

Miikka Kuisma

ETSAUSLAITTEEN TUOTTEISTAMINEN:

Haasteet ja uudet mahdollisuudet

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jorma Vihinen
Tarkastaja: Suvi Santa-aho
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Miikka Kuisma: Etsauslaitteen tuotteistaminen: Haasteet ja uudet mahdollisuudet
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Robotech Oy on kaksi ja puoli vuotta vanha automaatio- ja robotiikkayritys. Yrityksen tuotteet ovat normaalisti projektiluontoisia, uniikkeja ratkaisuja asiakkaan ehdoilla. Yleensä nämä ratkaisut koostuvat yhdestä tai useammasta teollisuusrobotista, jonka ympärille rakennetaan robottisolun. Yhdelle tämän yrityksen tuotteista on ilmennyt kuitenkin laajempaa kysyntää. Etsauslaitteisto on yksinkertainen laitteisto eikä se sisälläkään lainkaan robottia. Ilmiöt ja ongelmat etsausilmiön takana ovat kuitenkin jääneet osittain tutkimatta. Etsauslaitteiston tuotteistamista, sen haasteita ja uusia mahdollisuuksia tutkitaan tässä työssä.

Hammashionnan laadunvarmistukseen on olemassa useampia menetelmiä. Karkaisuetsaaminen on standardoitu hionnan laadunvarmistusmenetelmä, ja se onkin laajassa käytössä ympäri maailman. Karkaisuetsauskäytäntöjä on kuitenkin olemassa melkein yhtä monta kuin sitä toteutavia yrityksiäkin. Yrityksiä haastateltiin ennalta määritetyin kysymyksiin. Haastattelun ja eri standardien perusteella saadaan luotua yleinen etsauslaitteistomalli tai -sarja, joka palvelee mahdollisimman montaa asiakasta. Tärkeitä kysymyksiä ovat, mikä on etsausastioiden oikea lukumäärä ja miten altaat toteutetaan.

Myös itse etsauksen menetelmänä liittyy useita ongelmakohtia. Etsaus on hallittu syövytysprosessi, joka perustuu erilaisten happojen, emästen ja laimentimien käyttöön. Tällaisten aineiden käyttäminen luo monia ympäristö- ja turvallisuuskysymyksiä. Tässä työssä selvitettiin kokeellisesti etsauslaitteiston räjähdysvaarallisten ilmakehien syntymistä. Räjähdysvaarallisten ilmakehien esiintyminen vaikuttaa olennaisesti laitteistoon, sillä sen perusteella annetaan erilaisia e-vaatimuksia. Laitteisto testattiin ja todettiin räjähdysvaarattomaksi, joten sen tilaluokaksi määritettiin vaaraton. Tämä päätös antaa kuitenkin vaatimuksia laitteiston ilmanvaihdon toteutukselle.

Työssä tutkittiin myös etsauksen muita käyttökohteita. Karkaisuetsauksessa aineen rikkoutuminen ei ole toivottua, mutta tälle ominaisuudelle on kuitenkin käyttöä valmistustekniikassa. Oppikirjan mukainen kemiallinen työstäminen vaatisi muutoksia laitteiston konstruktion. Kemiallisessa työstämisessä käytettävät etsausaineet ovat konsentraatioiltaan väkevempiä eivätkä ne sellaisenaan sovellu laitteistossa käytettäväksi. Altaiden tulisi tässä tapauksessa olla avonaisia, mikä on uusi turvallisuusriski. Nykyisen karkaisuetsaukseen keskittyvän laitteiston altaisiin tarvittaisiin ainakin sekoitin ja lämmitin.

Avainsanat: etsaus, nital, hionnan laadunvarmistus, kemiallinen työstäminen, turvallisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Miikka Kuisma: Productization of Etching Machine: Challenges and New Possibilities
Master's thesis
Tampere University
Master in Machine Engineering
April 2020

Robotech is a two and half years old automation and robotics company. Company's products are normally project-natured and unique solutions on customer terms. The solutions mostly consist of one or more industrial robots, around which a robot cell is built. However, a wider demand has arisen for one of this company's products. Etching machine is a simple product, and it does not include a robot at all. The phenomena and problems behind the etching phenomenon have however remained partly unexamined. The productization of etching machine, its challenges and new possibilities are investigated in this thesis.

There are several methods for quality control of tooth grinding. Temper etching is a standardized method for grinding quality control, and it is widely used around the world. However, there are almost as many temper etching policies as there are companies executing it. Companies were interviewed with pre-defined questions. Based on the interview and different standards, a general etching machine model or series can be created to serve as many customers as possible. Important questions are, what is the correct number of etching vessels and how to implement this.

There are also several problem areas with etching itself as a method. Etching is a controlled corrosion process based on the use of various acids, bases and diluents. The use of such substances raises many environmental and safety issues. The formation of explosive atmospheres in etching machine was investigated experimentally in this thesis. The possible presence of explosive atmospheres has a significant effect on the machine, since it gives rise to various Ex-requirements. The machine was tested and found to be non-explosive, so its zone classification was determined to be non-explosive. However, this decision lays down requirements for the implementation of ventilation.

Other uses of etching were also investigated in this thesis. The destructive nature of acids, which is not desired in temper etching, has use as a manufacturing technique. Chemical machining according to textbooks would require changes in the design of the machine. The etchants used in chemical machining are more concentrated and are not as such suitable for use in the machine. In this case, the vessels should be open, which is a new safety risk. At least a stirrer and heater would be needed for the vessels of current machine focusing on temper etching.

Keywords: temper etching., natal, grinding quality control, chemical machining, safety

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

ALKUSANAT

Tämän työn aihe saatiin kirjoittajan työnantajalta Robotech Oy:ltä. Työssä tutkittiin yrityksen mahdollisesti ensimmäisen niin sanotusti oman tuotteen tuotteistamisen mahdollisuuksia. Tästä työstä muokkautui huomattavasti monitahoisempi kuin aluksi ajattelin. Työn tekeminen edellytti perehtymistä moneen tekniikan alaan, kuten kemiaan, materiaalitekniikkaan, konetekniikkaan, ja myös jonkin verran sähkötekniikkaan.

Isot kiitokset koko Robotechin väelle diplomityön aiheesta. Haluan myös kiittää työn ohjaajia sekä omaa perhettäni oikoluvusta ja saamastani rakentavasta palautteesta.

Tampereella, 20.4.2020

Miikka Kuisma

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	1
1.2 Työn rakenne ja käytetyt tutkimusmenetelmät	2
2. ETSUKSEN TEORIA	4
2.1 Etsuskemia	8
2.2 Etsusaineet	10
3. HIONNAN LAADUNVARMISTUS	12
3.1 Hiontapalamisen tarkastaminen	15
3.2 Karkaisuetsaaminen	17
3.2.1 Kansainvälinen ISO-standardi	19
3.2.2 Muut karkaisuetsausstandardit	23
3.2.3 Karkaisuetsauslaitteistot	23
3.2.4 Karkaisuetsauksen heikkoudet	24
3.2.5 Karkaisuetsaamista koskevat patentit	25
4. ETSUKSEN VALMISTUSTEKNIKKANA	27
4.1 Käytettävät kemikaalit ja niiden ominaisuudet	29
4.2 Kemiallisen työstämisen vahvuudet ja heikkoudet	30
4.3 Materiaalin poistotahti	31
4.4 Kemiallisen työstön käyttökohteet	32
4.5 Kemiallisen työstämisen laitteistot	34
4.6 Patentit	35
5. YMPÄRISTÖ- JA TURVALLISUUSKYSYMYKSET	36
5.1 Räjähdyksivaaralliset ilmakehät	36
5.2 Vaarallisten aineiden käsittely	41
6. ETSUKSEEN TUOTTEISTAMISEN HAASTEET KÄYTÄNNÖSSÄ	44
6.1 Karkaisuetsauskäytännöt	44
6.2 Karkaisuetsauksen yleiset ongelmakohdat	46
6.2.1 Pinnan syöpyminen	46
6.2.2 Kemikaalien käyttö	47
6.2.3 Etsaamisen kesto	47
6.2.4 Etsaustulosten tulokinnanvaraisuus	48
6.3 Etsusastiat ja -nesteen	49
6.4 Materiaalit	51
6.5 Etsausprosessin valvonta, tarkastus ja jälkitoimenpiteet	52
6.6 Nykyisen konstruktion soveltaminen valmistustekniikkaan	52

6.7	Turvallisuuden takaaminen	53
7.	RÄJÄHDYSVAARALLISUUDEN TESTAAMINEN	56
7.1	Mittausjärjestelyt	56
7.2	Mittauslaitteet.....	57
7.3	Mittauksien suorittaminen.....	58
7.4	Mittaustulokset	59
8.	LOPPUPÄÄTELMÄT JA KEHITYSEHDOTUKSET	61
9.	YHTEENVETO.....	64
	LÄHTEET	66
	LIITE A: HAASTATTELUPOHJA.....	71

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Tutkimuskysymykset ja -menetelmät</i>	2
Kuva 2.	<i>Rauta-hiili faasidiagrammi (Davis, 2002, s. 311).</i>	5
Kuva 3.	<i>Typpihapon ja metallien kemiallisen reaktion tuotteet (Sulcius, 2015, s. 1971).</i>	10
Kuva 4.	<i>Hammasyörien valmistuksessa käytettyjä työvaiheita (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 304).</i>	12
Kuva 5.	<i>Hammashiontamenetelmät (Karpuschewski, Knoche ja Hipke, 2008, s. 622).</i>	13
Kuva 6.	<i>Hiontatapahtuman muuttajat (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 265).</i>	14
Kuva 7.	<i>Kappaleen väri sen saaman lämmön mukaan (MacKenzie, 2017).</i>	15
Kuva 8.	<i>Lievästi palanut hammasyöriä</i>	17
Kuva 9.	<i>Selvästi palanut hammasyöriä</i>	18
Kuva 10.	<i>Selvästi palanut hammasyöriä</i>	18
Kuva 11.	<i>Palanut ja etsattu hammasyöriä (Crow ja Pershing, 2017).</i>	19
Kuva 12.	<i>ISO-standardin mukainen etsauskaavio. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 2)</i>	20
Kuva 13.	<i>Manuaalinen etsauslaitteisto (Crow ja Pershing, 2017).</i>	24
Kuva 14.	<i>Hammashiontapalamisen etsauksen referenssikappaleiden patentointi (Crow ja Jacobson, 2017).</i>	25
Kuva 15.	<i>Kemiallisen työstämisen laitteisto (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 838).</i>	27
Kuva 16.	<i>Kemialliset työstötavat (Misumi, 2010).</i>	28
Kuva 17.	<i>Kemiallisen työstämisen toimenpiteet</i>	28
Kuva 18.	<i>Kemiallisesti työstettyjä osia (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 838).</i>	33
Kuva 19.	<i>3D-tulosteen tukirakenteiden poistaminen kemiallisesti (Hirtenberger, 2017).</i>	34
Kuva 20.	<i>Räjähdyksivaaran riskiarviointi prosessina (Euroopan komissio, 2003, s. 9).</i>	37
Kuva 21.	<i>Vedyn alempi ja ylempi räjähdysraja (Phoenix Contact, 2010).</i>	38
Kuva 22.	<i>Nitalin varoitusmerkkejä (PACE Technologies, 2015).</i>	42
Kuva 23.	<i>Mittausalueet ja -sektorit</i>	57
Kuva 24.	<i>Kannettava kaasunilmaisin</i>	58

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Etsauksessa käytettävä maskausaineet (Dini, 1984).....</i>	<i>7</i>
Taulukko 2.	<i>Hiontapalamisen tutkimiseen käytettyjen menetelmien vertailu.</i>	<i>16</i>
Taulukko 3.	<i>Etsaustulosten arviointi.</i>	<i>17</i>
Taulukko 4.	<i>ISO-standardin mukainen tyypin 2 etsaus. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 3)</i>	<i>21</i>
Taulukko 5.	<i>ISO-standardin mukainen tyypin 3 etsaus. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 4)</i>	<i>22</i>
Taulukko 6.	<i>Kemiallisen työstämisen etsausaineita ja niiden ominaisuuksia (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 550).....</i>	<i>30</i>
Taulukko 7.	<i>Tilaluokitukset (TUKES, 2017).</i>	<i>39</i>
Taulukko 8.	<i>Laiteluokitukset.</i>	<i>40</i>
Taulukko 9.	<i>Haastateltujen yritysten laadunvarmistusmenetelmät.</i>	<i>45</i>
Taulukko 10.	<i>Etsausaltaiden lukumäärän liuosten sekä laimentimien kartoitus.</i>	<i>49</i>
Taulukko 11.	<i>Paikallaan olevan etsauslaitteiston mittaustulokset.</i>	<i>59</i>
Taulukko 12.	<i>Alueiden kaasujen pitoisuuksia etsauksen aikana.....</i>	<i>60</i>
Taulukko 13.	<i>Haastattelun ja standardien yhteenveto.</i>	<i>65</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>E</i>	syövytysnopeus pintaa kohden
<i>EF</i>	etsauskerroin
<i>D</i>	viistettävä pinnan leikkaussyvyyksien erotus
<i>d_u</i>	allesyöpymä
<i>k</i>	varmuuskerroin
<i>LFL_m</i>	massaperusteinen alempi syttymisraja
<i>N</i>	etsaussuuntien lukumäärä
<i>Q_{a min}</i>	ilman teoreettinen minimivirtausmäärä laimenemisen aikaansaamiseksi
<i>t</i>	aika
<i>T_a</i>	lämpötila
<i>T_e</i>	etsauksen syvyys
<i>v</i>	upotusnopeus
<i>W_g</i>	palavan aineen päästömäärä
AGMA	engl. American Gear Manufacturers Association, amerikkalaisten vaihdevalmistajien yhdistys
AISI 304L	ruostumattoman teräksen laatu
AISI 316L	haponkestävän teräksen laatu
ASTM	engl. American Society of Testing and Materials
ATEX	ransk. atmospheres explosives, käytetään räjähdysvaarallisten tilojen ja niissä käytettävien laitteiden yhteydessä
BNA	engl. Barkhausen Noise Analysis, suomeksi Barkhausen kohina, hionnan laadunvarmistusmenetelmä
EC	engl. eddy current, suomeksi pyörrevirta, ainetta rikkomaton aineenkoetusmenetelmä
Ex-laite	termi, jota käytetään räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävistä laitteista
Ex-tila	termi, jota käytetään räjähdysvaarallisista tiloista
LEL	engl. lower explosive limit, suomeksi alempi räjähdysraja
IECEX	engl. IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres, maailmanlaajuinen vastine ATEX:lle
ISO	International Organization for Standardization
MPI	engl. magnetic particle inspection, aineenkoetusmenetelmä
NDT	engl. non-destructive testing, suomeksi ainetta rikkomaton aineenkoetusmenetelmä
NE	engl. nital etching, toinen nimitys karkaisuetsaukselle (engl. temper etching)
Nital	engl. nitric acid and alcohol, typpihapon ja alkoholin seos
SH	engl. surface hardness, pinnankovuuden mittaamiseen tarkoitettu aineenkoetusmenetelmä
UEL	engl. upper explosive limit, suomeksi ylempi räjähdysraja
XRD	engl. X-ray diffraction, suomeksi röntgendiffraktio, ainetta rikkomaton aineenkoetusmenetelmä
PE	engl. polyethylene, suomeksi polyeteeni
POM	engl. polyoxymethylene, suomeksi polyoksimetyyli
PTFE	engl. polytetrafluoroethylene, suomeksi polytetrafluorieteeni, tunnetaan myös kauppanimellä teflon
PVC	engl. polyvinyl chloride, suomeksi polyvinylikloridi

1. JOHDANTO

Karkaisuetsauksen avulla voidaan tutkia kappaleiden pinnan rakenteen muutoksia hionnan jälkeen. Tällaisia kappaleita ovat esimerkiksi erilaiset akselit, laakerit ja etenkin hammaspyörät. Karkaisuetsaus (engl. temper etch) on aineenkoetusmenetelmänä monin tavoin standardoitu. Kansainväliset ja käyttökohtaiset standardit on tehty yleisellä tasolla, minkä vuoksi niitä onkin jalostettu yritysten ja asiakkaiden toimesta tarkemmiksi omien käyttökokemusten pohjalta.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

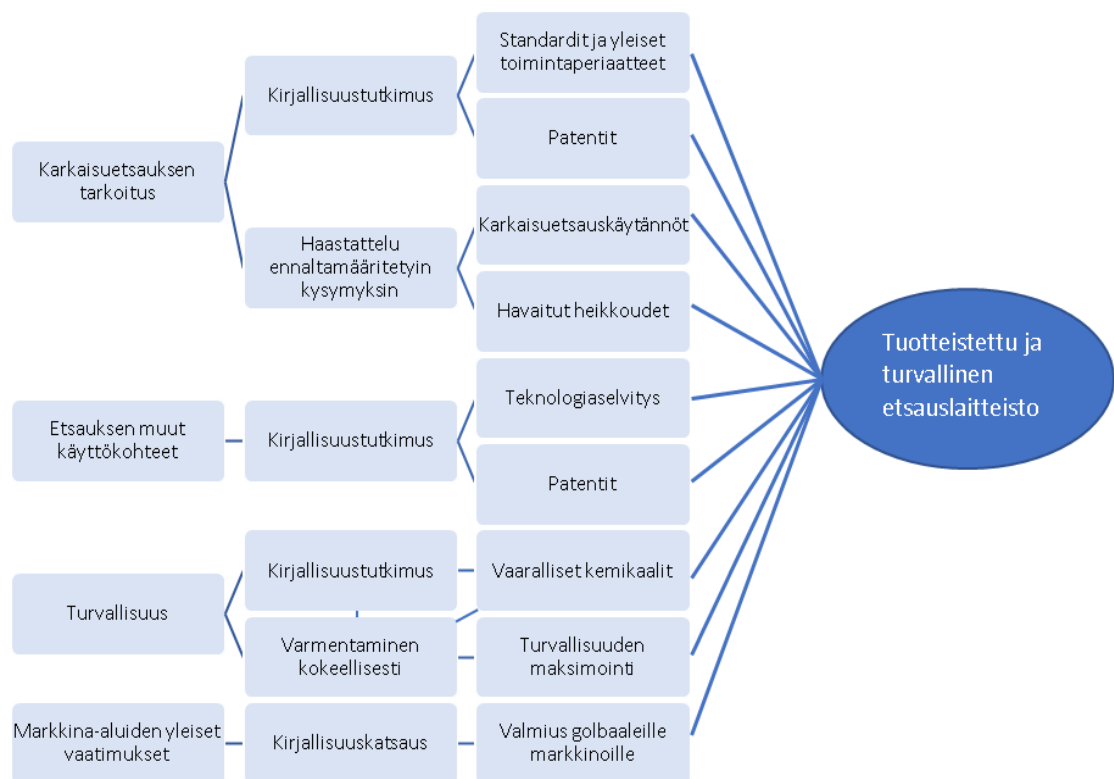
Tämän työn toimeksianto on saatu kirjoittajan työnantajalta. Robotech Oy on varsin tuore, noin kaksi ja puoli vuotta vanha robotiikka- ja automaatioalan yritys. Robotechin perustajajäsenillä on kuitenkin yritystään huomattavasti pidempi historia robotiikan ja automatiikan saralla. Robotechin toimittamat laitteistot ovat perustuneet yhteen tai useampaan teollisuusrobottiin, joiden ympärille on rakennettu toimiva kokonaisuus. Nämä asiakkaalle räätälöidyt laitteistot sisältävät usein erilaisia kuljettimia, tärymaljoja ja muita vastaavia apulaitteita. Materiaalivirtojen hallinta perustuu erilaisiin anturitekniikoihin ja tunnistusratkaisuihin. Laitteiston toiminnallisuus kulminoituu kuitenkin usein teollisuusrobottiin ja sen käyttämään apuvälineeseen, jota kutsutaan yleisemmin tarttujaksi. Tällaisten laitteistojen suunnittelu ja toteuttaminen on ollut Robotechin liiketoiminnan perusta.

Yritys on suunnitellut myös tuotteita perinteisen osaamisalueensa ulkopuolelta. Yksi tällainen tuote on automaattinen karkaisuetsauslaitteisto, jolle yrityksen selvityksen mukaan olisi laajempaa kysyntää, ja on mahdollisuus jopa laitteiston tuotteistamiseen. Laitteisto on yrityksen perinteisiin toimituksiin nähden yksinkertainen. Ilmiöt ja mahdolliset ongelmat etsausmenetelmän taustalla ovat kuitenkin jääneet vielä osittain tutkimatta. Karkaisuetsaus on kemiallinen aineenkoetusmenetelmä, jolla pyritään tutkimaan kappaleen mikro- tai makrorakennetta. Tässä diplomityössä selvitetään karkaisuetsauslaitteiston tuotteistamisen mahdollisuuksia. Tavoitteena on myös selvittää Robotechille etsausprosessin toimintaperiaatteet sekä karkaisuetsaamisen tarkoitus ja muut mahdolliset etsaamisen käyttötarkoitukset. Tämän lisäksi myös laitteiston turvallisuuteen liittyviä kysymyksiä on tutkittava.

Robotechin etsauslaitteet ovat tähän mennessä toimitettu hammaspyörävalmistajille. Tämän työn teoriaosassa keskitytään erityisesti hammaspyörien hiontaan ja sen laadunvarmistuksen tutkimiseen. Yhtenä osana tätä työtä on myös etsauslaitteen muiden käyttökohteiden kartoitus. Tavoitteena on mahdollistaa sen mahdollisimman laaja käyttötarkoitus. Etsausta käytetään myös valmistustekniikkana, ja sen siihen liittyvien vaatimusten selvittäminen on osa tätä työtä.

1.2 Työn rakenne ja käytetyt tutkimusmenetelmät

Tutkimuskysymyksiä sekä käytettäviä tutkimusmenetelmiä esitellään alla olevassa kuvassa.



Kuva 1. Tutkimuskysymykset ja -menetelmät.

Kuvassa 1 vasemmalla on esitelty tutkimuskysymyksiä. Tämän vieressä on esitelty menetelmiä, joiden avulla näihin kysymyksiin vastataan. Menetelmien avulla saavutettuja välituloksia esitellään tutkintamenetelmien oikealla puolella. Kuvassa oikealla on puolestaan työn lopullinen tavoite.

Aluksi käsitellään etsauksen teoriaa ja siihen liittyviä kemiallisia ilmiöitä. Tämän jälkeen keskitytään hammashionnan laadunvarmistukseen sekä etsaukseen valmistustekniikkana. Karkaisuetsausta vertaillaan aluksi eri NDT-menetelmiin (engl. non-destructive

testing suomeksi ainetta rikkoman koetusmenetelmä), minkä jälkeen siirrytään karkaisuetsauksen käytäntöihin ja toimintaperiaatteisiin. Yleisen karkaisuetsausmallin selvittämiseksi tutkitaan, miten eri yritykset tällä hetkellä toteuttavat etsauksen ja mitä käytäntöjä näiltä löytyy. Tämä suoritetaan haastattelututkimuksen avulla.

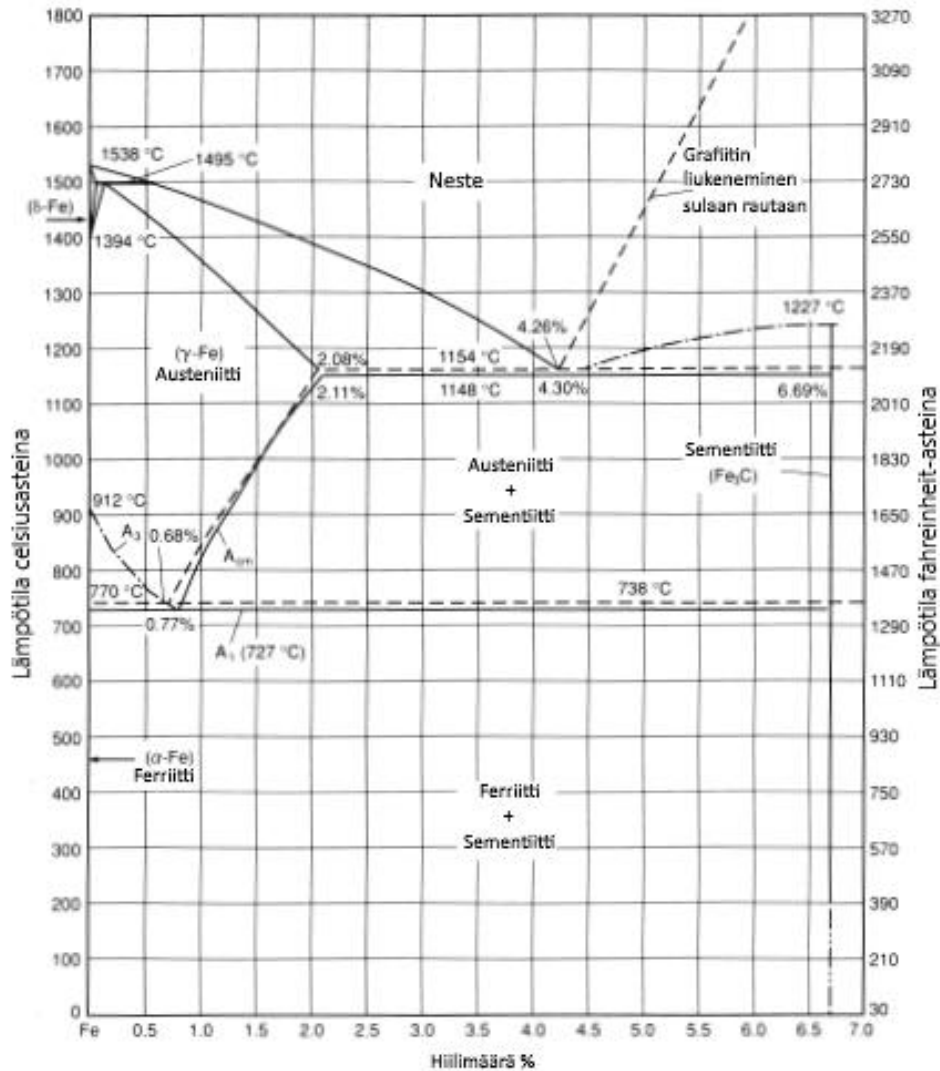
Etsauslaitteen suunnitteluun liittyy monia haasteita. Mahdollisimman monen yrityksen ja standardin palveleminen saattaa venyttää etsauslaitteen rajoja. Menetelmästandardit eivät kuitenkaan ole ainoita etsauslaitteen suunnittelua ohjaavia tekijöitä. Etsaus on kemiallinen prosessi ja siinä käytettävät nesteet luovat mahdollisesti räjähdysvaarallisia ilmakehiä. Yhtenä tutkimuskysymyksenä onkin, mitä etsauslaitetta mahdollisesti koskevia ex-vaatimuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä on olemassa. Räjähdysvaarallisille tiloille annetaan ex-luokitus ja niissä käytettäville laitteille annetaan vaatimuksia luokituksen pohjalta. Koska tarkoituksena on luoda tuote kansainvälisille markkinoille, on tutkittava myös kansainvälisiä standardeja.

