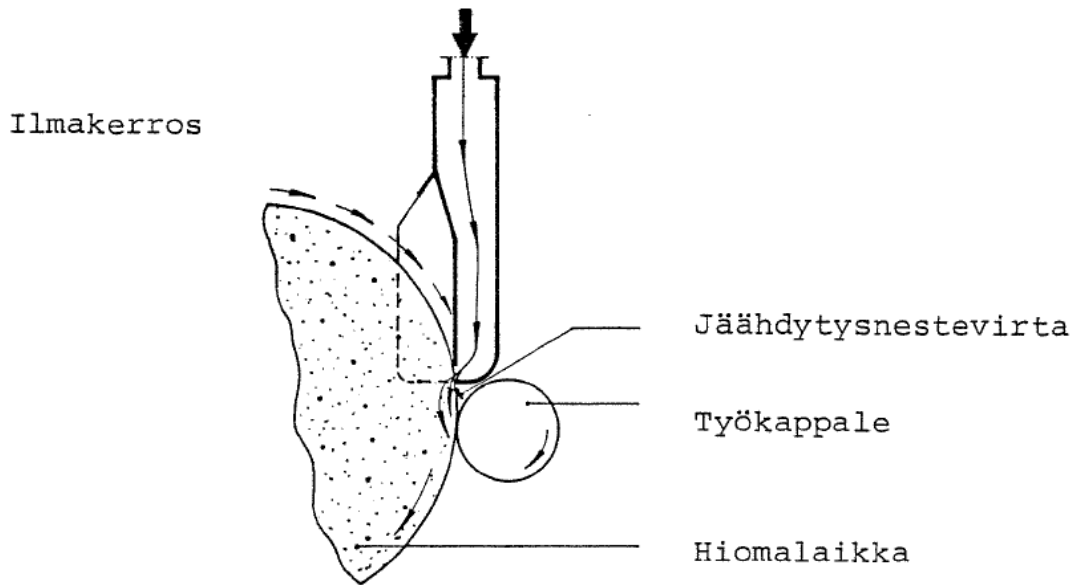
jäähdytysvoitelunesteen painetta kammiossa. Niiden profiili myötäilee muodoltaan hiontalaikan kehää. Suuttimen ja laikan väliin jää kuitenkin pieni rako, josta tapahtuu ohivuotoa laikan sivuille. Minimaalisella ohivuodolla saavutetaan sopiva paine ja neste täyttää laikan huokokset, joiden mukana se kulkeutuu kontaktialueelle. (Klocke et al. 2014)



Kuva 9. Painettakohottavan suuttimen sijainti hiontalaikkaan nähden (Klocke et al. 2014).

Painettakohottavaa suutinta pidetään tehokkaana tapana toimittaa neste laikan kehälle koko leveydellä ja maksimoimaan kontaktialueen läpi kulkevan nesteen määrän. Painettakohottavien suuttimien huono puoli on geometrinen joustamattomuus. Tämän vuoksi ne eivät sovi hyvin käytettäväksi tavanomaisten laikkojen kanssa, joissa kulumisen on suhteellisen korkea. Hiontalaikan kulumisen takia painettakohottavia suuttimia joudutaan säätämään ajoittain. Tärkeänä haittana voidaan pitää myös sitä, että merkittävä osa käytettävissä olevasta laikan tehosta menetetään nesteen pumppaushäviöiden takia. (Irani et al. 2005)

Suuri osa teollisuudessa käytettävistä suuttimista on suurinopeussuuttimia, esimerkiksi Kuva 10. Niiden tavoite on tuottaa koherentti suihku minimaalisella dispersiolla. Suurinopeussuuttimia, jotka tuottavat korkeamman suihkun koossapysyvyyden, kutsutaan pistesuihkusuuttimiksi. Korkeampi suihkun koossapysyvyys saadaan aikaan monimutkaisella suuttimen sisäisellä geometrialla. Suurinopeussuuttimet kehittävät tehokkaan suihkun, jonka avulla ne rikkovat ilmarajakerroksen ja tunkeutuvat kontaktialueelle. Toinen tehokkaan suihkun tuoma etu on, että suutinta voidaan samalla käyttää laikan puhdistamiseen. Ne voidaan myös sijoittaa voimakkaan suihkun takia verrattain kauas hiontalaikasta. (Brinksmeier et al. 1999)



Kuva 10. Suurinopeussuutin (Huuhka 1982).

