

Linda Suuronen

# JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET HIONNASSA: SYNTYMEKANISMIT JA VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: DI Arttu Heininen  
Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Linda Suuronen: Jäännösjännitykset hionnassa: syntymekanismit ja vaikuttavat tekijät  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka  
Huhtikuu 2021

---

Hionta on lastuava työstömenetelmä, jossa hiomalajan hiomarakeet toimivat leikkaavina terinä. Tasohionta on hiomaprosessi, jossa kappale, sen syöttöliike ja hiomalaikka on yleensä yhdensuuntaisia. Jäännösjännitykset ovat sisäisiä jännitystiloja kappaleessa, ja vetojäännösjännitykset heikentävät kappaleen ominaisuuksia altistaen sitä esimerkiksi murtumille. Tässä työssä tutustutaan tasohionnassa muodostuviin jäännösjännityksiin, kuinka hiontaparametrien valinta vaikuttaa muodostumiseen ja mitä vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin jäännösjännityksillä on.

Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on selvittää, kuinka hiontaparametrit tulisi valita, ettei haitallisia vetojäännösjännityksiä muodostuisi kappaleen pintaan. Ensin esitellään tasohiomaprosessi, hiomakoneessa tarvittavat elementit ja työssä tarkasteltavat hiontaparametrit. Tämän jälkeen tutustutaan kolmeen päätapaan, jolla jäännösjännityksiä hionnassa muodostuu, eli mekaanisen hankaus, lämpö ja faasimuutosten aiheuttama tiheyden muutos.

Hiontaparametrien tarkastelussa havaittiin, että lastuamissyvyyden pieni nosto voi tehdä jäännösjännityksistä puristavampia. Paljon kasvattamalla lämpötilan nousun vaikutukset ylittävät mekaanisen hankauksen vaikutuksen, ja jäännösjännitykset kasvavat kohti vetojäännösjännityksiä. Pääsääntöisesti lastuamisnopeuden isommalla kasvattamisella jäännösjännitykset menevät kohti vetojännityksiä. Syöttönopeuden kasvattaminen pienentää kappaleen altistumista lämmölle ja näin saadaan aikaan puristavampia jäännösjännityksiä. Lastuamisnopeuden kasvattamisen negatiivisia vaikutuksia voidaan pienentää kasvattamalla syöttönopeutta samanaikaisesti. Useimmiten lastuamissyvyydestä ja -nopeudesta johdanneen lastuvirran isompi nostaminen vie jäännösjännityksiä kohti vetojännitystä. Hiontaparametrien valinta siten, että lämpötila ei nouse liikaa, ehkäisee vetojäännösjännityksiä ja niiden haitallisia vaikutuksia kappaleelle. Korkean vetojäännösjännityksen havaittiin synnyttävän enemmän säröjä kappaleen pintaan sekä tekevän niistä suurempia. Säröt altistavat kappaletta herkemmin murtumaan väsymisen vuoksi, ja mekaanisten ja kemiallisten ilmiöiden yhdistelmät jännityssäröily ja korroosioväsyminen esiintyvät todennäköisemmin vetojäännösjännityksellä olevan kappaleen pinnassa.

Avainsanat: Hionta, tasohionta, teräs, jäännösjännitys, hiontaparametri, säröily

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Linda Suuronen: Residual Stresses in Grinding: Formation and Influential Factors  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Bachelor's Programme in Engineering Sciences, Mechanical Engineering  
April 2021

---

Grinding is an abrasive machining process, in which abrasive grains of grinding wheel work as cutting edges. Surface grinding is one type of grinding processes, in which the workpiece, grinding wheel and feed direction are parallel to each other. Residual stresses are internal stresses in material. Tensile residual stresses have harmful effects on material properties, for example exposing the machined part to fractures. This thesis is about grinding-induced residual stresses, how grinding parameters affect the formation and what effects residual stresses have on material properties.