2. ETSUKSEN TEORIA

Etsausta on hyödynnetty jo 1500-luvulla miekkojen ja haarniskoiden kuvioinnissa (Williams, 2012). Etsauksella on pitkät perinteet taiteessa, mutta sille on myöhemmin löydetty myös muuta käyttöä. Etsaus on hallittu syövyttävä prosessi, joka perustuu pohjimmitaan eri potentiaaleissa olevien pintojen väliseen elektrolyyttiseen vaikutukseen. Syövytysaineet (engl. etchants) luovat etsattavan kappaleen kontrastin kahdella eri tavalla: metallin rakeiden pinnassa tai raerajoilla. (Vander Voort, 1999, s. 166–167) Etsaus voidaan jakaa mikro- ja makroetsaukseen. Näistä ensimmäistä käytetään tutkiessa etsattavan kappaleen mikrorakennetta. Makroetsauksella puolestaan pystytään luomaan yleiskuva metallin tasalaatuisuudesta (Vander Voort, 1999, s. 4).

Syöpyminen tapahtuu ilman suuria potentiaalieroja, mikäli etsattava materiaali on yhtä faasia. Raerajojen ja rakeiden sisäiset potentiaalierot eivät juuri vaikuta etsausreaktioon. Yksifaasisissa metalleissa ja seoksissa syöpyminen perustuu enemmänkin rakeiden orientaatioiden vaihteluun. Raerajoilla vaikuttava kemiallinen syövytysaine voi luoda rae-kontrastia pidemmällä syövytysajolla. Rae-kontrasti perustuu tässä tapauksessa eri tavalla orientuneiden rakeiden liukenemisnopeuksiin syövyttävässä aineessa. Jotkin raakeet näyttävät vaaleina ja toiset tummempina. Tämä ei kuitenkaan johdu metallin alotropiasta vaan rakeiden suunnan ja valon suunnan suhteesta. (Vander Voort, 1999, s. 167–168) Rakenteiden orientaatiosta johtuvaa kontrastia on vaikea nähdä ilman apuvälineitä. Tällöin puhutaankin yleisesti mikrorakenteen muutoksista (Vander Voort, 2004, s. 24).

Useimmat rautametallit (engl. ferrous) ja monet pääasiassa muita metalleja kuin rautaa sisältävät metalliseokset (engl. nonferrous) koostuvat useammasta faasista (Vander Voort, 2004, s. 26). Raudalla on esimerkiksi monta mahdollista faasia. Rauta-hiili faasi-diagrammia esitellään kuvassa 2.



Kuva 2. Rauta-hiili faasidiagrammi (Davis, 2002, s. 311).

Raudan ja hiilen seosteissa austeniitti on stabiili ainoastaan yli 720 °C lämpötilassa kuvan 2 mukaisesti. Tämän lämpötilan alapuolella raudan ja hiilen seosteet koostuvat ferriitin ja sementiitin seoksesta. Tämän seoksen koostumukseen vaikuttaa merkittävästi muokkaamisen lämpötila sekä jäähtymisnopeus. Mikäli seos jäähtyy hitaasti, syntyy perliittiä. Jäähtymisnopeuden kasvaessa alkaa muodostua myös martensiittia. Teräksen karkaisussa tavoitellaan nimenomaan martensiittia, joka on austeniitin muutostuotteista kaikista kovinta ja haurainta. (Rakhit, 2000, s. 8–11) Martensiitti on ainoa karkaisussa muodostuva faasi, jos kappale jäähdytetään kriittisellä jäähdytysnopeudella (engl. critical quenching rate). Tämä saavutetaan jäähdyttämällä 750-asteinen autektoidinen teräs 450-asteiseksi nopeammin kuin 0,7 sekunnissa. (Sadegh ja Worek, 2018, s. 321)

Syöpyminen luo uurteita tai koloja, mikäli se tapahtuu faasirajalla. Perliitin etsaaminen on klassinen esimerkki kaksifaasisen seoksen etsauksesta. (Vander Voort, 1999, s. 166–167) Jännitesarjassa jalommat aineet toimivat katodeina eli pelkistyvät. Etsatessa

perliitin sementtiitilamellit toimivat katodeina ja ferriitilamellit anodeina merkittävällä potentiaalierolla. (Vander Voort, 1999, s. 167) Martensiitin ja ferriitin välille syntyy myös potentiaaliero, jossa martensiitti pelkistyy (Belyakov, 2019, s. 27). Tämän takia ferriitti liukenee etsatessa. Anodina toimiva ferriitti esiintyy tummempana etsauksen jälkeen (Vander Voort, 1999, s. 167–168).

Etsauksella voidaan tutkia hiontapalamisesta johtuvia metallin kide- ja faasirakenteen muutoksia, jotka näkyvät etsatun kappaleen pinnan kontrastina. Hiontapalamisen tutkiminen on makroetsausta tai tarkemmin karkaisuetsausta (Vander Voort, 1999, s. 4). Hiontapalamisen tutkimisessa aineen syöpyminen ei ole niinkään ideaalia, sillä se vaikuttaa etsattavan kappaleen, kuten hammaspyörän lopullisiin mittoihin. Sen sijaan valmistustekniikassa nimenomaan syöpymiselle ja aineen liukenemiselle on monia käyttökohteita. Kappaleen eri osien korroosionkestoon pystytään myös vaikuttamaan pureutumatta kyseisen kappaleen kiderakenteeseen. Selektiivinen etsaus on mahdollista karhentamalla tai peittaamalla eri faaseja (Vander Voort, 1999, s. 166).

Kemikaalisilla syövytysaineilla on yleensä kolme eri komponenttia: syövyttävä aine, säätelyaine tai liuotin sekä hapetin. Syövyttäviä aineita ovat muun muassa suola-, rikki-, fosfori- ja etikkahappo. Syövyttäviä aineita kutsutaan reagensseiksi (engl. reagent). Happoja käytetään yleensä etsauksessa reagensseina. Säätelyaineita ovat puolestaan esimerkiksi alkoholit ja vesi. Vetyperoksidi on erillinen hapetin. Joillakin syövytysaineilla yksi komponentti toimii kahteen tarkoitukseen, sillä esimerkiksi typpihappo on sekä syövyttävä että hapettava aine. (Vander Voort, 1999, s. 166)

Reagensseja käytetään yleensä veteen, etanoliin tai näiden seokseen liuotettuina. Liuottimilla, kuten etanolilla on myös oma tarkoituksensa. Syövytysreaktiossa vapautuva energia on jakauduttava liuoksen koko tilavuudelle. Syövytysreaktion nopeus on merkittävä tekijä. Tähän vaikuttaa olennaisesti reagenssien dissosiaatio liuoksessa sekä liuoksen sähkönjohtavuus ja viskositeetti, joka määrittää eri aineiden levittäytymisen. Typpihapon syövytysreaktio ja sen tulos siis riippuu myös liuottimen ominaisuuksista. Vesi-pohjainen liuos levittäytyy alkoholipohjaista liuosta paljon epätasaisemmin. Toisin kuin vesi, alkoholi pystyy myös liuottamaan rasvoja. Tämän takia alkoholipitoisilla liuoksilla saavutetaan tasaisempi tulos. (Berglund ja Dearden, 1931, s. 12–13) Kemiallisessa työssä käytetään reagensseina happojen lisäksi myös emäksiä.

Käsiteltävän kappaleen kaikkia kohtia ei välttämättä haluta etsata. Tämän takia karkaisuetsauksessa ja useammin kemiallisessa työstämisessä käytetään suojausaineita tai maskausaineita (engl. maskant, masking) kappaleen alueiden suojaamiseksi (Kumar,

Divya ja Zindani, 2018, s. 90–91). Maskausaine on inertti aine, joka ei reagoi reagenssien kanssa. Monet tekijät vaikuttavat maskausaineen valintaan. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa yksityiskohtien tarkkuus, tuotettavien osien lukumäärä sekä työstettävän kappaleen koko (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 7). Maskausaineelta halutaan seuraavia ominaisuuksia (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 7): Maskausaineen

- materiaali tulee olla kovaa ja kestää käsittelyä
- tulee olla tarpeeksi tarttuvaa
- piirroitus eli muodon kaivertaminen tulee olla helposti tehtävissä
- tulee olla etsausaineen kanssa inerttiä
- tulee kestää kemiallisen reaktion tuottama lämpötilan nousu
- tulee olla halpaa ja helposti irroitettavissa etsauksen jälkeen.

Huonosti tarttuvat maskausaineet voivat aiheuttaa etsauksessa tai käsittelyssä muodostuvia muodonvääristymiä etsausmaskin reunoilla. Jos maskausaineelta vaaditaan kulumisenkeston vuoksi korkeaa tarttumiskykyä, on sen poistaminen myös vaikeampaa. (Langworthy, 1989, s. 580) Maskausaineet eivät saa reagoida reagenssien tai etsattavan kappaleen kanssa. Tämän takia maskausaineet ovat kumi- tai polymeeripohjaisia (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 92). Yleisimpiä maskausaineita esitellään taulukossa 1.

Taulukko 1. Etsauksessa käytettävä maskausaineet (Dini, 1984).

Työkappaleen materiaali	Maskausaineen materiaali
Alumiini ja seosteet	Polymeerit, butyylikumit, neopreeni
Rautaseosteet	Polymeerit, polyvinyylikloridi (PVC), polyetyleenibutyylikumi
Nikkeli	Neopreeni
Magnesium	Polymeerit
Kupari ja seosteet	Polymeerit
Titaani	Polymeerit
Pii	Polymeerit

Maskausaine voidaan levittää kappaleen pintaan monella eri tavalla. Yksi keino on kastaa koko kappale maskausaineeseen. Tällöin muodostuu herkästi epätasapaksu kerros maskausainetta, sillä painovoiman ansiosta maskausaine valuu kappaleen pintaa pitkin alaspäin. Toisena vaihtoehtona on maskausaineen suihkuttaminen kappaleen pintaan. Maskausaineen muodostaman suojakerroksen paksuus on näillä tavoin toteutettuna

yleensä 0,2–0,4 mm (Langworthy, 1989, s. 580). Silkkipainatusta (engl. silk screen) käytetään, jos tavoitellaan erittäin tarkkoja muotoja. Tässä menetelmässä maskausaine levitetään kappaleen pintaan sen päälle asetetun muotin läpi. (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 92) Tällöin muodostuu erittäin ohut kalvo maskausainetta (Langworthy, 1989, s. 580). Silkkipainatuksella muodostettu maskaus ei kuitenkaan kestä kovin kauaa reagenssien kanssa (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 92).

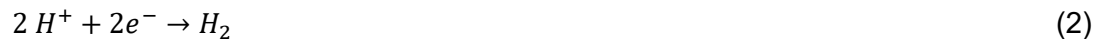
2.1 Etsauskemialla

Happoja käytetään yleensä etsauksessa reagensseina. Hapoista vain *HCL* (suolahappo), *HF* (vetyfluoridi) ja *H₂SO₄* (riikkihappo) toimivat hapon tavoin niiden sisältämien vetyionien ansiosta. (Berglund ja Dearden, 1931, s. 13) Koska hiilen määrä teräksessä ei juuri vaikuta sen syöpyemiseenkestoon (Osarolube, Owate ja Oforaka, 2008, s. 227), voidaan tutkia happojen ja raudan välisiä reaktioyhtälöitä. Tutkitaan vedyn ja raudan pelkitysmisreaktioita.

Raudan (II) pelkitysmisreaktio on muotoa:



Vedyn pelkistymisreaktio on muotoa:



Yhtälöistä 1 ja 2 saadaan johdettua kaava:



Raudan ja väkevän suolahapon reaktioyhtälö saadaan täten johdettua muotoon



Raudan ja suolahapon välinen reaktio vapauttaa vetyä. Metallin liukeneminen tuottaa vetyä, jos epäjaloka metalleja syövytetään hapettamattomassa liuoksessa. (Vander Voort, 1999, s. 169) Muut kuin yllämainitut hapot toimivat hapettimien tavoin (Berglund ja Dearden, 1931, s. 13).

Typpihapon ja raudan välinen reaktio riippuu typpihapon konsentraatiosta sekä reaktion lämpötilasta. Korkeammilla typpihapon konsentraatioilla ja korkeammilla lämpöillä typpihappo pelkistyy typpihapokkeeksi (*HNO₂*) ja typpioksidiksi (*NO₂*). (Ningshen ym., 2009) Väkevän typpihapon reaktioita voidaan kuvata seuraavilla reaktioyhtälöillä (Ningshen ym., 2009, s. 328):



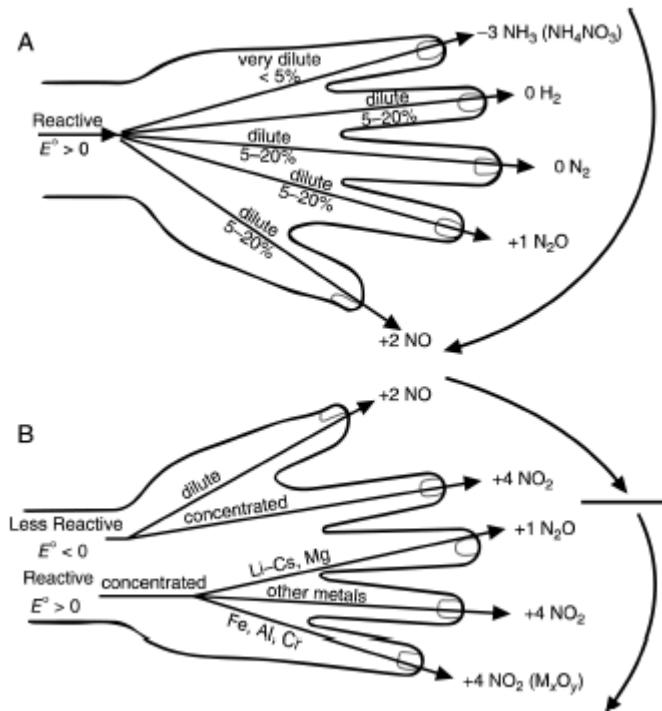


Passiivinen metalli on sähkökemiallisen sarjan mukaan aktiivinen, mutta syöpyy siitä huolimatta erittäin hitaasti. Jotkin metallit voidaan passivoida altistamalla ne passivoivaan aineeseen tai anodisoimalla riittävän suurella virralla. Joillakin hapoilla on metalleja passioiva ominaisuus. Jo 1700-luvulla huomattiin, että rauta reagoi voimakkaasti laimean typpihapon kanssa, mutta säilyy silminnähden koskemattomana väkevän typpihapon kanssa. Typpihaposta pelkistytävä typpihapoke (HNO_2) toimii raudan passivoijana. Raudan täytyy reagoida nopeasti typpihapon kanssa, jotta typpihapoketta muodostuisi. (Revie ja Uhlig, 2008, s. 83–90)

Pienemmillä konsentraatioilla ja alemmilla lämpötiloilla typpihappo pelkistyy typpimonoksidiksi (NO) (Ningshen ym., 2009, s. 328). Rauta muodostaa typpihapon kanssa rautanitraatteja ($Fe(NO_3)_x$) (Osarolube, Owate ja Oforka, 2008, s. 227). Laimean typpihapon reaktioita voidaan kuvata seuraavilla reaktioyhtälöillä (Ningshen ym., 2009, s. 328):



Molemmissa tapauksissa typpihappo pelkistyy hapettimiksi, mikä entisestään kasvattaa metallin liukenemistä. Metallien ja typpihapon välisten reaktioiden tuotteita havainnollistaa kuva 3.



Kuva 3. Typpihapon ja metallien kemiallisen reaktion tuotteet (Sulcius, 2015, s. 1971).

Kuvassa 3 vasemman käden reaktiot (A) käsittelevät reaktiivisten metallien ja laimean typpihapon kemiallisten reaktioiden tuotteita. Erittäin laimeilla liuksilla lopputuotteena esiintyy ammoniakkia NH_3 . Kaavoista voidaan päätellä, että typpihapon konsentraation pienentyessä myös sen hapettavuus pienenee. Tällöin oksideja muodostuu vähemmän ja myös vedyn muodostuminen on mahdollista suolahapon, rikkihapon ja vetyfluoridin tavoin.

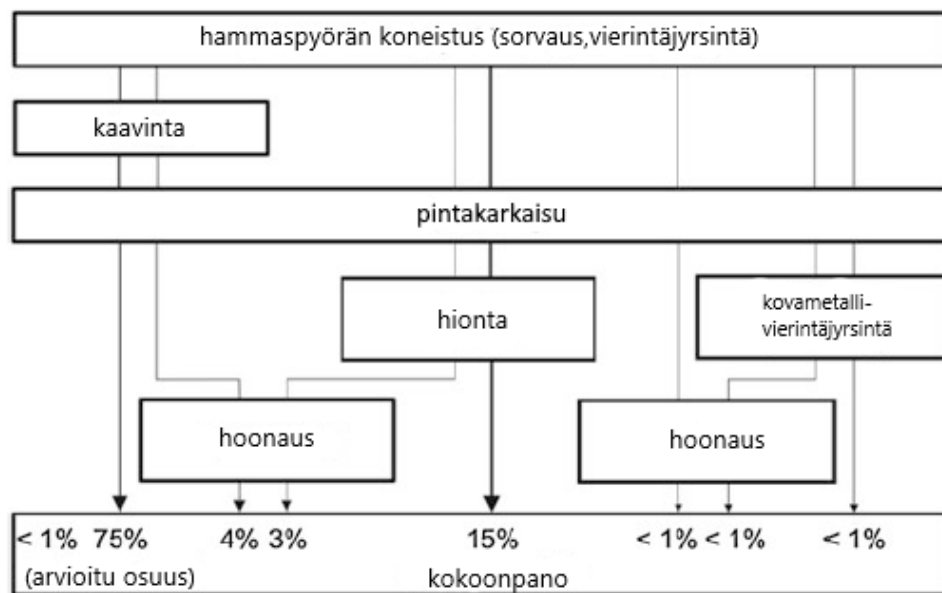
2.2 Etsausaineet

Etsausaineita on kehitelty yritys ja erehdys -menetelmällä, mutta myös perehtymällä etsattavan materiaalin korroosio-ominaisuuksiin (Vander Voort, 1999, s. 166). Etsausaineilla on eri ominaisuuksia ja tämän takia niitä käytetään eri tarkoituksiin. Metallurgian kirjallisuudessa (Vander Voort, 1999, 2004; ASTM International, 2015) etsausaineet on jaoteltu mikro- ja makroetsausaineisiin. Näiden lisäksi valmistustekniikassa käytetään omia etsausaineita tasaisen syövytyksen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi Amerikkalainen testaus- ja materiaaliyhdistys (engl. American Society of Testing and Materials, ASTM) esittelee standardissaan (ASTM International, 2015) yli 200 mikroetsausainetta. Makroetsausaineita ASTM (ASTM International, 1995) erittelee puolestaan useita kymmeniä. Käytettävät nesteet ovat osittain samoja, mutta seosten koostumus ja konsentraatiot vaihtelevat.

Etsausaineita on kokonaisuudessa huomattavan suuri määrä. Karkaisuetsauksessa ja yleisesti valmistustekniikassa käytettävien etsausaineiden joukko on kuitenkin pieni. Typpihappo on yleisesti käytetty happo. Alkoholien ja typpihapon seosta (1–10 til-%) kutsutaan nitaliksi. Nital tulee englannin kielen sanoista **n**itric acid ja **a**lcohol. Ferriittifaasin paljastava nital on yleisin raudan etsauksessa käytettävä etsausaine (Vander Voort, 1999, s. 212). Myös valmistustekniikassa käytetään typpihappoa, mutta suuremmilla konsentraatioilla. Etsausaineita käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa niiden käyttötarkoitusten yhteydessä.

3. HIONNAN LAADUNVARMISTUS

Hammaspyörä on yksi olennaisimmista koneenosista. Hammaspyöriä käytetään esimerkiksi autojen, traktorien, laivojen ja tuulivoimaloiden vaihteistoissa. (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 303) Hammaspyörien kysyntä on kasvussa ja niitä valmistetaan 2000-2500 miljoonaa kappaletta vuosittain (Goch, 2003, s. 1). Hammaspyöriä voidaan valmistaa useilla tuotantomenetelmillä hammaspyörän rakenteesta ja halutuista ominaisuuksista riippuen. Tuotannossa käytetään yleisesti niin lastuavaa kuin lastuamatontakin työstöä. (Klocke, 2019, s. 767) Hammaspyörien valmistus koostuu yleensä useammasta työvaiheesta tai prosessista. Suurin osa modernien vaihteistojen hammaspyöristä pintakarkaistaan hampaiden kulumiskestävyyden lisäämiseksi (Köhler, Schindler ja Woiwode, 2012, s. 291). Pintakarkaisun tai muiden lämpökäsittelyjen ymmärtäminen vaatii raudan faasidiagrammin tutkimista (Davis, 2002, s. 311).



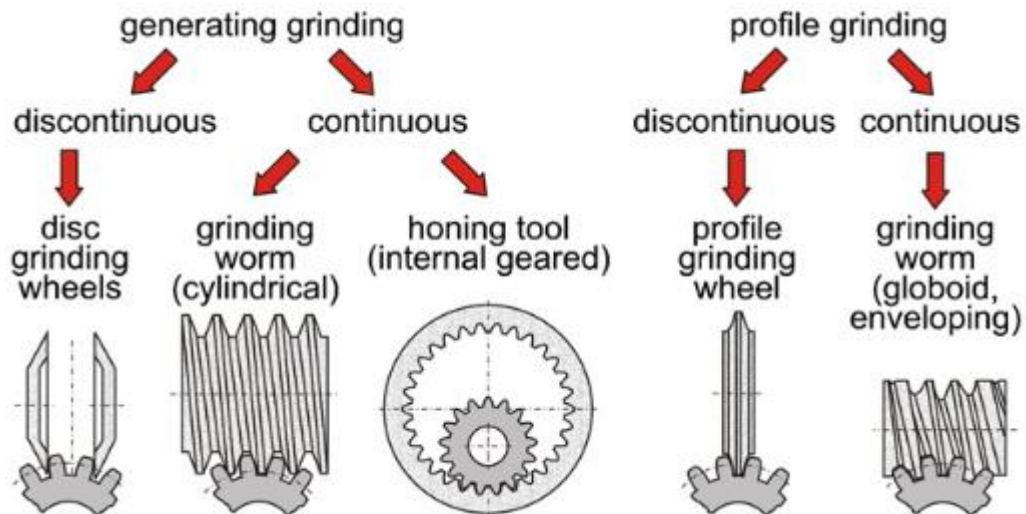
Kuva 4. Hammaspyörien valmistuksessa käytettyjä työvaiheita (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 304).

Kuvassa 4 on esitelty hammaspyörien valmistamisessa käytettyjä työvaiheita. Kuvasta huomataan, että kolmella neljästä hammaspyörästä karkaisu on viimeinen työvaihe, ilman hammaspyörän jälkikäsittelyitä. Näin saavutetaan yleisin hammaspyörien valmistustarkkuus. Hammaspyörien valmistustarkkuus on määritelty alan standardeissa (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2016) (DIN 3962-2, 1978; SFS-ISO 1328-2, 2016), joissa valmistustarkkuus on jaoteltu tarkkuusluokkiin. Tarkkuusluokkia on saksalaisten

standardissa 12 ja ne on määritelty asteikolla 1–12 (DIN 3962-2, 1978). SFS-ISO -standardi puolestaan käsittää 9 luokkaa asteikolla 4–12. Pelkällä hammaspyörän koneistuksella, kaavinnalla ja karkaisulla päästään tarkkuusluokkiin 6-12 (Bausch, 2006).

Tarkempien hammaspyörien kysyntä on myös kasvussa. Hammaspyöriltä vaaditaan suurempaa tehonvälityskykyä, parempaa luotettavuutta ja pidempää käyttöikää (Goch, 2003, s. 659). Näihin vaatimuksiin pystytään vastaamaan parantamalla valmistustarkkuutta. Vaadittava valmistustarkkuus vaikuttaa olennaisesti työvaiheiden määrään kuvan 4 mukaisesti. Tarkempaan valmistustarkkuuteen päästään esimerkiksi hoonaamalla ja hiomalla (Karpuschewski, Knoche ja Hipke, 2008, s. 622). Näin saavutetaan hiljaisempi käyntiäni ja ennen kaikkea parempi kuormitettavuus, joka tarkoittaa normaaleissa olosuhteissa pidempää käyttöikää (Karpuschewski, Knoche ja Hipke, 2008, s. 622).

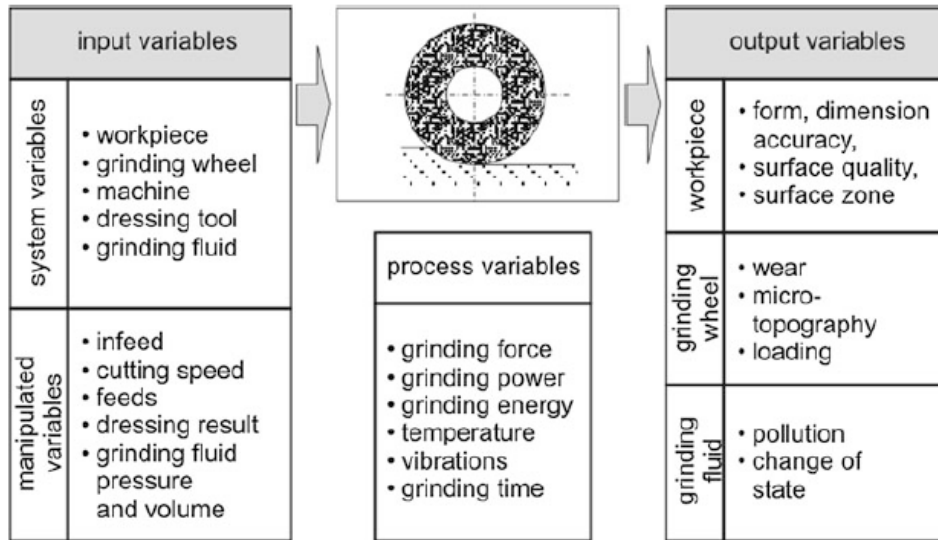
Noin 15–20 % suuressa mittakaavassa tuotetuista hammaspyöristä hiotaan (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 304). Hammashiontamenetelmät voidaan jakaa kahteen eri luokkaan hionnan toteutustavan perusteella: vierintähiontamenetelmiin (generating grinding) ja profiilihiontamenetelmiin (profile grinding). Hammashionnassa käytettäviä menetelmiä esitellään kuvassa 5.