Spraysuuttimet on kehitelty tuottamaan viuhkamainen, tai kartiomainen suihkukuviota. Kartiomainen suihku voi olla ontto- tai täyskartio. Neste toimitetaan spraysuuttimella prosessiin suurella nopeudella. Suuttimen sijainti hiontalaikkaan nähden on tärkeä pitää optimaalisena. Spraysuuttimia käytetään yleensä hiontalaikan puhdistamiseen ja minimimäärävoitelu (MQL) sovelluksissa. (Webster 2019)

4.2 Järjestelmän toteutus

Nesteen syöttöjärjestelmän suunnittelun on vastattava hionnan erityisiä teknisiä vaatimuksia. Hiontaprosessin jäähdytyksen pääasiassa riippuessa kontaktialueelle toimitetusta nesteestä, ei sekundaarisilla jäähdytysvaikutuksilla ole suurta merkitystä. (Madanchi et al. 2017)

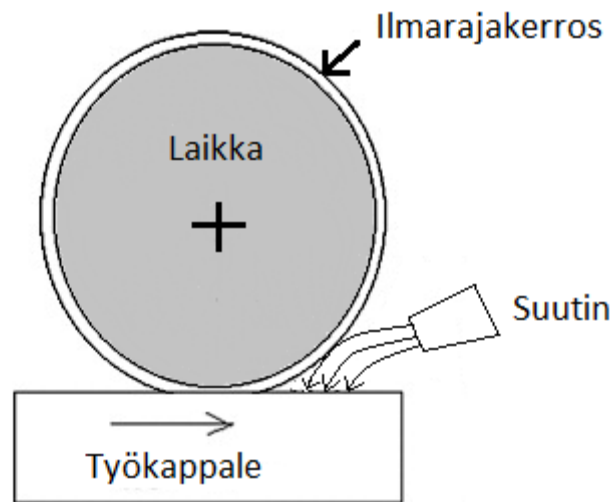
Jäähdytysvoitelunesteiden erityisominaisuuksille on kasvava kysyntä teollisuudessa, joka lisää eri nestetyyppien käyttöä. Tämä on otettava huomioon niiden syöttöjärjestelmän materiaalivalinnassa. Jäähdytysvoitelunesteen pilaantumisen tai konekomponenttien korroosion estämiseksi on varmistettava kaikkien materiaalien yhteensopivuus. Yleensä suositellaan välttämään sinkittyjä teräsputkia ja ei-rautapitoisia liitososia. Painovoimaohjatun putkistojärjestelmän takia tuoreen ja käytetyn nesteen säiliöltä vaaditaan kapasiteettia koko syöttöjärjestelmän jäähdytysvoitelunesteen määrän varastoimiseksi. Konetyökalujen ja keskussäiliöiden välisten pitkien etäisyyksien takia jokaiselle koneelle

on usein asennettava erillinen vastavirtaussäiliö. Lisäksi jokaisen säiliön suunnittelun tulisi estää kiinteiden jäännösten tai nesteen vastavirran kerrostuminen ja tarjota mahdollisuus tyhjentää säiliö kokonaan. (Marinescu et al. 2016 s. 255-257)

Huono suuttimen ja putkiston suunnittelu voi johtaa hajaantuneeseen suihkuun etenkin, kun käytetään korkeita nopeuksia. Suuttimen pinnan tulisi olla sileä, sillä ylimääräiset ulokkeet ja virheet suuttimen pinnassa häiritsevät virtausta ja aiheuttavat huonon koossapysyvyyden suihkulle. Samalla tavalla muutokset putkiston halkaisijoissa ja ylimääräiset mutkat rajoittavat virtausnopeutta ja mahdollista painetta. (Webster et al. 1995)

4.2.1 Nesteen toimituksen haasteet

Hiomaprosessissa syntyy erityisiä ongelmia nesteen toimituksessa. Ongelmat johtuvat suhteellisen suuresta välistä hiontalaikan ja työkappaleen välillä, sekä suurista hiomalai-kan kehänopeuksista. Suuri laikan pyörimisnopeus aiheuttaa ilmarajakerroksen pyörän ympärille. Pyörivä ilma muodostuu vahvemiksi laikan nopeuden kasvaessa. (Majumdar et al. 2018)



Kuva 11. Ilmarajakerros aiheuttaa taipumisilmion nestesuihkuun (Majumdar et al. 2018).

Ebberel et al. (2000) mukaan kuvassa 11 näkyvän ilmarajakerroksen läsnäolo pyörän ympärillä estää nesteen kunnollisen pääsyn kontaktialueelle estäen voitelun ja jäähdytyksen. Voitelu riippuu jopa jäähdytystä enemmän nesteen kontaktialueen saavuttamisesta, vaikka suuri määrä nestettä ei välttämättä ole tarpeellista voitelun tavoitteen saavuttamiseksi. Aiemmin useissa tutkimuksissa on havaittu ilmarajakerroksen olemassaolon vähentävän valmistustarkkuutta ja lisäävän hiontalaikan kulumista (Majumdar et al. 2018).

