

Jiri Leinonen

**Kuulapuhallus metallien kylmämuokkausmenetelmänä**

Opinnäytetyö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tradenomikoulutus  
Liiketalouden koulutusohjelma  
Kevät 2012



Koulutusala Yhteiskuntatieteiden, liiketalouden ja hallinnon ala	Koulutusohjelma Liiketalouden koulutusohjelma
Tekijä(t) Jiri Leinonen	
Työn nimi Kuulapuhallus metallien kylmämuokkausmenetelmänä	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Tuotantotalous ja logistiikka	Ohjaaja(t) Jarmo Happonen, Sami Räsänen
	Toimeksiantaja Blastman Robotics Oy
Aika Kevät 2012	Sivumäärä ja liitteet 36
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kuulapuhalluksen (shot peening) käyttöä metallien kylmämuokkauksessa. Työssä pyrittiin selvittämään kuulapuhallusprosessiin liittyviä keskeisiä asioita, kuten prosessin kontrollointia, puhallukseen tarvittavaa laitteistoa ja menetelmän tuomia hyötyjä. Tavoitteena oli myös antaa tietoa muun muassa puhallusprosessin käyttömahdollisuuksista, rajoituksista ja käytön laajuudesta. Työn toimeksiantaja on Blastman Robotics Oy, joka on maailman johtava raepuhallusrobottien ja –manipulaattoreiden toimittaja.</p> <p>Tämä opinnäytetyö on luonteeltaan tietokantatutkimus. Elektronisen median lisäksi lähdemateriaalina on käytetty yleisesti metallien kylmämuokkausta käsittelevää kirjallisuutta. Tutkimuksen tiedonhankintaa rajoitti kuulapuhallusta käsittelevän kirjallisuuden vaikea saatavuus.</p> <p>Tutkimuksesta selvisi, että metallien kylmämuokkaus kuulapuhaltamalla on tarkkuutta vaativa prosessi, jossa eri parametrien kontrolloinnilla voidaan vaikuttaa puhalluksen lopputulokseen. Kuulapuhallusprosessin tuomia etuja on mahdollista hyödyntää monilla eri teollisuudenaloilla, kuten auto-, lentokone- ja raskaan kaluston teollisuudessa. Kuulapuhalluksessa tuotettava kuulasuihku voidaan tuottaa sinkopyörällä, paineilmalaitteistolla tai erilaisilla automaattisilla kuulapuhallusroboteilla ja –laitteilla. Tutkimuksesta ilmeni, että kuulapuhalluksessa voidaan käyttää erilaisia kuulia, kuten rauta-, teräs-, keraami- ja lasikuulia sekä teräslankakatkoja.</p> <p>Kuulapuhalluksella ei ole kovin paljon rajoittavia tekijöitä. Yhdeksi merkittävimmistä ongelmista voi muodostua puhalluksella tuotetun jännityksen häviäminen. Sen voi aiheuttaa käsiteltävän kappaleen puhalluksen jälkeinen koneistus tai korkeille lämpötiloille altistuminen. Kuulapuhalluksen kustannukset muodostuvat useista eri osatekijöistä, kuten käsiteltävän kappaleen koosta, muodosta ja kovuudesta sekä puhalluksen peitosta ja intensiteetistä. Kuulien materiaali, kovuus ja nopeus sekä niiden hajoaminen vaikuttavat myös kustannuksiin.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Kuulapuhallus, intensiteetti, väsymiskestävyys
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto



School Business	Degree Programme Business Administration
Author(s) Jiri Leinonen	
Title Shot Peening as a Method of Cold Working of Metals	
Optional Professional Studies Industrial management and logistics	Instructor(s) Jarmo Happonen, Sami Räsänen
	Commissioned by Blastman Robotics Oy
Date Spring 2012	Total Number of Pages and Appendices 36
<p>The purpose of this thesis was to research the use of shot peening as a method of cold working of metals. The main goal of this thesis was to study the key facts related to shot peening, for example controlling the process, necessary equipment and benefits of the process. Another objective was also to give information for possibilities of using shot peening as well as restrictions and the extent of using this method. The thesis was commissioned by the Blastman Robotics Oy which is the world's leading supplier of advanced robotic abrasive blast-cleaning systems.</p> <p>The thesis was conducted by researching databases. The source material consists of electronic media and literature on cold working of metals generally. The information seeking for this research was restricted by a difficult access to literature on shot peening.</p> <p>The study indicated that cold working metals with shot peening is a process which demands accuracy. The result of shot peening can be affected by different kinds of parameters. The benefits of shot peening process are possible to be exploited in many industry sectors as in automotive, aircraft and heavy equipment industry. The shot stream produced in the shot peening process can be produced with wheel blasting, compressed air or different kinds of shot peening robots. This piece of research revealed that it is possible to use many kinds of shot types in the shot peening process, for example steel, iron, ceramic and glass shots and steel cut wires.</p> <p>Shot peening does not have many restrictions. One of the most significant problems can be caused from the loss of the compressive stress. Machining and high temperatures after shot peening process can remove the compressive stress from the surface of the material. The costs of shot peening consists of many factors: treated material, shape and hardness as well as the coverage of shot peening and the intensity of it. The material, hardness and speed of shots and also breaking of shots are factors which impact costs too.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	shot peening, intensity, fatigue strength
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	2
2 METALLIEN KYLMÄMUOKKAUS .....	3
2.1 Kylmävalssaus .....	3
2.2 Syväveto .....	4
2.3 Langanveto .....	5
3 KUULAPUHALLUS.....	6
3.1 Prosessin kontrollointi ja puhallustehon mittaus .....	7
3.1.1 Puhalluksen peitto .....	7
3.1.2 Käytettävien kuulien ja puhallustavan kontrollointi .....	9
3.1.3 Intensiteetin mittausmenetelmä ja valinta .....	9
3.2 Kuulapuhallukseen soveltuvat kuulat .....	11
3.2.1 Teräs- ja rautakuulat .....	11
3.2.2 Teräslankakatko .....	12
3.2.3 Lasikuulat .....	13
3.2.4 Keraamiset kuulat .....	14
3.3 Kuulapuhalluksessa käytettävät laitteet.....	14
3.3.1 Sinkopyöriä .....	14
3.3.2 Paineilmajärjestelmä .....	15
3.3.3 Automatisoidut kuulapuhalluslaitteet ja -robotit.....	17
3.4 Kuulapuhalluksen rajoittavat tekijät.....	18
3.5 Puhallusprosessin kustannukset ja pinnan jälkikäsittely .....	19
4 KUULAPUHALLUKSEN KÄYTTÖKOHTEET .....	20
4.1 Suihkumoottoreiden siivet.....	20
4.2 Kiertokanget .....	20
4.3 Kampiakselit .....	21
4.4 Vaihteistojen osat.....	22
4.5 Akselit.....	23
4.6 Jouset .....	24
4.7 Vääntövarret .....	25
5 KUULAPUHALLUSMUOKKAUKSEEN SOVELTUVAT MATERIAALIT .....	26

5.1 Lujat teräkset .....	26
5.2 Alumiiniseokset.....	26
5.3 Valuraudat.....	27
5.4 Sintratut metallit.....	28
6 KUULAPUHALUKSEN METALLURGISET HYÖDYT .....	29
6.1 Metallin väsyminen .....	29
6.2 Jännityskorroosio .....	30
6.3 Raerajakorroosio .....	33
6.4 Kuorintakorroosio .....	34
7 POHDINTA .....	35
LÄHTEET.....	38

## SYMBOLILUETTELO

ADI Austempered Ductile Iron

BDC Bottom Dead Center

CNC Computerized Numerical Control

FEM Finite Element Method

PLC Programmable Logic Controller

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee kuulapuhalluksen (shot peening) käyttöä metallien kylmämuokkausmenetelmänä. Kuulapuhalluksen avulla metallista saadaan väsymis- ja korroosiokestävyydeltään parempi. Puhallusprosessi tuottaa lisäksi samat hyödyt kuin raepuhallus, joka on menetelmältään vastaavanlainen kuin kuulapuhallus. Kuulapuhallus eroaa raepuhalluksesta pääosin käyttötarkoituksensa perusteella. Kuulapuhalluksessa pyritään hyödyntämään menetelmän tuottama puristusjännitys materiaalin pintaan, minkä ansiosta materiaalin väsymiskestävyys paranee. Raepuhalluksessa tavoitteena on yleensä pinnan puhdistaminen ja silottaminen.

Opinnäytteen toimeksiantaja on Blastman Robotics Oy, joka on maailman johtava raepuhallukseen tarkoitettujen robottien ja manipulaattoreiden toimittaja. Yrityksellä on yli 25 vuoden kokemus asiakkaille räätälöityjen laitteiden toimittamisesta eri teollisuusalojen toimijoille. Tilaajayritys haluaa lisätietoa kuulapuhallusmenetelmän käytöstä ja mahdollisuuksista, jotta se voisi hyödyntää sitä liiketoiminnassaan.

Opinnäytetyö suoritetaan pääosin tietokantatutkimuksena elektronista mediaa hyödyntäen kuulapuhallusta käsittelevän kirjallisuuden vähäisen määrän ja vaikean saatavuuden vuoksi. Metallien kylmämuokkausta yleisesti käsittelevää kirjallisuutta on pyritty kuitenkin hyödyntämään.

Opinnäytetyön tarkoituksena on antaa tilaajayritykselle mahdollisimman paljon keskeistä tietoa kuulapuhalluksen käyttöön liittyvistä asioista. Työn tavoitteena on selvittää puhallusprosessiin vaikuttavat parametrit, puhallukseen tarvittava laitteisto ja prosessin tuottamat hyödyt. Lisäksi tavoitteena on antaa täsmällistä tietoa esimerkiksi prosessin käyttömahdollisuuksista, rajoituksista ja käytön laajuudesta. Pohjustuksena kuulapuhallustutkimukselle käydään työn alussa läpi yleisesti metallien kylmämuokkaukseen liittyviä seikkoja ja eri kylmämuokkausmenetelmiä.

## 2 METALLIEN KYLMÄMUOKKAUS

Metallien muokkaamista rekristalisaatiolämpötilan alapuolella kutsutaan kylmämuokkaukseksi. Sitä käytetään usein jatkokäsittelytoimenpiteenä kuumamuokatulle tuotteelle (Lepola & Makkonen 2009, 81). Kylmämuokkauksen vaikutuksesta metallissa tapahtuu muokkauslujittumista: Metallin kovuus ja lujuus suurenevät, mutta sitkeys ja muovautumiskyky vähenevät. Lisäksi metallin mikrorakenne muuttuu rakeiden litistytessä. (Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, Tuomikoski & Koivisto 1997, 73.)

Kylmämuokkaukselle on ominaista muokkausvoiman lisääntymisen tarve muokkausasteen noustessa. Muokkausasteen liian suuri kasvu voi aiheuttaa metallin murtumisen. Kylmämuokatun tuotteen pinnanlaatu on hyvä, koska pinnasta saadaan kirkas ja sileä. Sen mittatarkkuus on kuumamuokattuihin tuotteisiin verrattuna selvästi parempi. Kylmämuokkauksen avulla voidaan valmistaa ohuita kappaleita. Muokattaviin kappaleisiin voi jäädä sisäisiä jännityksiä kylmämuokkausprosessin aikana, ellei niitä poisteta hehkuttamalla. (Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, Tuomikoski & Koivisto 1997, 73; Lepola & Makkonen 2009, 81.) Kylmämuokkausmenetelmiä ovat muun muassa kylmävalssaus, langanveto ja syväveto sekä kuulapuhallus, jota käsitellään tarkemmin luvuissa 3, 4, 5 ja 6.

### 2.1 Kylmävalssaus

Kylmävalssauksessa lähtömateriaalina toimii kuumavalssattu nauha, joka on ainepaksuudeltaan noin 1,5 - 6 millimetriä (Lepola & Makkonen 2009, 81). Kylmävalssauksen tarkoituksena on muuttaa kuumavalssattujen nauhojen mekaanisia ja teknisiä ominaisuuksia sekä paksuutta puristamalla niitä valssien välissä ilman esilämmitystä (Suomen ympäristökeskus 2002, 7).

Kuumavalssatun nauhan pinnasta poistetaan hilsekerros ennen kylmävalssauksen aloittamista. Hilseen poisto tapahtuu hapossa peittaamalla, jonka jälkeen nauha pestään ja kuivataan. Kuivauksen jälkeen nauhaan laitetaan suojaöljy, joka toimii myös voiteluaineena valssauksessa. Tämän jälkeen nauha ohennetaan kylmävalssaamalla käyttötarkoituksen mukaiseen 0,2 – 0,3 millimetrin paksuuteen. (Lepola & Makkonen 2009, 81.)



Kylmävalssauksen seurauksena teräs lujittuu ja sen muokattavuus on huono. Tämän vuoksi nauhalle tehdään rekristallisointihevkuutus, joka suoritetaan suojakaasulla täytetyissä kellouuneissa pinnan hapettumisen estämiseksi. Hehkutuksen jälkeen nauhalle suoritetaan viimeistelyvalssaus, jonka tarkoitus on parantaa nauhan pinnanlaatua ja ulkonäköä. (Lepola & Makkonen 2009, 81.)

Kylmävalssattuja tuotteita käytetään pääosin vaativiin tuotteisiin nauhoina ja levyinä, jotka omaavat korkeatasoisen pinnan viimeistelyn ja tarkkaan määritetyt metallurgiset ominaisuudet (Suomen ympäristökeskus 2002, 7). Eri kylmämuokkausmenetelmillä valmistettavista tuotteista ovat kylmävalssatut ohutlevyt merkittävän tuoteryhmä. Muokattavat teräsohutlevyt ja rakenneteräsohutlevyt ovat niistä tärkeimmät. Kylmävalssattuja ruostumattomia levyjä ja alumiinilevyjä käytetään myös paljon. (Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, Tuomikoski & Koivisto 1997, 73.)