Kuva 5. Hammashiontamenetelmät (Karpuschewski, Knoche ja Hipke, 2008, s. 622).

Menetelmät jaetaan edelleen jatkuviin ja epäjatkuviin menetelmiin. Kierukalla (worm) toteutettu jatkuva vierintähionta on menetelmistä kaikista nopein, mutta se soveltuu hyvin ainoastaan massatuotannolle tai suurille valmistuserille. Jatkuvalle vierintähionnalle saavutetaan standardin (DIN 3962-2, 1978) mukaiset tarkkuusluokat 1–2. Toisena ääripäänä on kiekoin toteutettu epäjatkuva vierintähionta, joka soveltuu paremmin yksittäisille kappaleille. Profiilihionnalla saavutettu tarkkuusluokka ja sille soveltuvat tuotantomäärät asettuvat näiden ääripäiden väliin.

Hiomisen lopputulokseen vaikuttaa monet muuttujat, joita esitellään kuvassa 6.



Kuva 6. *Hiomattapahtuman muuttujat* (Toenshoff ja Denkena, 2013, s. 265).

Kuvassa vasemmalla on listattu hiontaan vaikuttavia lähtömuuttujia. Näitä ovat esimerkiksi hiottava kappale, hiontatyökalu, hiontakone, hiontaneeste, syöttönopeudet, leikkausnopeus ja hiontaneesteen määrä. Keskellä on kuvattu varsinaisen hiontaprosessin muuttujia, kuten hiontavoima, -teho, -energia, lämpötila, värähtelyt sekä hionta-aika. Kuvassa oikealla on esitelty tulosmuuttujia eli mihin ominaisuuksiin voidaan hionnalla vaikuttaa. Vaikka hiomisella parannetaan hammaspyörän valmistustarkkuutta, ei se kuitenkaan väärin toteutettuna paranna karkaistun hammaspyörän ominaisuuksia.

Hiontatyökalun ja hiottavan kappaleen välinen kitka muuttuu lämmöksi. Suurin osa lämmöstä siirtyy hiottavaan kappaleeseen ja osa lämmöstä siirtyy pois hiontaneesteen, -työkalun ja -lastujen välityksellä. (Yin ja Marinescu, 2017, s. 2) Hiottavaan kappaleeseen ei kuitenkaan haluta tuoda lämpöä enää varsinaisen karkaisun jälkeen. Hionnasta aiheutuva lämpö voi aiheuttaa kappaleeseen haitallisia jäännösjännityksiä ja mikrorakenteen muutoksia (MacKenzie, 2017).

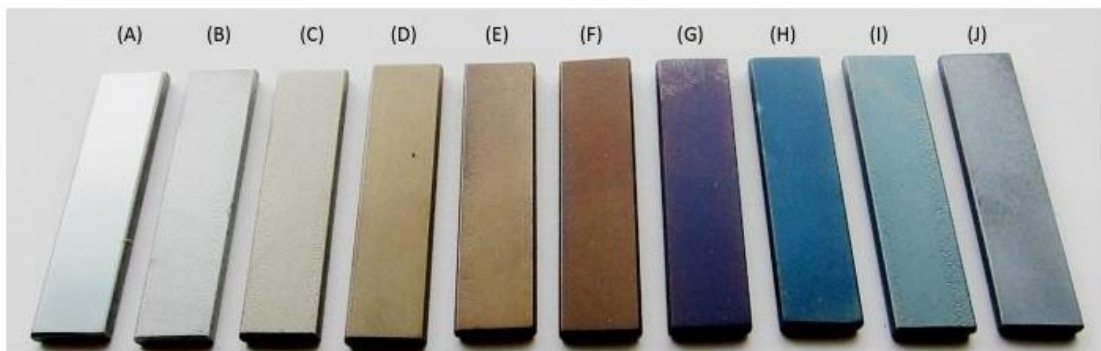
Jos halutaan varmistaa hionnan laatu, on sitä myös valvottava. Kappaleiden laadunvalvonnan avulla voidaan myös oppia käyttämään hionttapahtuman muuttujia oikein. Toisin sanoen hiottuja kappaleita tutkimalla opitaan havaitsemaan esimerkiksi hiontatyökalun epäkunto tai liian nopea syöttönopeus. Hiottusta kappaleesta voidaan tutkia eri asioita erinäisillä menetelmillä. Näitä menetelmiä käsitellään seuraavaksi alaluvuissa.

3.1 Hiontapalamisen tarkastaminen

Hionnan aiheuttamat virheet voidaan jakaa neljään luokkaan (MacKenzie, 2017):

- Hapetuspalaminen (engl. oxidation burn)
- Pintapäästyminen (engl. thermal softening)
- Haitallisten jäännösjännitysten muodostuminen (engl. residual stress)
- Uudelleen karkeneminen (engl. re-hardening burn)

Hapetuspalaminen tapahtuu ensimmäisenä lämpötilan noustessa. Hiottuun pintaan muodostuu oksideja, joiden väri muuttuu lämmön kasvaessa. Kappaleen värin perusteella voidaan arvioida kappaleen pinnan maksimilämpötila hionnan aikana. (MacKenzie, 2017) Kappaleen väri muuttuu lämpötilan noustessa kirkkaasta oranssiin ja edelleen sinisen eri sävyihin. Hapetuspalaminen nähdään ennen kaikkea visuaalisesti. Kappaleen lämpenemistä voidaan arvioida kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. Kappaleen väri sen saaman lämmön mukaan (MacKenzie, 2017).

Kuvan 7 kappale A ei ole altistunut lämmölle, kun taas kappale J on saanut sitä eniten. Hiottu kappale pehmenee, mikäli sen lämpötila nousee yli karkaisulämpötilan (Alban, 1985, s. 57). Kaikista pahimman palamisen yhteydessä puhutaan uudelleen karkenemisestä. Tällöin kappaleen lämpötila ylittää austenointilämpötilan, jolloin raudan tai teräksen kiderakenne muuttuu ferriitistä austeniitiksi (Crow ja Pershing, 2017). Uudelleen karkenemisessä kappaleen kovuus kasvaa paikallisesti. Tämän alueen ympärillä aine puolestaan pehmenee pintapäästymisen tavoin. Pintapäästymistä voidaan arvioida kuvan 7 värikartan perusteella, mutta sitä voidaan myös tutkia eri menetelmin.

Kappaleiden lujuusominaisuuksia sekä mikro- ja makrorakenteita voidaan tutkia monin tavoin (Siiriäinen ym., 2008). Hiontapalamisen tutkimiseen on olemassa useampia menetelmiä. Näitä ovat muun muassa nital etch (NE, suomeksi nitaletsaus), Barkhausen Noise Analysis (BNA, suomeksi Barkhausen kohina), Eddy Current (EC, suomeksi pyörrevirta) ja X-ray diffraction (XRD, suomeksi röntgendiffraktio). Etsauksen ja EC:n avulla

pystytään tutkimaan ainoastaan mikrorakennetta. BNA ja XRD sen sijaan mahdollistavat laajemman, myös jännitykset huomioivan tutkimisen. Menetelmien muita ominaisuuksia esitellään taulukossa 2.

Taulukko 2. Hiontapalamisen tutkimiseen käytettyjen menetelmien vertailu.

Ominaisuus	NE	BNA	EC	XRD
Ainetta rikkomaton	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Standardoitu	KYLLÄ	EI	KYLLÄ	KYLLÄ
Kemikaalien käyttö	KYLLÄ	EI	EI	EI
Automatisoitu	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Objektiivinen	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Kvantitatiivinen	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Luotettava	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ
Tutkiminen pinnoitteiden läpi	EI	KYLLÄ	EI	KYLLÄ
Altis vetyhaurastumiselle	KYLLÄ	EI	EI	EI
Tutkii jännityksiä ja mikrorakennetta	EI	KYLLÄ	EI	KYLLÄ
Nopea	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	EI
Voidaan tutkia helposti isoja alueita	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ	EI

Taulukon tiedot on koostettu kolmen lähteen (Wojtas ym., 1998; MacKenzie, 2017; Deveci, 2020) pohjalta. Kaikki mainitut menetelmät paitsi Barkhausen kohina ovat standardoituja. Kaikki menetelmät ovat myös laajassa käytössä. Isoin eroavaisuus etsauksen kohdalla on sen kemikaalien käyttö.

Devecin mukaan (Deveci, 2020) BNA on ainoa automatisoitu menetelmä. Mackenzie ja Wojtas puolestaan väittävät artikkeleissaan (Wojtas ym., 1998; MacKenzie, 2017), että etsaus on ainoa menetelmä, jota ei ole automatisoitu. Voidaan siis päätellä, että etsauslaitteita ei maailmalla ole, tai niistä ei ole kirjoitettu julkaisuihin.

Nitaletsaus on menetelmistä perinteisin, mutta sen asema yleisimpänä testausmenetelmänä on heikentymässä. Yrityshaastatteluista selvisi, että moni yritys luottaa hionnan laadunvarmistuksessaan ensisijaisesti Barkhausen kohinan käyttämiseen. Vihreät arvot ja luontokysymykset saavat lisää jalansijaa myös valmistusteollisuudessa, mikä heikentää etsauksen markkina-asemaa (He ym., 2019, s. 431). Etsauslaitteisto on manuaalisenä ja automaattisena koneena halpa, mutta ympäristöön liittyvät säädökset nostavat sen kokonaiskustannuksia (Wojtas ym., 1998).

3.2 Karkaisuetsaaminen

Karkaisuetsaamisen tavoitteena on havaita hiontapalamiselle altistuneet alueet esimerkiksi hammaspyörissä. Hammaspyörän lokaalit lämpötilamuutokset heikentävät pinnan tasalaatuisuutta ja näin kappaleen ominaisuuksia. Karkaisuetsaamisella pystytään havaitsemaan nimenomaan kappaleen pinnan kovuuden muutoksia. Etsauksen tuloksen perusteella voidaan arvioida kappaleen hionnan onnistumista. Taulukossa 3 esitellään kappaleen ominaisuuksien ja etsauksen tuloksen korrelaatiota (Deveci, 2020).

Taulukko 3. Etsaustulosten arviointi.

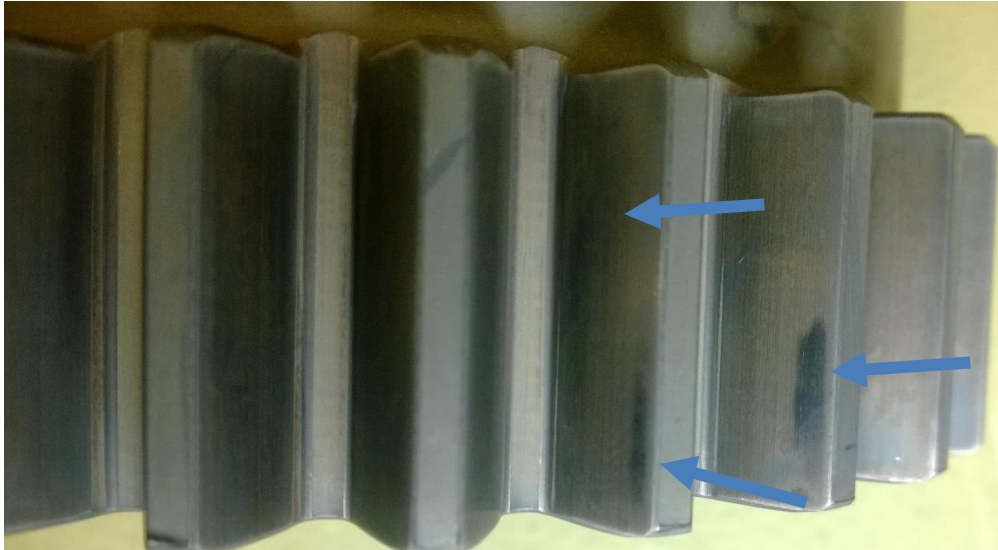
Kappaleen pintakerroksen lämpötila hionnassa	Kovuus	Jännitys	Etsauksen tulos nitalilla
100 °C – 150 °C	Normaali	Veto	Ei tulosta
150 °C – 350 °C	Laskee	Veto	Harmaa
350 °C – austenisoinnin lämpötila	Laskee	Veto	Tumma
Austenisoinnin lämpötilan yli	Kasvaa	Puristus	Valkoinen

Kappaleen lämpeneminen yli 150 °C:n lämpötilan laskee kappaleen kovuutta lokaalisti näissä osissa pintapäästymisen takia. Kappaleen virheellisestä hionnasta johtuva lämpö voidaan tämän vuoksi havaita etsauksen avulla. Kuvassa 8 esitetään lievästi palaneen hammaspyörän etsauksen tulos.



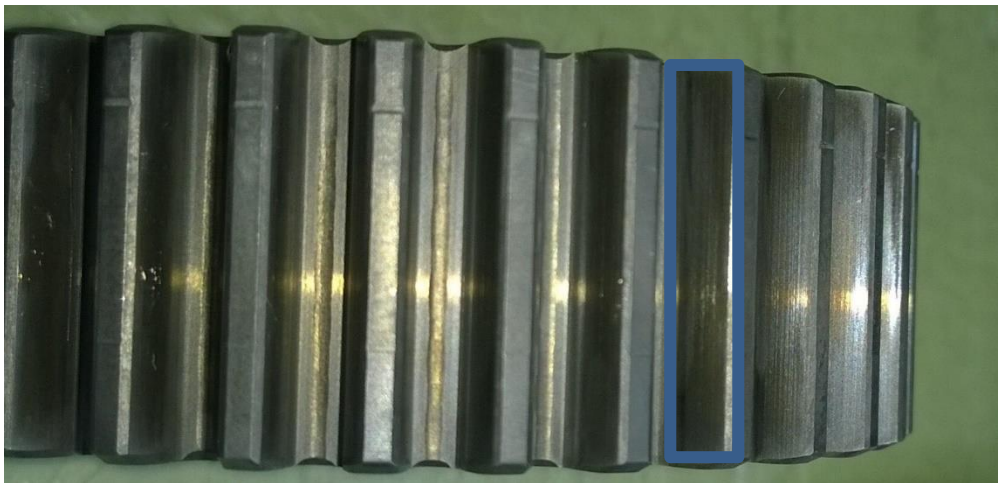
Kuva 8. Lievästi palanut hammaspyörä.

Kuvan 8 hammaspyörä on lievästi palanut. Palamien on havaittavissa ohuista tummista raidoista. Kyseinen hammaspyörä olisi saattanut mennä läpi tarkastuksesta, sillä hammaspyörän lievä palaminen voi olla vaikea havaita. Kuvassa 9 esitellään selvempi tapaus palaneesta hammaspyörästä.



Kuva 9. Selvästi palanut hammaspyörä.

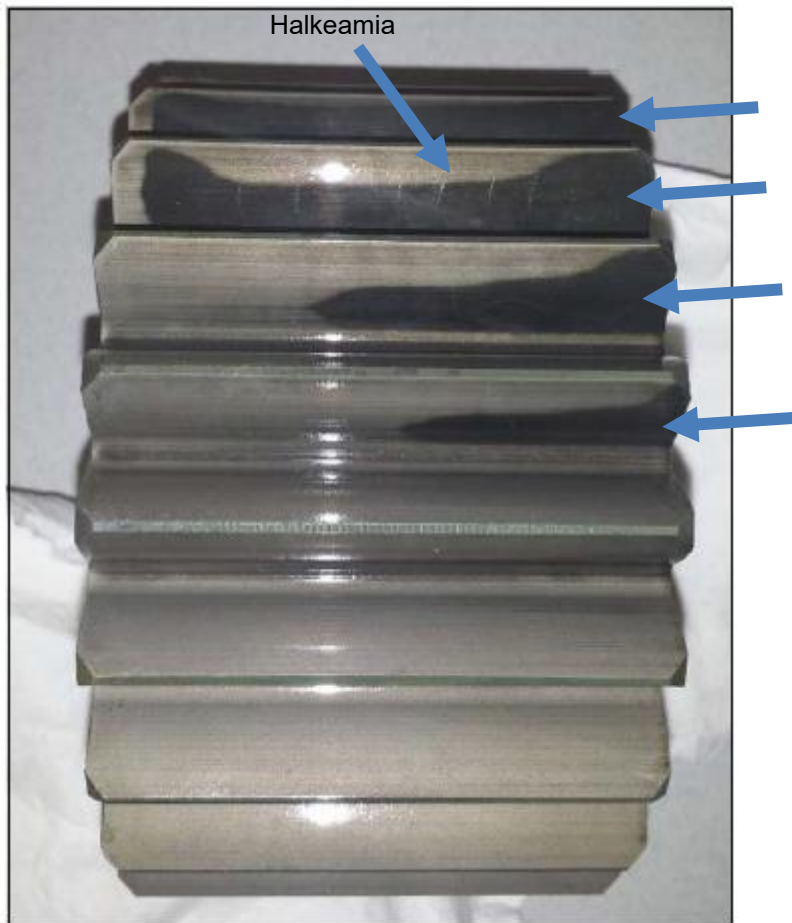
Kuvassa 9 olevan hammaspyörän palaminen on jo huomattavasti helpompi todeta. Hammaspyörän etsaaminen on aiheuttanut kappaleen pintaan mustia laikkuja.



Kuva 10. Selvästi palanut hammaspyörä.

Kuvan 10 hammaspyörä on myös selvästi palanut. Tässä tapauksessa hammaspyörä on palanut huomattavasti laajemmin ja tasaisemmin kuin kuvan 9 hammaspyörä. Hammaspyörän hampaat ovat lähes kauttaaltaan tummentuneet.

Kuvassa 11 on esimerkki etsatusta, selvästi palaneesta hammaspyörästä.



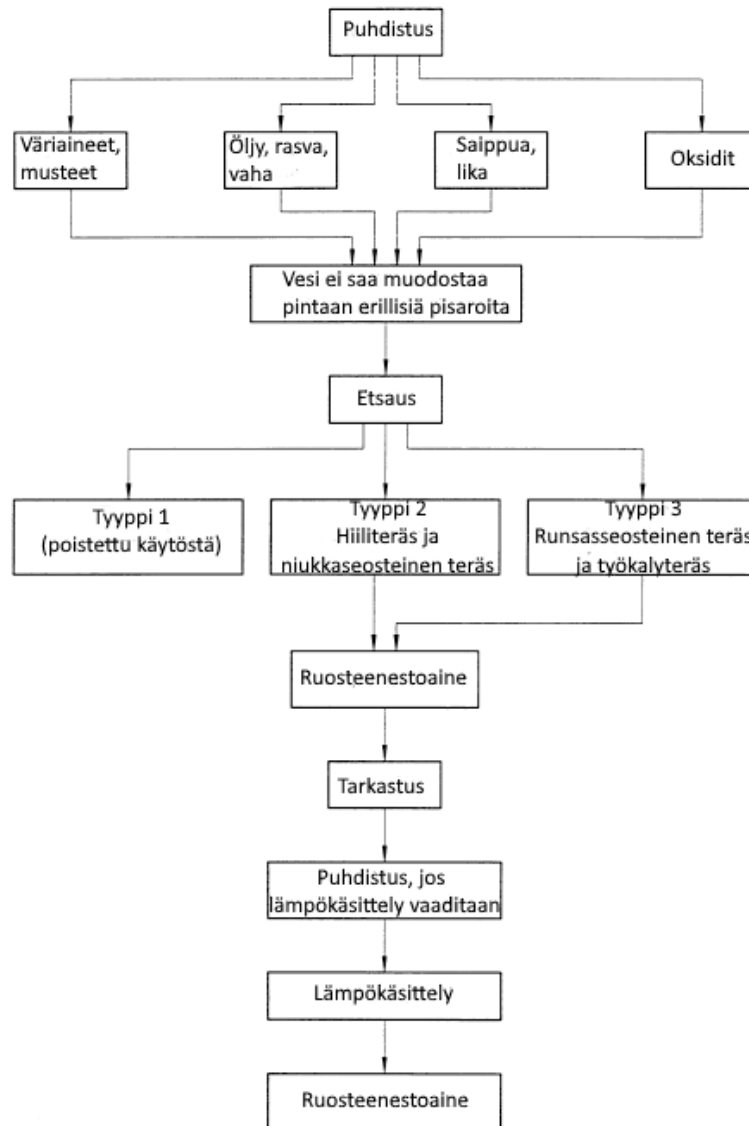
Kuva 11. Palanut ja etsattu hammaspyörä (Crow ja Pershing, 2017).

Hionnassa palaneet kohdat nähdään tummina läiskinä. Kuvan 11 hammaspyörän palaaneet, tummat kohdat on merkitty sinisin nuolin. Uudelleenkarkaistuilla alueilla ilmenee usein myös halkeamia. (Rakhit, 2000) Kuvan 11 hammaspyörässä nähdään myös visuaalisia halkeamia.

3.2.1 Kansainvälinen ISO-standardi

Etsaus on aineenkoetusmenetelmänä standardoitu monin tahoin. Ensimmäisen etsausstandardin on luonut amerikkalaisten vaihdevalmistajien yhdistys AGMA (engl. American Gear Manufacturers Association) vuonna 1967. Standardi kantoi tuolloin nimeä "temper etch procedure" (suomeksi karkaisuetsausmenetelmä). Vuonna 1989 standardin nimi tarkentui muotoon "Surface temper etch inspection after grinding" (suomeksi pinnan karkaisuetsauksen tarkastus hionnan jälkeen). Tämän standardin pohjalta luotiin myös kansainvälinen standardi ISO 14104 vuonna 1995, ja se hyväksyttiin myös Suomessa kansalliseksi standardiksi.

ISO-standardissa (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b) on määritelty etsauksessa käytettävät kemikaalit. Standardi käsittelee myös etsauksen valvonnan ja prosessin tuloksen tarkastamisen vaatimuksia. Karkaisuetsauksen toimenpidekaavio esitellään kuvassa 12.



Kuva 12. ISO-standardin mukainen etsauskaavio. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 2)

Kappale on puhdistettava ennen etsausta. ISO-standardi (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b) suosittelee emäksisten puhdistusaineiden, höyryrasvanpoistajien tai liuottimien käyttöä. Oikea puhdistusaine riippuu epäpuhtauksien tyypistä. Kappale on puhdistettava mahdollisimman hyvin, sillä likainen kappale heikentää ja vääristää etsauksen tulosta. Kappaleen epäpuhtaudet muuttavat myös etsausnesteiden ominaisuuksia ja lyhentävät niiden käyttöikää. ISO-standardi (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b) suosittelee seuraavanlaisia toimenpiteitä kappaleen pinnan puhdistamiseksi:

1. Höyryrasvanpoisto tai liuottimien käyttäminen (öljyt, rasvat väriaineet)
2. Puhdistaminen hankaamalla esim. puhaltamalla sopivalla materiaalilla
3. Puhdistaminen emäksillä tai ultraäänellä (saippuat ja muu lika)

Etsattavan kappaleen puhtaus voidaan testata huuhtelemalla se vedellä ja tarkastelemalla kappaleen pintaa tämän jälkeen. Vesi ei saa muodostaa erillisiä lammikoita (engl. "water breaks") kappaleen pintaan (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 2). Edellä mainittu proseduuri on toistettava tarvittaessa kappaleen pinnan puhtauden takaamiseksi.

Etsauksen työvaiheet on jaoteltu kappaleen materiaalin mukaan kolmeen tyyppiin, joista yksi on jo poistettu käytöstä. Tyypin 2 etsaus on tarkoitettu hiiliteräksille ja niukkaseosteisille teräksille. Tyypin 2 etsauksen toimenpiteet esitellään taulukossa 4.

Taulukko 4. ISO-standardin mukainen tyypin 2 etsaus. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 3)

Vaihe	Prosessi	Liuos	Suosittelut aika	Huomiot
1	Etsaus tyypihapolla	Tyypihappo 3–5 til-% Alkoholissa:..... Vedessä:.....	30 s – 60 s 10 s – 30 s	Tarkka aika mustan oksidikalvon kehittymiselle vaihtelee. Oikea aika tulee määrittää kokeellisesti.
2	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Hapon poistamiseksi
3	Kastaminen	Alkoholi	Kasta ja kuivaa	Veden poistamiseksi
4	Valkaiseminen	Suolahappo 4–6 til-% Alkoholissa:..... Vedessä:.....	30 s – 60 s 30 s – 60 s	Kappale tulee upottaa tarpeeksi pitkäksi ajaksi, jotta kappaleen pinta saa ruskeanharmaan värin. Oikea aika tulee määrittää kokeellisesti
5	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Hapon poistamiseksi
6	Neutralisointi	Emäksinen liuos pH>10	10 s – 60 s	Kappaletta pitää liikutella sen ollessa upotettuna
7	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Emäksisten liuottimien poistamiseksi
8	Kastaminen	Alkoholi	Kasta ja kuivaa	Veden poistamiseksi
9	Öljy	Ruosteenestävä	Kasta	Korroosion estämiseksi. Auttaa myös kontrastin luomisessa

Tyypin 3 etsaus on tarkoitettu runsasseosteisille teräksille sekä työkaluteräksille. Etsauksessa käytettävät aineet pysyvät samoina, mutta toimenpiteiden järjestys ja suositusajat vaihtuvat. Tyypin 3 etsauksen toimenpiteet esitellään taulukossa 5.