Nesteen sekundäärisiin vaikutuksiin, kuten lastujen pois huuhtomiseen ja kontaktialueen ulkopuoliseen jäähtytykseen, ei ilmarajakerroksella ole suurta vaikutusta. Hiomaprosessin jäähtytysvoitelun riippuessa pääasiassa kontaktialueelle toimitetusta nesteestä, on nesteen käyttö tehotonta, jos neste ei saavuta kontaktialuetta. Tämän takia tehokas nesteen toimittaminen pyörän ja työkappaleen rajapintaan vähentämällä haitallisen ilmakerroksen vaikutusta on tärkeää. (Ebberel et al. 2000)

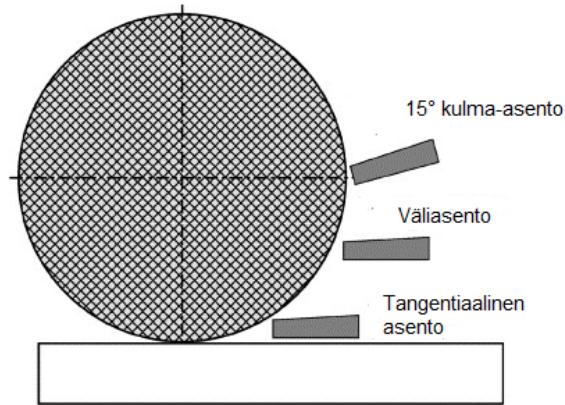
Nesteen virtausta, joka ei saavuta kontaktialuetta kutsutaan hyödyttömäksi virtaukseksi. Hyödyttömän virtauksen minimointi tuo haasteita nesteen toimitukseen. Etenkin vesipohjaisilla nesteillä, suuria nopeuksia käytettäessä, suuttimen oikeaoppinen sijoittelu on tärkeää sen välttämiseksi. Hyödyttömän virtauksen takia joudutaan käyttämään enemmän nestettä kuin on tarpeellista tehokkaan jäähtytyksen saavuttamiseksi. Kun nestettä joudutaan toimittamaan enemmän, järjestelmän vaatimukset nousevat. Suuremmat vaatimukset nostavat järjestelmän hintaa ja nesteen käytön kulut kasvavat. (Webster et al. 1995)

4.2.2 Suuttimen sijainti

Suuttimen oikealla sijainnilla ja kohdistuksella on merkittävä rooli hiontanesteen tehokkaassa käytössä. Sijainti on kriittinen nesteen hyödyllisen virtauksen maksimoinnissa, kontaktialueelle tunkeutumisessa ja ilmarajakerroksen vaikutuksen minimoinnissa. (Ebberel et al. 2000)

Suuttimen sijoittamista lähelle hiontalaikkaa ja erityisesti lähelle laikan ja kappaleen yhdyntävää rakoa eli kontaktialuetta pidetään yleisesti konventionaalisilla ja suurinopeus-suuttimilla parhaana tapana saada neste kontaktialueelle. Suuttimen tulisi olla sijoitettu tangentialisesti tai lähes tangentialisesti pyörän suhteen noin 10-25 astetta ennen kontaktialuetta. Jos suihkun nopeus on sama pyörän nopeuden kanssa edellä mainittu sijoittelu voi siirtää ilman pois suihkun tieltä nesteen liikemäärän ollessa suurempi kuin ilman. (Morgan et al. 2008)

Ebberel et al. (2000) kokeissa konventionaalinen suutin sijoitettiin laikkaan nähden tangentialisesti, 15 asteen kulmaan ja näiden sijaintien väliin kuvassa 12 näkyvällä tavalla. Kokeissa havaittiin, että väliasento oli tehokkain hyödyllisen virtauksen kannalta.



Kuva 12. Suutinten sijainnit Ebberel et al. (2000) kokeissa.

Liian suuri kulma tai etäisyys pyörästä voi aiheuttaa nesteen ohjautumisen pois laikan pinnasta tai nesteen kimpoamisen ilmarajakerroksesta, joka johtaa nestesuihkun hajoamiseen sumuksi. Optimaalinen suuttimen kulma hiontalaikkaan nähden riippuu suihkun ja pyörän nopeudesta. Rouse et al. suunnittelemalla kuperalla suuttimella tehdyissä kokeellisissa mittauksissa havaittiin, että kontaktialueen läpi kulkevan nesteen määrä vähenee suuttimen etäisyyden kasvaessa hiontalaikasta. Samalla suuttimella tehdyillä simulaatioilla havaittiin suihkun leveyden kasvavan etäisyyden kasvaessa, kun taas suihkun keskimääräinen nopeus laskee. (Morgan et al. 2008)

Suuttimen sijoittaminen lähelle laikkaa ei aina ole käytännöllistä ja mahdollista, kuten esimerkiksi syviä muotoja hiottaessa. Silloin voi olla tarpeen käyttää isoja suuttimen halkaisijoita ja suurempaa virtausnopeutta, että turbulenssi ei aiheuta liiallista suihkun leviämistä. Pienillä nopeuksilla suihku on kuitenkin mahdollista näissä tapauksissa suunnata suoraan laikkaan. (Rowe 2009 s. 128)