This thesis is a literature review and aims to find out how the grinding parameters should be chosen, so that the harmful tensile residual stresses would not be induced on the surface of a component. First, surface grinding process is introduced, then basic elements needed in a grinding machine and the grinding parameters which are examined in the work will be presented. Next the three primary formation causes of the residual stresses are explained: localized thermal expansion caused by temperature rise in contact area, mechanical abrasion causing plastic deformation and volume change due to phase transformation.

As the result of studying grinding parameters, it was noticed that the small increase in depth of cut might induce more compressive residual stresses. Bigger increase will shift residual stresses into tensile because of the increasing grinding temperature exceeding effect of the mechanical abrasion. In most cases, increasing wheel speed will make the residual stresses more tensile. The negative effects of the increase of the wheel speed can be reduced by increasing the work speed simultaneously, because increasing work speed reduces exposure time of the workpiece to the heat. Material removal rate depends on the preceding parameters, and therefore increase in the material removal rate often means more tensile residual stresses. The choice of grinding parameters so that the temperature will not rise too much prevents induce of the tensile residual stresses and their harmful effects on the component. High tensile residual stress was noticed to cause more and bigger cracks on the surface of a component. Cracks expose the component more readily to fracture and fail due to fatigue, and stress corrosion cracking and corrosion fatigue phenomena is also more likely to appear on the component surface.

Keywords: Grinding, surface grinding, steel, residual stress, grinding parameter, cracking

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

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TASOHIONTA.....	3
2.1 Tasohiomakoneen rakenne.....	3
2.2 Tasohiontaprosessi.....	5
2.2.1 Hiontaparametrit .....	5
2.2.2 Lämpötilannousu prosessin aikana .....	6
3. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN MUODOSTUMINEN.....	8
3.1 Jäännösjännitykset .....	8
3.2 Syntyvät.....	8
4. HIONTAPARAMETRIEN           VAIKUTUKSET           JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN MUODOSTUMISEEN.....	11
4.1 Lastuamissyvyys.....	11
4.2 Lastuamisnopeus.....	12
4.3 Syöttönopeus .....	14
4.4 Lastuvirta .....	14
5. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN VAIKUTUKSET MATERIAALIIN.....	16
5.1 Säröily.....	16
5.2 Väsyminen .....	17
5.3 Muut ilmiöt .....	18
6. YHTEENVETO.....	19
LÄHTEET.....	21

# 1. JOHDANTO

Hionta on lastuava työstömenetelmä, jossa työstettävästä kappaleesta poistetaan materiaalia nopeasti pyörivällä hiomalaikalla, joka sisältää työstettävää materiaalia yleensä kovempia hioma-ainerakeita. Laikalla viitataan tässä työssä hiomalaikkaan. Hionnassa on useimmiten korkea tarkkuus ja se mahdollistaa pienten toleranssien käytön. (Rowe 2014, s. 1–4; Marinescu et al. 2016, s. 3–4) Hiomaprosesseja on useita, kuten pyörö- ja tasohionta sekä niiden eri variaatiot. Yleisimpiä hioma-aineita eri metalleille ovat alumiinioksidi, piikarbidi ja kuutiollinen boorinitridi, sekä kovametalleille timantti (Rowe 2014, s. 37). Hiontaa voidaan soveltaa moneen materiaaliin ja kokoluokkaan, minkä vuoksi hionta on työstömenetelmänä todella monipuolinen ja joustava.

Hiomaproessin keston ja lopputuloksen laatuun sekä työstön aikaisen lämpötilaan vaikutetaan hiontaparametreilla. Eniten näihin voidaan vaikuttaa muuttamalla lastuamissyvyyttä ja -nopeutta, syöttönopeutta sekä lastuvirtaa. Lisäksi hiomakoneen käyttäjän on tiedettävä esimerkiksi hiomalaikan käyttöikä. Lastuamissyvyydellä tarkoitetaan yhdellä läpikululla poistettavan materiaalin syvyyttä pinnasta alaspäin, kun taas lastuamisnopeus kuvaa hiontalaikan pyörimisnopeutta, joka voi hiomamenetelmästä riippuen olla jopa satoja metrejä sekunnissa. Syöttönopeus kertoo syöttöliikkeestä, kuinka nopeasti työstettävä kappale etenee hiomakoneessa. Lastuvirta kuvaa poistuvan materiaalin määrää aikayksikköä kohden. (Rowe 2014 s. 16–18; Marinescu et al. 2016, s. 11–16)