Taulukko 5. ISO-standardin mukainen tyypin 3 etsaus. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 4)

Vaihe	Prosessi	Liuos	Suositteltu aika	Huomiot
1	Pesu suolahapolla	Suolahappo 4–6 til-% Alkoholissa:..... Vedessä:.....	1,5 min – 3,5 min 30 s – 60 s	Oikea aika tulee määrittää kokeellisesti.
2	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Hapon poistamiseksi
3	Kastaminen	Alkoholi	Kasta ja kuivaa	Veden poistamiseksi
4	Etsaus typpihapolla	Typpihappo 3–5 til-% Alkoholissa:..... Vedessä:.....	1,5 min – 3,5 min 30 s – 60 s	Tarkka aika mustan oksidikalvon kehittymiselle vaihtelee. Oikea aika tulee määrittää kokeellisesti.
5	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Hapon poistamiseksi
6	Kastaminen	Alkoholi	Kasta ja kuivaa	Veden poistamiseksi
7	Valkaiseminen	Suolahappo 4–6 til-% Alkoholissa:..... Vedessä:.....	1,5 min – 3,5 min 30 s – 60 s	Kappale tulee upottaa tarpeeksi pitkäksi ajaksi, jotta kappaleen pinta saa ruskeanharmaan värin. Oikea aika tulee määrittää kokeellisesti
8	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Hapon poistamiseksi
9	Neutralisointi	Emäksinen liuos pH>10	10 s – 60 s	Kappaletta pitää liikutella sen ollessa upotettuna
10	Huuhtelu	Vesi	Tarvittaessa	Emäksisten liuottimien poistamiseksi
11	Kastaminen	Alkoholi	Kasta ja kuivaa	Veden poistamiseksi
12	Öljy	Ruosteenestävä	Kasta	Korroosion estämiseksi. Auttaa myös kontrastin luomisessa

Useimmat hammaspyörät asettuvat materiaalinsa puolesta tyyppiin 2 (Davis, 2005, s. 155). Tämä on siis todennäköisesti käytetyin toimenpidekaavio ainakin hammaspyörävalmistajien keskuudessa. Myös etsauksen kohteena olevien laakereiden materiaalikirjo on erittäin laaja (Burrier, 2001). Tämän takia laakerivalmistajat saattavat käyttää etsauksessaan molempia toimenpidekaavioita.

Ottaen huomioon vedellä huuhtelut sekä kastamiset alkoholiin, tyypin 2 etsaus vie taulukon 4 mukaan aikaa arviolta 5–10 min. Tähän vaikuttaa olennaisesti etsausjärjestelmän joustavuus. Tyypin 3 etsaus on huomattavasti tyyppiä 2 pidempi menettelytapa. Happojen käyttöön perustuvien yksittäisten prosessien vaatima aika on taulukon 5 perusteella jopa seitsenkertainen. Suolahappoa käytetään tässä tyypissä sekä pesemiseen, että myöhemmin valkaisemiseen. Etsaus tyypin 3 mukaisesti vie aikaa arviolta 15–25 minuuttia etsausjärjestelmän joustavuuden mukaan. Varsinaisen etsauksen viemä aika on kuitenkin vain osa koko prosessista. Ennen etsausta kappale on täytynyt puhdistaa ja etsauksen jälkeen on vuorossa jälkitoimenpiteet.

3.2.2 Muut karkaisuetsausstandardit

ISO-standardi ei ole suinkaan ainoa laajalti käytössä oleva hiontapalamisen tutkimisen tarkoitettu etsausstandardi. Yhdysvallan puolustusvoimien MIL-etsausstandardi (Department of Defence, 2008) antaa ohjeistuksen ilmavoimien ilma-alusten osien ja varaosien etsaamiseksi. Tämä standardi on ISO-standardin kanssa hyvin samanlainen, mutta monilta osin huomattavasti yksityiskohtaisempi. MIL-standardi sisältää kaksi vaihtoehtoista menetelmää etsauksen käytännön toteutuksen näkökulmasta. Tämä standardi käsittelee ISO-standardin tavoin upottamalla toteutettavaa etsausta, mutta myös pyyhkäisytekniikalla toteutettua. Pyyhkäisyllä toteutettavaan etsaukseen (engl. Swab Etch Technique) ei tässä työssä perehdytä, sillä Robotechin kehittämisen alla olevan etsauslaitteiston toimintaperiaate ei ole sen mukainen.

MIL-standardin toimenpidemallit on myös jaettu materiaalin tyyppin mukaan niukkaseosteisiin teräksiin sekä työkaluteräksiin. Niukkaseosteisten teräksien etsausmenetelmä on lähes identtinen ISO-standardin kanssa ja työkaluteräksienkin etsaus toteutetaan vain hieman eri tavalla. Käytettävät nesteet ja niiden pitoisuudet ovat samoja, mutta etsattavat materiaalit on MIL-standardissa listattu. Näiden standardien suurin eroavaisuus löytyy etsausjärjestelmän lisälaitteista. MIL-standardin mukaan sekuntikello on oltava näkyvillä etsauksen aikana, tosin ISO-standardi suosittelee myös epäsuorasti sen käyttöä. Suurin eroavaisuus on kuitenkin vesialtaiden vaatimuksissa. MIL-standardi vaatii vesialtailta jatkuvan ylivirtauksen tai pinnankuorintalaitteiston.

Laajalti käytössä olevien standardien lisäksi monet yritykset ovat luoneet omat etsausstandardinsa. ISO-standardi ja MIL-standardi ovat yleispäteviä standardeja, jotka rohkaisevat niiden käyttäjiä laatimaan täsmällisemmät toimenpiteet omien kokeidensa pohjalta.

3.2.3 Karkaisuetsauslaitteistot

Suuri osa yritysten toteuttamasta etsauksesta perustuu kiinteisiin altaisiin, joissa etsaus tapahtuu manuaalisesti esimerkiksi kattonosturia käyttämällä. Kuvassa 13 nähdään tyyppillinen manuaalinen etsauslaitteisto.



Kuva 13. Manuaalinen etsauslaitteisto (Crow ja Pershing, 2017).

Manuaalisella etsauksella on hyvät puolensa. Kiinteillä altailla pystytään etsaamaan iso-jakin kappaleita, sillä altaiden kokoa rajoittaa ainoastaan käytössä oleva tila. Pienet etsausastiat on varsin helppo hankkia ja käyttää. Manuaalisella etsauksella on kuitenkin monia ongelmakohtia. Etsauksen tulokseen vaikuttaa merkittävästi sen toteuttaja. Vaikka toimenpide olisikin tarkasti määritelty, voi tuloksissa olla merkittäviä eroja johtuen esimerkiksi prosessiaikojen ja puhdistustoimenpiteiden vaihteluista eri työntekijöiden välillä. Manuaalisessa etsauksessa työntekijä altistuu myös vaarallisille aineille. Nämä tekijät ovat saaneet miettimään muita ratkaisuja hionnan laadunvarmistukseen. Vaikka automaattisia karkaisuetsauslaitteita olisikin olemassa, niitä ei ilmeisesti ole tuotteistettu. Robotech on toimittanut kaksi yksilöityä automaattista etsauslaitteistoa.

3.2.4 Karkaisuetsauksen heikkoudet

Kemikaalien käyttö on turvallisuusriski, mutta se tuo mukanaan myös muita ongelmia. Happojen käyttö voi altistaa kappaleen vetyhaurastumiselle ja tekee menetelmästä ainetta rikkovan. Tämän vuoksi koe on toistettavissa vain kappaleen valmistustoleranssien puitteissa. Ainetta rikkoutuu tai poistuu kuitenkin melko vähän. Yhdellä etsauskerralla kappaleen jokaisesta pinnasta liukenee n. 0,003 mm:n paksuinen kerros (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b, s. 3–4). Tällä etsauksen ominaisuudella on myös käyttöä muussa tarkoituksessa.

Etsausta ei pidetä luotettavana eikä nopeanakaan menetelmänä (Wojtas ym., 1998; MacKenzie, 2017). Tämä ajatus voi perustua automaattisten etsauslaitteiden harvinaisuuteen. Etsaus näyttää olevan muita menetelmiä huonommassa maineessa. Tätä mainetta olisi järkevä yrittää parantaa ja löytää ratkaisuja etsauksen ongelmakohtiin.

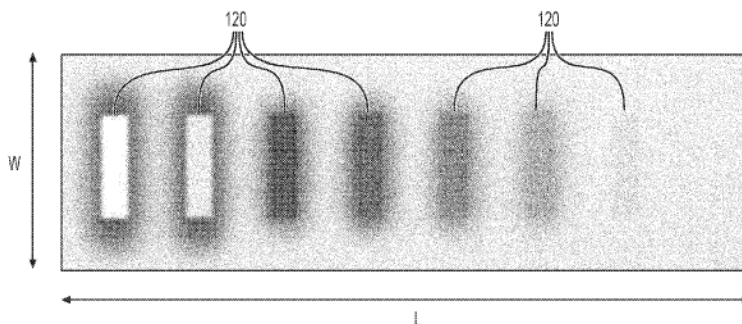
Useiden lähteiden (MacKenzie, 2017; He ym., 2019; Deveci, 2020) vertaillen hionnan laadunvarmistusmenetelmiä, nousee esille yksi karkaisuetsauksen heikkouksista: vetyhaurastuminen. Vety on yksi tärkeimmistä teräksen kaasumaisista epäpuhtauksista. Vety aiheuttaa teräkseen liuetessaan teräksen haurastumista. Vetyhaurastumisen aiheuttaa vedyn diffundoituminen teräkseen. Metallin sulkee sisäänsä vetykertymiä, jotka muodostavat vetyrakkuloita korkeassa kaasunpaineessa. Jos ilmiö tapahtuu metallin pinnan läheisyydessä, rakkulat voidaan nähdä myös paljain silmin. Teräksen seostus vaikuttaa vedyn liukoisuuteen. Vedyn liukoisuutta voidaan pienentää käyttämällä nikkeä, mangaania ja kobolttia seosaineina. Pii, alumiini, kromi ja hiili lisäävät vetyn liukenevista. (Kivivuori, 2019, s. 76, 169)

Esimerkiksi hitsaus ja eräät pintakäsittelyt mukaan lukien etsaaminen edesauttavat vedyn teräkseen joutumista. Teräksen lujuuden kasvaessa myös pintakäsittelyssä syntyvä vetyhauraus lisääntyy. Metallin pinnassa esiintyvä diffundoitunut vety voidaan poistaa hehkuttamalla. 900 Mpa:n murtolujuutta pidetään riskirajana vetyhaurastumiselle. (Kivivuori, 2019, s. 76) Eri standardeissa on määritelty kovuuksia, jonka ylittyessä vaaditaan vedynpoistoehkutusta. Kansainvälisessä standardissa (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b) ja Yhdysvaltain asevoimien standardissa (Department of Defence, 2008) suositellaan etsatuille kappaleille vedynpoistoehkutusta.

3.2.5 Karkaisuetsaamista koskevat patentit

Vaikka karkaisuetsaaminen onkin hyvin vanha menetelmä, ei sitä ole juuri patentoitu. Karkaisuetsaukseen liittyy tällä hetkellä hyvin vähän patenteja, ja niistä suurin osa pätee Yhdysvalloissa. Bell Helicopter Textronin patentti (Hohman ja Nissen, 2015) on päivätty vuodelle 2015 ja se käsittelee etsauksen jälkeistä automaattista tarkastusmenetelmää. Tässä patentissa etsattu hammaspyörä kuvataan eri suunnista automaattisesti. Tietokone huomaa kuvista hammaspyörien virheet algoritmien perusteella.

Toinen karkaisuetsaamisen patentti liittyy testikappaleiden käyttämiseen.



Kuva 14. Hammashiontapalamisen etsauksen referenssikappaleiden patentointi (Crow ja Jacobson, 2017).

Kuvan 14 testikappaleeseen poltetaan laserilla suorakaiteenmuotoisia kuviota eri lämpötiloilla. Eri lämpötiloilla syntyviä sävyjä pystytään vertaamaan hammashiotun kappaleen etsaustuloksen väreihin. Testikappaleilla pystytään myös valvomaan etsausnesteiden kuntoa. Testikappaleen koko värispektri tulee esiin, mikäli etsausnesteet ovat toimintakuntoisia. Testikappaleiden keksijät, Crow ja Pershing, kertovat testikappaleiden käytöstä lisää omassa artikkelissaan (Crow ja Pershing, 2017). Tässä artikkelissa testikappale on pyöreän muotoinen ja eri polttojäljet on jaettu säteensuuntaisesti. Testikappaleeseen luodaan vähintään kolme eritasoista palamisjälkeä. Zösch et. al. ovat kirjoittaneet testikappaleiden hyödyistä käytännössä (Zösch ym., 2018). Kyseisessä artikkelissa on testattu saman etsausastian sisältö kahdesti testikappaleiden avulla. Etsausnesteiden kunto on toisella testauskerralla selvästi heikompi, sillä testikappaleen spektri näkyy vain osittain.

4. ETSAUS VALMISTUSTEKNIKKANA

On tilanteita, joissa ei pärjätä perinteisillä lastuavilla työstömenetelmillä. Syy voi olla taloudellinen tai kappaleen valmistus on yksinkertaisesti perinteisesti mahdotonta seuraavien syitten takia (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 835):

- Työkappale on todella lujaa tai kovaa materiaalia
- Materiaali on liian haurasta mekaanisesti työstettäväksi
- Työkappale on liian taipuisa muokattavaksi tai kiinnitettäväksi
- Kappale on rakenteeltaan monimutkainen
- Kappaleelta vaaditaan korkeaa pinnanlaatua tai valmistustoleranssia, joiden toteuttaminen voi olla epätaloudellista.

Hionnan laadunvarmistus on ollut Robotechin etsauslaitteistojen käyttötarkoitus, mutta hyvin vastaavalle konstruktiolle on ilmennyt muitakin mahdollisia käyttökohteita. Yksi mahdollinen sovellus on kemiallinen työstäminen tai kemiallinen etsaus (engl. Chemical machining, myös chemical milling tai chemical etching). Kemiallinen työstäminen on säädelyihin etsausainekylpyihin perustuva valmistusmenetelmä (Veco, 2019). Menetelmällä pystytään poistamaan materiaalia valituista kohdista tai kappaleen kaikilta pinoilta. Näin pystytään saavuttamaan kappaleelle millainen muoto tahansa. Kemiallinen työstäminen voidaan suorittaa immersiollla eli upottamalla työstettävä kappale reagenssiin. Työstäminen voidaan toteuttaa myös suihkuttamalla kappaleen pintaan reagenssia. Suihkutettava reagenssi voi olla joko nesteenä tai kaasumaisessa olomuodossa.

Immersiolla suoritettavaan kemialliseen työstämiseen tarvittava järjestelmä esitellään kuvassa 15.

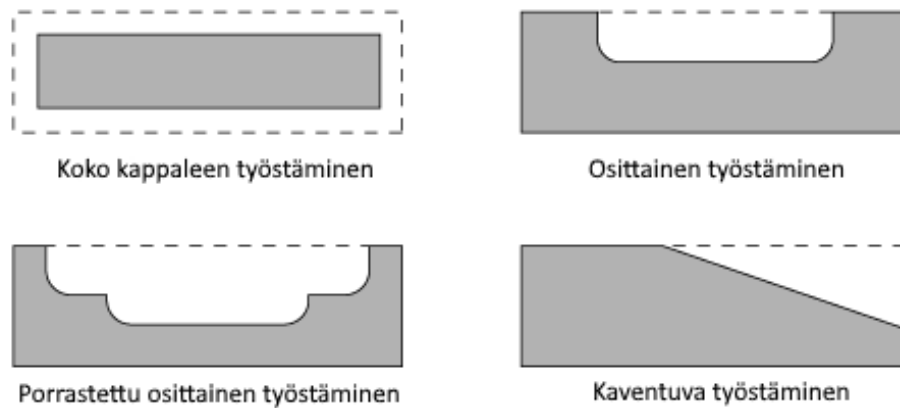


Kuva 15. Kemiallisen työstämisen laitteisto (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 838).

Laitteiston tärkeimmät osat ovat ripustin, sekoitin ja lämmitin. Etsausaineet (reagenssit) ja maskausaineet ovat puolestaan kemiallisen työstämisen perusedellytyksiä (Kumar,

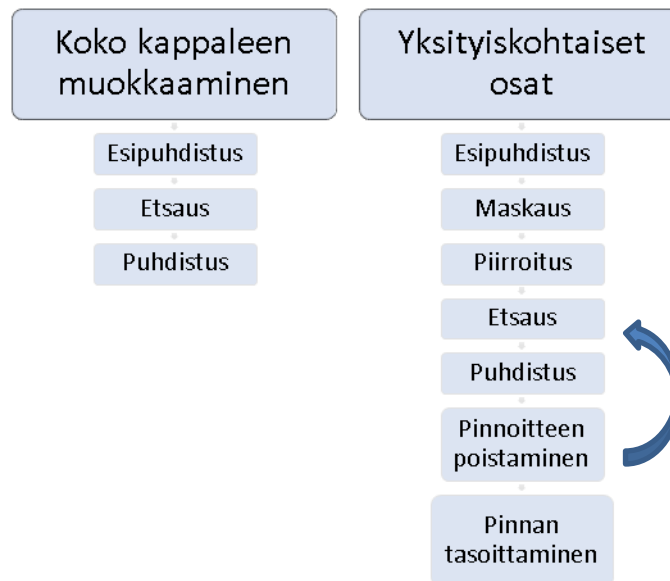
Divya ja Zindani, 2018, s. 90). Etsattava työkappale asetetaan lämmitettyyn ja sekoitettavaan etsausaineeseen, kuten happoon tai emäkseen. Kemiallisessa työstössä on huomioitavaa, että menetelmä ei vaadi voimaa eikä erillisiä työkaluja (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 836).

Kemiallinen työstäminen voidaan suorittaa useammalla eri tavalla halutun lopputuloksen mukaan. Työstötapoja esitellään kuvassa 16.



Kuva 16. Kemialliset työstötavat (Misumi, 2010).

Kappale voidaan työstää joko kokonaan tai osittain halutuilta pinoilta. Osittainen työstäminen voidaan toteuttaa käyttämällä maskausaineita tai kastamalla kappale vain osittain (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 836). Prosessi voidaan jakaa halutun lopputuloksen mukaan kahdeksi vuokaavioksi kuvan 17 mukaisesti (Langworthy, 1989, s. 579):



Kuva 17. Kemiallisen työstämisen toimenpiteet.

Koko kappaleen muokkaaminen on käytännössä karkaisuetsaamisen kaltainen prosessi. Jos kuitenkin halutaan etsata kappale yksityiskohtaisesti, koko prosessi on huomattavasti työläämpi. Molemmissa tapauksissa, kuten karkaisuetsaamisessakin pintojen puhdistaminen ennen etsaamista on ensiarvoisen tärkeitä. Yksityiskohtainen kemiallinen työstäminen koostuu pääpiirteittäin viidestä vaiheesta (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 90):

- **Esikäsitelyssä** kappale valmistellaan ja ennen kaikkea puhdistetaan prosessia varten.
- **Maskauksella** suojellaan kappaleen kohtia, joita ei haluta työstää. Tässä käytettävän maskausaineen tulisi olla helposti revittävässä, kemiallisesti reagoimatonta ja tarpeeksi tarttuvaa kestääkseen etsauksen kemiallisen hankauksen.
- **Piirroitusvaiheessa** poistetaan maskausaine kohdista, joita halutaan työstää. Tässä siis luodaan etsattavat muodot.
- **Etsausvaiheessa** kappale etsataan ja maskatut kohdat pysyvät ehjinä.
- **Jälkikäsitelyssä** kappale tulee huuhdella huolellisesti, jotta kemiallinen reaktio saadaan pysäytettyä. Maskausaine revitään pois, kappale tarkastetaan ja tasoitellaan tarvittaessa.

Piirroitus voidaan suorittaa etsauksen jälkeen tarvittaessa uudelleen. Tällöin voidaan saavuttaa monitasoinen etsaustulos. (Langworthy, 1989, s. 90) Tämä on nähtävissä myös kuvasta 15, jossa kappaleen on maskausta on poistettu kolmeen kertaan eri kohdista.

4.1 Käytettävät kemikaalit ja niiden ominaisuudet

Käytettävät etsausaineet ovat väkeviä happo- tai emäsluoksia. Hyvä etsausaine täyttää seuraavat vaatimukset (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 550):

- Saavutetaan hyvä pinnanlaatu
- Materiaali etsautuu tasaisesti
- Halpaa ja helposti saatavilla
- Neutralisoituu helposti
- Ei ole myrkyllinen
- Soveltuu mahdollisimman monelle materiaalille

Taulukossa 6 esitellään työstämisessä käytettäviä etsausaineita, niiden konsentraatioita, käyttölämpötiloja, etsausnopeuksia ja kohdemateriaaleja.

Taulukko 6. *Kemiallisen työstämisen etsausaineita ja niiden ominaisuuksia* (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 550).

Metalli	Etsausaine	Konsentraatio	Lämpötila (°C)	Etsausnopeus (µm/min)	Etsauskerroin
Alumiini	$FeCl_3$	12°–18° Be ^a	47	20	1,5:1
	$HCl:HNO_3:H_2O$	10:1:9	47	20–40	2:1
Kylmävalssattu teräs	$FeCl_3$	42° Be ^a	47	20	2:1
	HNO_3	10–15 til-%	47	40	1,5:1
Ruostumaton teräs	$FeCl_3$	42° Be ^a	52	20	2:1
Kupari	$FeCl_3$	42° Be ^a	47	40	2,5:1
	$CuCl_2$	35° Be ^a	52	10	3:1
Magnesium	HNO_3	12–15 til-%	27–47	20–40	–
Nikkeli	$FeCl_3$	42° Be ^a	47	10–20	(1–3):1
Sinkki	HNO_3	10–15 til-%	47–52	20	–

Taulukosta huomataan, että rauta(III)kloridi eli ferrikloridi on yleisesti käytetty etsausaine ja yleinen käyttölämpötila on 50 °C:n molemmiin puolin. Natriumhydroksidia on myös ehdotettu yhdeksi alumiinin etsausaineeksi (Campbell, 2006, s. 76). Typpihappo on taulukon mukaan myös sopiva etsausaine monelle materiaalille. Rautakloridin ja kuparikloridin konsentraatio on taulukossa määritelty Baumén ominaispainon asteikolla. Baumén ominaispainon mittaamiseen on saatavilla muun muassa erilaisia käsimittareita.

Kun työstämisessä käytetään maskausaineita, on otettava huomioon myös etsauskerroin. Etsauskerroin on määritelty (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 550):

$$EF = \frac{d_u}{T_e}, \quad (13)$$

jossa EF = etsauskerroin, d_u = allesyöpymä ja T_e = etsauksen syvyys.

Kemiallinen työstäminen tapahtuu kohtisuorasti kappaleen pintaa vastaan, mutta myös sivusuunnassa maskausaineen alla (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 549).

4.2 Kemiallisen työstäminen vahvuudet ja heikkoudet

Kemiallisella työstöllä on monia vahvuuksia. Materiaalin poistaminen ei aiheuta kappaleeseen jännityksiä eikä teräviä reunoja, joten kappaleen väsymislujuus ei muutu. Tämä on tärkeää etenkin lentokoneiteollisuudessa, sillä lentokoneiden ohuet ja kevyet pinnat altistuvat monille jännityssykleille. Kemiallinen työstäminen ei myöskään vaikuta kohdekappaleen magneettisiin ominaisuuksiin. Monimutkaisten muotojen työstäminen on helppoa ja myös kappaleen sisäpuolelta. Tämän takia kemiallisella työstöllä voidaan

saavuttaa erittäin ohuita ja monimutkaisia rakenteita. (Langworthy, 1989; Kumar, Divya ja Zindani, 2018; Veco, 2019)

Kemiallinen työstäminen on myös taloudellista. Materiaalin poistaminen voidaan suorittaa kaikilta halutuilta pinnoilta samanaikaisesti vähentäen työstövaiheiden lukumäärää. Myös useita kappaleita voidaan työstää samanaikaisesti. Menetelmä on myös joustava, sillä uusi haluttu muoto on sekä halpa testata että toteuttaa. Yrityksen logo on myös mahdollista etsata tuotteen pintaan jo valmistuksen aikana. (Langworthy, 1989; Kumar, Divya ja Zindani, 2018; Veco, 2019) Kemiallisella työstämisellä voidaan siis parantaa tuotannon tehokkuutta samalla lisäämällä sen joustavuutta.

Kuten karkaisuetsaamisellakin, kemiallisella työstämisellä on myös heikkouksia. Yksi yhteinen heikkous on tietenkin kemikaalien käyttö ja siitä johtuvat ympäristö- ja turvallisuustekijät. Yksityiskohtaisten kappaleiden vaatima maskaus, piirroitus ja maskin poistaminen vievät aikaa. Etsauksen jälkeinen pinnanlaatu riippuu myös kappaleen pinnanlaadusta ennen etsausta (Youssef, El-Hofy ja Ahmed, 2012, s. 551). Suurempi materiaalin poisto ja pitempi etsaus heikentävät pinnanlaatua (Campbell, 2006, s. 76). Kemiallisesti koneistetut kappaleet tulee usein myös hioa mekaanisesti kappaleen pinnanlaadun ollessa heikko ennen etsausta.

Kemiallisella työstämisellä on myös oleellisia rajoituksia. Ainoastaan matalien leikkauksien tekeminen on perusteltua, sillä materiaalin poistotahti on hyvin rajallinen. Yli 3 mm:n poistaminen aineen pinnalta on taloudellisempaa perinteisellä työstämisellä (Campbell, 2006, s. 76). Toisessa julkaisussa puolestaan määritettiin erikseen maksimaaliset leikkaussyvyudet pursotetuille kappaleille ja levyille erikseen. Ensimmäisen leikkaussyvyys voi olla maksimissaan 3,83 mm kun levyjen puolestaan jopa 12,27 mm (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 95). Etsattavien kappaleiden pyöristyssäde on suoraan verrannollinen etsattavan kappaleen tai poistettavan pinnan paksuuteen (Langworthy, 1989, s. 581). Tämä pätee myös kappaleeseen tehtävien reikien kokoon. Jos etsattavan pinnan paksuus on esimerkiksi 0,5 mm, voidaan siihen syövyttää 0,5 mm:n reikä ja tehdä 0,025 mm:n pyöristyksiä (Veco, 2019).

4.3 Materiaalin poistotahti

Materiaalin poistotahti tai syövytysnopeus (engl. material removal rate tai etching rate) riippuu etsattavan kappaleen ominaisuuksista, sekä etsausaineen konsentraatiosta ja lämpötilasta (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 90; Mahamood ja Akinlabi, 2018, s. 13). Reagenssin lämpötilan nostaminen kasvattaa syövytysnopeutta, mutta kasvattaa samalla myös pinnankarheutta (Mahamood ja Akinlabi, 2018, s. 13). Tyypillinen materiaalin

poistotahti asettuu 0,0025–0,1 mm/min välille (Kalpakjian ja Schmid, 2006). Jos kappaleen poistotahti ja poistettavan materiaalin paksuus ovat tiedossa, voidaan etsausaika laskea seuraavalla kaavalla (Mahamood ja Akinlabi, 2018, s. 13):

$$E = T_e/t, \quad (14)$$

jossa

E = syövytysnopeus (pintaa kohden), T_e = leikkauksen syvyys ja t = etsausaika.