Painettakohottavien suuttimien sijoittelussa tärkeintä tehokkaan toiminnan kannalta on se, onko suutin sopivan lähellä laikkaa. Suutin tulee olla sijoitettuna lähelle laikkaa ja sen täytyy mukailla hiontalaikan profiilia minimaalisella ohivuodolla. Näin saavutetaan haluttu paine, joka täyttää pyörän huokokset nesteellä mahdollistaen kuljetuksen kontaktialueelle. (Webster 2019)

4.2.3 Nesteen virtausnopeus

Yksi vaikeimmista kysymyksistä jäähdytysvoitelunesteiden tehokkaaseen käyttöön liittyen on, kuinka paljon nestettä tarvitaan ja kuinka suurella nopeudella neste toimitetaan. Yleisesti voitaisiin ajatella, että suurempi määrä on jäähdytyksen kannalta parempi. Suuren nopeuden ja nesteen määrän voidaan ajatella auttavan pitämään myös kontaktialueen ympäristön viileänä ja lämpötilan tasaisena hiontakoneessa. Suuren nestemäärän

pumppaaminen korkeilla nopeuksilla kuitenkin kehittää lämpöä ja aiheuttaa lämpötilan nousun nesteessä. Nesteen käytössä tulee myös ottaa huomioon kustannukset ja ympäristönäkökulmat, jonka takia on pyrittävä käyttämään vain riittävä määrä nestettä yli-
mitoitetun määrän sijaan. (Rowe 2009, s. 135-136)

Eri tutkimuksissa on havaittu, että prosessille hyödyllinen virtaus riippuu hiontalaikan nopeuden ja suuttimen sijainnin lisäksi nestesuihkun nopeudesta, sekä laikan huokoisuudesta. Tutkimuksissa on havaittu hyödyllisen virtauksen olevan 5-20 prosenttia suuttimesta poistuvan nestesuihkun määrästä. Myös on havaittu, että saavutettavissa oleva hyödyllinen virtaus on arviolta noin 50 prosenttia hiontalaikan kehäpinnan huokoisuudesta. (Morgan et al. 2008)

Gviniashvili et al. (2004) kokeellisissa tutkimuksissa havaittiin, että suuttimen virtausmäärän lisäys kasvattaa kontaktialueen läpi kulkevan nesteen määrää. Nesteen määrä, joka voidaan kuljettaa laikan pinnalla kontaktialueelle, on kuitenkin rajallinen. Tämä johtaa siihen, ettei korkeilla nesteen toimitusmäärillä kasvua hyödyllisessä virtauksessa enää tapahdu.

Tavallisesti neste ohjataan kontaktialueelle nopeudella, joka on lähellä hiontalaikan pyörimisnopeutta. Suuttimesta poistuvan suihkun nopeuden ollessa 80-100 prosenttia laikan nopeudesta päästään saavutettavissa olevaan hyödylliseen virtaukseen. Suihkun nopeuden ei kannata olla tätä suurempi, koska se ei lisää hyödyllistä virtausta kontaktialueelle. (Morgan et al. 2008)

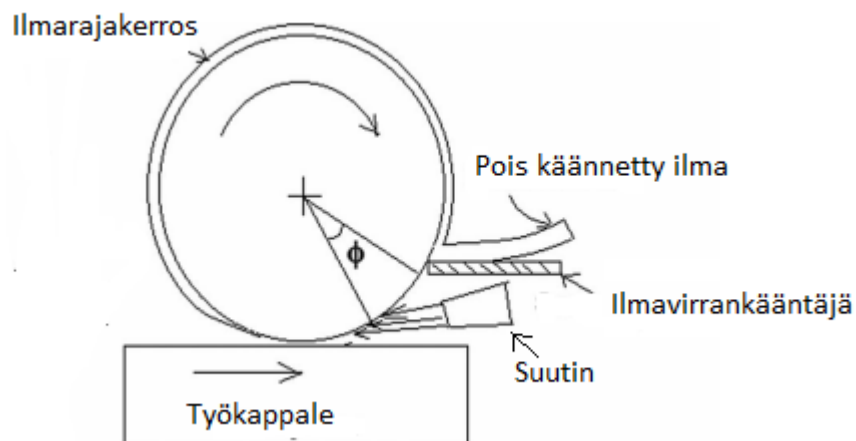
Korkeilla laikan pyörimisnopeuksilla ja nesteen toimitusmäärillä ongelmaksi muodostuu laikan pyörittämiseen tarvittavan tehon kasvu, joka johtuu laikan huokosissa kuljetettavan nesteen aiheuttamasta vastuksesta. Hiontalaikan tehoa voidaan pienentää laskeamalla suuttimen läpi kulkevan suihkun nopeutta, joka voi kuitenkin johtaa lämpövaurioihin. Kokeellisen tutkimuksen perusteella suihkun nopeuden lähestyessä laikan nopeutta laikan pyörittämiseen tarvittavan tehon kasvu hidastuu. Laikan ja suihkun nopeuksien ollessa yhtä suuret on suihkun teho hyvin lähellä laikan tehoa. Suihkun nopeuden kasvaessa laikan nopeutta suuremmaksi laikan teho laskee, mutta suihkun teho nousee suhteessa enemmän. Hiontaprosessin kokonaistehon optimoinniksi ei suihkun nopeuden ole hyödyllistä olla laikan nopeutta suurempi. (Gviniashvili et al. 2004)