## 2.2 Syväveto

Syväveto on prosessi, jossa levyaihiosta muovataan yleensä astiamaisia tai kuppimaisia tuotteita. Syvävedon suorittamisessa käytetään kaksitoimista puristinta sekä työkaluja, joita ovat vetorengas, pidätysrengas ja painin. Vedon aikana painin pakottaa aihion liukumaan pidätinlevyn ja vetorengaan välistä. Aihio muovautuu kuppimaiseksi tuotteeksi virratessaan vetorengaan pyörityksen yli. Muokattavan levyn paksuus säilyy yleensä samana, mutta on myös mahdollista, että levy paksuuntuu aihion tyssäytymisen vuoksi. (Kivivuori 2006, 25.)

Syvävedetyillä ohutlevytuotteilla on monia etuja esimerkiksi hitsaamalla tai valamalla valmistettuihin verrattuna. Etuja ovat muun muassa rakenteen keveys, jäykkyys ja lujuus, hyvä pinnanlaatu sekä mahdollisuus pinnoitteiden käyttöön. Lisäksi tuotteet soveltuvat hyvin sarjatuotantoon, mikä on suuri etu kustannussäästöjen vuoksi. Tuotteen hinta saadaan alhaiseksi työkalukustannusten jakautuessa useaan osaan. Syvävetämällä voidaan muovata esimerkiksi terästä, messinkiä, kuparia, alumiinia ja magnesiumia. (Katainen & Mäkinen 1997, 172 - 173.) Syvävetämällä valmistettuja tuotteita käytetään muun muassa autojen korirakenteissa ja erilaisissa suojakoteloissa (Kärnä, Lammasaari & Lehtonen 1986, 280).

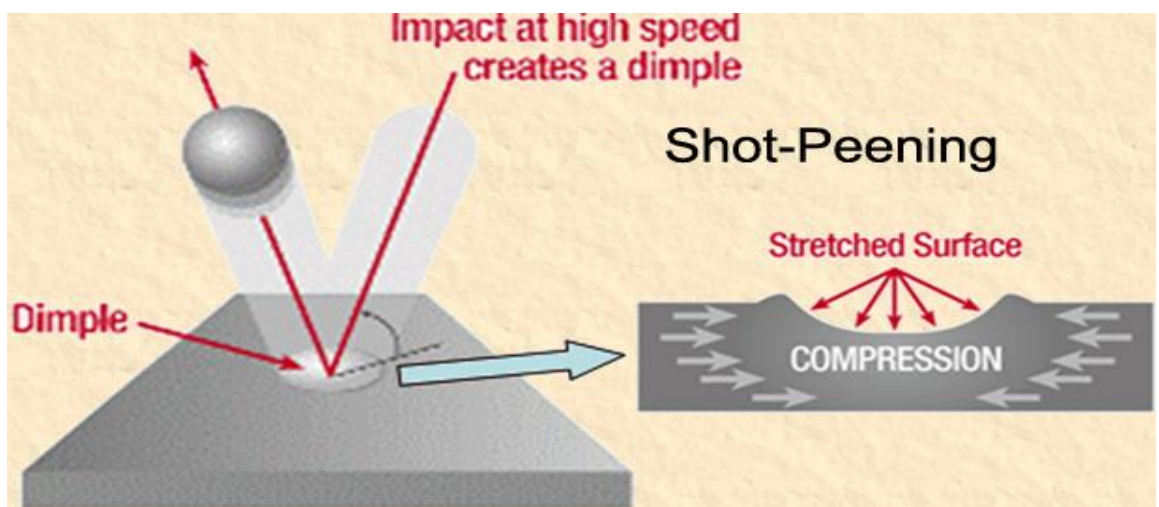
### 2.3 Langanveto

Langanveto on kylmämuokkausmenetelmä, jossa tankojen tai langan läpimittaa pienennetään vetokivien läpi vetämällä. Vetokivissä on kartionmuotoisia aukkoja, joiden pienin halkaisija on vedettävän langan lähtöhalkaisijaa pienempi. Yleensä langanvedossa käytettävä raaka-aine on kuumavalssaamoilta toimitettua tankoa, joka on halkaisijaltaan 5,5 – 16 millimetriä. Langanvetoa suorittavilla langanvetolaitoksilla on tyypillisesti laitteet tangon esikäsitteilyä, kuiva- tai märkävetoa, lämpökäsittelyä ja viimeistelyä varten. (Suomen ympäristökeskus 2002, 12.)

### 3 KUULAPUHALLUS

Kuulapuhallus (shot peening) on metallien kylmämuokkausmenetelmä, jossa käsiteltävän kappaleen pintaan kohdistetaan kuulasuihku. Menetelmän seurauksena muokattavan kappaleen pintaan muodostuu puristusjännitystä. Kuulapuhallus on lähes sama asia kuin raepuhallus, mutta eroaa siitä käyttötarkoituksensa ja laajuutensa perusteella. Raepuhalluksen tavoitteena on pääasiassa pintojen puhdistaminen ja pinnan valmistelu ennen pinnoitusta. Kuulapuhalluksella saadaan aikaan samat hyödyt kuin raepuhalluksella, mutta sen lisäksi sillä voidaan vaikuttaa pinnan metallurgiseen rakenteeseen, joka lujittuu kuulapuhallusprosessissa. Kuulapuhallus aiheuttaa puristusjännitystä, joka parantaa kappaleen väsymiskestävyyttä ja vähentää jännityskorroosiota. Kappaleen väsymiskestävyyttä on mahdollista pidentää aina 1000 %:iin asti riippuen kappaleen ja puhallettavien kuulien materiaalista ja laadusta sekä puhalluksen tehokkuudesta. (Linna 2007, 10; Räsänen 2010, 5.)

Puhallettavien kuulien iskeytyessä kappaleen pintaan ne muodostavat pieniä puolipallomaisia kuoppia aiheuttaen pintamateriaalin plastisen virtauksen materiaalin venyessä. Puhalluksen jälkeen kappaleen pinta on puristuksessa ja pintakerroksen alla oleva kerros vedossa. Pinnan puristusjännityksen ja alemman kerroksen vetojännityksen välille voi muodostua suurikin ero, minkä vuoksi kappaleen väsymiskestävyys paranee. Kuulapuhalluksen vaikutus ulottuu yleensä enimmillään 0,254 millimetriä pinnan alapuolelle ja tätä syvemmällä ei enää tapahdu plastisia muutoksia. (Linna 2007, 10.) Kuulapuhalluksen vaikutus kappaleen pintaan on havainnollistettu kuviossa 1.



Kuvio 1. Kuulapuhalluksen vaikutus kappaleen pintaan (Räsänen 2010, 94)

Kuulapuhalluksella voidaan vaikuttaa pinnan jännitysten jakautumiseen parantavasti esimerkiksi kuumamuokkauksen jälkeen. Kuulapuhalluskäsittely sopii erityisen hyvin hiotuille pinnoille, koska hionnassa syntyvä vetojännitys voidaan muuttaa kuulapuhalluksella puristusjännitykseksi. Kuulapuhalluksen avulla saatava hyöty on kuitenkin rajallista, koska menetelmällä tuotettu jäännösjännitys ei voi kasvaa tiettyä pistettä suuremmaksi riippuen kohteen materiaalista ja ominaisuuksista. (Linna 2007, 10.) Puristusjännityksen suuruus heti pinnan alapuolella on vähintään puolet materiaalin myötörajasta kuulapuhalluksen jälkeen (Metal Improvement Company).

### 3.1 Prosessin kontrollointi ja puhallustehon mittaaminen

Kuulapuhallusprosessin aikana pääasiallisesti huomioon otettavia tekijöitä ovat puhalluksen peitto, kuulien koko, materiaali ja kovuus sekä puhalluksen nopeus ja puhalluskulma. Nämä tekijät vaikuttavat puhalluksen intensiteettiin, joka mittaa puristusjännityksen suuruutta kappaleen pinnassa. Intensiteetin määrittämisessä käytetään yleensä apuna Almen-testiliuskoja, joilla voidaan mitata intensiteetin suuruus liuskan taipumisen perusteella. (Saario 2008, 18.)

#### 3.1.1 Puhalluksen peitto

Puhalluksen peitto tarkoittaa kuulien osumapinta-alan suhdetta koko puhalluspinta-alaan. Puhalluksen peiton tulee olla riittävän suuri, jotta kappaleen väsymiskestävyysominaisuudet saadaan aikaiseksi. Kun puhalluspinta-ala on kokonaan kuulapuhallettu kutsutaan sitä 100 %:n peitoksi. Tällöin pintakerroksen jäännösjännitykset ovat tasaiset. Alle 100 %:n peitto on tehoton, koska kuulapuhaltamaton alue edistää epätasaisten jäännösjännitysten jakautumista pintakerroksessa. Yli 100 %:n peitto voidaan saavuttaa altistusajan moninkertaistamisella 100 %:n peittoa käyttäen. (Linna 2007, 11; Karuppanan, Romero, de los Rios, Rodopoulos & Levers 2002, 102.)

Kuulapuhallusprosessin alkuvaiheissa kuopat muodostuvat todennäköisimmin ilman päällekkäisyyksiä, joten peitto kasvaa alussa lineaarisesti ajan kanssa. Peiton määrän kasvu hidastuu ajan kuluessa, koska todennäköisyys kuoppien päällekkäisyyksien muodostumiselle kasvaa. Tästä johtuen lähestyminen kohti 100 %:n peittoa on eksponentiaalista. Käytännössä

100 %:n peittoa ei kuitenkaan voida tarkasti mitata eikä saavuttaa. Mittaus voidaan suorittaa tarkasti 98 %:n peittoon asti ja tämän vuoksi sitä pidetään yleisesti täydellisenä peittona. (Karuppanan, Romero, de los Rios, Rodopoulos & Levers 2002, 102.)

Peittoa voidaan arvioida esimerkiksi visuaalisesti suurennusta apuna käyttäen. Puhalletun kappaleen pintaa verrataan jo peitoltaan tunnettujen pintojen valokuviiin, jonka jälkeen voidaan määrittää puhalluksen peiton arvo hakemalla pinnan peittoa vastaava kuva. Lisäksi on olemassa epäsuoria menetelmiä, joissa jäännösjännityksen suuruutta mittaamalla voidaan arvioida peiton kattavuutta. Jäännösjännityksen määrittämisessä voidaan käyttää apuna muun muassa röntgendiffarktiota. (Linna 2007, 11.) On myös olemassa teoreettisia malleja, jotka on kehitetty ennustamaan puhalluksen peiton kehitystä ja eräs niistä on nimeltään Avramin kaava.

Avramin kaava lähtee oletuksesta, että jokainen puhallettu partikkeli tekee materiaaliin saman kokoisen kuopan ja että partikkelit osuvat pintaan satunnaisesti, mutta kuitenkin sellaisella voimakkuudella, joka on yhtenäinen riittävän ajanjakson ajan. Kaavan mukaan kuoppien koko, puhallusaste ja alistusaika ennustavat puhalluksen peittoa. (Karuppanan, Romero, de los Rios, Rodopoulos & Levers 2002, 102.) Avramin kaava on seuraavanlainen:

$$C(t) = 100 \left\{ 1 - \exp \left( - \frac{3r^2 \dot{m} t}{4A\bar{r}^3 \rho} \right) \right\}$$

$C(t)$  = puhalluksen peitto tiettyä aikana

$r$  = kuoppien keskimääräinen säde

$A$  = alue, johon kuulapuhallus on suoritettu

$t$  = kuoppien tekoon käytetty aika

$\dot{m}$  = kuulien massavirta

$\rho$  = puhalluksen tiheys

$\bar{r}$  = kuulien keskimääräinen säde. (Karuppanan, Romero, de los Rios, Rodopoulos & Levers 2002, 102 – 103.)

### 3.1.2 Käytettävien kuulien ja puhallustavan kontrollointi

Kuulien koolla on vaikutusta puhalluksen intensiteettiin ja peittoon. Puhallusintensiteetti kasvaa kuulien koon kasvaessa, mutta puhalluksen peitto puolestaan pienenee. Yleensä käytännöllisintä on käyttää pienintä kuulakokoa, jolla haluttu intensiteetti saavutetaan, koska tällä tavalla saadaan nopeiten aikaiseksi tavoiteltu peitto. Puhallettavassa kappaleessa olevat kulmat voivat myös rajoittaa käytettävien kuulien kokoa. Pinnan kulmapuhallus on mahdollista ainoastaan jos kuulan säde on puhallettavan kulman pyöristyssädettä pienempi. (Linna 2007, 11.)

Kuulan materiaali ja kovuus vaikuttavat myös puhalluksen intensiteettiin. Kuulan materiaalin tiheyden kasvaessa myös intensiteetti kasvaa kappaleeseen kohdistuvan iskuenergian ollessa suurempi. Lisäksi kuulien tulee olla kovempia kuin puhallettava materiaali. Puhallettavaa materiaalia pehmeämmät kuulat laskevat intensiteettiä. Intensiteettiin vaikuttaa myös puhallusnopeus, jolla tarkoitetaan kohtisuoraa nopeutta suhteessa puhallettavaan pintaan. Puhallusnopeus lisää intensiteettiä, mutta kasvattaa kuulien hajoamisen riskiä. Mikäli puhalluskulma poikkeaa 90:stä asteesta vaikuttaa se intensiteettiin laskevasti. (Linna 2007, 11 – 12.)