Tästä saadaan johdettua kappaleen etsaamiseen tarvittava aika:

$$t = \frac{T_e}{E} \quad (15)$$

Kaavan avulla saadaan selville, että jos halutaan poistaa 52-asteisessa ferrikloridissa olevan ruostumattoman teräksen yhdeltä pinnalta 1 mm ainetta, tulee teräksen olla upoksisissa

$$t = \frac{1 \text{ mm}}{0,04 \text{ mm/min}} = 25 \text{ min} \quad (16)$$

Työstettävään kappaleeseen on mahdollista tehdä eri paksuisia kohtia käyttämällä maskausaineita. Kun maskausaineen poistaminen ja etsaus suoritetaan uudelleen ja uudelleen, saavutetaan portaittain kasvava tai kapeneva kappale. Kappaleeseen voidaan työstää kemiallisesti kiilamaisia muotoja myös maskausaineita käyttämättä. Kiilamainen muoto voidaan saavuttaa laskemalla kappale reagenssiin hallitulla nopeudella ja etsauksen päätyttyä nostamalla nopeasti se pois. Tämä voidaan suorittaa myös upottamalla kappale nopeasti ja vetämällä sitä hiljalleen pois reagenssista. Tällöin kappaleen eri osiot ovat eri ajan upotettuina ja kappale saa kiilamaisen muodon. (Kumar, Divya ja Zindani, 2018, s. 91) Kappaleen upotusnopeus (tai vetonopeus) voidaan laskea kaavalla:

$$v = \frac{NLE}{D}, \quad (17)$$

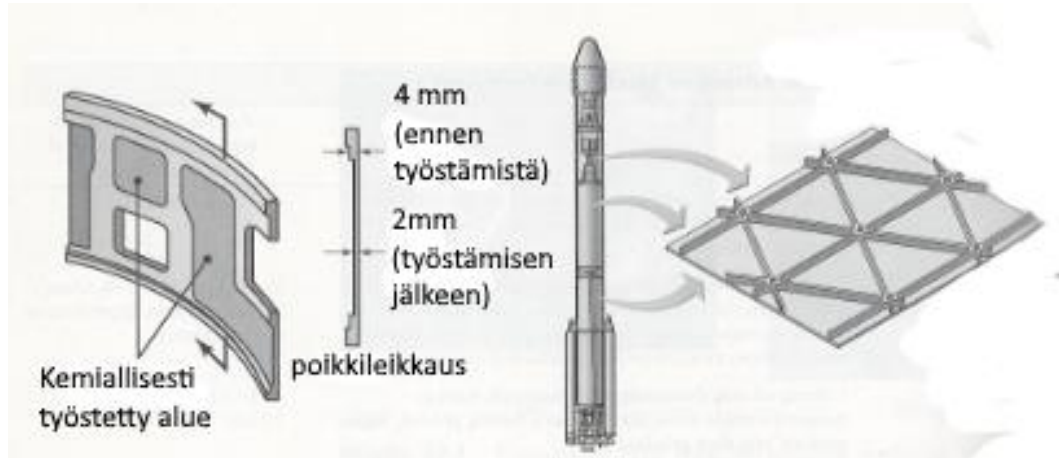
jossa v = upotusnopeus, N = etsaussuuntien määrä, E = etsausnopeus per pinta, D = viistettävän pinnan leikkaussyvyyksien erotus

Jotta kiilamainen muoto on mahdollista tehdä, tarvitaan vähintään työstettävän viisteen mitan korkuinen etsausastia.

4.4 Kemiallisen työstön käyttökohteet

Kemiallista työstämistä on sovellettu jo pitkään käyttökohteissa, joissa vaaditaan erinomaista valmistustarkkuutta. Kemiallista työstöä käytetään laajasti lentokoneolosuhteissa.

dessa, jossa vaaditaan äärimmäistä lujuuden ja painon suhdetta. Alumiiniset lentokoneen siipien ja rungon osat työstetään kemiallisesti, jolloin saavutetaan optimaaliset poikkipinta-alat ja mahdollisimman ohuet rakenteet. (Langworthy, 1989, s. 584) Kemiallista työstöä käytetään samoista syistä myös puolustusteollisuudessa ohjusten suoja-kuorien valmistukseen (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 838). Lentokoneiteollisuudessa ja puolustusteollisuudessa käytetään paljon osittaista etsausta ja maskausta.



Kuva 18. Kemiallisesti työstettyjä osia (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 838).

Kuvassa 18 on tyypillisiä puolustus- ja lentokoneiteollisuudessa kemiallisesti työstettyjä osia. Kuvassa vasemmalla esitellään kemiallisesti työstetty ohjuksen suojapaneeli. Kuvassa oikealla on puolestaan avaruusaluksen vastaavanlainen suojapaneeli. Molemmissa tapauksissa kappaleiden paksummat osat on maskattu ja kappaleet on tämän jälkeen etsattu. Etsausaine on reagoinut kappaleen maskaamattomien osien kanssa, jolloin on saavutettu haluttu muoto.

Kemiallisella työstöllä voidaan muokata helposti koko kappaletta. Yksi uusi käyttökohde koko kappaleen etsaukselle on 3D-tulostetut osat. Tästä esimerkkinä Itävaltalaisen Hirtenbergerin suunnittelema 3D-tulosteiden tukirakenteiden poistamiseen tarkoitettu Hirtisation-tekniikka. Tämän prosessin tarkoitusta havainnollistaa kuva 19.



Kuva 19. 3D-tulosteen tukirakenteiden poistaminen kemiallisesti (Hirtenberger, 2017).

Hirtenbergerin teknologian ideana on poistaa 3D-tulostetun metallikappaleen tukirakenteet niin kappaleen ulko- kuin sisäpuoleltakin. Tämä menetelmä on huomattavasti helpompi ja halvempi kuin mekaaniset työstömenetelmät. Kuvassa 19 oleva kappale on aikaisemmin vaatinut putkien sisäpuolista koneistusta ja ulkopinnan hiomista mekaanisesti.

Lääketeollisuus on yksi vaativimmista tieteenaloista valmistustarkkuuden ja laadun mittareilla (Veco, 2019). Titaania ja ruostumatonta terästä käytetään laajalti lääketieteessä niiden korroosionkeston ja puhdistettavuuden takia. Näistä materiaaleista tuotetaan kemiallisesti työstämällä monia osia. Näistä yksinkertaisimpia ovat esimerkiksi skalpellien terät, sahat ja neulat (Lehrer, 2009; Veco, 2019). Kemiallisesti voidaan työstää myös muodoltaan huomattavasti vaativampia osia. Tällaisia ovat puolestaan esimerkiksi ihmisen yläleuan ja kallon korjaukseen tarkoitettut titaaniverkot sekä silmäkirurgiassa käytettävät osat (Lehrer, 2009).

Mikroelektronisten laitteiden, kuten piirilevyjen ja prosessorien valmistuksessa käytetään myös kemiallista työstämistä. Tässä tapauksessa puhutaan usein märkäetsauksesta (engl. wet etching). Märkäetsausta käytetään yleisemmin puolijohteiden kuten piin eikä niinkään metallien etsaukseen. (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 839) Kyseinen prosessi on jo huomattavasti monitahoisempi käytettävien etsausaineiden ja maskauksen suhteen. Tämän takia märkäetsaukseen ei tässä työssä syvennytä tarkemmin.

4.5 Kemiallisen työstämisen laitteistot

Kemiallisella työstämisellä on useita käyttökohteita, joten siihen tarkoitettuja laitteistoja tai rakennelmia on myös monessa eri kokoluokassa. Suuret kemiallisesti työstettävät

osat vaativat myös suuret etsausaltaat. Etsausaltaat voivat olla jopa $3,7 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (55 m^2) kokoisia (Kalpakjian ja Schmid, 2006, s. 839). Käytännössä tällaisten altain käyttö perustuu erilaisten nosturien käyttämiseen, joko manuaalisesti, tai ainakin osittain automaattisesti.

Pienempien osien kemialliseen työstämiseen on olemassa monia erilaisia laitteistoja. Levymäisten kappaleiden työstämiseen on markkinoilla useita tuotteita. Lähimpänä Robotechin kehittämisen alla olevan laitteiston ulkomuotoa, ja siinä työstettävien kappaleiden dimensioita, on Hirtenbergerin kehittämä laitteisto. Se on tarkoitettu 3D-tulosteiden tukirakenteiden poistamiseen ja kappaleen viimeistelyyn. Tuotenimikkeenä laitteistolla onkin Finishing Module (suomeksi viimeistelymoduuli). Laitteiston toiminnan perustana on laitteiston sisällä oleva teollisuusrobotti (Hirtenberger, 2017). Laitteiston yksityiskohmainen toimintaperiaate ja etsausalain sisältö on kuitenkin tarkoin varjeltua tietoa. Kyseisestä laitteesta on saatavilla ainakin kolme eri kokoa.

4.6 Patentit

Valmistustekniikkana etsaus on patentoitu laajemmin kuin karkaisuetsaus. Suurin osa kemiallisen työstämisen patenteista liittyy lentoteollisuuteen tai puolijohteiden valmistamiseen. Esimerkiksi 3D-tulosteiden kemiallisen työstämisen patenteja ei vielä ole. Iso osa lentoteollisuuden patenteista on myös vanhentuneita tai vanhentumassa. Patenteille asetettu enimmäisaika on 20 vuotta, mutta vuosimaksuista johtuen monet patentit eivät ole voimassa kovinkaan pitkään (Heinonen ja Baltscheffsky, 2005, s. 48). Tämän takia pitkäaikaisia patenteja löytyy enemmän suurempien yritysten hallinnasta. Patentin voi saada keksinnölle, joka on uusi ja eroaa tunnetuista keksinnöistä merkittävästi (Heinonen ja Baltscheffsky, 2005, s. 26–27). Tämän takia varsinaiseen kemialliseen työstämiseen, kuten karkaisuetsaukseenkin liittyvien patenttien saaminen voi olla jo hankalaa.

5. YMPÄRISTÖ- JA TURVALLISUUSKYSYMYKSET

5.1 Räjähdyksvaaralliset ilmakehät

Kun tarkastellaan etsauslaitteen turvallisuutta, on välttämätöntä perehtyä räjähdysvaarallisiin tiloihin ja tiloissa käytettäviin laitteisiin. Näistä käytetään yleisesti myös nimityksiä ex-tila tai ex-laite, jotka voidaan yhdistää EU:ssa yhdeksi sanaksi: ATEX. ATEX-termi pohjautuu ranskankielen sanoihin "Atmospheres explosibles"(Euroopan komissio, 2017). ATEX koostuu kahdesta direktiivistä: 2014/34/EU (laitedirektiivi) ja 1999/92/EY (työolosuhteiden direktiivi). Ex-tiloja koskeva kansallinen ATEX-lainsäädäntö tuli voimaan vuonna 2003. Työolosuhteiden direktiivi on tarkoitettu työnantajille, joiden työntekijöiden työssä voi altistua syttyvistä nesteistä, kaasuista tai pölyistä johtuvalle räjähdysvaaralle. Laitedirektiivit on puolestaan tarkoitettu ensisijaisesti suojausjärjestelmien, laitteiden tai komponenttien valmistajille, maahantuojille ja markkinoille saattajille. Myös omaan käyttöön valmistettu laite on oltava laitedirektiivin mukainen (TUKES, 2015a). Ex-tiloja esiintyy teollisuudessa, jossa käsitellään tai varastoidaan palavia nesteitä tai syttyviä kaasuja. Ex-laitteita on ex-tiloissa käytettävät laitteet ja koneet, mutta myös sen ulkopuolella sijaitsevat turva- säätö- ja ohjauslaitteet. (TUKES, 2015a)

Palavia aineita käsittelevä tai varastoiva laitteisto on suunniteltava, rakennettava, käytettävä ja hoidettava niin, että palavien aineiden päästöt on minimoitu. Päästöjen määrä, kesto ja esiintymistäajuus on oltava niin normaalitoiminnassa kuin poikkeustilanteissakin mahdollisimman pieni. Mikäli räjähdyskelpoisen kaasuilmaseoksen esiintyminen on mahdollista, on toimittava seuraavasti. Eliminoidaan

- a) räjähdyskelpoisten kaasuilmaseosten esiintymistodennäköisyys

TAI

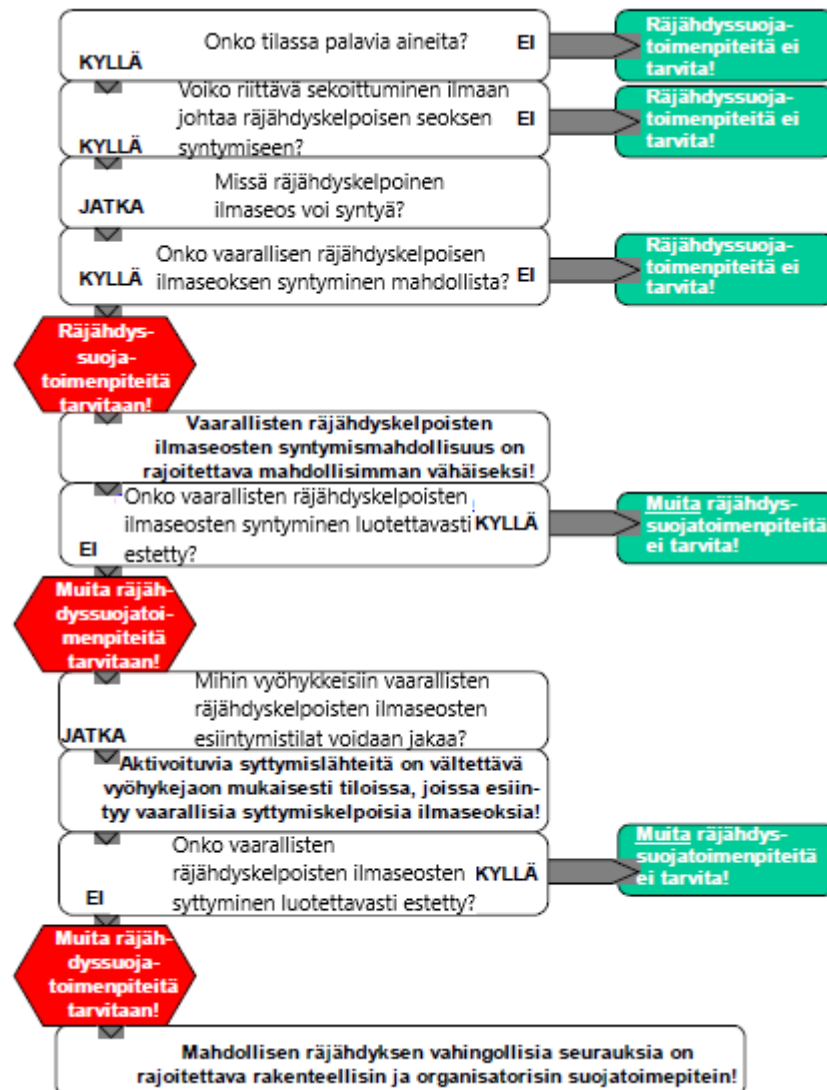
- b) syttymislähde. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015)

Jos räjähdyskelpoisten ilmaseoksen syntyminen on mahdollista, on tehtävä räjähdys-suojausasiakirja (TUKES, 2017). Tämän asiakirjan laatiminen on yleensä laitteiston hankkijan vastuulla, jos työpaikalta löytyy ex-tiloja. Räjähdys-suojausasiakirja voi olla itsenäisen dokumentin muodossa, mutta myös koostua useasta erillisestä asiakirjasta (TUKES, 2017). Räjähdys-suojausasiakirjasta tulisi Turvallisuus- ja kemikaaliviraston mukaan (TUKES, 2017) selvittää ainakin seuraavat asiat:

- Räjähdyksvaaran riskiarviointi

- Tilojen luokittelu räjähdysvaaran perusteella
- Ex-tiloissa käytettävien laitteiden asianmukaisuus ja luettelointi
- Tilaluokkien asianmukainen merkintä
- Työvälineiden turvallisen käytön valvonta
- Suojaustoimenpiteiden toteuttaminen asianmukaisesti

Räjähdysvaaran riskiarviointi prosessikaaviona on esitetty kuvassa 20



Kuva 20. Räjähdysvaaran riskiarviointi prosessina (Euroopan komissio, 2003, s. 9).

Ensimmäiseksi pitää tutkia, onko tilassa palavia aineita. Etanoli, kuten helposti syttyvät aineet yleensäkin eivät kuitenkaan syty itsestään. Aineen syttymiseen ja palamiseen tarvitaan kolme tekijää: palava aine, happea ja syttymislähde. Jos jokin näistä tekijöistä puuttuu, syttymistä ei tapahdu. Toiseksi on tutkittava, voiko riittävä sekoittuminen ilmaan johtaa räjähdyskelpoisen seoksen syntymisen. Laitedirektiivi ei kata mahdollisten

epästabiilien kemiallisten yhdisteiden aiheuttamaa räjähdysvaaraa (Euroopan komissio, 2017, s. 42). Palavan aineen sekoittuminen ilmaan ei pelkästään riitä räjähdysvaarallisen ilmakehän syntymiseen, sillä palavan aineen konsentraatio tulee olla oikea. Lukuisille aineille on kokeellisesti määritetty alempi ja ylempi räjähdysraja, joiden sisällä räjähdys voi tapahtua. Räjähdysrajoja selventää kuva 21, jossa on esitetty vedyn alempi ja ylempi räjähdysraja.



Kuva 21. Vedyn alempi ja ylempi räjähdysraja (Phoenix Contact, 2010).

Useimpien aineiden ja yhdisteiden räjähdysrajat löytyvät käyttöturvallisuustiedotteista. Nital-seoksen käyttöturvallisuustiedotteissa on annettu etanolin räjähdysrajat. Etanolin alempi räjähdysraja on 3,3 vol-% ja ylempi räjähdysraja 19 vol-% (Ff-chemicals Oy, 2018).

Seuraavaksi on tutkittava, missä räjähdyskelpoinen ilmaseos voisi syntyä. Tilat luokitellaan räjähdyskelpoisten ilmakehien esiintyvyyden todennäköisyyksien mukaan tilaluokkiin. Tilaluokat on jaoteltu myös palavan aineen tyyppin mukaan. Tilaluokituksen määräytymistä selventää taulukko 7.

Taulukko 7. Tilaluokitukset (TUKES, 2017).

Tilaluokka	Määritelmä
Tilaluokka 0	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.
Tilaluokka 1	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy normaalitoiminnassa satunnaisesti.
Tilaluokka 2	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalioloissa on epätodennäköistä ja se kestää vain lyhyen ajan.
Tilaluokka 20	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti ja usein
Tilaluokka 21	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy normaalitoiminnassa satunnaisesti.
Tilaluokka 22	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalioloissa on epätodennäköistä ja se kestää vain lyhyen ajan.

Kaasuilmaseosten tilaluokkia ovat 0, 1, 2 sekä vaaraton tila. Tilaluokat määräytyvät päästöluokan ja ilmanvaihdon käytettävyyden sekä tehokkuuden perusteella. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015)

Laimenemisen tehokkuus, ilmanvaihdon käytettävyys sekä järjestelmän rakenne määrittävät ilmanvaihdon tehokkuuden (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015). Ilma on poistettava ensisijaisesti kohdepoistoa käyttämällä. Kohdepoisto ja sen muotoilu tulee myös ottaa huomioon ilmanvaihdon järjestelyissä. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012a, s. 19) Ilmanvaihdon tehokkuus on tärkein tilaluokkiin vaikuttava tekijä (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, s. 47). Riittävän tehokas ilmanvaihto voi päästömäärän mukaan pienentää vaarallisen tilan aluetta riittävän pieneksi, jolloin sitä pidetään vaarattomana alueena. Laimenemisen tehokkuus voidaan jakaa kolmeen tasoon (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, s. 24):

- 1. Voimakas laimeneminen:** Pitoisuus päästölähteen läheisyydessä pienenee nopeasti, jolloin siitä ei ole käytännössä mitään jäljellä päästön lakattua.
- 2. Tyydyttävä laimeneminen:** Pitoisuutta kontrolloidaan. Tilaluokan laajuus pysyy vakaa päästön aikana, eikä räjähdyskelpoinen kaasuilmaseos säily kohtuuttoman kauaa päästön lakattua.
- 3. Heikko laimeneminen:** Pitoisuus säilyy kohtuuttoman kauan päästön lakattua tai se on hyvin merkittävä.

Ilmanvaihdon järjestelyille ei ole olemassa eksplisiittisiä ohjeita (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012a, s. 20). Standardissa (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015) on kuitenkin esitelty teoreettinen raittiin ilman minimivirtausmäärä, jolla palavan aineen päästön pitoisuus laimenee alle alemman syttymisrajan.

$$Q_{a \min} = \frac{W_g}{kLFL_m} * \frac{T_a}{293} \quad (18)$$

missä

$Q_{a \min}$ = ilman teoreettinen minimivirtausmäärä laimenemisen aikaansaamiseksi,

W_g = palavan aineen päästö määrä (kg/s),

k = LFL_m :ään liittyvä varmuuskerroin ($\leq 1,0$),

LFL_m = massaperusteinen alempi syttymisraja (kg/m^3),

T_a = vallitseva lämpötila (K).

Ilmanvaihdon käytettävyys voidaan jakaa kolmeen luokkaan (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, s. 52): Ilmanvaihto on

- **hyvä**, kun ilmanvaihdon toiminta on käytännössä katkotonta tai jatkuvaa.
- **kohtalainen**, kun ilmanvaihto oletetaan toimivan normaalisti. Lyhyet ja harvoin sattuvat katkokset ovat sallittuja.
- **huono**, kun ilmanvaihto ei ole hyvä eikä kohtalainen, mutta katkokkien ei oleteta kestävän kauaa.

Koneellisen ilmanvaihdon hyvä käytettävyys vaatii käytännössä varailmanvaihtolaitteen tai prosessin automaattisen pysäyttämisen ilmanvaihdon häiriintyessä (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, s. 52). Tilaluokka 0 voi muuttua vaarattomaksi tilaksi luotettavalla ja hyvällä ilmanvaihdolla. Tämä vaatii myös sen, että mahdollisesti syttyvä aine laimenee tasaisesti. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015). Hyvä ilmanvaihto tarkoittaa, että palavien aineiden höyryjen pitoisuus saa olla maksimissaan 25 % kemikaalin alemmasta räjähdysrajasta (TUKES, 2015b).

Mikäli räjähdysvaarallisen ilmakehän syntymistä ei voida luotettavasti estää, on estetävä ilmaseoksen syttyminen. Eri tilaluokissa voi käyttää ainoastaan niihin soveltuvia laiteluokkia. Laiteluokat esitellään taulukossa 8.

Taulukko 8. Laiteluokitukset.

Tilaluokka	Laiteluokka
0	1G
1	1G, 2G
2	1G, 2G, 3G
20	1D
21	1D, 2D
22	1D, 2D, 3D

Laiteluokat on määritelty palavan aineen tyyppin mukaan. Tilaluokka antaa laiteluokituksen vähimmäisvaatimuksen. Tilaluokat 0 ja 20 vaativat vähintään laiteluokan 1. Laiteluokitus saattaa sisältää myös tiedon laitteiden räjähdysuojaustasosta. Palavat kaasut ja höyryt on jaettu syttymisryhmiin T1–T6 niiden itsesyttymislämpötilan mukaan. Ex-laitteista tulee käydä ilmi niiden korkein mahdollinen pintalämpötila. (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012a, s. 10–13)

Räjähdysvaarallisia tiloja ja niissä käytettäviä laitteita säätelee Euroopassa ATEX-direktiivit. Maailmanlaajuinen vastine tälle direktiiville on IECEx. IECEx on eurooppalaisen ATEX:in tavoin jaettu eri osiin tai direktiiveihin. Näistä kaksi on lähtökohdiltaan samoja, kuin Euroopassa. IECEx on jaettu kolmeen sertifiointijärjestelmään (SESKO ry, 2020):

- IECEx certified equipment scheme (vrt. ATEX-laitedirektiivi.)
- IECEx certified service facilities scheme (vrt. ATEX-työolosuhdedirektiivi)
- IECEx scheme for certification of personnel competence (CoPC)

IECEx sertifioi siis myös työntekijöiden pätevyyden räjähdysvaarallisten aineiden käyttämiseen. ATEX-direktiivien noudattaminen on Euroopassa laissa vaadittu. IECEx perustuu puolestaan standardeihin, eikä se ole täten pakollinen osa vaatimustenmukaisuusvakuutusta. (Pommé ja Sijrier, 2010, s. 6)

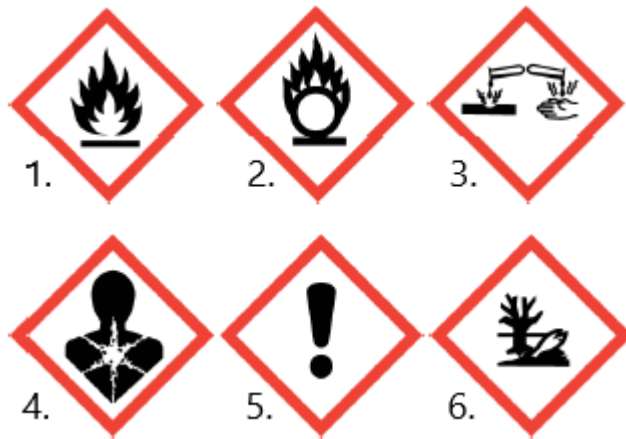
5.2 Vaarallisten aineiden käsittely

Monet etsauksessa käytettävät aineet ovat myrkyllisiä, syövyttäviä tai räjähdysvaarallisia. Hapojen ja emäksien käsittelyssä tulee noudattaa erityistä varovaisuutta. Vander Voort kertoo artikkelissaan (Vander Voort, 2015), että 47 vuoden kokemuksella metallografiasta hän on kuullut neljästä nitalin käyttöön liittyvästä onnettomuudesta. Vander Voortin mukaan metallografinen laboratorio on verrattain turvallinen työskentely-ympäristö. Laboratoriossa vaarallisten aineiden käsittely on arkipäiväistä, mutta etsauslaitteistolla vaarallisten aineiden käsittely on vähäisempää. Vaarallisia aineita käsitellään kuitenkin enemmän niitä vaihdettaessa ja sekoittaessa, mikä on yleisesti laboratorioalan koulutuksen saaneen henkilön vastuulla. Etsausaineen sekoittamisjärjestys on erittäin tärkeää. Aineiden sekoittaminen pitää aina aloittaa laimentimista. Happo tulee lisätä laimentimeen hitaasti ja samalla sekoittaen. (Vander Voort, 2015)

Etsausnesteiden konsentraatioihin, sekä hapojen ja alkoholien seoksiin liittyy monia rajoitteita. Propanolin ja typpihapon seos on epästabili, eikä sitä voi varastoida. Tämän takia etanolia ja jopa metanolia käytetään yleisemmin hapojen laimentamiseen. Yli 5 %

typpihappo-etanoli -seoksen säilyttäminen suljetussa astiassa ei ole turvallista. Meta-noliin pystytään turvallisesti sekoittamaan enemmän typpihappoa kuin etanoliin, mutta metanoli on myrkyllistä. (Vander Voort, 2015)

Vaarallisia kemikaaleja sisältäviin astioihin on merkittävä niiden sisältö sekä varoitus-merkinnät. Merkintä tulee olla selvästi havaittavissa olevalla paikalla. Merkintä voidaan sijoittaa säiliön kylkeen tai sen välittömään läheisyyteen. (TUKES, 2015b) Kemikaalien vaatimat varoitusmerkit ilmenevät kemikaalien käyttöturvallisuustiedotteista. Nitalia koskevia varoitusmerkkejä esitellään kuvassa 22.