4.3 Ilmavirrankääntäjä

Ilmavirrankääntäjä on yksinkertainen levy, joka sijoitetaan lähelle hiontalaikkaa. Sen tarkoitus on estää ilmarajakerroksen pyöriminen hiontalaikan mukana ja siten helpottaa

nesteen pääsyä kontaktialueelle. Se voidaan asentaa kiinni esimerkiksi laikan suojuksen tai suuttimeen. Ilmavirrankääntäjää käytetään yleensä vain konventionaalisten suutinten kanssa. (Rowe 2009, s. 125-126)

Ilmavirrankääntäjä luo hiontalaikan pinnalle matalapaineisen alueen ohjaamalla laikan mukana pyörivän ilmarajakerroksen pois hiontalaikan pinnalta kuvassa 13 esitetyllä tavalla. Matalapaineinen alue vetää nestesuihkua laikan pintaa kohden mahdollistaen nesteen kulkeutumisen kontaktialueelle. Sen avulla on mahdollista tehostaa jäähdytystä ja voitelua, joka parantaa hiontaprosessin tehokkuutta. (Majumdar et al. 2018)



Kuva 13. Ilmavirrankääntäjän vaikutus ilmarajakerrokseen (Majumdar et al. 2018).

Ilmavirrankääntäjän tulee olla sijoitettu lähelle kontaktialuetta, että ilmarajakerros ei pääse muodostumaan uudelleen ennen hiontalaikan ja työkappaleen välistä kontaktia. Majumdar et al. (2018) havaitsivat tutkimuksessaan ilmarajakerroksen alkavan muodostua uudelleen, jos ilmavirrankääntäjä on sijoitettu yli 20 astetta ennen kontaktialuetta. Ilmavirrankääntäjän tulee myös olla hyvin lähellä laikan kehäpintaa, että ilmarajakerros saadaan ohjattua pois laikan pinnalta. Perinteisten laikkojen nopean kulumisen takia ilmavirrankääntäjä vaatii jatkuvaa säätöä, joka on merkittävä haitta sen käytön yleistymiselle teollisissa sovelluksissa. (Webster 2019)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Ilmarajakerroksen vaikutuksen minimointi

Kuten edellä on todettu, ilmarajakerros syntyy hiontalaikan ympärille suurien laikan pyörimisnopeuksien takia. Se estää jäähdytysvoitelunesteen pääsyn kontaktialueelle ohjaamalla nestesuihkun pois. Konventionaalisten nesteen toimitustapojen ei uskota läpäisevän ilmarajakerrosta. Suurinopeussuuttimilla neste on mahdollista toimittaa niin suurella nopeudella, että suihku voi läpäistä ilmarajakerroksen. (Majumdar et al. 2018)

Monet tutkimukset ovat vahvistaneet, että suuttimen suihkun nopeuden sovittaminen hiontalaikan nopeuteen on toimiva tapa poistaa ilmarajakerroksen vaikutus. Jäähdytysvoitelunesteen toimituskulma on ollut myös monien tutkimuksien kohde. Tutkimusten tulokset ovat tarjonneet ristiriitaista tietoa optimaalisesta kulmasta. Nesteen toimittaminen tangentiaalisesti hiontalaikkaan on yleinen tapa (Ebberel et al. 2000). Rowe (2009 s. 126) mukaan nesteen toimittaminen 34 asteen kulmassa tai tangentiaalisesti on tehokas tapa minimoida ilmarajakerroksen vaikutus.

Tönshoff & Denkena (2013, s. 383) mukaan painettakohottava suutin on tehokas tapa minimoimaan ilmarajakerroksen vaikutusta. Kalliin hinnan, asennuksen vaativuuden ja sopimattomuuden käytettäväksi perinteisten laikkojen kanssa takia painettakohottavat suuttimet eivät kuitenkaan ole yleisessä käytössä teollisuudessa.

Tutkimukset ovat osoittaneet, että konventionaalisten suuttimien kanssa käytettävällä il-mavirrankääntäjällä pystytään minimoimaan ilmarajakerroksen vaikutusta tehokkaasti. Se on kuitenkin painettakohottavan suuttimen tapaan tarkka sijainnista lähellä hiontalaikka, joka aiheuttaa tarpeen jatkuvalla säätämiseksi. Tämän takia suurinopeussuutin, jonka suihkun nopeus vastaa laikan pyörimisnopeutta on varmempi ratkaisu käytettäväksi teollisuudessa.