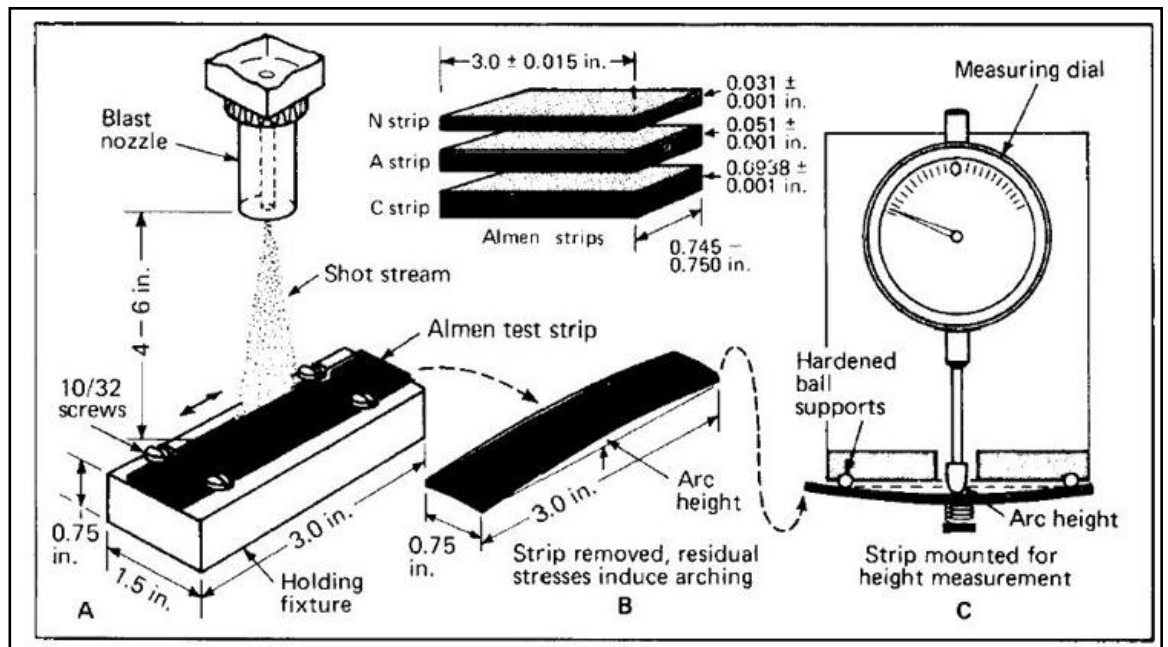
### 3.1.3 Intensiteetin mittaussuomenetelmä ja valinta

Intensiteetin mittauksessa apuna käytetään Almen-testiliuskaa, joka on valmistettu teräksestä. Liuskan pinta kuulapuhalletaan, mikä aiheuttaa sen taipumisen. Liuskan kaaren korkeus mitataan kalibroidulla Almen-mittarilla ja saatu tulos kertoo suoraan saavutetun intensiteetin arvon. (Räsänen 2010, 87.) Mittaustuloksen ollessa esimerkiksi 0,013 A tarkoittaa, että kaaren korkeus on 0,013 tuumaa. A-kirjain ilmaisee puhalluksessa käytettävän levyn paksuuden. Intensiteetin mittauksessa voidaan luonnollisesti käyttää myös SI-järjestelmän suureita. Jotta kaaren korkeutta voidaan pitää puhalluksen tehon mittana, täytyy puhalluksen olla tehty 100 %:n peittoa käyttäen. (Linna 2007, 12.) Almen-liuskoja on kolmea eri tyyppiä: A, N ja C. Kaikki tyypit ovat saman pituisia ja levyisiä, mutta eri paksuisia. (Electronics Incorporated.)

Almen-liuskojen paksuudet:

- N-liuska: 0,79 mm
- A-liuska (yleisin): 1,29 mm
- C-liuska: 2,39 mm. (Metal Improvement Company 2005, 41.)

A-liuskaa käytetään enimmäkseen keskinkertaista intensiteettiä tavoiteltaessa ja puhallettaessa teräskuulilla tai teräslankakatkoilla. N-liuska soveltuu käytettäväksi alemman intensiteetin kohteissa ja silloin kun puhalluksessa käytetään keraamisia tai lasisia kulia. C-liuskaa käytetään yleensä korkeaa intensiteettiä mitattaessa. (Electronics Incorporated.) Kuviossa 3. on esitetty intensiteetin mittaukseen tarvittava Almen-testilaitteisto.



Kuvio 3. Intensiteetin mittaus Almen-testilaitteistolla (Linna 2007, 12)

Intensiteetti on käytännöllistä valita riittävän pieneksi suhteessa tavoiteltuun jäännösjännitykseen. Käytännössä pienin intensiteetti on se, millä tavoiteltu pintajännitys saavutetaan. Pienen intensiteetin etuna ovat puhallusprosessin edulliset kustannukset, koska kuulakoko ja puhalluksen kesto ovat silloin alhaisimmillaan. Ohuita kappaleita puhallettaessa täytyy intensiteetissä huomioida vastakkaiselle puolelle mahdollisesti syntyvä vetojännitys. Maksimi-intensiteetti on täten riippuvainen kappaleen paksuudesta ja materiaalista. Intensiteettiin vaikuttavat lisäksi metalliin tehdyt pintakäsittelyt. Metallin pinnan kovuuden

kasvaessa on myös intensiteetin kasvettava, jotta tietty puristusjännitys saavutetaan tietyllä syvyydelle. (Linna 2007, 12 – 13.)

### 3.2 Kuulapuhallukseen soveltuvat kuulat

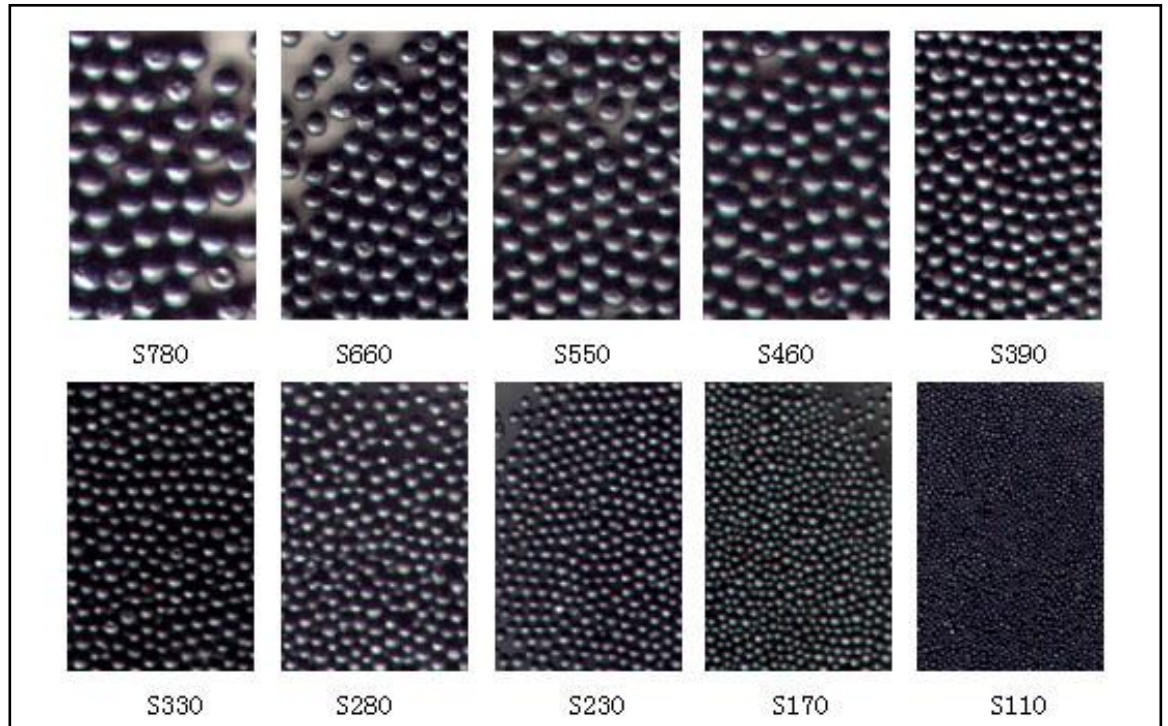
Kuulapuhalluksessa voidaan käyttää monia erilaisia kuulia, kuten teräskuulia, rautakuulia, lasikuulia, keraamisia kuulia tai teräslankakatkoja. Kuulapuhalluksessa käytetään paljon rauta- ja teräskuulia, mutta myös lasikuulien ja keraamisten kuulien suosio on lisääntynyt (Linna 2007, 13).

#### 3.2.1 Teräs- ja rautakuulat

Teräskuulat valmistetaan nestemäisestä teräksestä atomisoimalla, jonka jälkeen ne kovetetaan lämpökäsittelyllä halutunlaisiksi. Teräskuulien etuna on parempi kestävyys verrattuna lasikuuliin, rautakuuliin tai keraamisiin kuuliin. Teräskuulat voidaan kierrättää jopa 3000 kertaa niiden sitkeyden ja kestävyuden ansiosta. Hyvän kestävyuden ansiosta myös puhalluksen laatu paranee ja puhallusvälineistö säilyy parempana. Teräskuulien etuna on niiden kyky saavuttaa kappaleeseen maksimi-intensiteetti. Teräskuulia on saatavana myös hiiliteräksestä ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuna. Teräskuulien käytön huonoja puolia ovat kalliit materiaalikustannukset ja kuulien kestävyys verrattuna teräslankakatkoihin. Teräskuulien kovuus on Rockwell-asteikolla välillä C 40 – 50. (Industrial Metal Finishing, Inc.; Linna 2007, 13; Räsänen 2010, 24.)

Valettujen rautakuulien kovuus on välillä C 20 – 60. Valetut rautakuulat ovat alkukustannuksiltaan halvempi vaihtoehto kuin teräskuulat, mutta ne ovat myös vähemmän kestäviä ja aiheuttavat täten enemmän laitteiston huoltokustannuksia. (Linna 2007, 13.) Kuviossa 3. ja taulukossa 1. on esitetty SAE-standardin mukaiset teräskuulakoot.





Kuvio 3. Teräskuulakoot SAE-standardin mukaisesti (Räsänen 2010, 24)

Taulukko 1. Teräskuulakoot millimetreinä (Räsänen 2010, 24)

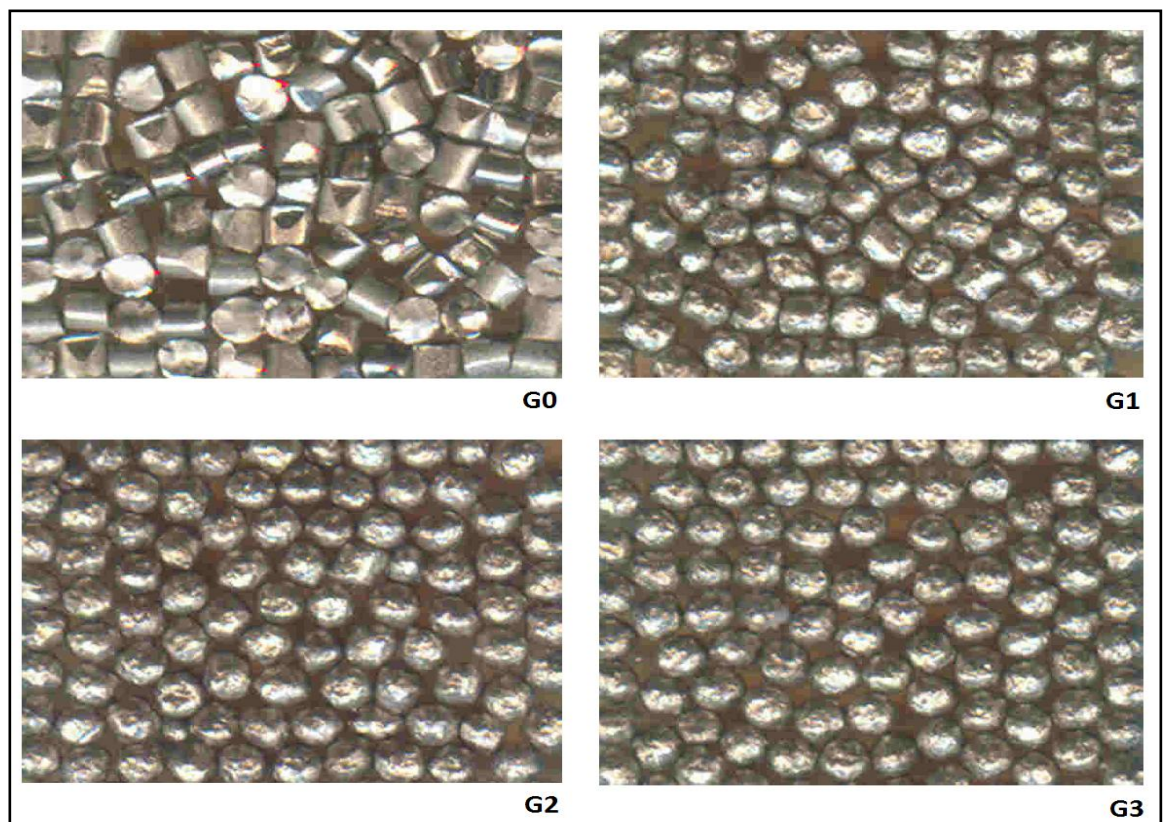
SAE- standardi	S780	S660	S550	S460	S390	S330	S280	S230	S170	S110	S070
Koko (mm)	2.5	2.0	1.7	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.3	0.2

### 3.2.2 Teräslankakatko

Teräslankakatko on teräslangasta leikattu pelletti, jonka pituus on saman suuruinen kuin teräslangan halkaisijan. Leikkauksen jälkeen teräslankakatkon reunat pyöristetään, jotta ne eivät jäisi teräviksi. Teräslankakatkolla on monia hyviä puolia. Teräslankakatko tuottaa käsiteltävään materiaaliin tasaisen tuloksen koostumuksensa vuoksi. Se on lisäksi kestävämpi kuin teräs-, lasi- tai keraamikuulat ja sitä voidaan käyttää myös hiiliteräksestä ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuna. Teräslankakatkon huonoja puolia ovat korkeat

materiaalikustannukset ja rajoitetut kokomahdollisuudet. (Industrial Metal Finishing, Inc.; Räsänen 2010, 28.) Kuvio 4. esittää muodoltaan erilaisia lankakatkoja SAE-standardin mukaan. Lankakatkojen muodot ovat

- G0, leikattu
- G1, käsitelty
- G2, kaksoiskäsitelty
- G3, pallomaiseksi käsitelty. (Räsänen 2010, 28.)