Kuva 22. Nitalin varoitusmerkkejä (PACE Technologies, 2015).

Kuvan 22 varoitusmerkkien tunnuksen symbolit (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012c):

1. GHS02, Liekki
2. GHS03, Liekki ympyrän päällä
3. GHS05, Syöpyminen
4. GHS08, Terveysvaara
5. GHS07, Huutomerkki
6. GHS09, Ympäristö

Kunkin symbolin yhteyteen on erikseen merkitty vaaraluokka. Esimerkiksi syöpymisen vaaraluokat ovat 3.2, ihosyövyttävyyys ja 3.3, vakava silmävaurio (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012c).

Vaarallisten kemikaalien säiliöiden merkitsemisestä on olemassa myös standardi. Standardi (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012c) koskee ainoastaan 1 m³ tai sitä suurempia vaarallisia kemikaaleja sisältävien säiliöiden merkitsemistä. Vaarallisista aineista

ilmoittavat merkinnät eivät siis ole pakollisia, mikäli astiat pysyvät alle kuutiometrin kokoisina. Valoille altistuminen nopeuttaa joidenkin kemikaalien ominaisuuksien heikentymistä, joten niitä suositellaan varastoitaviksi valolta piilossa. (Vander Voort, 2015)

6. ETSAUSKONEEN TUOTTEISTAMISEN HAAS- TEET KÄYTÄNNÖSSÄ

Robotechin toimitukset ovat olleet tähän asti asiakkaille räätälöityjä ratkaisuja projekti-
luontoisesti. Etsaus on kuitenkin laajassa käytössä ympäri maailman, joten etsauslait-
teen tuotteistamisen mahdollisuuksia on järkevää tutkia. Tarkoituksena on tuottaa yksi
etsauslaitemalli tai -sarja, joka palvelee mahdollisimman montaa asiakasta ympäri maa-
ilman. Pienemmän laitteen hankintakynnys voi olla matalampi, sillä sen sijoittaminen ole-
massa olevaan tehdasympäristöön on helpompaa. On myös tutkittava, millaiset lisäva-
rusteet olisivat käytännöllisiä ja täten myös houkuttelevia. Lisävarusteiden avulla sa-
masta tuotteesta saadaan monipuolinen kuitenkin laitteiston rakennetta olennaisesti
muuttamatta.

Etsausstandardeja tai -käytäntöjä on melkein yhtä monta kuin niitä käytäviä yrityksiä.
Etsattavat kappaleet ovat erikokoisia, mutta myös erilaisia muodoltaan. Etsauslaitteen
läpimenoaika riippuu yrityksestä, mutta myös koneen ominaisuuksista. Etsausastioiden
koko, muoto, lukumäärä ja sijainti vaikuttavat myös oleellisesti koneen toimintaan.

Etsauksen heikkouksien tunnistaminen ja etenkin niiden voittaminen on tullava ilmi et-
sauslaitteen markkinoinnissa. Etsaus voidaan mieltää vaaralliseksi, likaiseksi ja vaike-
aksi prosessiksi. Etsaukseen liittyykin monia etsausnesteiden käsittelystä ja varastoin-
nista johtuvia turvallisuuskysymyksiä. Etsauslaitteesta on tehtävä turvallinen ja mahdol-
lisimman ympäristöystävällinen. Etsausnesteiden ominaisuudet täytyy tutkia perusteelli-
sesti, ennen kuin niitä voidaan laitteistossa luotettavasti ja turvallisesti käyttää. Tähän
liittyy oleellisesti myös laitteiston räjähdysvaarallisuuden arviointi ja sen edellyttämien
toimenpiteiden toteuttaminen.

6.1 Karkaisuetsauskäytännöt

Jokaisella yrityksellä, niiden etsauslaitteistoilla ja etsaajilla, on omat käytäntönsä, vaikka
karkaisuetsaus onkin kansainvälisesti standardoitu. Jotta pystytään vastaamaan asiak-
kaiden tarpeisiin, on tehtävä esimerkiksi markkinatutkimusta. Yritysten etsauskäytäntöjä
kartoitettiin haastatteleamalla yritysten edustajia ennalta määritetyin kysymyksiin. Tutki-
mus pyrittiin tekemään mahdollisimman laajalle sektorille, joten haastateltavien joukossa
on niin hammaspyörien, akselien kuin laakerienkin valmistajia. Hammaspyörien ulko-
halkaisijat vaihtelevat haastatelluilla yrityksillä välillä 90–800 mm. Etsattavien kappalei-
den massat puolestaan sijoittuvat välille 0,5–300 kg. Haastateltavat yritykset toimivat

niin Suomessa kuin muualla Euroopassakin. Haastattelu toteutettiin sähköpostitse ja haastattelun kysymykset ovat tämän työn liitteenä. Vastauksia on esitetty kootusti seuraavien alaotsikoiden alla.

Haastateltujen yritysten käyttämät hammashionnan laadunvarmistusmenetelmät on koottu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Haastateltujen yritysten laadunvarmistusmenetelmät.

Yritys	Käytetyt menetelmät
A	BNA + NE
B	BNA + NE
C	BNA (ennen myös NE)
D	BNA + NE
E	BNA, NE, MPI, SH
F	BNA + NE
G	BNA + NE
H	BNA + NE

Karkaisuetsaus ei ollut yhdellekään haastateltavalle uusi asia. Haastatelluista yrityksistä jokainen luotti hionnan laadunvarmistuksessa Barkhausen kohinan käyttämiseen. Seitsemän yritystä kahdeksasta käytti tämän lisäksi myös etsausta itse tai alihankintana. Yritysten karkaisuetsaaminen toteutetaan manuaalisesti pienemmille kappaleille käsin tai suuremmille kappaleille nosturien avulla. Kaikki etsausta käyttävät yritykset toteuttivat etsauksensa ISO 14104:n tai siitä itse jalostamansa sisäisen standardin mukaan. Yhdellekään yrityksellä ei ollut käytössä automatisoitua etsauslinjaa. Yritys C oli jo lopettanut etsauksen käytön ja siirtynyt täysin Barkhausen kohinan varaan. Yritys E käytti edellä mainittujen menetelmien lisäksi myös magneettijauhetarkastusta (engl. magnetic particle inspection, MPI) sekä pinnankovuuden mittauksia (engl. surface hardness).

Tuotannosta etsattavien kappaleiden osuus vaihteli huomattavasti eri yritysten välillä. Yritysten yleisin käytäntö oli etsata valmistuserän tai vuoron ensimmäinen kappale. Yritys D etsasi tämän lisäksi 3–5 kappaletta tunnissa. Yritys B etsasi erän jokaisen kappaleen, jos etsaus on ollut asiakkaan vaatimuksena. Monet yritykset käyttivät etsausta ja Barkhausen kohinaa rinnakkain eri tavoin yrityksen mukaan. Yleinen käytäntö on, että Barkhausen kohinan antamat tulokset varmistetaan etsaamalla tai toisin päin. Yritykset E ja F etsasivat ainoastaan korkean BNA-arvon saaneet kappaleet. Näistä ensimmäinen tutki kaikki hammaspyörät Barkhausen kohinalla, kun jälkimmäinen ainoastaan joka 25.–200. hammaspyörän.

Kolme yritystä kahdeksasta romutti kaikki etsaamansa kappaleet. Lopuilla yrityksistä etsattu kappale päätyi valmiiksi tuotteeksi joko sellaisenaan, puhdistettuna tai jonkin ylimääräisen työstövaiheen jälkeen. Kappaleen vedynpoistohehkusäde etsauksen jälkeen oli vain yhdelle yritykselle tuttua, vaikka siitä mainitaan alan standardeissa. Yritykset eivät ole tietoisia sen hyödyistä tai eivät koe sitä tarpeelliseksi. Toisaalta osa yrityksistä romutti etsatut kappaleet, jolloin vetyhaurastumisen aiheuttama ongelma eliminoiduu täysin.

6.2 Karkaisuetsauksen yleiset ongelmakohdat

Vaikka etsauksella onkin monia heikkouksia, ne eivät tee etsauksesta huonoa menetelmää. Suuri osa etsauksen heikkouksista tai heikkouksiksi mielletyistä seikoista johtuvat automaation vähydestä tai sen puuttumisesta kokonaan. Tässä osiossa keskitytään sellaisiin karkaisuetsauksen heikkouksiin, joihin pystytään eri toimenpiteillä vaikuttamaan.

6.2.1 Pinnan syöpyminen

Karkaisuetsausta käytetään NDT-menetelmien tavoin, vaikka se onkin ainetta rikkova menetelmä. Hammaspyörän pinta syöpyy aina jonkin verran etsauksen aikana, oli hammaspyörän kunto tai pintarakenne sitten mikä tahansa. ISO-standardin mukaan jokaisella etsauskerralla ainetta syöpyy kolme mikrometriä kappaleen jokaiselta pinnalta. Joissain tapauksissa yhdestäkin etsauskerrasta johtuva pienikin dimensioiden muutos on liikaa. Tämä on kuitenkin asiakaskohtaista. Aineen rikkoutumiseen vaikuttaa myös tarvittavien etsauskertojen määrä. Mikäli jokaisella etsauskerralla saavutetaan luotettava tulos, aineen rikkoutumisen ongelma pienenee. Tähän pystytään vaikuttamaan muilla sekoilla, kuten etsausnesteiden laaduilla ja mahdollisimman hyvin vakioituilla prosessiajoilla.

Pinnan syöpyminen ei sinänsä ole ongelma, jos se on hyvin ennakoitavissa. Hammaspyörän pinta syöpyy tasaisesti, mikäli sen pinnan karkaisu on pysynyt tasaisena hammaspyörän huolimatta. Etsauksesta johtuva, tässä tapauksessa tasainen syöpyminen, voitaisiin ottaa huomioon kappaleen lopullisissa dimensioissa. Tarkasti hallituilla ja testatuilla etsausnesteillä voidaan saavuttaa hyvin tasalaatuinen lopputulos. Aineen syöpyminen voitaisiin ottaa huomioon tekemällä siitä viimeinen työstövaihe. Jos kaikkia hammaspyöriä ei etsata, joudutaan tietenkin tekemään ainakin kahdet erilaiset hammaspyöräparametrit. Tämä päätelmä perustuu kuitenkin siihen, että etsatut hammaspyörät, myös ehjät sellaiset, päätyvät myös käyttöön.

6.2.2 Kemikaalien käyttö

Haastattelun perusteella kemikaalien käyttö ja ympäristökysymykset ovat yksi suurimmista huolenaiheista etsausta käyttävissä tai sen käyttöä harkitsevissa yrityksissä. Kun etsataan manuaalisesti, huoli on ennen kaikkea työn suorittajalla. Manuaalisella etsaus tavalla työntekijä altistuu syövyttävillä ja räjähdysvaarallisille etsausnesteille ja niiden höyryille huomattavasti enemmän. Tällainen altistuminen pienenee huomattavasti automaattisella etsauslaitteistolla, jolloin huoli esimerkiksi roiskeista poistuu normaalissa käytössä kokonaan. Kemikaalien käyttö on ongelma, jota ei voida täysin mitenkään varmasti eliminoida. Automaattisessa etsauslaitteistossa huoli kemikaaleista kulminoituu etsausnesteiden vaihtamiseen. Etsausnesteiden vaihtamisväliä tulisikin pitkittää mahdollisimman paljon, mutta ei kuitenkaan nesteiden kunnon ja puhtauden kustannuksella. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että etsattavat kappaleet ovat mahdollisimman puhtaita.

Kemikaalien käyttämiseen liittyy olennaisesti myös ilmanvaihdon toteutus. Koneen ilmanvaihdon rajapinta olisi hyvä vakioida. Tulisi miettiä, mikä on yleinen liityntätapa tai kohta asiakkaan ilmanvaihdon putkitukselle. Tämänhetkinen liityntä vinoon pintaan voi olla asiakkaan näkökulmasta haastavaa. Tulisikin miettiä olisiko etsauslaitteiston ilmanvaihtoyhteen suu samansuuntainen esimerkiksi asiakkaan oletetun katon kanssa. Laitteisto olisi näin helpommin asennettavissa myös itse asiakkaan toimesta. Tämän lisäksi on tutkittava olisiko järkevää toimittaa ilmanvaihdon putkisto metritavarana asiakkaalle.

6.2.3 Etsaamisen kesto

Etsaamiseen tarvittava aika riippuu huomattavasti etsattavan materiaalin tyypistä, kuten luvussa 3 jo todettiin. Etsattavan tuotteen läpimenoaika on karkeasti 5–25 minuuttia. Automaattinen etsauskone sopii massatuotantoon manuaalista konetta huomattavasti paremmin. Ajatus siitä, että etsaaminen on hidasta, voi johtua etsauksen manuaalisuudesta. Manuaalisesti etsaamalla työntekijän on oltava läsnä, mutta automaattisella etsauslaitteistolla tämä ongelma menettää merkitystään. Automaattisen etsauksen vaatima aika on ohjelmakohtaisesti riittävällä tarkkuudella vakio. Toisaalta tieto prosessin/ohjelman ajankulusta voisi olla reaaliajassa nähtävissä, mikä joustavoittaa koneen käyttöä entisestään.

Automaattisella etsauslaitteistolla pitkä aika kuluu etsattavan kappaleen valuttamiseen ennen siirtymistä seuraavalle astialle. Valumisaikojen pienentäminen voi osoittautua hankalaksi. Yksi keino voisi olla jonkinlainen etsauskoriin asennettava täry. Toisaalta jos jokaista kemikaalia varten on vain yksi astia, on mietittävä myös astian oikea lähestymissuunta. Tämänhetkinen etsaustaso pyörii vain toiseen suuntaan. Kahteen suuntaan pyörivä laitteisto on heti monimutkaisempi niin mekaanisesti kuin ohjelmallisestikin. Tällä

hetkellä etsausprosessin reseptien määrittäminen on helppoa. Kahdensuuntaisen etsausprosessin resepti olisi vaikeammin konfiguroitavissa. Tämän tekemiseen tarvittaisiin ohjelmallisesti enemmän, ainakin jos tällaisen reseptin tekeminen tehdään mahdolliseksi myös asiakkaan toimesta.

Tämänhetkisen etsauslaitteiston toimintamallilla saavutettu kapasiteetti on kuitenkin rajallinen. Kyseisellä konstruktiolla voidaan etsata vain yhtä kappaletta kerrallaan. Tämä riittää useammille asiakkaille, mutta se voi myös karsia isompia yrityksiä. Kiinteillä etsausastioilla ja robotilla varustetulla versiolla saavutettaisiin huomattavasti suurempi kapasiteetti. Lisäksi voisi miettiä etsausta odottavien kappaleiden puskurointia. Etsauslaitteiston merkittävä muuntaminen nostaa myös laitteiston hankintahintaa.

6.2.4 Etsaustulosten tulkinnanvaraisuus

Yksi merkittävä heikkous etsauksessa on sen tulosten tulkinnanvaraisuus. Tulkinnanvaraisuus voi johtua monista yksittäisistä tekijöistä tai niiden summasta. Etsauksen laadun parantamiseksi voidaan tehdä moniakin asioita. Etsauksen laadunvarmistuksen vaiheet:

1. Varmistetaan, että etsattava kappale on aina puhdas
2. Varmistetaan, että etsauksessa käytettävät nesteet ovat toimintakuntoisia.
3. Varmistetaan kokeellisesti oikeat pitoajat eri prosesseille.
4. Luodaan tarvittavat edellytykset tulosten tarkistamiseksi.

Etsattavan kappaleen puhtaus on kaikista merkittävin tekijä etsauksen tuloksen kannalta. Likainen kappale itsessään vääristää etsaustulosta. Lisäksi lika vaikuttaa myös välillisesti heikentämällä etsausnesteitä. On perusteltua luoda etsauslaitteiston käyttäjälle ohjeet myös etsattavan kappaleen puhdistamiseen.

Etsausnesteiden toimintakuntoa on hyvä seurata aktiivisesti. Tähän on olemassa ainakin kaksi tapaa: nesteen kunnan tarkastaminen joko astiasta mittarilla tai näytteestä titraamalla sekä referenssikappaleiden käyttäminen. Referenssikappaleita olisi hyvä toimittaa laitteiston mukana.

Jos etsattavat kappaleet ovat puhtaita ja etsausnesteet toimintakuntoisia, voidaan tutkia prosessien eri pitoaikoja. Pitoaikojen tutkiminen on iteratiivinen prosessi, joka vaatii useamman testauskerran. Asiakkaille on perusteltua luoda tähän tarkoitukseen tutkimuspöytäkirjat, joiden avulla voidaan helposti pitää kirjaa etsausprosessien muutettavista parametreista. Lopulta on mahdollista luoda hyvinkin tarkka sisäinen standardi, jonka pohjalta saavutetaan laadukkaita etsaustuloksia.

Etsauksen tulokset on myös pystyttävä helposti tarkastamaan. On varmistuttava riittävästä valaistuksesta. Eräät yritykset käyttävät myös referenssikuvia etsauksen tuloksen määrittämiseksi.

6.3 Etsausastiat ja -nesteet

Kuten johdannossa todettiin, etsausta käytetään erilaisille koneenosille. Esimerkiksi hammaspyörrien, akselien ja laakerien hionnan laadunvarmistus voidaan suorittaa ainakin osittain etsauksen avulla. Näillä komponenteilla on etsauslaitetta koskevia, rajoittavia dimensioita. Laakereilla ja yleisimmillä hammaspyörillä rajoittavana tekijänä on halkaisija. Akseleilla ja esimerkiksi kierukkavaihteilla ja murikkapyörillä rajoittavaksi dimensioiksi muodostuu niiden pituus eikä niinkään halkaisija. On pohdittava, onko mielekästä rajoittaa dimensioiltaan niin sanotusti pitkien tuotteiden etsattavuutta pyöreillä astioilla vai ovatko esimerkiksi pitkulaiset tai syvemvät astiat aiheellisia. Toisaalta pitkät tuotteet etsataan yleensä lokaalisti.

Etsausastioiden optimaalisen lukumäärän selvittäminen oli osa etsauskäytäntöjen kartoitusta. Taulukkoon 10 on koottu yritysten etsausaltaista antamat tiedot sekä verrataan niitä yleisiin standardeihin.

Taulukko 10. Etsausaltaiden lukumäärän liuosten sekä laimentimien kartoitus.

	Altaiden lukumäärä	Liukokset	Laimennin
Yritys A	4	Nital, HCL, Etanoli, Vesi	Alkoholi
Yritys B	N/A	N/A	Alkoholi
Yritys E	5	Nital, Vesi, HCL, Alkaali, Öljy	Vesi
Yritys F	3	Nital, HCL, Vesi	Alkoholi
Yritys G	8	Nital, HCL, Alkaali, Alkoholi	Alkoholi
Yritys H	3	N/A	Alkoholi
ISO 14104	6	Nital, HCL, Alkoholi, Vesi, Alkaali, Öljy	Alkoholi/Vesi
MIL-STD	6	Nital, HCL, Alkoholi, Vesi, Alkaali, Öljy	Alkoholi/Vesi

Altaiden lukumäärissä on jonkin verran vaihtelua. Standardit eivät sinänsä ota kantaa altaiden lukumääriin vaan sisältävät ainoastaan suositellun proseduurin. Kaikki haastellut yritykset käyttivät nitalia ja suolahappoa. Yritys F käytti vain kolmea allasta eikä lainkaan neutralisoivaa nestettä kuten natriumhydroksidia. Syöpyminen saattaa jatkua pitkäänkin, mikäli neutralisointia ei suoriteta. Vedellä huuhtelu käytännössä vain laimentaa happoa etsattavan kappaleen pinnassa.

Käytännössä altaiden minimi lukumäärä on kolme, mutta se ei ole kuitenkaan optimaalinen. Luotettavien tuloksien aikaansaamiseksi tarvitaan nimittäin nitalia ja suolahappoa.

Tämän lisäksi tarvitaan neutralisoivaa nestettä sekä huuhteluun tarkoitettua ainetta, kuten vettä tai alkoholia, kuten on mainittu standardissa ISO 14104. Näin ollen vähimmäislukumäärä altaille olisikin 4. Tämäkään ei ole oikea etsauslaitteiston dimensioista ja ohjelmateknisistä syistä. ISO-standardin mukaiset tyyppin 2 ja tyyppin 3 etsausproseduurit ovat hieman erilaiset. Runsasseosteisille teräksille sekä työkaluteräksille tarkoitettu tyyppin 3 etsaus vaatii suolahappokäsittelyn kahteen kertaan. Tämän takia tulee miettiä riittääkö yksi suolahappoallas tai mikä olisi yksittäisen altaan oikea sijainti. Huuhtelualtaita on nimittäin hyvä olla enemmän kuin yksi.

Suurin osa yrityksistä käyttää happojen laimentamiseen alkoholia. Alkoholin käyttö laimentimena onkin perusteltua. Yritys E laimensi käytettävät hapot vedellä. Kyseisen yrityksen yksi huolenaiheista olikin virheelliset näyttämät etsaustuloksessa. Alkoholipohjaisilla etsausliuoksilla saavutetaan parempi etsaustulos, mikä saatiin selville teoriaosiossa. Alkoholien käyttäminen tuo mukanaan kuitenkin toisen ongelman. Alkoholi, toisin kuin vaihtoehtoinen ja standardien mukainen vesi, aiheuttaa räjähdysvaarallisia päästöjä. Toisaalta päästöjä syntyy joka tapauksessa, sillä suolahappo vapauttaa räjähdysvaarallista vetyä. Tilaluokituksen tekeminen olisi siis veden käyttämisestä huolimatta tehtävä. Näistä syistä ei ole millään tasolla järkevää käyttää vettä happojen laimentamiseen.

Etsausnesteiden vaihdossa oli yrityksillä hyvin eriäviä käytäntöjä. Yleisin käytäntö oli vaihtaa etsausnesteet kerran viikossa. Yritys A vaihtoi etsausnesteet jopa päivittäin. Pisin vaihtoväliä noudatti yritys G, jonka etsausnesteet vaihdetaan 2–4 kk välein. Toisaalta tässäkin yrityksessä huuhteluun käytettävää vettä vaihdettiin useammin. Yritys D noudatti muista yrityksistä poikkeavaa, ei aikaperusteista mallia. Tässä yrityksessä nesteiden väriä verrataan referenssikuvuihin, jotka ottavat joltain osin kantaa nesteiden epäpuhtauksiin. Väriin perustuva nesteiden vaihtaminen on ongelmallista, sillä nesteen väristä ei selviä esimerkiksi sen typpihappokonsentraatio. Toisaalta esimerkiksi etsausnesteen viallinen väri on varteenotettava vaihtoperuste myös ennen nesteiden suunniteltua vaihtamisväliä.

Yhdysvaltain asevoimien standardissa (Department of Defence, 2008) annetaan myös vesisäiliöille erityisvaatimuksia. Huuhteluun tarkoitettut vesisäiliöt tulee varustaa ylivirtauksella tai vedenpinnan kuorintalaitteella. Toisin sanoen veden pinnasta pitää poistaa siinä kelluvat epäpuhtaudet. Jatkuvasti juokseva vesi tai kuorintalaite voi olla haastava toteuttaa tämänhetkisellä etsauslaitteen konstruktiolla. Ylivirtauksen tai vedenpinnan kuorintalaitteen merkitys pienenee veden vaihtovälin tihtyessä.

Harva yritys käytti öljyä etsatun kappaleen ruosteenestoon, tai se ei ainakaan tullut haastattelussa ilmi. Osa yrityksistä käytti kuitenkin öljyastioita. Öljyastian käyttäminen etsauslaitteiston sisällä ei kuitenkaan ole järkevää monestakaan syystä. Öljyn leviämistä voi olla hankala välttää. Mahdollista öljyämistä ennen kappale kuitenkin tarkastetaan, joten öljyäminen muodostuu joka tapauksessa erilliseksi vaiheeksi. Öljy heikentää etsausliuosten tehoa ja etsaustuloksen tarkkuutta. Öljyastiaa ei kannata asentaa, koska aineiden ja kappaleiden puhtaus on jo nyt ongelma etsauksen toteuttajilla. Laitteistoon integroitu öljysuihkutin tai ulkopuolinen öljyastia voisi sen sijaan olla hyvä lisävaruste.

6.4 Materiaalit

Etsauksessa käytettävät hapot ovat tähän käyttötarkoitukseen laimennettuinkin syövyttäviä. Tämän takia tulee miettiä tarkoin myös etsauslaitteistossa käytettäviä materiaaleja. Mahdollisesta syöpymisestä aiheutuva konerikko ei saa aiheuttaa vaaraa työntekijöille eikä ympäristölle. Syövyttävien aineiden leviämistä laitteiston sisällä on hankala arvioida. Syövyttävien aineiden kulkeutuminen tulee ottaa huomioon koneen suunnittelussa. Tämä tarkoittaa, että laitteiston turvallisen toiminnan vaatimat komponentit kestävät etsausnesteitä kuin koskemattomana. Tuotteistettavan etsauslaitteiston materiaali- valinnat on oltava tarkalleen mietittyjä, sillä väärin valintojen tuoma lisäkustannus näkyy jokaisessa laitteessa.