5.2 Hiontanesteen valinta

Hiontaan ei ole olemassa yhtä ylivoimasta nestetyyppiä, joka toimisi parhaiten kaikissa työstöissä ja erilaisten materiaalien kanssa. Hionnan jäähdytysvoitelunesteen valintaan vaikuttaa hiontatapa, työstettävä materiaali ja hionta-arvot. Nykyään myös ympäristönäkökulmaa otetaan enemmän huomioon nestettä valittaessa. Taulukossa 2 on listattuna hionnassa käytettävien nesteiden ominaispiirteitä. (Irani et al. 2005)

Hiontaan käytettävät öljyt sopivat parhaiten vaikeasti työstettävien materiaalien, kuten titaanin ja ruostumattoman teräksen hiontaan. Emulsio mahdollistaa useimpien materiaalien hionnan. Synteettiset ja puolisynteettiset nesteet taas sopivat parhaiten helposti työstettävien materiaalien hiontaan, sillä niillä on hyvät puhdistustavat ominaisuudet. Synteettisiä ja puolisynteettisiä nesteitä käytetään kuitenkin harvoin hionnassa huonojen voiteluominaisuuksien takia.

Emulsioilla on joukko ominaisuuksia, joka puoltaa niiden käyttöä hionnassa. Emulsioilla on hyvät jäähdytys- ja puhdistusominaisuudet, sekä lastujen suodatuksen alhaiset kustannukset. Emulsiot ovat myös halvempia ja ympäristöystävällisempiä kuin öljyt. Huonona puolena voidaan hionnan kannalta pitää voiteluominaisuuksien heikkoutta, sekä korkeita ylläpitokustannuksia. Korkeat ylläpitokustannukset johtuvat emulsioiden herkkyydestä bakteereille ja sienikasvustoille.

Suoria öljyjä käytetään usein muista lastuavista menetelmistä poiketen korkeanopeuksisessa hionnassa, koska öljyn voiteluominaisuudet vähentävät lämpöä reilusti ja ne toimivat emulsiota paremmin pienemmän höyrystymislämmön takia. Öljyjä käytetään myös silloin, kun työkappaleelta vaaditaan pientä pinnan karheutta.

Taulukko 2. Hiontanesteiden ominaispiirteet (Irani et al. 2005).

	Synteettiset	Puolisynteettiset	Emulsiot	Öljyt
Jäähdytys	4	3	2	1
Voitelu	1	2	3	4
Ylläpito	3	2	1	4
Suodatettavuus	4	3	2	1
Ympäristö	4	3	2	1
Hinta	4	3	2	1
Laikan kesto	1	2	3	4
1, huonoin; 4, paras				

5.3 Optimaalinen virtausnopeus ja suuttimen sijainti

Monien tutkimusten ja yleisesti käytössä olevan tavan mukaan suuttimesta poistuvan suihkun nopeuden tulisi olla noin 80-100 prosenttia hiontalaikan kehän pyörimisnopeudesta. Gviniashvili et al. (2004) mukaan kokeellisissa olosuhteissa osoitettiin, että suuttimen suihkunopeuden sovittaminen pyörän nopeuteen saa laikan tehon vastaamaan suurin piirtein nesteen jakelutehoa. Johtopäätöksenä on, että tämä tila on hyvin lähellä suurinta mahdollista hyödyllistä virtausta ja estää nesteen toimittamiseen käytettävän kokonaistehon kasvamisen liiallisen suureksi.

Yleisesti käytössä olevan tavan mukaan suutin sijoitetaan tangentiaalisesti laikkaan nähdessä. Konventionaalisen suuttimien oikeaoppisesta sijoittamisesta on kuitenkin saatu risiirittaisia tuloksia. Suutin sijoitetaan mahdollisimman lähelle laikkaa tangentiaalisesti tai lähes tangentiaalisesti, että neste suihku ei ohjaudu tai kimpoa pois laikan pinnasta ja muutu sumuksi (Rowe 2009 s. 127-128). Ebberel et al. (2000) kokeissa taas havaittiin, että kuvassa 14 näkyvän tangentiaalisen sijainnin yläpuolella oleva väliasento on tehokain hyödyllisen virtauksen kannalta.

Webster et al. (1995) tutkimusten mukaan suurinopeussuuttimien ja etenkin pistesuihkusuuttimien sijoittamisella ei ole suurta vaikutusta työkappaleen laatuun. Painettakohottavien suuttimien sijoittamisessa tärkeintä on, että suutin on lähellä hiontalaikkaa ja myötäilee sen muotoja.