Rowen (2014, s. 5) mukaan hiontaa käytetään usein tuotteen viimeistelyssä, joten mahdolliset virheet voivat tulla kalliiksi. Jäännösjännitykset ovat sisäisiä jännityksiä kappaleessa, ja niistä voi olla joko hyödyllisiä tai haitallisia vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin niiden merkistä riippuen (Totten et al. 2002, s. 11–12). Hionnassa jäännösjännityksiä syntyy pääsääntöisesti kolmesta syystä: paikallinen lämpölaajeneminen tai -kutistuminen hionnan aikana, plastinen muodonmuutos johtuen hiomalaikan hankaamisesta sekä faasimuutoksen aiheuttama tilavuuden muutos. (Totten et al. 2002, s. 12; Ding et al. 2017)

Jäännösjännitykset vaikuttavat kappaleen väsymiskäyttäytymiseen ja murtolujuuteen synnyttämällä erilaisia säröjä kappaleen pintaan (Totten et al. 2002, s. 11). Kappaleen murtuminen ja hajoaminen jäännösjännitysten vuoksi voi uhata ihmisten terveyttä ja aiheuttaa suuria rahallisia menetyksiä, esimerkiksi ilma-aluksen osan pettäessä (Fairfax &

Steinzig 2016). Näiden syiden vuoksi on tärkeää, että jäännösjännitysten syntymisen syyt ja laatuun vaikuttavat tekijät tunnetaan, jotta kappaleesta saadaan hiomalla juuri sellainen kuin halutaan.

Tämän työn tarkoituksena on tutustua hionnassa syntyviin jäännösjännityksiin, ja selvittää niiden syntymekanismia ja muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Aihetta lähdetään tarkastelemaan vastaamalla tutkimuskysymyksiin: miksi ja milloin jäännösjännityksiä syntyy hionnassa, kuinka hionnan parametrit vaikuttavat jäännösjännitysten muodostumiseen, sekä mitä vaikutuksia jäännösjännityksillä on työstettävään kappaleeseen. Työ suoritetaan kirjallisuusselvityksenä, ja tiedonhakuun on pääsääntöisesti käytetty Tampereen yliopiston kirjaston Andor-hakupalvelua. Tavoitteena työlle on muodostaa looginen kokonaisuus, joka vastaa tutkimuskysymyksiin ja selvittää, kuinka hiontaparametrit tulisi valita, jotta haitalliset vetojäännösjännitykset kappaleen pinnassa vältettäisiin.

Eri hiontamenetelmistä työn rajaukseksi on valittu tasohionta ja työstettävän materiaalin tarkastelu rajataan teräksiin. Jäännösjännitysten muodostumisessa tutkitaan mekaanisen hankauksen aiheuttaman plastisen muodonmuutoksen, faasimuutosten ja lämpötilan muutoksen aiheuttamia muutoksia. Aikaisemmin esiteltyjen hiontaparametrien vaikutukset jäännösjännityksiin tutkitaan. Ilmiöt kuvataan ja selitetään sanallisesti, ja kuvia käytetään havainnollistamisessa.