Ensimmäisenä happojen kanssa yhteensopivana materiaalina tulee mieleen tietenkin haponkestävä teräs. Hapoissa, kuten teräksissäkin on kuitenkin huomattavia eroavaisuuksia. Turvallisuus- ja kemikaaliviraston mukaan (TUKES, 2015b) austeniittiset teräkset, kuten ruostumaton AISI 304L ja haponkestävä AISI 316L, kestävät erinomaisesti mietoja ja väkevää typpihappoa. Samasta lähteestä on kuitenkin myös luettavissa, että samat materiaalit eivät sovellu edes miedolle suolahapolle. Tämän takia ruostumattoman ja haponkestävänkin teräksen käytössä tulee olla tarkkana. Etanolilla ja yleisesti neutralisointiaineena käytettävällä natriumhydroksidilla ei myöskään ole syövyttävää vaikutusta ruostumattomaan teräkseen.

Hapot toimitetaan lähes poikkeuksetta muoviastioissa tai -tynnyreissä, mutta pienempinä määrinä myös lasiastioissa. Yleisesti ottaen muovit kestävät hyvin happoja ja emäksiä, mutta muovejakin on olemassa lukuisia erilaisilla ominaisuuksilla. Eri muovilaatujen hintoja ja ominaisuuksia vertailtiin erään muovivalmistajan sivuilla (VINK Finland Oy, 2020). Polytetrafluorieteeni eli teflon (engl. Polytetrafluoroethylene, PTFE) kestää äärimmäisen hyvin kemikaaleja, mutta se on myös erittäin kallista. Polyoksimetyyli (engl. Polyoxymethylene, POM) on helppo työstää, mutta se ei puolestaan kestä kemikaaleja. Polyeteenillä (engl. Polyethylene, PE) on sen sijaan hyvä kemikaalienkestokyky, ja se

on myös halpa muovimateriaali. Jokaisella näistäkin muoveista voi olla omat käyttökohteensa kehityksen alla olevassa automaattisessa etsauslaitteistossa.

6.5 Etsausprosessin valvonta, tarkastus ja jälkitoimenpiteet

Yhdysvaltojen puolustusvoimien standardi (Department of Defence, 2008) vaatii, että laitteiston yhteydessä on selvästi esillä laitteiston prosessia seuraava sekuntikello. Tämä vaatimus viittaa vahvasti etsauslaitteiden yleiseen manuaalisuuteen. Manuaalisella laitteistolla etsauksen tulos perustuu pitkälle yksittäisen etsaajan ammattitaitoon ja käsitykseen pitoajoista. Tällaisessa tapauksessa selvästi visuaalinen sekuntikello onkin perusteltu. Toisaalta kappaleen laskeminenkin voi viedä itsessään jo sekunnin, joten hetki, josta ajanotto alkaa ja loppuu voi vaihdella käyttäjänkin kohdalla melko paljon. Tällainen aikanäyttö ei ole välttämätön, mutta ei kuitenkaan täysin turhakaan automaattisessa laitteistossa. Sekuntikellon visualisointi voi tuoda tuttua lisäinformaatiota ainakin manuaaliseen etsaustapaan tottuneille.

Etsausnesteiden kunnon ja etsauksen laadunvalvonta voi olla haasteellista. Etsausnesteiden kunnon valvonta testikappalein on patentoitu Yhdysvalloissa. Euroopassa näin ei kuitenkaan tiedettävästi ole. Tämän takia testikappaleiden käyttö ainakin joltain osin voisi olla perusteltua.

Etsaustuloksen arvioinnin laatu perustuu merkittävästi työntekijän ammattitaitoon, mutta myös esimerkiksi heikko näkökyky saattaa ratkaista epäselvissä tilanteissa. Ainakin osittain tämän takia standardeissa on määritelty tarkastuspisteen oikea valovoimakkuus. Osa haastatelluista yrityksistä myös dokumentoi kaikki etsatut ja Barkhausen kohinalla testatut kappaleet. Tämä tarkoittaa, että ne kuvataan ja BNA-arvot kirjataan tarkasti ylös. Näin ollen myös myöhemmin mahdollisesti vioittuneen hammaspyörän valmistuksen elinkaari on jäljitettävissä. Tällaiseen ei kaikilla yrityksillä välttämättä ole olemassa oikeita resursseja.

6.6 Nykyisen konstruktion soveltaminen valmistustekniikkaan

Etsaus on valmistustekniikkana huomattavasti monitahoisempi prosessi kuin karkaisuetsaaminen. Karkaisuetsauksessa prosessi perustuu huoneenlämpöisiin seisoviin etsausaineisiin. Etsauslaitetta on muokattava, jotta se soveltuisi kemialliseen työstämiseen. Merkittävimpiä tarvittavia lisälaitteita ovat sekoitin ja lämmitin. Etsausaineen lämmittäminen nopeuttaa prosessia ja sekoitin puolestaan takaa tasaisemman laadun. Näiden lisääminen nykyisen etsauslaitteiston liikkuviin etsaussäiliöihin voi olla haasteellista. Se-

koitin ja lämmitin eivät ole ihan välttämättömiä. Nykyinen laitteisto ja tämänhetkiset etsausnesteet voivat jo soveltua epätarkempaan työstämiseen. Tällaista voi olla esimerkiksi 3D-tulostetun kappaleen tukirakenteiden poisto tai työstö, jolla ei pyritä lopullisiin mittoihin.

Valmistustekniikassa etsattavien kappaleiden kokospektri on erittäin laaja. Lentokoneen siipien etsauslinjastoa on hankala automatisoida eikä Robotechin etsauslaitteiston kapasiteetti ole lähelläkään vaadittua. Lentoteollisuudessa on toisaalta sopeuduttu kemialliseen työstämiseen, joten käyttöä voi löytyä yllättävän paljon myös pienille kappaleille. Nykyinen etsauslaitteisto soveltuisikin kokonsa puolesta pienempien kappaleiden etsaukseen. Kemiallista työstöä vaativat kappaleet eivät välttämättä ole yhtä säännöllisen muotoisia kuin laakerit ja hammaspyörät. Kemiallisesti työstettäviä kappaleita halutaan yleensä myös työstää kaikilta maskaamattomilta pinnoilta samanaikaisesti. Tämän takia tulisi suunnitella myös tähän soveltuva ripustin.

Kemiallisessa työstämisessä käytettävien etsausaineiden konsentraatiot ovat huomattavasti isompia ainakin typpihapon osalta. Luvussa 4.1 todettiin, että teräksen kemialliseen työstämiseen käytetään jopa 15 til-% typpihappoa. Luvussa 5.2 puolestaan todettiin että 5 til-% väkevämpien typpihappoliuosten kanssa ei ole turvallista käyttää suljettavia astioita. Suljettavilla astioilla käytettävät typpihappokonsentraatiot takaavat hitaamman, mutta toisaalta tarkemman työstämisnopeuden. Väkevämpien happojen käyttö lisää myös tapaturmariskiä. Täysin oppikirjan mukaista kemiallista työstöä ei siis voida tämänhetkisellä konstruktiolla toteuttaa.

Kemiallisessa työstämisessä ei välttämättä käytetä suolahappoa, jonka vapauttaman vedyn päästöt poistuisivat siis kokonaan. Etsausaltaita ei myöskään tarvita yhtä montaa kuin karkaisuetsauksessa. Yleisesti koko kappaleen muokkaaminen vaatii esipuhdistuksen, etsauksen ja lopuksi vielä puhdistuksen. Kappaleen neutralisoinnista ei löytynyt kirjallisuudesta viitteitä. Tämä tuntuu oudolta, sillä etsausnesteiden konsentraatiot ovat paljon suuremmat. Yksityiskohtaisten, maskausta vaativien osien etsaus voi osoittautua hankalaksi. Maskausaine ei saisi levitä laitteiston sisällä, mikäli maskausaineelle varattaisiin laitteistosta yksi allas. Maskausaineen leviäminen aiheuttaisi ennen pitkää ongelmia etsauksen laadussa.

6.7 Turvallisuuden takaaminen

SFS-standardin perusteella voidaan määrittää teoreettiset arvot räjähdysvaarallisten aineiden haihtuvuudelle. Laimenemisen tehokkuus on määritelty ilmvirran nopeuden ja suhteellisen päästömäärän suhteena. Teoreettisen arvon laskeminen on työlästä eikä se

yksinään anna täydellistä kuvaa ilmanvaihdon tilasta. Tämän vuoksi on perusteltua tehdä erillisiä mittauksia.

Robotechin ensimmäisenä toimittaman laitteiston tilaluokkakartoituksen teki kolmannen osapuolen palotarkastaja. Lausunnon perusteella laitteistolle ei esitetty ex-vaatimuksia. Tarkastajan lausunto on kuitenkin muodostettu melko yleisellä tasolla. Lausunto perustuu arvioon laitteiston kokonaistilavuudesta sekä tehokkaan kohdepoiston käyttöön. Lausuntoon on luotettu ja laite onkin varustettu laitteiston yläosaan sijoitetulla koneellisella kohdepoistolla. Lausunnot ei kuitenkaan käy ilmi prosessissa syntyvien päästöjen määrää eikä sijaintia. Tämän takia on perusteltua tutkia asiaa myös itse ja varmistaa ilmanvaihtojärjestelyn tehokkuus.

Etsauslaitteisto on ehkä hieman poikkeuksellinen laite, sillä sen sisään luodaan ex-tila. Etsauslaitteisto koostuu kuitenkin useammasta laitteesta, jotka sijaitsevat mahdollisessa ex-tilassa. On perusteltua tutkia sekä laitedirektiiviä että työolosuhdedirektiiviä. Täten varmistetaan laitteiston turvallisuudesta ja helpotetaan myös laitteiston myyntiä. Ex-tiloista on tehtävä räjähdysvaarallisuusasiakirja, jonka tekeminen tai teettäminen on normaalisti työnantajan (myöhemmin laitteiston hankkijan) vastuulla. Kun tämä tehdään itse, voidaan pienentää asiakkaan palotarkastajan velvoitteita ja näin ollen pienentää laitteiston hankintakynnystä.

Etsauksen teorian ja turvallisuusvaatimusten kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin etsauksessa syntyviä räjähdysvaarallisia aineita. Suolahappo vapauttaa vetyä reagoiessaan metallien kanssa. Typpihappo voi puolestaan pelkistyä ammoniakiksi. Vety ja ammoniakki ovat palavia kaasuja. Vety on erittäin herkästi syttyvää ja sillä on matala alempi räjähdysraja sekä korkea ylempi räjähdysraja. Ammoniakilla on kuitenkin verrattain korkea alempi räjähdysraja (16 til-%), jonka saavuttaminen on melko epätodennäköistä.

Etsaus perustuu erilaisten happojen käyttöön, mutta hapot ovat sellaisenaan liian väkeviä. Tämän vuoksi happoja laimennetaan joko vedellä tai yleisimmin alkoholilla. Metanoli ja etanoli ovat standardin (Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012b) mukaisia laimentimia. Metanoli on puolestaan myrkyllistä, joten sen käyttäminen on vaikeaa. Mikäli typpihappoa halutaan laimentaa alkoholin avulla, on etanolin käyttö perusteltua. Etanoli on herkästi syttyvää ja se haihtuu nopeammin kuin vesi muodostaen höyrystyessään palavia kaasuja. Etanolia tai alkoholiseoksia, kuten Sinolia käytetään etsausprosessissa myös sellaisenaan veden syrjäyttämiseen. Käytännössä kaikki prosessissa käytettävät alkoholit ovat pääosin etanolia.

Etikkahappo voi muodostua typpihapon hapettavuuden takia typpihapon ja etanolin sekoituessa. Etikkahappo on nesteenä ja kaasuna palava aine, mutta se ei haihdu nopeasti, joten sen esiintymistä ei ole tarpeellista tutkia. Etikkahappo haisee voimakkaasti. Jos etanolia ei löydy, voidaan ajatella, että etikkahapon esiintyminen on vielä pienempää. Teorian perusteella etsauksessa syntyy neljää palavaa kaasua, joilla on eri ominaisuudet. Etikkahappoa oletetaan syntyvän niin vähän, että sitä ei tarvitse huomioida. Ammoniakki puolestaan vaatii hyvin korkean alemman räjähdysrajan, joten sen räjähdysriski on erittäin pieni. Voidaankin siis keskittyä tutkimaan vedyn ja kaasumaisen etanolin muodostumista ja pitoisuuksia.

Etsauslaitteisto sisältää käytännössä kaksi eri tilaa, joita jakamassa on etsaustaso etsausastioineen. Etanoli muodostaa höyrystyessään ilman kanssa räjähtäviä seoksia, jotka ovat ilmaa raskaampia (Carl Roth GmbH + Co KG, 2015; Ff-chemicals Oy, 2018). Etsausastioita ei ole tarkoitus täyttää kokonaan vaan nesteen pinta jää noin 30 cm astian yläpinnan alapuolelle. Räjähdyskelpoinen ilmaseos siis syntyy todennäköisimmin alkoholia sisältävien astioiden nestepinnan yläpuolelle astioiden sisään. Etsausastioilla on myös omat kantensa, jotka ovat suljettuina, mikäli laitteistoa ei käytetä.

Ilmanvaihtokanava on sijoitettu laitteiston yläosaan, mikä heikentää yläpuolisen alueen räjähdyskelpoisten ilmaseosten syntymistä. Ilmanvaihto saattaa kuitenkin syystä tai toisesta lakata, vaikka etsausastioiden kannet olisivat auki. Koneellinen ilmanvaihto ei välttämättä ole tarpeeksi tehokas, jos kohdepoisto on väärin sijoitettu. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että etanolipitoisten aineiden höyry leviää myös etsaustason alapuolelle. Etsausastioiden tyhjennys tapahtuu myös etsaustason alapuolelta. Koko etsauslaitteen sisäosa on siis mahdollista ex-tilaa. Etsauslaitteen ympärille voi myös muodostua ex-tila, jota on tutkittava. Aineiden räjähdysvaarallisuus vaikuttaa ex-luokitukseen toisin kuin aineiden myrkyllisyys. Myrkylliset aineet muodostuvat ensisijaisesti etsauspisteellä, jonne myös kohdepoisto on sijoitettu. Voidaan olettaa, että runsaalla ilmanvaihdolla saadaan myrkylliset aineet poistettua.

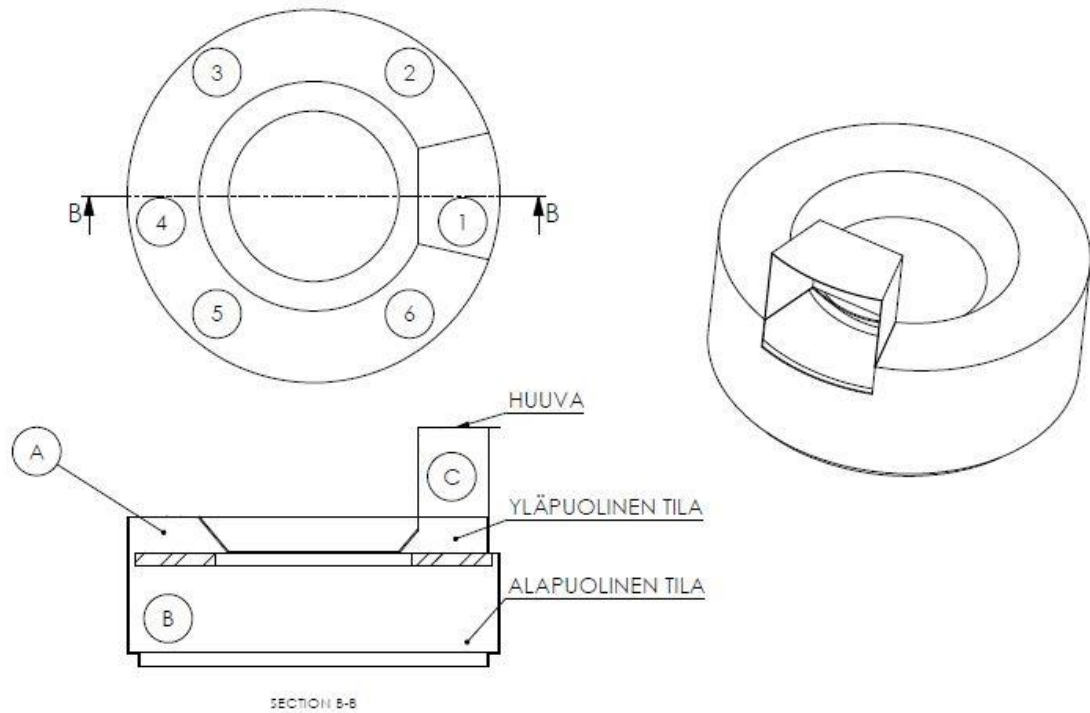
7. RÄJÄHDYSVAARALLISUUDEN TESTAAMINEN

Räjähdyksvaarallisuuden testaamiseksi löydettiin kaksi erilaista keinoa. Ensimmäinen olisi etsauksessa syntyvien kaasujen tarkoituksellinen räjäyttämisen. Tämä testausmenetelmä suoritettaisiin oikean etsauslaitteiston miniatyyrikoossa. Pienoiskoossa olevan etsauslaitteiston palavien kaasujen räjäyttämisen olisi turvallisempaa kuin oikeassa koossa. Tällä menetelmällä on kuitenkin ainakin kaksi heikkoutta. Räjäyttämiseen perustuva testausmenetelmä on edelleen vaarallinen eikä tällaisen testauksen toteuttamiseen ole tiloja helposti saatavissa. Tällä menetelmällä saatavat tulokset eivät myöskään välttämättä ole luotettavia. Etsauslaitteen skaalaaminen kaikilta osin pienemmäksi on haastavaa. Tulokset eivät välttämättä olisi suoraan verrannollisia todellisessa koossa olevan etsauslaitteiston räjähdysturvallisuuden tai -vaarallisuuden kanssa. Näitten syitten takia kehitettiin toinen vaihtoehtoinen menetelmä, jonka tulokset perustuvat oikeaan laitteeseen.

Aineen syttyminen ja palaminen vaativat kolme tekijää: palavan aineen, happea ja syttymislähteen. Etsauksessa mahdollisesti palavat aineet on kartoitettu. Tämän lisäksi tiedetään aineiden tiheys ja täten myös alueet mihin näiden palavat kaasut mahdollisesti ilmaantuvat. Palavan aineen ja hapen seos tulee olla alemman ja ylemmän räjähdysrajan sisällä. On siis perusteltua tutkia, ilmaantuuko räjähtäviä ilmaseoksia laitteen sisälle eri kaasujen oletetuille esiintymisalueille. Tämä on huomattavasti turvallisempi ja luotettavampi testausmenetelmä, mikäli käytetään oikeanlaisia mittareita.

7.1 Mittausjärjestelyt

Tarkoituksena on tutkia, miten palavien aineiden pitoisuudet eroavat laitteiston eri osissa. Tutkimuksesta tulisi selvittää, onko koneellinen ilmanvaihto sijoitettu oikein sekä onko sen teho oikea. Etsausastioita eli päästökohteita on kyseisessä tapauksessa yhdeksän. Tutkimus suoritetaan prosessin ollessa käynnissä, mutta myös prosessin ollessa pysäytettynä ja etsausastioiden kansien ollessa kiinni. Etsauslaitteiston tutkittavat tilat on jaettu korkeussuunnassa alueisiin. Korkeussuunnassa alueiden jakorajana toimii taso, jossa etsaus suoritetaan. Laitteen pinta-ala on myös jaettu tutkittaviin sektoreihin. Laitteiston koneellinen ilmanvaihto tapahtuu kiinteän huuven kohdalta. Etsauslaitteiston alueet ja sektorit selviävät sen yksinkertaistetusta kuvasta 23.



Kuva 23. Mittausalueet ja -sektorit.

Vedyn esiintymistä ja pitoisuuksia tutkitaan etsauslaitteiston yläosissa (A,C), koska vety on ilmaa kevyempää. Etanolin esiintymistä ja pitoisuuksia puolestaan tutkitaan ensisijaisesti etsauslaitteiston alaosissa (B), koska etanolin palavat kaasut ovat ilmaa raskaampia. Mittauksissa pyritään mittaamaan kyseisten aineiden maksimipitoisuudet esitetyillä alueilla. Tämän lisäksi pitoisuuksia tutkitaan etsauslaitteiston välittömästä läheisyydestä. Laitteiston sisältä ja ympäriltä tehdään myös harkinnan mukaan muiden kaasujen pistotarkastus.

7.2 Mittauslaitteet

Kaasujen pitoisuuksien mittaamiseen käytetään kannettavaa Riken Keiki GP-03 -mallista kaasuilmaisinta. Käytettävä ilmaisin on varsin kompakti, joten sen asettaminen mitauspisteisiin ei vaadi kovin suuria ponnisteluja. Kaasuilmaisinta on esitelty kuvassa 24.



Kuva 24. Kannettava kaasunilmaisim.

Kyseisen kaasunilmaisimen havaitsemisperiaatteena on katalyyttinen palamismenetelmä ja sen näytteenotto perustuu diffuusioon. Kaasunilmaisim on kalibroitu vedyn ja etanolin pitoisuuksien mittaamiseen. Laite mittaa näiden aineiden pitoisuuksien prosenttiosuutta aineiden alemmasta räjähdysrajasta (engl. Lower Explosive Limit, LEL). Laitteen toiminta-alue on 0–100 % LEL ja 1 % LEL näyttötarkkuudella. Laitteen oikea tarkkuus on $\pm 5\%$ lukemasta tai $\pm 2\%$ LEL. Laitteen tarkkuuden pitäisi riittää luotettavien mittaustuloksien aikaansaamiseksi. Kaasunilmaisim kykenee tallentamaan pitoisuuden maksimiarvon, mitä hyödynnettiin mittauksissa. Kaasunilmaisim on tarkoitettu yhden kaasun tutkimiseen kerrallaan. Etsauslaitteistossa muodostuu kuitenkin useita kaasuja, jotka sekoittuvat keskenään. Kaasunilmaisim ilmoittaa kaikkien tunnistamiensa palavien kaasujen yhteenlasketun pitoisuuden. Esiintyvien kaasujen tunnistaminen perustuu teoriaan ja omaan pohdintaan.

7.3 Mittauksien suorittaminen

Kaasujen pitoisuuksia tutkittiin monessa eri skenaariossa. Myös ilmanvaihdon tehokkuutta muutettiin ja tutkittiin sen vaikutusta päästöjen muodostumiseen. Ensimmäiseksi tutkittiin, mikä liuos aiheuttaa suurimmat päästöt. Tämä mittaus suoritettiin asettamalla kaasunilmaisim kuvan 23 mukaisiin kohtiin etsauslaitteiston yläpuoliseen tilaan. Etsausastioiden kannet avattiin minuutin ajaksi ja kaasunilmaisimen maksimiarvo kirjattiin ylös. Laitteiston alapuolinen tila tutkittiin myös samaan tapaan. Paikallaan olevien etsausastioiden päästömittaus suoritettiin kahdella eri ilmanvaihdon tehokkuudella.

Seuraavaksi tutkittiin kaasujen pitoisuuksia laitteiston normaalissa käytössä eli etsauksen aikana. Hammaspyörä etsattiin ISO-standardin tyyppin 2 mukaisesti. Etsaus suoritettiin neljä kertaa. Jokaisella kerralla tutkittiin etsauslaitteiston kaasujen pitoisuuksien maksimiarvoja laitteiston eri osissa. Ensimmäiseksi tutkittiin varsinaisen etsauspisteen kaasujen pitoisuuksia asettamalla kaasunilmaisoin C- ja A-alueiden väliin laitteiston etupuolelle etsauksen ajaksi. Toisessa mittauksessa kaasunilmaisoin asetettiin laitteiston takaosaan A-4, jossa kaasujen pitoisuuksien oletetaan olevan keskimäärin kaikista suurimmat. Kolmannella etsauskerralla kaasunilmaisoin asetettiin laitteiston takaosaan etsaus-tason alapuolelle. Neljännellä ja viimeisellä etsauskerralla tutkittiin ympäröivän alueen kaasujen pitoisuuksia.

7.4 Mittaustulokset

Kun mittaukset aloitettiin ja kannet olivat kiinni ei löydetty viitteitä palavien kaasujen esiintymisestä. Kaikkien tuloksien yksikkö on %-LEL. Alla olevassa taulukossa on esitelty mittaustulokset, kun etsausastiat ovat auki, mutta etsaus ei ole käynnissä.

Taulukko 11. Paikallaan olevan etsauslaitteiston mittaustulokset.

KONE EI PYÖRI

	Alue-sektori	Normaali ilmanvaihto	Tehostettu ilmanvaihto
	A-1	19	6
	A-2	3	4
	A-3	28	21
	A-4	14	10
	A-5	8	6
	A-6	16	14
	B-1	0	0
	B-2	0	0
	B-3	0	0
	B-4	0	0
	B-5	0	0
	B-6	0	0
	C-1	0	0

Laitteiston suurimmat palavien kaasujen pitoisuudet esiintyivät alueella A-3. Kyseisellä alueella oli mittauksien aikana suolahappoallas. Suolahaposta haihtuu teorian mukaan sen laimentamiseen käytetyn etanolin lisäksi myös vetyä. Tämän takia alueen pitoisuuksissa on selvä ero muihin alueisiin. Alue A-5 oli mittauksien aikana nitalia sisältävänastian välittömässä läheisyydessä. Tällä alueella on yllättävän pienet palavien kaasujen

pitoisuudet. Alueen A-2 sijaitti neutralointiaineen läheisyydessä, missä pitoisuudet olivat myös varsin pienet. Ilmanvaihtoyhteen (C-1) läheisyydessä ei havaittu palavia kaasuja kummallakaan ilmanvaihdon tehokkuudella.

Taulukossa 12 esitellään etsauksen aikana syntyvien kaasujen maksimipitoisuuksia.

Taulukko 12. Alueiden kaasujen pitoisuuksia etsauksen aikana.