5.4 Suuttimen valinta

Kuten aiemmissa luvuissa on todettu konventionaaliset suuttimet ovat edullisia ja helppoja käyttää, sekä kohdistaa. Ne mahdollistavat loppukäyttäjälle hiontakoneen ominaisuuksien laajan käytön. Konventionaalisten suuttimien virtaus on kuitenkin turbulenttia, eivätkä ne läpäise ilmarajakerrosta etenkään korkeilla hiontalaikan kehänopeuksilla. Jäähdytysvoitelunesteiden optimaalista käyttöä varten konventionaaliset suuttimet eivät toimi parhaiten. (Webster 2019)

Suurinopeussuutin on yleisin valinta teollisiin sovelluksiin. Niiden etu on nesteen toimitaminen riittävän suurella teholla ilmarajakerroksen läpäisemiseksi. Tehokas suihku mahdollistaa myös laikan puhdistamisen. Pistesuuhkusuutin voidaan tarvittaessa sijoittaa hieman kauemmaksi kontaktialueesta. (Brinksmeier et al. 1999)

Painettakohottava suutin on erittäin tehokas tapa välttää ilmarajakerroksen vaikutus ja toimittaa neste laikan pinnalle koko leveydellä. Niitä ei kuitenkaan suositella käytettäväksi perinteisten laikkojen kanssa. Perinteiset laikat kuluvat nopeasti, joka aiheuttaa ajoittaisen säädön tarpeen. Painettakohottava suutin sopii parhaiten käytettäväksi ulkoiseen pyöröhiontaan. (Klocke et al. 2014)

Spraysuuttimet tuottavat viuhkamaisen, tai kartiomaisen sumusuihkun. Spraysuuttimilla tuotetaan huomattavasti pienempi virtausmäärä, jonka takia niitä käytetään yleensä hiontalaikan puhdistamiseen ja minimimäärävoiteluun (MQL). (Webster 2019)

Kirjallisuuden perusteella suurinopeussuutin vaikuttaa olevan tällä hetkellä paras vaihtoehto teollisuuden sovelluksiin, vaikka ne kuluttavat paljon nestettä. Suurinopeussuutin

järjestelmät ovat verrattain edullisia ja niillä pystytään poistamaan ilmarajakerroksen vaikutus, sekä ne voidaan sijoittaa muita suuttimia vapaammin.

6. YHTEENVETO

Hiominen kuluttaa muihin lastuaviin menetelmiin verrattuna huomattavan suuren määrän energiaa, joka muuttuu lämmöksi hiontalaikan ja työkappaleen kosketuksessa kontaktialueella. Liian suureksi nousseella lämmöllä voi olla epätoivottu vaikutus työstettävän kappaleen eheyteen ja laatuun. Tässä työssä tutkittiin kirjallisuuden avulla, kuinka pyörö- ja tasohionnan lämpötilaa voidaan hallita hiontaneiteiden avulla. Hiominen on tärkeässä osassa monen tuotteen valmistusta eri teollisuuden aloilla. Se myös suoritetaan yleensä valmistuksen loppupäässä, jolloin vauriot työkappaleeseen tulevat kalliiksi. Nämä tekijät ovat ajaneet tutkimaan, miten nesteiden avulla voidaan hiontaprosessin lämpöä hallita mahdollisimman tehokkaasti.

Hiontaneiteinä käytetään eniten öljyjä ja vesipohjaisia nesteitä. Öljyt ovat yleensä mineraaliöljyjä, mutta myös synteettisiä ja kasviöljyjä käytetään. Ne eivät sisällä lainkaan vettä, mutta muita lisäaineita voidaan käyttää lämmön ja paineensietokyvyn parantamiseksi. Öljyjen suurin etu on hiontalaikan pienempi kuluma ja pidempi käyttöikä, joka on seurausta hyvistä voiteluominaisuuksista. Vesipohjaisista nesteistä emulsiot ovat yleisimmin käytettyjä metallien hionnassa. Vesipohjaisten nesteiden tärkein etu on termodynaamisista ominaisuuksista johtuva öljyjä parempi jäähdytysteho. Yhtä ylivoimaista nestetyyppiä ei hiontaan ole olemassa vaan nesteen valinta on aina suoritettava tapauskohtaisesti.

Hiontaneiteen lisäksi suutinjärjestelmällä on merkittävä vaikutus prosessin tuottavuuteen työkappaleen laatuun ja hiontalaikan kulumiseen. Suuttimen tärkein tehtävä on mahdollistaa nesteen toimitus kontaktialueelle korkeimman mahdollisen jäähdytyksen ja voitelun saavuttamiseksi. Suuttimella voidaan säätää nestevirtauksen nopeutta, suuntaa ja painetta. Suuttimet voidaan jakaa neljään perustyyppiin: Konventionaalinen, painetta-kohottava, suurinopeus- ja spraysuutin. Ne ovat rakenteeltaan hyvin erilaisia, mutta jokaisella niistä on omat hyvät puolensa.

Hiomaprosessissa syntyy erityisiä ongelmia nesteen toimituksessa. Ne ovat seurausta suhteellisen suuresta välistä hiontalaikan ja työkappaleen välillä, sekä suuresta hiomalaikan nopeudesta. Oikealla suuttimen sijainnilla ja suuttimesta poistuvan nesteen virtausnopeudella voidaan minimoida ongelmien vaikutuksia. Monien tutkimusten perusteella suuttimesta poistuvan suihkun nopeuden tulisi vastata hiontalaikan kehän pyörimisnopeutta. Suuttimen optimaalisesta sijainnista taas on saatu ristiriitaisia tutkimustuloksia.