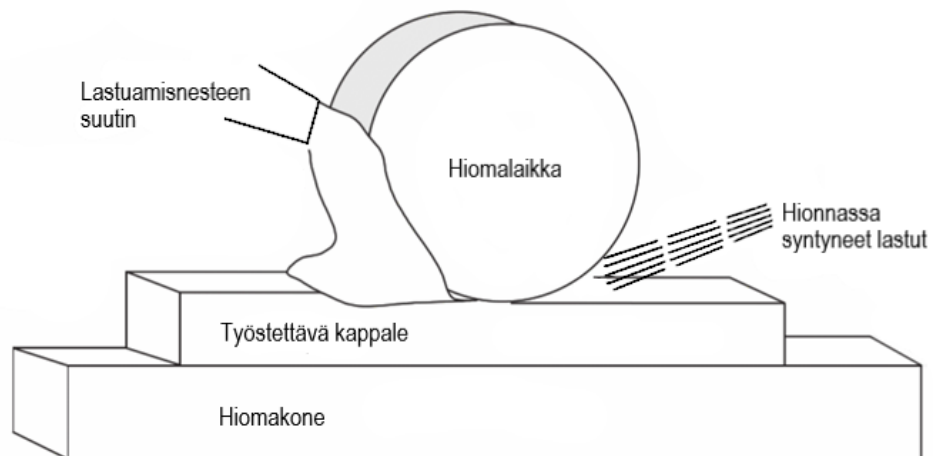
Työssä käsitellään ensin tasohiomakone ja tasohiontaa prosessina, ja tämän jälkeen avataan jäännösjännitysten laatuja ja niiden syntymistä. Seuraavaksi tarkastellaan hionta- ja työstöparametrien vaikutusta jäännösjännityksiin, ja viides luku käsittelee jäännösjännitysten vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin. Viimeisessä luvussa tehdään yhteenveto työssä käsitellyistä aiheista ja parametrien valinnasta siten, että vetojäännösjännityksiltä välttyttäisiin. Työn onnistumista, tavoitteiden saavuttamista ja mahdollisia rajoituksia pohditaan lopuksi.

## 2. TASOHIONTA

Tässä luvussa käydään läpi, mitä elementtejä hiomakone sisältää ja vertaillaan eri hioma-aineita. Hiomaproessin periaate käydään lävitse, ja valitut hiontaparametrit esitellään.

### 2.1 Tasohiomakoneen rakenne

Hionnassa huomioitavia peruselementtejä ovat hiomalaikka, työstettävä kappale, hiomaneste ja hionnassa syntyvät lastut. Kuvassa 1 on havainnollistettu tasohiomakonetta, jossa työkappale liikkuu ja laikka on yhdensuuntaisesti työkappaleeseen nähden. Kyseisessä kuvassa on kyse kehähionnasta, sillä hiomalaikan kehäpinta työstää kappaletta.



**Kuva 1.** Hiomakoneen rakenne (mukaillen Rowe 2014, s. 8)

Hiomalaikka koostuu hiomarakeista, sideaineesta ja huokosista. Sideaineen tehtävänä on pitää hiomarakeet paikallaan, ja siinä olevat huokokset antavat tilaa materiaalin poistoon kontaktialueelta. Teräksille yleisimmän hioma-aineen alumiinioksidin kanssa sideaineena käytetään esimerkiksi erilaisia keraameja tai hartseja. Todella kovien hioma-aineiden, kuten timantin, kanssa voidaan käyttää myös metalleja sideaineena. (Rowe 2014, s. 36, 46)

Tärkeänä hioma-aineen ominaisuutena pidetään hioma-aineen kovuutta ja sen säilymistä korkeissa lämpötiloissa. Lämpöominaisuudet vaikuttavat kulumisenkestävyyteen ja hionnan aikaiseen lämpötilaan. (Rowe 2014, s. 37–38) Taulukossa 1 on esillä tyypillisten hioma-aineiden ominaisuuksia. Timantin ja kuutiollisen boorinitridin lämmönjohta-