ETSAUS KÄYNNISSÄ

	Alue-sektori	Tehostettu ilmanvaihto
	A-1	5
	A-2	N/A
	A-3	N/A
	A-4	5
	A-5	N/A
	A-6	N/A
	B-1	N/A
	B-2	N/A
	B-3	N/A
	B-4	0
	B-5	N/A
	B-6	N/A

Taulukosta huomataan, että etsauksen aikana syntyvien kaasujen pitoisuudet pysyvät matalina. Maksimi arvo on vain 5 % kaasujen alemmasta räjähdysrajasta. Etsauksen aikana tutkittiin kaasujen pitoisuuksia myös laitteiston välittömästä läheisyydestä. Palavia kaasuja ei käytettävällä mittarilla havaittu lainkaan.

8. LOPPUPÄÄTELMÄT JA KEHITYSEHDOTUKSET

Yritysten karkaisuetsauskäytäntöjen yhdistäminen yhdeksi laitteeksi ei ole hankalaa niinkään altaiden lukumäärän osalta vaan enemmänkin huolta aiheuttaa kappaleiden dimensioiden ja massojen eroavaisuus. Tämän takia onkin tutkittava, onko järkevää tehdä yksi tuote. Yksi vaihtoehto on tietysti etsauslaitteiston jonkinasteinen modulointi. Runko, sähköistys ja ilmanvaihtoratkaisut pysyisivät samana, mutta esimerkiksi etsaustasosta tehtäisiin osittain räätälöitävä. Jo tällaisella muutoksella laitteiston vaatima yhtäjaksoinen suunnittelukuorma keskittyisi ainoastaan etsaustason suunnitteluun. Toisaalta etsauslaitteen runkojakin voisi olla kahta eri kokoluokkaa, kuten tähän asti toimitetut laitteistotkin. Näihin runkoihin pitäisi kuitenkin tehdä pieniä muutoksia, jotta laite olisi helposti liikuteltavissa ja käyttöön otettavissa loppuasiakkaalla. Etsauslaitteistosta voitaisiin luoda niin sanottu perusmalli, johon kyetään lisäämään lisävarusteita. Tällaisia lisävarusteita voisi olla erilaiset laitteiston sisälle asennettavat konsentraatiomittarit ja -anturit. Myös varsinaisen laitteiston ulkopuolelle olisi kiinnitettävissä lisävarusteita kuten dokumentointiin ja sen helpottamiseksi tarkoitettavat valaisimet ja kamera.

Räjähdyksivaarallisuuden testaaminen kannettavan kaasunilmaisimen avulla osoittautui hyväksi keinoksi. Etsauslaitteiston yläpuolisen tilan tilaluokka olisi ilman toimenpiteitä tilaluokka 1. Heikollakin ilmanvaihdolla palavien kaasujen osuus jäi vain 28 %:iin alemmasta räjähdysrajasta. Hyvä ilmanvaihto tarkoittaa, että palavien kaasujen pitoisuus pysyy alle 25 %:ssa alemmasta räjähdysrajasta. Tutkimuksissa siis huomattiin, että laitteisto saadaan räjähdysvaarattomaksi tehokkaalla ilmanvaihdolla. Näin laitteiston tilaluokka on siis vaaraton. Tämä edellyttää kuitenkin tehokasta ja luotettavaa ilmanvaihtoa. Toisin sanoen ilmanvaihtumista on tutkittava virtausvahdin avulla. Mikäli ilmanvirtaus loppuu, on laitteiston kannet laskettava, ja tämän jälkeen laitteisto on kytkettävä jännitteettömäksi. Ainoastaan ilmanvaihdolle esitetään ex-vaatimuksia. Ilmanvaihtimen ex-luokka tulee olla vähintään 1. Näin varmistutaan laitteiston räjähdysvaarattomuudesta.

Etsauslaitteisto todettiin tutkimusten perusteella palavien kaasujen osalta turvallisiksi, mutta myrkylliset kaasut jäivät vielä tutkimatta. Myrkyllisten kaasujen pitoisuuksista etsauslaitteiston sisällä tai ulkopuolella ei ole tarkkaa tietoa. Myrkylliset kaasut eivät vaikuta ex-luokituksiin. Myrkyllisille aineille altistumista voidaan ilmanvaihton ansiosta pitää erittäin pienenä. Myrkyllisille kaasuille on kuitenkin annettu viitteellisiä altistumisrajoja. Myrkyllisille kaasuille altistumista tulisi pyrkiä pienentämään eri keinoin. Etsauslaitetta käyttävien työntekijöiden tulisi olla tietoisia etsauslaitteistossa käsiteltävistä aineista.

Yksi vaihtoehto voisi olla kannettava myrkyllisten kaasujen esiintymisestä varoittava laite, kuten räjähdysvaarallisuudenkin tutkimisessa. Toinen vaihtoehto on kiinteä kaasunilmaisain ja siihen yhteydessä oleva oviraja. Myrkyllisiä kaasuja olisi joka tapauksessa hyvä tutkia vielä tarkemmin.

Kehityksen alla olevan automaattisen etsauslaitteiston etsausaltaat ovat alle yhden kuutiometrin kokoisia, mutta niihin olisi silti järkevää asentaa merkinnät niiden sisältämistä kemikaaleista. Tämän lisäksi oviin ja ikkunoihin on hyvä asentaa varoitusmerkit syövyttävistä aineista ja esimerkiksi kieltää avotulen tekeminen. Käyttöohjeisiin tulee myös panna turvallisen käytön osiossa. Tämä antaa samalla kuvan siitä, että turvallisuus on myös laitteiston toimittajalla mielessä.

Etsauslaitteiston markkinointikustannukset ovat tähän mennessä pysyneet äärimmäisen pieninä. Tieto Robotechin ensimmäisen laitteiston onnistuneesta toimituksesta levisi hammaspyörävalmistajien keskuudessa melko nopeasti. Automaattisen etsauslaitteiston omistaja on huomannut radikaalin eron manuaaliseen laitteistoon verrattuna. Yksi tärkeä erovaisuus on tietenkin laitteiston kohonnut turvallisuus. Kuvitelma etsauksen vaarallisuudesta näkyi kuitenkin haastattelun tuloksissa. Tämän takia turvallisuuden koekellinen testaaminen ja sen toteaminen on tultava ilmi laitteiston markkinoinnissa. Aiemmin vaaralliseksi oletettu laite voi muuttua houkuttelevaksi myös täysin Barkhausen kohinan käyttämiseen siirtyneissä yrityksissä. Yrityksen verkkosivuille tehtävä ja tulostettava tuote-esittely voi olla tässä kohtaa myös tarpeen.

Kaksi ensimmäistä laitteistoa on myyty Pirkanmaalle. Suomestakin löytyy vielä kiinnostuneita asiakkaita yrityshaastattelun perusteella. Kansainvälisille markkinoille siirtyminen tarkoittaisi vielä lisää asiakkaita, mutta myös lisää normaalista kotimaisesta projektista poikkeavaa työtä. Kaikki dokumentit tulee olla vähintään englanniksi käännettyjä. Yksi suunnittelun ja asennuksien kannalta merkittävä tekijä on sähkömerkinnät ja johdinvärit. Euroopassa markkinoitavilta laitteilta vaaditaan CE-merkintä ja sitä edeltävä vaatimustenmukaisuusvakuutus. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ei ole olemassa tällaista merkintää. Tämän lisäksi esimerkiksi eri osavaltioiden lait ja määräykset voivat poiketa toisistaan merkittävästi. Suuri osa löydetyistä patenteista pätee juuri Yhdysvalloissa. Turvallinen lähestyminen kansainvälisiä markkinoita kohtaan tulisi aloittaa Euroopasta, jossa pätee pääosin samat säädökset kuin Suomessakin. Keski-Euroopassa ja esimerkiksi Saksassa on erittäin paljon hammaspyöriä valmistavia yrityksiä.

Vaikka laitteisto kehitettiin alun perin hammashionnan laadunvarmistukseen, on vastaavalle konstruktiolle löytynyt yllättävää käyttöä. Kemiallisen työstämisen mahdollisuuk-

sien tutkiminen on perusteltua. Oppikirjan mukainen kemiallinen työstäminen vaatii laitteistolta uusia ominaisuuksia. Tutkiminen kannattaa kuitenkin pitää aluksi hillittynä tekemättä radikaaleja muutoksia laitteiston rakenteeseen. Yhtenä vaihtoehtona onkin testata uusia mahdollisuuksia jo toimitetuilla etsauslaitteistoilla. 3D-tulostaminen on arkipäiväistynyt, joten sillä saralla on varmasti Hirtisation-tekniikan kanssa vastaavaa käyttöä. Tällaisen toimintamenetelmän testaaminen käytännössä 3D-tulostusyritysten kanssa voi luoda uusia mahdollisuuksia. Tutkittavia asioita ovat muun muassa eri metalliseokset ja niille soveltuvat etsausaineet.

9. YHTEENVETO

Työn alussa käsiteltiin etsauksen ja hammashionnan laadunvarmistuksen teorioita. Lähteinä käytettiin kirjallisuutta niin kemian, materiaalitekniikan kuin konetekniikankin aloilta. Käytännössä kaikki maailmassa valmistettavat hammaspyörät pintakarkaistaan. Pintakarkaisun jälkeen hammaspyörän pinnan faasi on martensiitti. Viallisen hionnan aiheuttaman lämmön takia hammaspyörän pinta päästyy. Tämän takia metallin pintarakenteeseen muodostuu muita faaseja, kuten ferriittiä. Etsaus on hallittu syövyttävä prosessi, joka perustuu pohjimmiltaan eri potentiaaleissa olevien pintojen väliseen elektrolyyttiseen vaikutukseen. Karkaisuetsauksessa syntyvä kontrasti johtuu metallin päästyessä muodostuvista potentiaalieroista eri faasien välillä. Ferriitin hapettuminen näkyy etsauksen jälkeen tummina laikkuina esimerkiksi viallisesti hiotun hammaspyörän pinnalla. Kemiallisessa työstämisessä syöpyminen tapahtuu sen sijaan tasaisesti ilman selvää potentiaaliero.

Yleistä etsauslaitemallia tai -sarjaa varten hankittiin tietoa niin karkaisuetsauksen standardeista kuin niitä käyttävistä yrityksistäkin. Kahdeksaa hammaspyörä- tai laakerivalmistajaa haastateltiin ennalta määritetyin kysymyksin. Haastattelussa tiedusteltiin yritysten yleisiä käytäntöjä hammashionnan laadunvarmistukseen liittyen. Kaikissa haastatelluissa yrityksissä käytettiin ensisijaisesti Barkhausen kohinaa. Yhtä lukuun ottamatta yritykset luottivat kuitenkin edelleen myös karkaisuetsaukseen. Karkaisuetsauksen osalta saatiin tärkeää tietoa yritysten käyttämien etsauslaitteiden lukumäärästä sekä käytettävistä etsausnesteistä. Lisäksi saatiin tietoa yleisesti etsattavien kappaleiden kokoluokista. Haastateltujen yritysten yleisimmät huolenaiheet olivat turvallisuus ja etsaus tulosten tulkinnanvaraisuus. Näihin asioihin perehdyttiin tässä työssä huomattavan paljon. Yrityshaastatteluista saatuja tietoja on koostettu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Haastattelun ja standardien yhteenveto.

	Altaiden lukumäärä	Liukokset	Laimennin	Etsattavien kappaleiden koko
Yritys A	4	Nital, HCL, Etanoli, Vesi	Alkoholi	D = 200–300 mm m = 2–3 kg
Yritys B	N/A	N/A	Alkoholi	D < 800 mm m = N/A
Yritys C	N/A	N/A	N/A	N/A
Yritys D	N/A	N/A	N/A	D < 250 mm m = N/A
Yritys E	5	Nital, Vesi, HCL, Alkaali, Ölly	Vesi	D = N/A m = 200–300 kg
Yritys F	3	Nital, HCL, Vesi	Alkoholi	D = 90–500 mm m = N/A
Yritys G	8	Nital, HCL, Alkaali, Alkoholi	Alkoholi	N/A
Yritys H	3	N/A	Alkoholi	D = N/A m = 1–55 kg
ISO 14104	6	Nital, HCL, Alkoholi, Vesi, Alkaali, Ölly	Alkoholi/Vesi	N/A
MIL-STD	6	Nital, HCL, Alkoholi, Vesi, Alkaali, Ölly	Alkoholi/Vesi	N/A

Yritys C oli jo luopunut karkaisuetsauksen käytöstä. Kappaleiden koissa on huomattavan paljon varianssia. Yhden vakioidun etsausallaskoon toteuttaminen voi olla hankalaa.

Syövytyksessä käytettävistä aineista käytetään nimitystä reagenssi tai syövytysaine (engl. etchant). Etsausaineita on olemassa satoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Karkaisuetsauksessa käytettävät etsausaineet rajoittuvat käytännössä kahteen: nitaliin eli typpihapon ja alkoholin seokseen sekä laimennettuun suolahappoon. Laimentamiseen käytetään joko vettä tai mieluummin alkoholia, kuten etanolia. Kemiallisessa työstämisessä käytetään osittain samoja etsausnesteitä kuin karkaisuetsauksessa, mutta väkemmällä konsentraatioilla. Laimennetun typpihapon lisäksi käytetään esimerkiksi rauta(III)kloridia. Käytettävät kemikaalit, niin hapot kuin niiden laimentamiseen käytettävä alkoholikin, luovat turvallisuusriskejä. Aineiden potentiaalinen räjähdysvaarallisuus vaikuttaa laitteiston sisältämän tilan ja siinä käytettävien laitteiden ex-luokitukseen. Tämän takia räjähdysvaarallisuutta tutkittiin kokeellisesti. Laitteisto todettiin räjähdysvaarattomaksi tietyin ehdoin. Laite tulee varustaa hyvällä ilmanvaihdolla ja sen toimintavarmuus on taattava.

LÄHTEET

Alban, L. E. (1985). *Systematic analysis of gear failures*.ASM International, s.249.

ASTM International. (1995). *Standard Method for Macro-Etching Metals and Alloys. Praktische Metallographie/Practical Metallography*, s.11.

ASTM International. (2015). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys ASTM E-407*.ASTM International, s.22.

Bausch, T. (2006). *Innovative Zahnradfertigung : Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität ; mit 64 Tabellen*.Renningen: Expert Publishing House, s.778.

Belyakov, A. (2019). Microstructure and Mechanical Properties of Structural Metals and Alloys. *Open Access Metallurgy Journal*.MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 8(9), s. 272.

Berglund, T. ja Dearden, W. H. (1931). *Metallographers' Handbook of Etching*.Lontoo: Sir Isaac Pitman & Sons, s.183.

Burrier, H. I. (2001). *Bearing steels. Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, s.501–506.

Campbell, F. C. (2006). *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*.Elsevier Science, s.15–92. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856174954500020>.

Carl Roth GmbH + Co KG. (2015). *Käyttöturvallisuustiedote. Etanoli (Bioetanoli) 96% SOLVAGREEN, denaturoitu*. Saatavissa: <https://www.carlroth.com/medias> (Viitattu: 25. helmikuuta 2020).

Crow, J. R. ja Jacobson, T. G. (2017). Method of Standardizing Grinder Burn Etch Testing. Patent Application Publication Pub . No .: US 2017 / 0215756A1.

Crow, J. R. ja Pershing, M. A. (2017). *Standard samples for grinder burn etch testing. American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting 2017*, s.121–127.

Davis, J. R. (2002). *Iron-Carbon Phase Diagram. Surface Hardening of Steels*, s.311–313.

Davis, J. R. (2005). *Gear Materials, Properties, and Manufacture*.ASM International, s.339.

Department of Defence. (2008). *MIL-STD-867C - Temper Etch Inspection*, s.16.

Deveci, M. (Stresstech). (2020). *Detection Methods of Grinding Damages*. Saatavissa: https://www.stresstech.com/application/files/4815/0633/3175/Bulletin_3_Detection_methods_of_grinding_damages_cover.pdf (Viitattu: 4. maaliskuuta 2020).

DIN 3962-2. (1978). *TOLERANCES FOR CYLINDRICAL GEAR TEETH; Tolerances for Tooth Trace Deviations*.German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), s.2.

Dini, J. W. (1984). Fundamentals of Chemical Milling. *American Machinist*, (768), s. 113–128.

Euroopan komissio. (2003). *KOM(2003) 515 lopullinen Komission tiedonanto. Ohjeellinen toimintaopas vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseostenaiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi annetun*. Bryssel, s.69.

Euroopan komissio. (2017). *ATEX 2014/34/EU Guidelines*. Bryssel, s.238.

Ff-chemicals Oy. (2018). *KÄYTTÖTURVALLISUUSTIEDOTE Nital-seos (typpihappo 3 v/v-% etanolissa)*. Saatavissa: http://www.ff-chemicals.fi/product_info2.php?cPath=29_33&products_id=31952 (Viitattu: 19. helmikuuta 2020).

Goch, G. (2003). Gear metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), s. 659–695.

He, B. ym. (2019). A survey of methods for detecting metallic grinding burn. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier Ltd, 134, s. 426–439. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.093>.

Heinonen, K. ja Baltscheffsky, A. (2005). *Keksijän opas – keksinnöstä patentiksi*. Helsinki: Edita Prima Oy, s.107.

Hirtenberger. (2017). *Hirstitation*. Saatavissa: <https://hes.hirtenberger.com/en/hirtisation/> (Viitattu: 20. helmikuuta 2020).

Hohman, E. ja Nissen, J. P. (2015). Automated Nital Etch Inspection System Patent Application Publication Pub. No.: US 2015/0193919 A1.

Kalpakjian, S. ja Schmid, S. R. (2006). *Manufacturing Engineering and Technology*. 5. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, s.1295.

Karpuschewski, B., Knoche, H. J. ja Hipke, M. (2008). Gear finishing by abrasive processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2), s. 621–640.

Kivivuori, S. (2019). *Lämpökäsittelyoppi 1- Lämpökäsittelytietoa karkaisijoille*. Keuruu: Teknologiateollisuus ry, s.390.

Klocke, F. (2019). Gear Cutting. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, s. 767–774.

Köhler, J., Schindler, A. ja Woiwode, S. (2012). Continuous generating grinding - Tooth root machining and use of CBN-tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), s. 291–294.

Kumar, K., Divya, D. ja Zindani, J. P. (2018). *Advanced Machining and Manufacturing Processes*. Cham: Springer International Publishing AG, s.201. Saatavissa: <http://www.springer.com/series/11181>.

Langworthy, E. M. (Aerochem). (1989). *Chemical Milling. ASM Handbook, Volume 16: Machining*. ASM International Handbook Committee, s.579–586.

Lehrer, C. (Photofabrication E. I. (2009). *An Update on chemical milling. Medical Design*. Toimittanut L. Gordon, s.17–19.

- Mackenzie, S. (2017). *Metallurgical Reasons for Grinding Cracks and Their Detection*. Saatavissa: <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat-metallurgical-reasons-for-grinding-cracks-and-their-detection/> (Viitattu: 1. helmikuuta 2020).
- Mahamood, R. M. ja Akinlabi, E. T. (2018). *Chemical Cutting Process. Advanced Noncontact Cutting and Joining Technologies*. Springer, s.11–25.
- Misumi. (2010). *Chemical Milling. Surface Finishing Tutorial*. Saatavissa: <https://www.misumi-techcentral.com/tt/en/surface/2010/01/031-chemical-milling---2.html> (Viitattu: 4. maaliskuuta 2020).
- Ningshen, S. ym. (2009). Corrosion assessment of nitric acid grade austenitic stainless steels. *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 51(2), s. 322–329. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.038>.
- Osarolube, E., Owate, I. O. ja Oforka, N. C. (2008). Corrosion behaviour of mild and high carbon steels in various acidic media. *Scientific Research and Essays*, 3(6), s. 224–228.
- PACE Technologies. (2015). *Safety Data Sheet Nital Etchant*. Saatavissa: <https://www.metallographic.com/MSDS/SDS-OSHA/Nital.pdf> (Viitattu: 4. helmikuuta 2020).
- Phoenix Contact. (2010). *Explosion protection Theory and practice Explosion protection*, s.60. Saatavissa: <http://es.slideshare.net/dpires/explosion-protection-theory-and-practice>.
- Pommé, R. ja Sijrier, H. J. (2010). IECEx certification schemes versus ATEX directives. *PCIC Europe 2010 Conference Record, PCIC EUROPE 2010*, Tammikuu, s. 1–8.
- Rakhit, A. K. (2000). *Heat Treatment of Gears : A Practical Guide for Engineers*. Materials Park, OH : ASM International, s.211.
- Revie, R. W. ja Uhlig, H. H. (2008). Passivity. *Corrosion and Corrosion Control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering (4th Edition)*. John Wiley & Sons, s. 83–113.
- Sadegh, A. M. ja Worek, Wi. M. (2018). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 12. p. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, s.1509. Saatavissa: <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781259588501>.
- SESKO ry. (2020). *IEC:n vaatimustenmukaisuuden järjestelmät*. Saatavissa: https://www.sesko.fi/standardit/harmonisoidut_standardit_ja_direktiivit/iec_n_vaatimustenmukaisuuden_arviointijarjestelmat/iecex (Viitattu: 8. huhtikuuta 2020).
- Siiriäinen, J. ym. (2008). *Barkhousen Noise and Its Use for Quality Control of the Production of Transmission Gears. Advanced Materials Research*, s.407–419. Saatavissa: www.scientific.net/AMR.41-42.407.
- Sulcius, A. (2015). Reactions of Metals in Nitric Acid: Writing Equations and Calculating Electromotive Force of Redox Reaction. *Journal of Chemical Education*, 92(12), s. 1971–1972.

Suomen standardisoimisliitto SFS. (2012a). *Räjähdysvaarallisten tilojen luokittelu : palavat nesteet ja kaasut = Classification of hazardous areas : flammable liquids and gases. SFS-käsikirja 59.*Helsinki, s.123.

Suomen standardisoimisliitto SFS. (2012b). *SFS-ISO 14101 - Gears. Temper Etch Inspection After Grinding*, s.6.

Suomen standardisoimisliitto SFS. (2012c). *SFS 5491. Vaaralliset kemikaalit, säiliöiden merkitseminen*, s.9.

Suomen standardisoimisliitto SFS. (2015). *SFS-EN 60079-10-1 : 2015 Räjähdysvaaralliset tilat . Osa 10-1 : Tilaluokitus . Kaasuräjähdysvaaralliset tilat Explosive atmospheres . Part 10-1 : Classification*, s.213.

Suomen standardisoimisliitto SFS. (2016). *SFS-ISO 1328-2. CYLINDRICAL GEARS – ISO SYSTEM OF ACCURACY – PART 2: DEFINITIONS AND ALLOWABLE VALUES OF DEVIATIONS RELEVANT TO RADIAL COMPOSITE DEVIATIONS AND RUNOUT INFORMATION.*

Toenshoff, H. K. ja Denkena, B. (2013). *Basics of Cutting and Abrasive Processes.*Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s.399.

TUKES. (2015a). *Atex räjähdysvaarallisten tilojen turvallisuus.* Saatavissa: https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/ATEX_rajahdysvaarallisten_tilojen_turvallisuus/310d29f5-57bc-431a-90e5-27bf0b6e0f8d (Viitattu: 12. helmikuuta 2020).

TUKES. (2015b). *Vaarallisten kemikaalien varastointi.* Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/kemikaalit_kaasu/Vaarallisten_kemikaalien_varastointi.pdf (Viitattu: 1. maaliskuuta 2020).

TUKES. (2017). *ATEX-starttipaketti.* Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-starttipaketti-2017.pdf/b440ed57-218e-4eda-a5b9-42df468e0b5f/ATEX-starttipaketti-2017.pdf> (Viitattu: 12. helmikuuta 2020).

Veco. (2019). *Chemical Etching in a World of Precision Engineering. Whitepaper series.* Saatavissa: <https://insights.vecoprecision.com/en/whitepaper-chemical-etching> (Viitattu: 4. maaliskuuta 2020).

VINK Finland Oy. (2020). *Muovitetopankki.* Saatavissa: <https://www.vink.fi/muovitetopankki> (Viitattu: 15. huhtikuuta 2020).

Vander Voort, G. F. (1999). *Metallography: Principles and Practice.*ASM International, s.752.

Vander Voort, G. F. (2004). Metallurgy and Microstructure. teoksessa *ASM Handbook, Volume 09 - Metallography and Microstructures.*ASM International, s. 21–28.

Vander Voort, G. F. (2015). *Safety in the Metallography Laboratory.* Vac Aero International Inc. Saatavissa: <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1426-safety-in-the-metallography-laboratory.html> (Viitattu: 25. helmikuuta 2020).

Williams, A. (2012). *The Sword and the Crucible - A History of the Metallurgy of European Swords up to the 16th Century*, s.223–229.

Wojtas, A. S. *ym.* (1998). Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method. *7th European Conference on Non-destructive Testing*, 3(9), s. 1–7. Saatavissa: <http://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/041/041.htm>.

Yin, G. ja Marinescu, I. D. (2017). *A heat transfer model of grinding process based on energy partition analysis and grinding fluid cooling application*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, s.1–43.

Youssef, H. A., El-Hofy, H. A. ja Ahmed, M. H. (2012). Fundamentals of Nontraditional Machining Processes. teoksessa *Manufacturing Technology. Materials, Processes, and Equipment*, s. 533–586.

Zösch, A. *ym.* (2018). Reference blocks generated by laser treatment for grinding burn inspection. *Ecndt*, s. 8. Saatavissa: <http://www.ndt.net/?id=22678>.

LIITE A: HAASTATTELUPOHJA

Q1: Do you use any NDT-methods for grinding burn inspection?

Q2: Are you familiar with nital etching or temper etching?

Q3: Do you use temper etching alongside other NDT-methods?

Q4: Do you etch according to standards such as ISO 14104 or do you have your own standardized procedure?

Q5: Do your etching inspectors have to be trained or certified?

Q6: Do your customers have any demands concerning etching?

Q7: How many ground gears are inspected? All, every other, first of a batch, last etc.?

Q8: About what size are the gears (shafts, bearings) mostly being etched?

Q9: What happens to the etched gears (shafts, bearings)? Are they going for use after some procedure or are they sent to scrap metal?

Q10: Is nital (in alcohol or water?) your primary etching solution? What else are you using?

Q11: How many containers are you using?

Q12: How often are the solutions changed or tested and how?

Q13: Do you use any reference objects to monitor the effectiveness of the solutions?

Q14: Are you familiar with baking the object after etching?

Q15: Have you noticed any major drawbacks for temper etching?

Q16: Are you currently etching manually using fixed containers (with immersion) or do you have some kind of a machine for the etching procedure?

Q17: Would you be interested in such automated machine?