Kuvio 4. Teräslankakatkon muodot SAE-standardin mukaan (Räsänen 2010, 28)

### 3.2.3 Lasikuulat

Lasikuulien valmistuksessa käytetään natriumkarbonaatti – kalsiumoksidilasia. Lasikuulia voidaan käyttää esimerkiksi ohuiden kappaleiden puhalluksessa. Lisäksi niitä käytetään tiettyjen metallien, kuten alumiinin, titaanin ja ruostumattoman teräksen puhaltamiseen kun

on vaarana, että metalli reagoi rauta- tai metallikuulien kanssa niillä puhallettaessa. Lasikuulia voidaan käyttää muun muassa lentokoneiden moottoreiden ja turbiinien osien kuulapuhalluksessa. Lasikuulien etuja ovat esimerkiksi hyvä kokovalikoima ja alhaiset materiaalikustannukset. Lasikuulat eivät aiheuta metallin likaantumista tai jätä jäämiä työstettävään kappaleeseen reagoimattomuutensa vuoksi. Lasikuulien haittana on niiden heikkous verrattuna teräskuuliin ja keraamisiin kuuliin. (Industrial Metal Finishing, Inc.; Linna 2007, 13; Räsänen 2010, 42.)

#### 3.2.4 Keraamiset kuulat

Keraamisten kuulien valmistus perustuu oksidien fuusioimiseen korkeissa lämpötiloissa. Keraamiset kuulat ovat erittäin kestäviä eivätkä ne murru helposti. Niitä käytetään esimerkiksi lentokoneteollisuudessa moottorien lapojen ja turbiinien kuulapuhallukseen. Keraamisten kuulien etuna on niiden hyvä uusiokäyttöaste. Keraamisten kuulien käyttöä rajoittaa niiden kalleus. (Räsänen 2010, 36; Linna 2007, 13.)

### 3.3 Kuulapuhalluksessa käytettävät laitteet

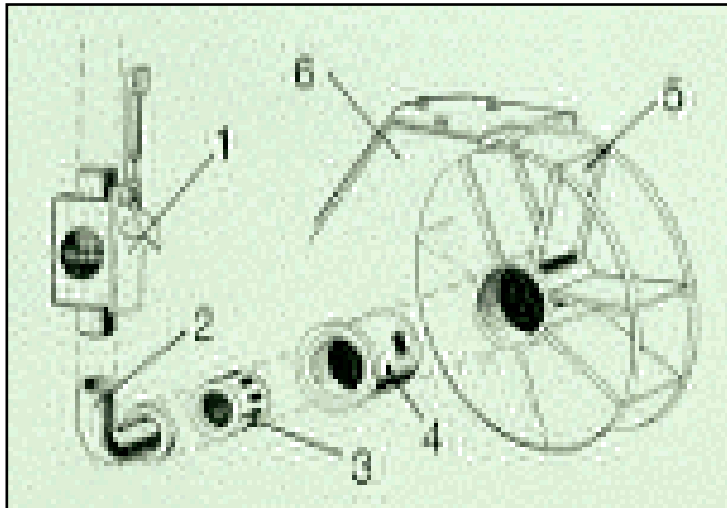
Kuulasuihku tuotetaan kuulapuhalluksessa perinteisesti joko sinkopyörällä tai paineilman avulla. Peruskomponentteja puhalluslaitteistoissa ovat puhalluslaite, kuulien kierrätyslaite ja liikuttelulaitteisto puhallettavalle kappaleelle (Linna 2007, 13). Nykyään on olemassa myös täysin automatisoituja kuulapuhalluslaitteita ja -robotteja, jotka haastavat perinteiset menetelmät tarkkuudellaan ja tehokkuudellaan.

#### 3.3.1 Sinkopyörä

Sinkopyörän asetukset ja ominaisuudet vaikuttavat paljon puhalluksen lopputulokseen. Lopputulokseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat sinkopyörän pyörimisnopeus, maksimi rakeenvirtaus, raesuihkun virtauskuvion paikka sekä puhalluksen voimakkuuden tasalaatuisuus ja peittoalue. Sinkopyörälaitteissa voidaan käyttää erilaisia kappaleenkääntäjiä, kuten lastaavia ja purkavia robotteja sekä indeksipöytiä. Sinkopyörän käytön etuja ovat

esimerkiksi puhallusnopeuden hyvä kontrollointi ja kosteusongelmien vähäisyys verrattuna paineilmalla tapahtuvaan puhallukseen. (Linna 2007, 13; Räsänen 2010, 79.) Sinkopyörän rakenne on havainnollistettu kuviossa 5. Sinkopyörän osat ovat

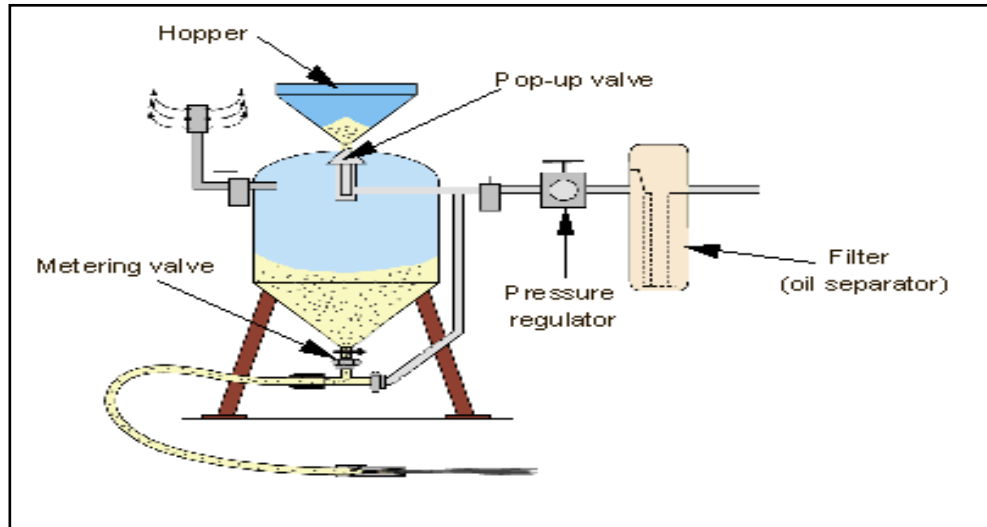
1. Venttiili
2. Syöttöputki
3. Kiihdytin
4. Jakokappale
5. Sinkopyörän siipi
6. Sinkopyörän kotelo. (Räsänen 2010, 78.)



Kuvio 5. Sinkopyörän rakenne (Räsänen 2010, 78)

### 3.3.2 Paineilmajärjestelmä

Paineilmalla tapahtuvassa puhalluksessa kuulat johdetaan puhallusletkun paineilmavirtaan, josta kuulat kulkeutuvat suuttimen kautta kappaleen pintaan. Paineilman tulee olla puhdasta, koska esimerkiksi ilman seassa oleva öljy likaa puhallettavan kuulan ja siten myös käsiteltävän pinnan. Kosteus on myös haitallista muun muassa ruosteen muodostumisen vuoksi. (Linna 2007, 13; Räsänen 2010, 71.) Paineilmajärjestelmälaiteisto on esitetty kuviossa 6.



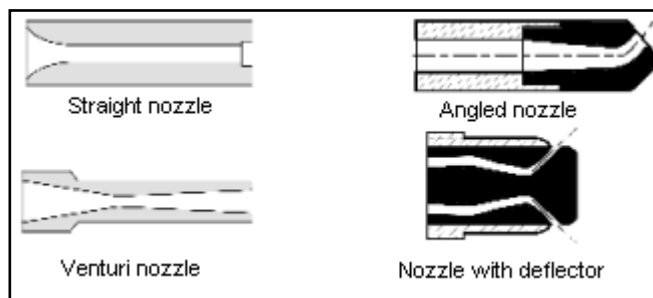
Kuvio 6. Paineilmajärjestelmä (Räsänen 2010, 74)

Paineilmapuhalluksessa muita huomioon otettavia tekijöitä:

- Paineilmaputkiston tulee olla mahdollisimman lyhyt ja suora sekä halkaisijaltaan mahdollisimman suuri, koska näin voidaan minimoida paineilmahäviöt.
- Kaikkien osien ja liittimien halkaisijoiden tulee olla yhtä suuret paineilmanputkiston halkaisijan kanssa turbulenssin poistamisen ja paineilmahäviöiden vähentämisen vuoksi.
- Paineilmaletkut täytyy olla leikattu täysin suoraan ja asennettu oikein.
- Kiinnitysruuvit eivät saa vahingoittaa paineilmaletkuja.
- Puhallusletkun sisähalkaisijan täytyy olla 3 – 4 kertaa suuttimen sisähalkaisijan suuruinen.
- Heti suuttimen alkaessa kulua paineilmaverkoston täytyy pystyä tuottamaan 50 % lisää paineilman virtausta, jotta ilmavirtaus pysyy samanlaisena kuin uudella suuttimella puhallettaessa. (Räsänen 2010, 71.)

## Suuttimet

Puhalluksessa käytettävää suutinta valitessa tulee ottaa huomioon muutamia asioita. Suuttimen sisäreiän profiililla on vaikutusta puhalluskuvion muodostumiseen. Suuttimen sisäreiän profiilin ollessa suora muodostuu suihkusta tiivis, mikä sopii pienten alueiden puhallukseen. Ulosvirtausnopeus suoralla suuttimella on noin 100 m/s. Suurten pintojen puhallukseen sopii puolestaan venturiprofiilinen suutin, joka tuottaa laajan puhalluskuvion ja kasvattaa rakeiden (kuulien) nopeutta. Ulosvirtausnopeus on venturisuuttimella noin 200 m/s. (Räsänen 2010, 76.) Suuttimien sisäreikien profileja on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Suuttimien sisäreikien profileja (Räsänen 2010, 76)

Suuttimen sisäreiän koolla on myös vaikutusta puhallukseen. Tuottavuus paranee käytettäessä suurinta mahdollista paineilmaverkoston sallimaa suuttimen sisäreiän kokoa. Pienempää suutinta käytettäessä rakeiden (kuulien) nopeus kasvaa mutta virtausmäärä alenee. Puhalluksessa tulee lisäksi ottaa huomioon suuttimien materiaali ja kuluminen. Erittäin hyvin kulutusta kestäviä suuttimia ovat esimerkiksi boori- ja piikarbidisuuttimet. Ne ovat kuitenkin hauraita eivätkä ne kestä törmäilyä ja taivutusta yhtä hyvin kuin volframikarbidisuuttimet. Suuttimien kulumisella on vaikutusta ilmanpaineen alenemiseen ja puhallusnopeuteen. Jokaista 0,5 bar:in pudotusta kohden tuottavuuden arvo vähenee noin 10 %. (Räsänen 2010, 76.)

### 3.3.3 Automatisoidut kuulapuhalluslaitteet ja -robotit

Erilaisia automatisoituja kuulapuhalluslaitteita ja -robotteja on nykyään tarjolla melko paljon. Ne on suunniteltu erityistä tarkkuutta vaativaa kuulapuhallusprosessia varten, jota esimerkiksi lentokone- ja autoteollisuus käyttävät nykyään laajasti hyväkseen. Monet roboteista ovat PLC- tai CNC-ohjattuja, jotka toimivat täysin automaattisesti.



Kuulapuhalluslaitteita ja -robotteja valmistavia yhtiöitä ovat esimerkiksi Intiassa toimiva Mec Shot Equipments Private Limited sekä Guyson Corporation, joka sijaitsee Yhdysvalloissa. Kuvio 8. esittää Guyson Corporation –yhtiön RB-10 -kuulapuhallusrobottilaitteistoa, joka on kehitetty hammaspyörien ja lentokonekomponenttien käsittelyä varten.



Kuvio 8. Guyson Corporationin RB-10 -kuulapuhallusrobottilaitteisto (Guyson Corporation 2009)

### 3.4 Kuulapuhalluksen rajoittavat tekijät

Puhallettavan kappaleen muoto ja koko sekä pinnan laatu asettavat kuulapuhallukselle muutamia käyttörajoituksia. Lisäksi puhalluksen jälkeinen kappaleenkäsittely tulee ottaa huomioon. Ongelmia voi syntyä, mikäli kappale altistuu korkeille lämpötiloille puhalluksen jälkeen, koska korkea lämpötila voi aiheuttaa pintaan syntyneen puristusjännityksen häviämisen. Samasta syystä myös koneistusta tulisi välttää kuulapuhalluksen jälkeen. (Linna 2007, 14.)