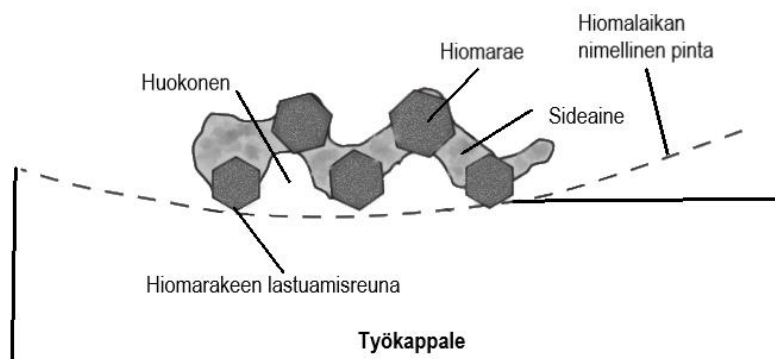
vuudet ovat moninkertaisia piikarbidiin ja alumiinioksidiin nähden. Suurempi lämmönjohtavuus tarkoittaa parempaa lämmönsiirtoa hionnan kontaktipinnalta (Grum 2010). Myös kovuus on timantilla ja kuutiollisella boorinitridillä muita aineita reilusti suurempi.

Taulukko 1. *Hioma-aineiden ominaisuuksia (Rowe 2014, s. 36–38)*

Hioma-aine	Lämmönjohtavuus (W/(mK))	Knoop-kovuus (kg/cm <sup>2</sup> )
Alumiinioksidi	35	1350–2220
Piikarbidi	100	2450
Kuutiollinen boorinitridi	240–1300	4500
Timantti	600–2000	6400

Kuutiollista boorinitridiä käytetään laajasti teräksien hionnassa, vaikka se on tavanomaisempia hioma-aineita kuten alumiinioksidia ja piikarbidia reilusti kalliimpaa. Alumiinioksidihiomarakeita on useita erilaisia eri teräslaaduille ja metalliseoksille. Timantti on käytössä vain todella kovien metallien ja keraamien hionnassa. Tärkeintä hioma-aineen valinnassa on, että se on yhteensopiva työkappaleen kemiallisen koostumuksen kanssa ja kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyvät olosuhteet sopivat hioma-aineelle. (Rowe 2014, s. 38–40)

Kuvassa 2 on havainnollistettu hiomalaikan rakennetta hiomassa kappaletta. Hiomalaikvoja on olemassa mitä erilaisemmillä ominaisuuksilla, sillä rakeiden ja huokosten koko sekä sideaineen, rakeiden ja huokosten määrän suhteita muuttamalla myös laikan ominaisuudet, kuten kovuus, kulumisen kesto ja lämmönjohtavuus, muuttuvat. Mitä enemmän huokosia, sitä pehmeämpi laikka on, mutta se voi kulua nopeammin. Pieni raekoko tekee laikoista vahvempia. (Rowe 2014, s. 50–53)



**Kuva 2.** *Hiomalaikan rakenne (mukaihen Rowe 2014, s. 85)*



Lastuamislestteen tarkoitus on vähentää mekaanisia, kemikaalisia ja lämpövaikutuksia hioma-aineen ja työkappaleen välillä. Se vähentää kitkaa työkappaleen ja hiomalaikan välillä, jähdyttää suoraan kontaktialuetta ja ohjaa hionnassa muodostuneet lastut pois kontaktialueelta. (Klocke et al. 2014; Marinescu et al. 2016, s. 247) Lastuamislesteitä on täysin synteettisiä ja mineraaliöljypohjaisia, ja joissakin voi olla myös kasviöljyä seassa (da Silva et al. 2019). Hionta voidaan suorittaa lastuamislesteen kanssa eli märkänä tai ilman lastuamislestettä eli kuivana (Srivastava et al. 2020)

## 2.2 Tasohiontaprosessi

Tasohionta voidaan jakaa kahteen päämenetelmään: aiemmin mainittuun kehähiontaan ja otsahiontaan. Rowen (2014, s. 6) mukaan harvinaisemmassa otsahionnassa hiomalaikan etuosa hioo työkappaletta. Useimmiten tasohiontaa käytetään isoille tasaisille pinoille, ja syöttöliike hiomakoneeseen tapahtuu pituussuunnassa, joko yhteen suuntaan tai edestakaisella liikkeellä (Marinescu et al. 2016, s. 409–410, 419). Hiomalaikka voi pyöriä kumpaan vaan suuntaan, ja suunnalla on pieni vaikutus siihen, kuinka hiomaraakeet osuvat kappaleeseen, ja hiontavoiimiin ja palamisherkkyyteen (Rowe 2014, s. 17). Lisäksi eri hiomaprosesseja voidaan luokitella käytettyjen parametrien suuruusluokan mukaan, kuten lastuamisnopeuden mukaan tavanomaiseen hiontaan ja suurnopeushiontaan (Ding et al. 2017).