Hiontanestetyyppi, sen koostumus, suuttimen suunnittelu ja nesteen virtausnopeus, sekä suuttimen oikeaoppinen sijoittelu voivat vaikuttaa prosessin tuottavuuteen, työkapaleen laatuun ja hiontalaikan kulumiseen huomattavasti. Tämä työ antaa syvemmän käsityksen hionnassa käytettävistä nesteistä ja niiden toimittamisesta prosessiin. Jäähdytyksen ja voitelun optimointi tarjoaa mahdollisuuden minimoida käytettävän nesteen määrän ja prosessin kuluttaman energian, joka vähentää haitallisia ympäristövaikutuksia ja kustannuksia.

LÄHTEET

Brinksmeier, E., Heinzl, C. & Wittmann, M. (1999). Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.48(2), pp.581–598. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63236-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63236-3)

Ebbrell, S., Woolley, N.H., Tridimas, Y.D., Allanson, D.R. & Rowe, W.B. (2000). The Effects of Cutting Fluid Application Methods on the Grinding Process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.40(2), pp.209–223.

Guo, C. & Malkin, S. (2000). Energy Partition and Cooling During Grinding. Journal of Manufacturing Processes, Vol.2(3), pp.151–157. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70116-2](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70116-2)

Gviniashvili, V., Woolley, N. & Rowe, W. (2004). Useful coolant flowrate in grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.44(6), pp.629–636. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.12.005>

Huuhka, P., (1982). Hionta-arvot, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, s.10-18.

Hörner D. (2014). Neat Cutting Fluids. In: Mang T. (eds) Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg

Hörner D. (2014). Water-Miscible Cutting Fluids. In: Mang T. (eds) Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg

Irani, R., Bauer, R. & Warkentin, A. (2005). A review of cutting fluid application in the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.45(15), pp.1696–1705. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.006>

Klocke F., Brocker R., Duscha M. & Weiß M. (2014). Grinding Process. In: Mang T. (eds) Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg.

Lin, B., Zhou, K., Guo, J., Liu, Q. & Wang, W. (2018). Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. Tribology International, Vol.122, pp.151-162. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.017>

- Madanchi, N., Winter, M., Thiee, S. & Herrmann, C. (2017). Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design. *Procedia CIRP*, Vol.61, pp. 564-569. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.192>
- Majumdar, S., Kumar, S., Roy, D., Chakraborty, S. & Das, S. (2018). Improvement of lubrication and cooling in grinding. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.33(13), pp.1459–1465. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364756>
- Malkin, S. & Guo, C. (2007). Thermal Analysis of Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.56(2), pp.760–782. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.005>
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M.P., Uhlmann, E., Rowe, W.B & Inasaki, I. (2016) Handbook of machining with grinding wheels. Taylor & Francis Group, pp. 3-6, 247-268, 409-422, 493-551.
- Morgan, M., Jackson, A., Wu, H., Baines-Jones, V., Batako, A. & Rowe, W. (2008). Optimisation of fluid application in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol.57(1), pp.363–366. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.090>
- Puerto, P., Fernández, R., Madariagab, J., Arana, J. & Gallego, I. (2013). Evolution of Surface Roughness in Grinding and its Relationship with the Dressing Parameters and the Radial Wear. *Procedia Engineering*, pp.174-182. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>
- Rowe, W.B. (2009) Principles of Modern Grinding Technology, William Andrew, pp. 1-34, 105-112.
- Sakabrasives (2017) Cylindrical grinding wheel. Viitattu 7.5.2020. Saatavissa: <http://www.sakabrasives.com/products/bonded-abrasives/cylindrical-grinding-wheel/>
- Seidel, M.W., Zösch, A. & Härtel, K. (2018) Grinding burn inspection, *Forschung im Ingenieurwesen*, Vol.82(3) pp. 253-259. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10010-018-0270-4>
- Singh, R. & Bajpai, V. (2015). Coolant and lubrication in machining. In *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer-Verlag London Ltd., pp. 981–1018. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_7

Tönshoff, H. & Denkena, B. (2013). Basics of Cutting and Abrasive Processes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 247-301, 371-396.

Uddeholm Oy (2018) Grinding of Uddeholm tool steels. Viitattu 6.5.2020. Saatavissa: <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2019/10/Tech-Uddeholm-Grinding-EN.pdf>.

Webster, J., Cui, C., Mindek, R. & Lindsay, R. (1995). Grinding Fluid Application System Design. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.44(1), pp.333–338. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62337-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62337-3)

Wegener, K., Bleicher, F., Krajnik, P., Hoffmeister, H. & Brecher, C. (2017). Recent developments in grinding machines. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.66(2), pp.779–802. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.006>