Kappaleen muodolla voi olla rajoittava vaikutus pienisäteisissä kulmissa, joihin kuulat eivät pääse iskeytymään. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi jokin automatisoitu puhallusmenetelmä,

jonka ominaisuudet rajoittavat luoksepääsevyyttä. Puhallettavan kappaleen muodolla on myös vaikutusta kuulasuihkun tulokulmaan. Tulokulman tulisi olla kohtisuorassa puhallettavaan pintaan nähden. Eri muotoisten kappaleiden puhallus mahdollistetaan yleensä monipuolisella liikutettavalla laitteistolla. (Linna 2007, 15; Saario 2008, 19.)

Kappaleen koko voi olla puhallusta rajoittava tekijä, mikäli puhallustila ei ole tarpeeksi suuri. Lisäksi kuulapuhalluksessa tulee ottaa huomioon pinnanlaadun vaikutus puhalluksen lopputulokseen. Puhallettavalla pinnalla oleva lika heikentää puhallustuloksen tasaisuutta ja tehokkuutta. (Linna 2007, 15.)

### 3.5 Puhallusprosessin kustannukset ja pinnan jälkikäsittely

Kuulapuhalluksen kustannukset muodostuvat useista eri tekijöistä, joita ovat puhallettavan kappaleen koko, muoto ja kovuus sekä puhalluksen peitto ja intensiteetti. Kuulien materiaali, kovuus ja nopeus sekä niiden hajoaminen ovat myös kustannuksiin vaikuttavia osatekijöitä. Kuulien hajoamisen todennäköisyys suhteessa intensiteetin kasvuun lisääntyy merkittävästi kuulien nopeuden kasvaessa. Puhalluksen tuotantotehokkuuteen ja työntekijäkustannuksiin voidaan vaikuttaa oikeanlaisia kuulia ja puhallusnopeutta käyttämällä. Pieniä kuulia ja suurta nopeutta käyttämällä saavutetaan parhaiten tavoiteltu peitto tietylle intensiteetille. (Linna 2007, 15.) Edellä mainitut kustannustekijät koskevat lähinnä manuaalisesti tapahtuvaa puhalluskäsittelyä. Automatisoituja puhallusmenetelmiä käytettäessä korostuvat kustannuksissa laitteistojen hankinnasta ja käytöstä aiheutuvat menot.

Kuulapuhallettua pintaa ei yleensä tarvitse jälkikäsitellä. Puhalluksen jälkeen pinnat ovat kuitenkin paljaita ja korroosiolle alttiita. Tämän vuoksi korroosioherkät pinnat tulisi suojata puhalluskäsittelyn jälkeen. Teräspintoihin voidaan joissakin tapauksissa suorittaa esimerkiksi öljykäsittely. Puhalluksen jälkeinen koneistus ja hiominen ei ole suositeltavaa, jotta puhalluksella tuotettu puristusjännitys säilyisi. Poikkeuksena voidaan kuitenkin pitää alumiini- ja magnesiumseoksia, jotka on puhallettu syvävaikutteisesti. Näitä seoksia käytettäessä voidaan pintaa koneistaa kevyesti. Teräksiä on mahdollista hioa kevyesti puhalluksen jälkeen, mutta kappaleen suoristamista tai kylmämuokkausta tulee välttää. (Linna 2007, 15 – 16.)



## 4 KUULAPUHALLUKSEN KÄYTTÖKOHTEET

Kuulapuhallusta hyödynnetään laajasti eri teollisuudenaloilla, kuten esimerkiksi auto-, lentokone- ja raskaan kaluston teollisuudessa. Tyypillisiä kuulapuhallettavia osia ovat muun muassa kiertokanget, kampiakselit, vaihteistot, akselit, jouset, vääntövarret ja suihkumoottoreiden siivet. Kuulapuhallusprosessi mahdollistaa entistä vahvempien, kestävämpien ja kevyempien osien valmistuksen joskus jopa pienemmällä materiaalimäärillä kuin normaalisti. (Abrasive Finishing Company Inc.; Progressive Surface.)

### 4.1 Suihkumoottoreiden siivet

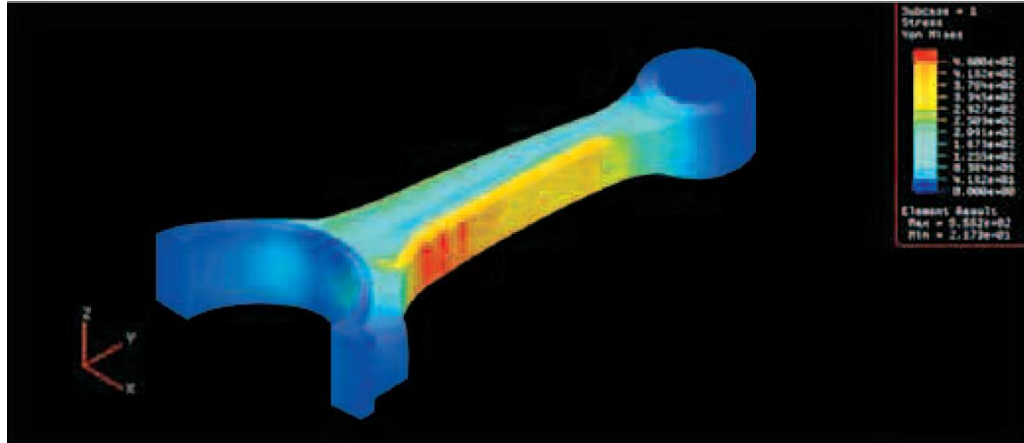
Lentokoneiden suihkumoottoreiden siivet ovat tavanomaisia kuulapuhalluksen käyttökohteita. Siipien juurten kuulapuhallus estää siiven materiaalin väsymistä. On yleistä, että monet moottorien siipien juuret kuulapuhalletaan uusina ja myöhemmin vielä huollon yhteydessä väsymisenkeston parantamiseksi. Puhalluskäsittely on suositeltavaa tehdä myös siipiä tukeville levyille ja pyörille. (Champaign 2001, 22.)

Siipien kantopinnat ovat myös yleisiä kuulapuhalluksen kohteita. Puhalluskäsittely estää muun muassa kantopinnoille haitallista, pinnan säröilystä johtuvaa väsymistä. Lisäksi se estää jännityskorroosion muodostumista ja parantaa yleistä väsymisenkestoa. Monilla kantopinnoissa käytettävillä pinnoitus- ja pintakäsittelyprosesseilla on myös taipumus heikentää materiaalin väsymisenkestoa. Kuulapuhallusta käytetään korvaamaan näistä käsittelyistä johtuvat haitalliset vaikutukset. (Champaign 2001, 22.)

### 4.2 Kiertokanget

Kiertokanget ovat hyviä esimerkkejä metallinosista, jotka ovat alttiita kuormitusväsymiselle. Kiertokankien kuormitusväsymiselle kriittisimmät alueet ovat säteet I-palkkien molemmilla puolilla (kuvion 9. punaiset kohdat). Yleensä kiertokanget kuulapuhalletaan ympäriinsä ennen reikien koneistusta. Testeissä on osoitettu kuulapuhalletun pinnan suojaavan niin hyvin, että edes puhalluksen jälkeen tehdyt naarmut eivät aiheuta väsymiskestävyyden

heikkenemistä edellyttäen, että naarmu on syvyydeltään alle neljäsosan puristuksessa olevasta kerroksesta. Kuvio 9. havainnollistaa elementtimenetelmällä (FEM:llä) kuvattua kiertokankea, jossa kuormituskohdat on merkitty eri värein. Suurimmat kuormituskohdat näkyvät kuvassa punaisella. (Champaign 2001, 23; Metal Improvement Company 2005, 20.)

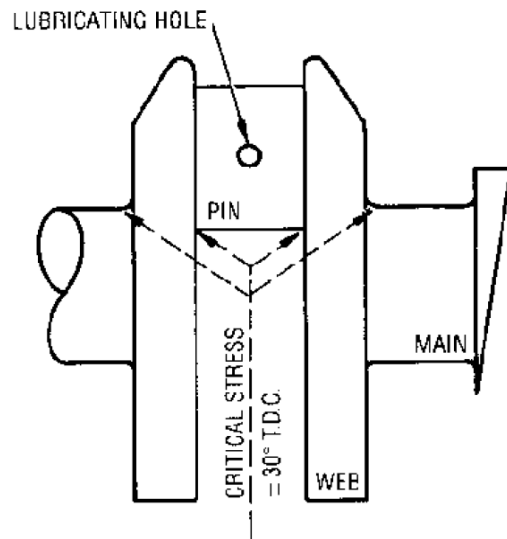


Kuvio 9. Kiertokangen kuormituskohdat FEM-ohjelmistolla kuvattuna (Metal Improvement Company 2005, 20)

#### 4.3 Kampiakselit

Kaikenkokoiset kampiakselit reagoivat hyvin kuulapuhallukseen. Puhallusprosessin on osoitettu olevan tehokas muun muassa taottua terästä, valuterästä ja lämpökäsiteltyä valurautaa puhallettaessa. (Champaign 2001, 24.)

Kampiakselin rasitukselle altteinta aluetta ovat laakeroidun kammentapin reunamat (kuvio 10.). Korkein rasituskohta on tarkalleen reunaman alapuolella silloin kun tappi on niinkutsutussa alakuolokohdassa (BDC:ssä) palamissyklin aikana. On yleistä, että halkeamat alkavat juuri näistä kammentapin reunamakohdista ja etenevät kampiakseliverkoston kautta viereisen päälaakerin reunamaan aiheuttaen väsymisrasitusta. (Champaign 2001, 24.)



Kuvio 10. Kampaakselin rasiukselle kriittiset alueet kampaapissa (Champaigne 2001, 24)

#### 4.4 Vaihteistojen osat

Vaihteistojen osat ovat erittäin yleisiä kuulapuhalluksen käyttökohteita. Kuulapuhallusta voidaan käyttää esimerkiksi auto-, laiva- ja kaivosteollisuuden laitteissa oleviin vaihteistojen osiin, kuten hammaspyöriin. Yleensä kaikenkokoiset ja -muotoiset hammaspyörät kuulapuhalletaan, jotta niiden taivutusväsymisominaisuudet hampaiden juurissa parantuvat. Hampaiden kontaktista syntyvä kuormitus hammaspyörästössä aiheuttaa taivutusrasitusta etenkin hampaiden juurialueille kosketuskohdan alapuolelle (kuvio 11.). (Champaigne 2001, 25; Metal Improvement Company 2005, 19.)

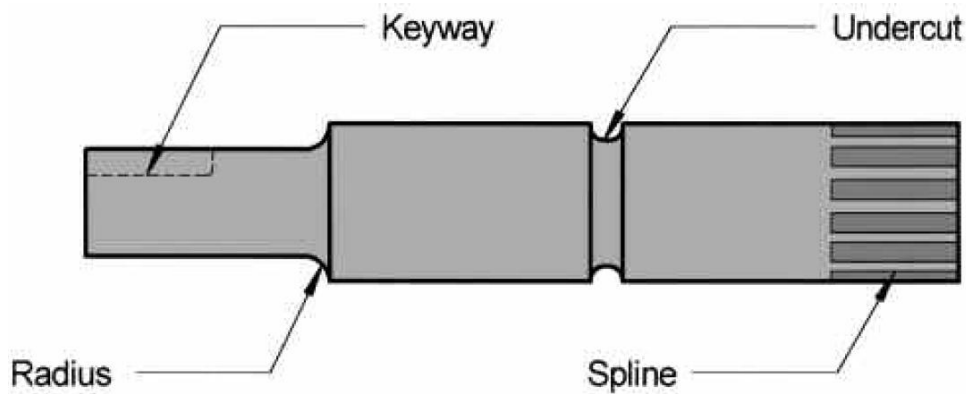


Kuvio 11. Polarisoitu näkymä hammaspyörän rasisuskohdista (Metal Improvement Company 2005, 19)

Hammaspyörät kuulapuhalletaan usein pinta- tai läpikarkaisun jälkeen. Lisääntynyt pinnan kovuus aiheuttaa puristusjäännityksen suhteellista kasvua. Suurin jäännösjännitys lämpökäsitellyillä ja kuulapuhalletuilla hammaspyörillä voi olla välillä 1170 – 1600 MPa riippuen lämpökäsittelymenetelmästä ja puhalluksen parametreista. Puhalluksessa käytetään yleensä kovia kuulia (55 – 62 HRC), kun puhalletaan lämpökäsiteltyjä hammaspyöriä. Tietyn toleranssin vaativat hammaspyörät voidaan kiillottaa tai hioa puhalluskäsittelyn jälkeen. Tämä edellyttää, että jälkikäsittelyprosessit eivät poista puristuksessa olevaa kerrosta enempää kuin 10 prosenttia. (Champaign 2001, 25; Metal Improvement Company 2005, 19.)

#### 4.5 Akselit

Kaikenkokoiset ja -tyyppiset akselit voidaan kuulapuhaltaa niiden väsymisominaisuuksien parantamiseksi (Champaign 2001, 27). Akseleita käytetään välittämään voimaa yhdestä paikasta toiseen pyörimisliikkeen avulla. Voimansiirron pyörivään osaan kohdistuu täten vääntökuormitusta. Vetoakselit sopivat erinomaisesti kuulapuhalluksen kohteiksi, koska ne ovat pääosin kantavia osia, jotka vaativat väsymiskestävyyttä. Vetoakselin heikkoja kohtia ovat tyypillisesti esimerkiksi akselin urakohdat, kuten kiilaurat (kuvio 12.). (Metal Improvement Company 2005, 23.)



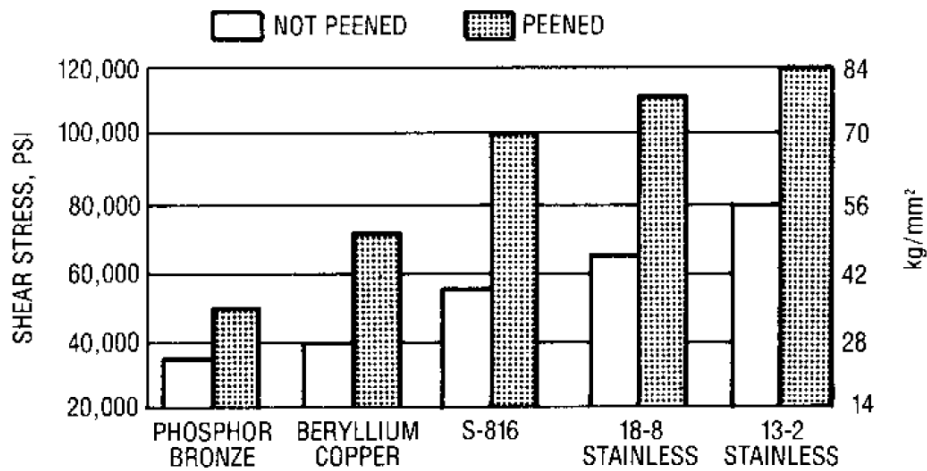
Kuvio 12. Vetoakselin heikot kohdat (Metal Improvement Company 2005, 23)

Monet akselit sisältävät heikennysuran, joka on suunniteltu pettämään ensimmäisenä akselin ylikuormitustilanteissa, jotta akselin pyörittämä laitteisto olisi suojassa. Kuulapuhaltamalla akselin heikennysura voidaan akselin elinikää parantaa ja samalla säilyttää sama ylikuormitussuoja, jonka heikennysura antaa. (Champaign 2001, 28.)

#### 4.6 Jouset

Painekierrejouset ovat alttiita sykliselle väsymiselle ja sen vuoksi ne ovat yleisimpiä kuulapuhalluksen kohteita. Jousi toimii yleensä korkeissa sykliväsymisolosuhteissa, joka aiheuttaa haitallista vetojännitystä jousen sisähalkaisijan kohdille. (Metal Improvement Company 2005, 22.)

Kuulapuhallettuja jousia käytetään esimerkiksi autoteollisuudessa. Kaikki auton moottorit sisältävät kuulapuhallettuja venttiilinjousia ja niitä on käytetty jo 45 vuoden ajan. Jouset valmistetaan yleensä teräslangasta. Niitä on kuulapuhallettu menestyksekkäästi halkaisijaltaan 0,13 mm:n jousista aina 76 mm:n jousiin. (Champaign 2001, 28.) Kuvio 13. esittää erilaisista metalliseoksista tehtyjen kierrejousien leikkausjännityskeston eroja kuulapuhallettuna ja -puhaltamattomana.



Kuvio 13. Kuulapuhallettujen ja –puhaltamattomien kierrejousten kestävyysvaihtelut eri metalliseoksilla (Champaign 2001, 28)

Jousien kuulapuhalluksen jälkeen on melko yleistä suorittaa niiden lämpökäsittelyoperaatio. Hiiliteräksiä kuumennetaan 30 minuutin ajan noin 205 celsiusasteessa. Lämpökäsittely toimii jousien vakauttavana prosessina niiden valmistuksessa. (Metal Improvement Company 2005, 23.)

#### 4.7 Vääntövarret

Vääntövarret ovat erinomaisia kuulapuhalluksen käyttökohteita. Ne ovat rakenteellisia osia, joita käytetään usein jousituksissa ja niihin liittyvissä laitteissa. Niitä käytetään vakauden säilyttämiseen kiertoliikettä estämällä. Kuulapuhalluksella voidaan tuottaa vääntövarsille painonsäästöetua ja pidennetty käyttöikä etenkin silloin kun niitä käytetään laitteissa, joihin kohdistuu jatkuvaa kuormitusta, kuten auton jousituksissa. (Champaign 2001, 28; Metal Improvement Company 2005, 23.)

## 5 KUULAPUHALLUSMUOKKAUKSEEN SOVELTUVAT MATERIAALIT

Kuulapuhallusta voidaan käyttää monien eri metallien ja metalliseosten yhteydessä. Paljon käytettyjä ovat lujat teräkset, alumiiniseokset ja valuraudat sekä jauhemetallurgisesti sintratut metallit.

### 5.1 Lujat teräkset

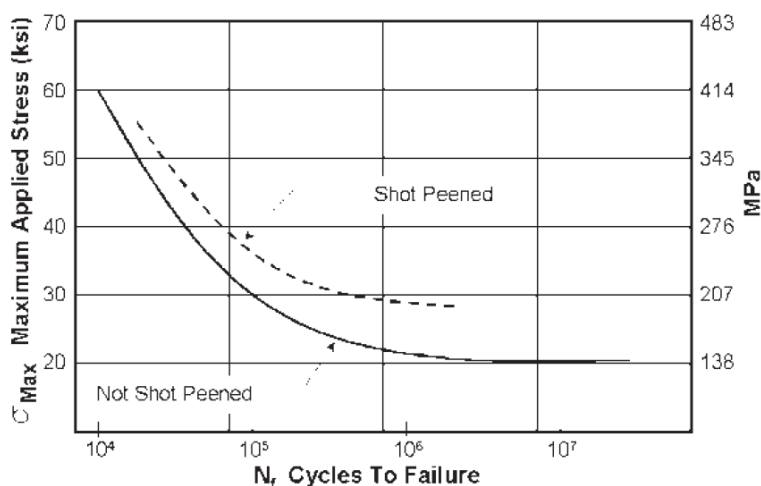
Lujat metallit ovat hauraita ja alttiita pinnan halkeamille. Näitä materiaaliin kohdistuvia haitallisia vaikutuksia voidaan estää käyttämällä lujia kuulapuhallettuja metalleja väsymiselle alttiiksi joutuvissa kohteissa. Tyypillisiä kuulapuhallettujen lujien terästen käyttökohteita ovat esimerkiksi iskuruuvinvääntimet ja lyömäsoittimien työkalut. (Metal Improvement Company 2005, 8.)

Teräksen suurin väsymislujuus ilman kuulapuhallusta saadaan aikaan teräksen kovuuden ollessa Rockwell-asteikolla noin C 40. Tätä korkeammilla kovuuksilla materiaali menettää väsymiskestävyyttä halkeamisherkkyyden kasvaessa. Kuulapuhallusta käytettäessä saadaan väsymiskestävyys puolestaan kasvamaan suhteellisesti kovuuden kanssa. Kovuuden ollessa C 52 kuulapuhalletun materiaalin väsymiskestävyys on yli kaksi kertaa parempi kuin kuulapuhaltamattoman materiaalin. Kuulapuhalletussa kappaleessa olevat pintanaarmut eivät heikennä materiaalin väsymiskestävyyttä, jotka muutoin voisivat olla haitallisia kuulapuhaltamattomissa lujan teräksen kohteissa. (Champaigne 2001, 29.)

### 5.2 Alumiiniseokset

Alumiiniseosten väsymiskestävyyttä voidaan parantaa kuulapuhalluksen avulla. Yleisimpiä käyttökohteita ovat lentokoneiden rakenteet. Perinteisiä 2000- ja 7000-sarjan alumiiniseoksia on käytetty vuosikymmeniä lentokoneiteollisuudessa hyvän kestävyys – painosuhteen vuoksi. Alumiiniseoksia, joiden käyttö lentokoneiteollisuudessa on lisääntynyt ja jotka sopivat hyvin kuulapuhallettaviksi ovat esimerkiksi alumiini-litium –seokset sekä alumiini-valuseokset. Alumiini-litium –seosten sisältämä noin 2 – 3 %:n suuruinen litiummäärä parantaa

materiaalin kestävyyttä ja vähentää tiheyttä. (Champaign 2001, 30; Metal Improvement Company 2005, 11.) Kuviossa 14. on esitetty kuulapuhalletun ja –puhaltamattoman 7050-T7651 –alumiiniseoksen S-N –käyrien ero. S-N –käyrä havainnollistaa väsymismurtolujuutta jännitysykklien funktiona. Käyristä nähdään, että kuulapuhallettu alumiiniseos on väsymismurtolujuudeltaan kuulapuhaltamatonta seosta parempi.



Kuvio 14. Kuulapuhalletun ja –puhaltamattoman 7050-T7651 -alumiiniseoksen S-N –käyrä (Metal Improvement Company 2005, 11)

### 5.3 Valuraudat

Valurautaosia käytetään usein koneistamattomina kohteissa, joissa valettuun pintaan kohdistuu kuormitusrasitusta. Valetuissa pinnoissa esiintyvät puutteellisuudet, kuten reiät ja epäpuhtaudet voivat laskea huomattavasti esimerkiksi koneistamattomien perliittisten pallografiittivalurautojen väsymislujuusominaisuuksia. Kuulapuhalluksella voidaan parantaa merkittävästi materiaalin ominaisuuksia silloin kun valupinnassa esiintyy tällaisia pieniä puutteita. Tyypillisiä valuraudan kuulapuhalluskohteita ovat diesel-moottoreiden sylinteriputket. (Metal Improvement Company 2005, 10 – 11.)

Austemperoidun pallografiittivaluraudan (ADI:n) käyttö kuulapuhalluksen kohteena on yleistynyt 1990-luvulta lähtien kun sen ominaisuuksia alettiin kehittää. Kehitys on mahdollistanut sen ainutlaatuisten mekaanisten ominaisuuksien hyödyntämisen. Kehitystä on hyödynnetty muun muassa nokka- ja kampiakseleissa sekä vaihteistojen osissa.



Austemperoidulla pallografiittivaluraudalla on hyvä lujuus – painosuhte ja erinomainen kulutuskestävyys. Sitä on käytetty korvaamaan jopa alumiinia tietyissä korkeaa kestävyyttä vaativissa kohteissa. Kuulapuhaltamalla austemperoitu pallografiittivalurautaa voidaan sen sallittu taivutusväsymiskestävyys kasvattaa jopa 75 prosenttiin asti. (Champaigne 2001, 31; Metal Improvement Company 2005, 10.)

#### 5.4 Sintratut metallit

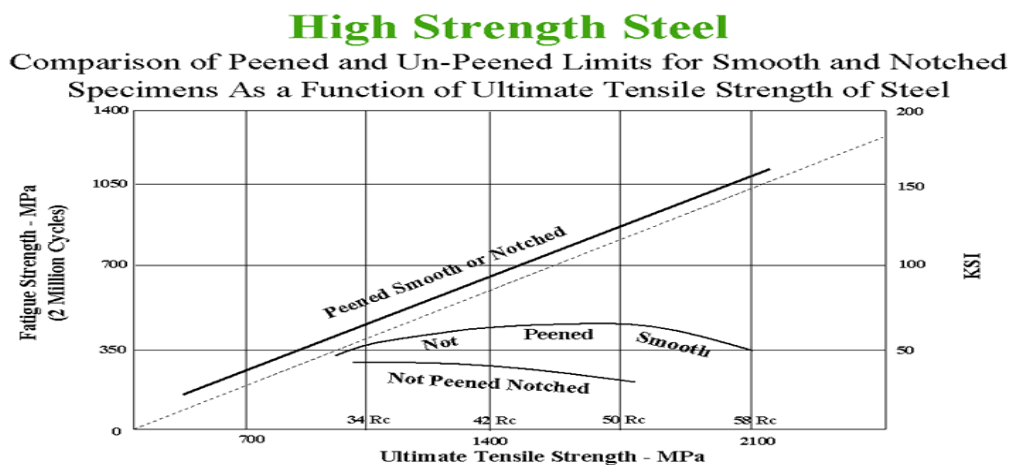
Sintrattujen metalliosien dynaamisia ominaisuuksia on mahdollista parantaa kuulapuhalluksen avulla. Puhalluskäsittely koventaa materiaalia ja aiheuttaa sen pintaan jäännösjännityksiä, minkä ansiosta materiaalin ominaisuudet paranevat. Optimoiduilla parametreilla suoritettuna kuulapuhalluksen on osoitettu kasvattavan sintrattujen teräseosten kestävyyttä 22 prosenttia. Lisäksi on osoitettu niiden väsymisiän kasvavan kymmenkertaiseksi. Autoteollisuudessa käytettävät osat, kuten vaihteistot ja kiertokanget sopivat hyvin kuulapuhallettujen sintrattujen metallien kohteeksi. (Champaigne 2001, 31.)

## 6 KUULAPUHALLUKSEN METALLURGISET HYÖDYT

Kuulapuhalluskäsittely vaikuttaa käsiteltävän pinnan metallurgiseen rakenteeseen lujittamalla sitä ja aiheuttamalla siihen puristusjännityksen. Sen ansiosta puhalluskäsittelyllä voidaan parantaa käsiteltävän materiaalin väsymiskestävyyttä ja vähentää muun muassa jännitys-, raeraja- ja kuorintakorroosion muodostumista.

### 6.1 Metallin väsyminen

Ilman kuulapuhallusta esimerkiksi koneistettujen metallikomponenttien optimaaliset väsymisominaisuudet ovat materiaalin kovuuden ollessa noin 30 HRC. Tätä korkeammilla kovuuksilla materiaali menettää väsymiskestävyyttä halkeama- ja haurauserkkyiden kasvaessa. Kuulapuhalluskäsittelyn tuomien hyödyllisten pinnan puristusjännitysten myötä käsiteltävän materiaalin väsymiskestävyys saadaan kuitenkin kasvamaan suhteessa kovuuden ja lujuuden kanssa. (Metal Improvement Company.) Kuviossa 15. on vertailtu kuulapuhalletun ja –puhaltamattoman koekappaleen väsymiskestävyyden rajoja teräksen vetomurtolujuuden funktiona. Testaus on tehty sekä sileälle että loviselle koekappaleelle. Kuvioista nähdään, että kuulapuhallus parantaa kestävyttä selkeästi. Se antaa saman hyödyn sekä sileälle että loviselle koekappaleelle. Ilman kuulapuhallusta lovisen koekappaleen väsymiskestävyys on heikoin.



Kuvio 15. Kuulapuhalletun ja –puhaltamattoman, sileän ja lovisen koekappaleen väsymiskestävyyden vertailu vetomurtolujuuden funktiona (Metal Improvement Company)

Valmistusprosessien vaikutus materiaalin väsymisikään

Eri valmistusprosesseilla on merkittävä vaikutus metallien väsymisominaisuuksiin. Vaikutukset voivat olla joko hyödyllisiä tai haitallisia. Haitallisia vaikutuksia aiheuttavat karkaisu, hionta, koneistus, pinnoitus, hitsaus ja kipinätyöstö. Hionta, koneistus ja hitsaus voivat jättää metallin pinnan jännitykseen, mikä voi johtaa halkeiluun. Karkaisu, pinnoitus ja kipinätyöstö voivat muodostaa pinnasta kovan ja hauraan. (Metal Improvement Company.)

Metalleille hyödyllisiä vaikutuksia aiheuttavia prosesseja ovat muun muassa lämpökäsittely, hoonaus, kiillotus, valssaus ja kuulapuhallus. Nämä menetelmät parantavat metallin väsymisikää tuottamalla pintaan puristusjännityksen. Kuulapuhallus antaa näistä menetelmistä suurimman hyödyn, koska se tuottaa korkeimman puristusjännityksen eri materiaaleilla. (Metal Improvement Company.)

## 6.2 Jännityskorroosio

Jännityskorroosion muodostumista voi aiheuttaa vetojännityksen alaisen metalliosan joutuminen syövyttävään ympäristöön. Jännityskorroosion vaikutuksesta metalliin muodostuu murtumia. Vaihtelevan jännityksen ja syövyttävän ympäristön yhteisvaikutus aiheuttaa helposti korroosioväsymistä. Jännityskorroosion aiheuttama rakenteellinen vika on usein äkillinen ja ennustamaton, joka voi ilmaantua jopa muutaman tunnin jälkeen korroosiolle ja vetojännitykselle altistumisesta. Vika voi toisaalta ilmetä vasta kuukausien tai vuosien päästä. Käytännössä kaikki metalliseokset ovat alttiita jännityskorroosiolle tietyissä korroosio- ja jännitysolosuhteissa. (Metal Improvement Company; Valorinta 1993, 244.)

Jännityskorroosiomurtumaan johtava vetojännitystila voi johtua kappaleen ulkoisesta kuormituksesta ja/tai sisäisistä jännityksistä. Korroosioympäristö on puolestaan spesifinen kullakin materiaalilla. Ulkoisesta kuormituksesta johtuva vetojännitys voi aiheutua muun muassa staattisesta kuormasta, ruuviliitoksen kiristysvoimasta tai staattisesta paineesta. Sisäisten jännitysten aiheuttajia puolestaan ovat esimerkiksi kylmämuokkaus, lastuaminen, lävistäminen, leikkaus ja hitsaus. Sisäiset jännitykset ovat erityisen vaarallisia niiden koon vaikean ennustettavuuden vuoksi. Sisäiset jännitykset voivat olla lähes metallin myötölujuuden suuruisia. Sisäisten ja ulkoisten jännitysten vaikuttaessa samanaikaisesti voi tilanne muodostua todella vaaralliseksi. (Opetushallitus.)

Jännityksen lisääntyminen nopeuttaa murtumisriskiä. Ennen kuin jännityskorroosiota esiintyy on jännityksen kuitenkin ylitettävä tietty rajajännitys, joka joissain tapauksissa voi olla vain 10 prosenttia materiaalin myötörajasta oleva jännitys. Jännityskorroosion rajajännitykseen vaikuttaa kuitenkin merkittävästi materiaalin ja ympäristön yhdistelmän vaikutus. (Opetushallitus.)

Tyypillisiä jännityskorroosion aiheuttamia ilmiöitä ovat messingin varastorepeäminen ja teräksen lipeähauraus. Messinkien varastorepeäminen johtuu kylmämuokkauksen tai syvävedon aikana rakenteeseen syntyneiden sisäisten jännitysten, ammoniakkin ja muiden tyypeä sisältävien aineiden korroosion vaikutuksesta. Lipeähaurautta voi muodostua kylmämuokatuissa kattilateräksissä emäksisissä olosuhteissa. (Opetushallitus.)

Jännityskorroosioherkkyyttä lisäävät happi ja muut voimakkaat hapettajat. Tavallisella austeniittisella ruostumattomalla teräksellä jännityskorroosiota esiintyykin ainoastaan hapettavissa kloridiliuoksissa. Jännityskorroosiota on kuitenkin mahdollista estää poistamalla happi liuoksesta. Yleensä jännityskorroosiota esiintyy vain tietyllä metallin ja liuoksen välisellä potentiaali-alueella. Potentiaalın muuttaminen joko anodiseen tai katodiseen suuntaan voi estää jännityskorroosion muodostumista. Lämpötilan nousulla on jännityskorroosiota kiihdyttävä vaikutus. Joillakin seoksilla, kuten esimerkiksi magnesiumseoksilla jännityskorroosiota esiintyy jo huoneen lämpötilassa. Yleensä jännityskorroosio kuitenkin vaatii korotettua lämpötilaa. (Opetushallitus.)

Metallin mikrorakenteella (raekoko, orientaatiot, erkaumat, sulkeumat), dislokaatorakenteella ja faasien termodynaamisella stabiilisuudella on metallin koostumuksen ohella vaikutusta jännityskorroosiotaiipumukseen. Lämpökäsittelytila, muokkausaste ja niiden säätelämät ominaisuudet määräävät näiden taipuvaisuuden jännityskorroosioon. (Opetushallitus.)

### Korroosioväsyminen

Vaihtelevien jännitysten ja syövyttävän ympäristön aiheuttamaa progressiivista halkeilua kutsutaan korroosioväsymiseksi (Metal Improvement Company). Rakenteen joutuessa värähtelyjen, vaihtosuuntaisen kuormituksen tai termisten vaihtelujen alaiseksi materiaalin väsymislujuus määrää kestoiän. Korroosiolle alttiissa ympäristössä väsymiskestävyys muodostuu selvästi pienemmäksi kuin se olisi ilman korroosioväliainetta. (Opetushallitus.)

Korroosioväsymisessä korroosion ja jännityksen osuus vaurion syntyyn vaihtelee samalla tavalla kuin jännityskorroosiossakin. Korroosioväsymistä esiintyy todennäköisesti olosuhteissa, joissa materiaali on altis muille paikallisen korroosion muodoille, kuten pistekorrosiolle. Paikalliset pinnan korroosiovauriot toimivat tällöin jännityksen keskittäjinä. Korroosioväsymiselle alttiita teräksiä ovat esimerkiksi austeniittiset ruostumattomat teräket kloridipitoisessa ympäristössä. (Opetushallitus.)

Korroosioväsymistä esiintyy myös olosuhteissa, joissa materiaalin syöpyminen on tasaista ilman dynaamista rasitusta. Tätä voi tapahtua myös hyvin lievissäkin korroosioympäristöissä. Tällöin jännitysvaihtelujen materiaalin pintaan aiheuttamat paikalliset muodonmuutokset rikkovat passivaatiokerroksen ja/tai muodostavat muuhun pintaan verrattuna epäjalomman alueen, joka anodisena syöpyy. (Opetushallitus.)

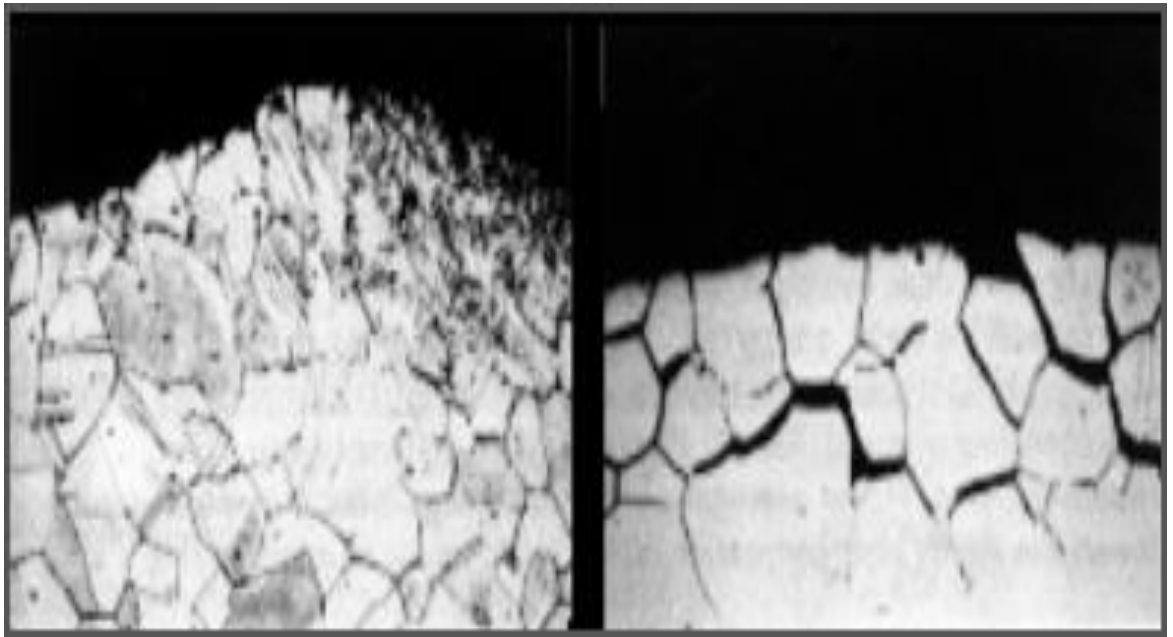
Korroosioväsymisen aiheuttajia:

- Putkistojen säiliöiden sisäpaineen vaihtelut
- Epätasaiset höyry- tai nestevirtaukset venttiileissä sekä venttiilien käyttöön liittyvät paineiskut
- Putkistojen ja säiliöiden lämpölaajenemisesta johtuvat erot
- Laitoksen tai prosessin ylös- ja alasajo
- Oheislaitteiden, kuten pumppujen, kompressorien tai venttiilien aiheuttamat värähtelyt
- Paikalliset lämpötilavaihtelut. (Opetushallitus.)

Korroosioväsymismurtumia esiintyy eniten erilaisissa pyörivissä koneenosissa, kuten akseleissa (Opetushallitus). Kontrolloidulla kuulapuhalluksella voidaan ehkäistä tai viivyttää sekä jännityskorroosiota että korroosioväsymistä (Metal Improvement Company).

### 6.3 Raerajakorroosio

Raerajakorroosio on korroosiomuoto, jota esiintyy ruostumattomien ja ferriittisten terästen hitsaus- ja lämpökäsittelyalueilla sekä näiden terästen käyttölämpötila-alueen ollessa 450 – 500 celsiusastetta. Terästen raerajoille erkanee tässä lämpötilassa kromikarbideja ja ympäristöön muodostuu vastaavasti vähäkromisia alueita, jotka toimivat pieninä anodeina. Tämä aiheuttaa metallin nopean syöpyimisreaktion. (Ansaharju, Ilomäki, Katainen, Maaranen & Mäkinen 1989, 159.) Austeniittisia ruostumattomia teräksiä käytettäessä raerajakorroosiota voidaan ehkäistä kuulapuhaltamalla ne ennen niiden altistumista raerajakorroosiota aiheuttaville lämpötiloille (Metal Improvement Company). Kuviossa 16. on verrattu kuulapuhallettua ja -puhaltamatonta austeniittisen ruostumattoman teräksen pintaa. Kuviossa vasemmalla on kuulapuhallettu pinta ja oikealla kuulapuhaltamaton raerajakorroosiosta kärsinyt pinta.



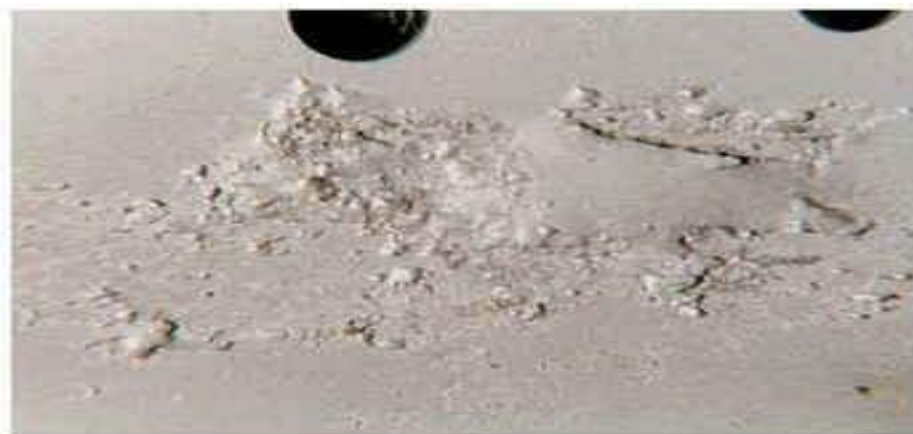
Kuvio 16. Vasemmalla kuulapuhallettu pinta ja oikealla kuulapuhaltamaton raerajakorroosiosta kärsinyt pinta (Metal Improvement Company)

#### 6.4 Kuorintakorrosio

Kuorintakorrosio (kuvio 17.) on vakavampi muoto raerajakorroosiosta, joka etenee pitkin alumiinin raerajoja. Se ilmenee metallin pinnan rakeiden noustessa laajenevien korroosiotuotteiden voimasta, jotka esiintyvät raerajoilla heti pinnan alapuolella (Corrosion Technology Laboratory). Kuorintakorrosion vaikutuksesta metallin pinnan ulkonäkö muodostuu kerrokselliseksi. Kuorintakorrosiota voi esiintyä esimerkiksi lentokoneen rungon niinkutsutussa häntäkoonpanossa ja siipien pinnoissa. (Metal Improvement Company.)

Kuorintakorrosio paikannetaan yleensä kiinnikkeiden vierestä, missä sähköä eristävä tiiviste tai kadmiumpinnoitus on vioittunut mahdollistaen galvaanisen vaikutuksen eri metallien välillä. Kuorintakorrosio etenee usein ulospäin kiinnikereiästä, joko kokonaan reiän ympärysmitaltaan tai yhteen suuntaan reiän segmentistä. Vakavissa tapauksissa pinta pullistuu ulospäin, mutta lievemmissä tapauksissa ei välttämättä esiinny paljastavia pullistumia, jolloin kuorintakorrosiota ei pystytä havaitsemaan kovin helposti. (Metal Improvement Company.)

Kuulapuhalluksella voidaan tehokkaasti tunnistaa ja korjata kuorintakorrosion aiheuttamat vauriot. Kuorintakorrosion tunnistaminen kuulapuhalluksen avulla perustuu pinnan uudelleenpullistumiseen puhalluksen jälkeen. Pinnan pullistuminen on merkki kuorintakorrosion esiintymisestä syvemmillä materiaalissa. Mikäli korroosiota esiintyy voidaan pinnan pullistuma korjata ja pinta uudelleenpuhaltaa niin moneen kertaan, että pullistumia ei enää esiinny. (Metal Improvement Company.)



Kuvio 17. Kuorintakorrosio (Metal Improvement Company)

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli antaa tilaajaryitykselle mahdollisimman paljon keskeistä tietoa kuulapuhallusmenetelmään liittyvistä asioista. Tavoitteena oli tuoda esille tietoa puhallusprosessiin vaikuttavista parametreista, puhalluksessa käytettävistä laitteista ja prosessin tuomista hyödyistä. Pyrkimyksenä oli myös selvittää muun muassa menetelmän käyttömahdollisuuksia, rajoituksia ja käytön laajuutta.

Metallien kylmämuokkaus kuulapuhaltamalla on tarkkuutta vaativa prosessi, jossa tulee ottaa huomioon monia tekijöitä, kuten puhalluksen peitto, kuulien koko, materiaali ja kovuus sekä puhalluksen nopeus ja puhalluskulma. Näiden parametrien kontrolloinnilla voidaan vaikuttaa puhalluksen intensiteettiin ja samalla työn lopputulokseen.

Kuulapuhallusprosessin tuomia etuja voidaan hyödyntää monissa eri käyttökohteissa. Suurimmat kuulapuhalluksen hyödyntäjät teollisuudessa ovat esimerkiksi auto-, lentokone- ja raskaan kaluston teollisuus. Juuri näillä teollisuudenaloilla kuulapuhallus antaa merkittävää hyötyä, koska käytettäviltä osilta vaaditaan hyvää paino – kestävyysuhdetta. Näillä aloilla on toki hyötyä myös osien hyvästä korroosionkestävyydestä, joka kuulapuhalluksella on mahdollista tuottaa.

Kuulapuhallusmenetelmässä tuotettava kuulasuihku voidaan toteuttaa sinkopyörällä, paineilmalaitteistolla tai nykyisin yleistyvillä automaattisilla kuulapuhalluslaitteilla ja -roboilla. Puhalluksessa käytettäviä kuulia ovat rauta-, teräs-, keraami- ja lasikuulat sekä teräslankakatkot. Paljon käytettyjä kuulia ovat teräs- ja rautakuulat, mutta suosiotaan ovat lisäksi esimerkiksi lasi- ja keraamikuulat.

Kuulapuhalluksella ei ole kovin paljon rajoittavia tekijöitä. Yhdeksi merkittävimmistä ongelmista voi muodostua pintaan syntyneen puristusjännityksen häviäminen mikäli kappale altistuu korkeille lämpötiloille puhalluksen jälkeen. Tämän vuoksi myös puhalluksen jälkeistä koneistusta tulisi välttää. Tärkeitä huomioon otettavia tekijöitä ovat myös kuulasuihkun tulokulma ja puhallettavan kappaleen pinnanlaatu. Tulokulman tulisi olla pintaan nähden kohtisuorassa ja kappaleen pinta puhdas, jotta puhalluksesta tulisi tasainen ja tehokas.

Kuulapuhalletulle pinnalle ei yleensä tarvitse suorittaa jälkikäsitteilyä. Kuulapuhalletut pinnat ovat kuitenkin paljaita ja korroosiolle alttiita, joten korroosioherkät pinnat tulisi suojata



puhalluksen jälkeen. Puhalluskäsittelyn jälkeistä koneistusta ja hiomista tulisi välttää, jotta puhalluksella tuotettu puristusjännitys kappaleen pinnassa säilyisi.

Kuulapuhallusprosessin kustannuksiin vaikuttavat useat eri osatekijät. Näitä ovat käsiteltävän kappaleen koko, muoto ja kovuus sekä puhalluksen peitto ja intensiteetti. Lisäksi kuulien materiaali, kovuus ja nopeus sekä niiden hajoaminen ovat kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Puhallusprosessin tuotantotehokkuuteen ja työntekijäkustannuksiin pystytään vaikuttamaan oikeanlaisia kuulia ja puhallusnopeutta käyttämällä. Edellä mainitut kustannustekijät korostuvat etenkin manuaalisesti tapahtuvassa puhalluksessa. Robotisoidussa puhalluksessa kustannukset koostuvat luonnollisesti suurelta osin laitteistojen hankinnoista ja käyttökuluista.

Kuulapuhallusmenetelmän käytön laajuudesta globaalisti ei ole saatavilla tarkkaa tietoa, esimerkiksi tilastollisesti. Näyttäisi kuitenkin siltä, että menetelmän käyttö on suosituinta Yhdysvalloissa ja Aasian maissa. Kuulapuhalluksessa käytettävien automatisoitujen kuulapuhallusrobottien ja -laitteiden valmistus ja kehittäminen on keskittynyt maantieteellisesti juuri näille alueille.

Kuulapuhallusmenetelmästä kiinnostuneille on olemassa eräänlaisia työpajakoulutuksia (workshops), joita järjestää esimerkiksi Yhdysvalloissa toimiva yhtiö nimeltä Electronics Incorporated. Tänä vuonna kyseinen yhtiö järjestää koulutuksia Japanissa, Meksikossa, Kanadassa, Kiinassa, Singaporessa, Saksassa ja Yhdysvalloissa. Koulutukset kestävät yleensä muutaman päivän, jonka aikana läpikäydään kuula- ja raepuhallukseen liittyviä perusasioita sekä laajemmin alan teollisuuden näkökulmia. Koulutuksista on mahdollisuus saada sertifioitu todistus suorittamalla koulutuksen päätteeksi järjestettävä testi.

Tutkimuksen alussa asetettuihin tavoitteisiin päästiin kohtalaisen hyvin vaikka kaikkiin kysymyksiin ei saatukaan vastausta. Yhtenä tavoitteena oli saada tietoa kuulapuhalluksen käytön laajuudesta, joka osoittautui kuitenkin liian haastavaksi tutkimusalueeksi, koska aiheesta ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Puhallusprosessissa käytettävien automatisoitujen robottien ja laitteiden ominaisuuksista ei myöskään löytynyt tietoa toivotulla tavalla. Erityisesti tavoitteena olisi ollut löytää tarkempaa tietoa automaattisten kuulapuhallusrobottien ohjelmointi- ja tarkkuusominaisuuksista, koska työn tilaajayritys on keskittynyt nimenomaan robottien kehittelyyn ja toimitukseen.

Kuulapuhallusta käsittelevän kirjallisuuden saatavuuden puute oli tätä tutkimusta rajoittava tekijä, jota kompensoi kuitenkin elektronisesta mediasta saatavilla ollut runsas aihetta käsittelevä tietomäärä. Aikataulullisesti kuulapuhallusta käsittelevän materiaalin etsintä ja oleellisen tiedon seulonta vei suuren osan tutkimukseen käytetystä ajasta. Jatkotutkimuksena tälle työlle voisi toimia esimerkiksi muiden harvinaisten pinnanmuokkausmenetelmien, kuten laserpuhalluksen tai ultraäänimuokkauksen tutkimus.

## LÄHTEET

## Kirjallisuus:

Ansaharju, T., Ilomäki, O., Katainen, H., Maaranen, K. & Mäkinen, A. 1989. Materiaalitekniikka. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.

Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J. & Koivisto, K. 1997. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Oy Edita Ab.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2009. Materiaalit ja niiden käyttö. Helsinki: WSOYpro Oy.

Katainen, H. & Mäkinen, A. 1997. Muovaava ja leikkaava työstö. Helsinki: Capella Finland Oy.

Kärnä, T., Lammassaari, A. & Lehtonen, R. 1986. Kone- ja metallialan perusoppi 7. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset.

Valorinta, V. 1993. Koneenrakentajan metallioppi. Tampere: Pressus Oy.

## Sähköiset lähteet:

Abrasive Finishing Company Inc. n. d. Shot Peening Process. Saatavilla:

<http://abrasivefinishingcompany.com/t-shot-peening.html> (Luettu 1.12.2011).

Champaigne, J. 2001. Shot Peening Overview. Saatavilla:

<http://www.shotpeener.com/learning/spo.pdf> 18.1.2001.

Electronics Incorporated. n. d. Types and Grades of Almen Strips. Saatavilla:

<http://www.electronics-inc.com/typegrade.html> (Luettu 21.11.2011).

Guyson Corporation. 2010. Robotic shot peening system. Saatavilla:

<http://www.guyson.com/whatsnew/product-news/robotic-shot-peening-system/>  
30.7.2010.

Industrial Metal Finishing, Inc. n. d. Shot Peening Media. Saatavilla:

<http://www.indmetfin.com/Services/ShotPeeningMedia.aspx> (Luettu 28.11.2011).

Karuppanan, S., Romero, J.S., de los Rios, E.R., Rodopoulos, C. & Levers, A. 2002. A theoretical and experimental investigation into the development of coverage in shot peening. Saatavilla: <http://www.shotpeener.com/library/pdf/2002015.pdf> (Luettu 21.11.2011).

Kivivuori, S. 2011. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Aalto-yliopisto. Kemian tekniikan korkeakoulu. Materiaalitekniikan laitos. Saatavilla: [http://www.ohutlevy.com/pdf/terasohutlevy\\_seppo\\_kivivuori.pdf](http://www.ohutlevy.com/pdf/terasohutlevy_seppo_kivivuori.pdf) (Luettu 9.1.2012).

Linna, J. 2007. Pinnan muokkauksen vaikutus alumiinirakenteen väsymislujuuteen. Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. Diplomityö. Saatavilla: [http://www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full\\_thesis/Linna\\_Janne\\_2007.pdf](http://www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full_thesis/Linna_Janne_2007.pdf) (Luettu 14.11.2011).

Metal Improvement Company. n. d. a. Shot peening. Saatavilla:

[http://www.metalimprovement.com/shot\\_peening.php](http://www.metalimprovement.com/shot_peening.php) (Luettu 15.11.2011).

Metal Improvement Company. n. d. b. Metal fatigue. Saatavilla:

[http://www.metalimprovement.com/metal\\_fatigue.php](http://www.metalimprovement.com/metal_fatigue.php) (Luettu 16.1.2012).

Metal Improvement Company. n. d. c. Stress corrosion cracking. Saatavilla:

[http://www.metalimprovement.com/stress\\_corrosion\\_cracking.php](http://www.metalimprovement.com/stress_corrosion_cracking.php) (Luettu 17.1.2012).

Metal Improvement Company. n. d. d. Exfoliation corrosion. Saatavilla:

[http://www.metalimprovement.com/exfoliation\\_corrosion.php](http://www.metalimprovement.com/exfoliation_corrosion.php) (Luettu 17.1.2012).

Metal Improvement Company. 2005. Shot peening applications. Saatavilla:

[http://www.metalimprovement.com//premium/PDF/greenbook\\_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf](http://www.metalimprovement.com//premium/PDF/greenbook_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf) (Luettu 1.12.2011).

NASA Corrosion Technology Laboratory. n. d. Intergranular Corrosion. Saatavilla:

<http://corrosion.ksc.nasa.gov/intercor.htm> (Luettu 6.2.2012).

Opetushallitus. n. d. Korroosionesto: Esiintymismuodot. Saatavilla:

[http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html) (Luettu 7.2.2012).

Progressive Surface. n. d. What is shot peening? Saatavilla:

[http://www.progressivesurface.com/shotpeening\\_process.php](http://www.progressivesurface.com/shotpeening_process.php) (Luettu 1.12.2011).

Saario, I. 2008. Robottisolun käyttöönotto ja valmistelevat toimenpiteet. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tutkintotyö. Saatavilla:

<http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8725/Saario.Ilari.pdf?sequence=2> (Luettu 14.11.2011).

Suomen ympäristökeskus. 2002. Rautametallien jalostus. Saatavilla:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=11782&lan=FI> (Luettu 12.1.2012).

Julkaisemattomat lähteet:

Räsänen, S. 2010. Raepuhallus. Word-dokumentti. (Luettu 14.11.2011).