Lindsayn (1989) mukaan hionnassa poistuvan materiaalin määrään vaikuttaa kolme tekijää: hioma-aineen terävyys, kohtisuorassa kontaktipinnasta olevan normaalivoiman suuruus ja hioma-aineen kestävyys. Materiaalin poisto perustuu hiomaraakeen lastuamisreunaan, joka toimii leikkaavana teränä. Hiomalaikan pyöriessä sen yksittäiset raakeet tunkeutuvat työkappaleeseen ja tarpeeksi syvälle tunkeutuvat raakeet leikkaavat lastuja ja poistavat näin materiaalia. Koska hioma-aineraakeet ovat geometrialtaan epäsäännöllisiä ja sattumanvaraisesti laikassa, osa raakeista ei muodosta lastua, vaan ne joko ainoastaan kyntävät kappaleen pintaa tai liukuvat sillä. (Rowe 2014, s. 15–17) Liukumisen aikana tapahtuu vain elastista muodonmuutosta, eli kappaleen pinta palautuu, kun siihen ei enää kohdistu voimia. Lastunmuodostumisen aikana kappale kokee myös plastista eli palautumatonta muodonmuutosta. (Klocke et al. 2014) Plastinen muodonmuutos vaatii materiaalikohtaisen myötörajan ylittymisen, eli hionnassa syntyvien voimien aiheuttama jännitys muodostuu niin suureksi, että kappale menettää kimmoisuutensa.

### 2.2.1 Hiontaparametrit

Lastuamisnopeus on hionnassa käytettävän hiomalaikan pyörimisnopeus (Rowe 2014, s. 16). Lastuamissyvyys on poistettavan materiaalikerroksen paksuus yhdellä hionnan

läpikululla, jonka todellinen arvo on aina pienempi kuin hiomakoneeseen asetettu arvo. Tavallisesti todellinen lastuamissyvyys on noin neljäsosa hiomakoneeseen asetetusta arvosta, mutta suuruuteen vaikuttaa muun muassa työkappaleen kovuus, hiomalaikan kunto, kontaktin leveys ja lämpölaajeneminen. (Rowe 2014, s. 17–19; Marinescu et al. 2016, s. 14) Syöttönopeus kertoo, kuinka nopeasti kappale syötetään ja se etenee hiomakoneessa. Lastuamis- ja syöttönopeus pitkälti määrittelevät työstämisen keston (Marinescu et al. 2016, s. 413).

Lastuvirta, toisinaan myös aineenpoistonopeus, riippuu aiemmista parametreistä. Mitä suurempia nopeudet ja syvyydet ovat, sitä suurempi on lastuvirta ja enemmän materiaalia poistuu sekuntia kohden. Lastuvirran avulla eri hiontakertoja on helpompi verrata. (Rowe 2014, s. 22–23; Marinescu et al. 2016, s. 16) Taulukossa 2 on esillä tarkasteltavien hiontaparametrien yksiköt ja tyypilliset suuruudet tavanomaisessa ja suurnopeushionnassa.

Taulukko 2. *Tyypillisiä hiontaparametrien arvoja tavanomaisessa hionnassa ja suurnopeushionnassa (Fathallah et al. 2009; Marinescu et al. 2016, s. 413; Ding et al. 2017; Kang et al. 2020)*

Parametri	Tavanomainen hionta	Suurnopeushionta
Lastuamissyvyys ( $\mu\text{m}$ )	1–50	3–50
Lastuamisnopeus (m/s)	15–40	60–200
Syöttönopeus (m/min)	1–15	1–15
Lastuvirta ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	0,5–2	<60

Lastuamissyvyys ja syöttönopeus ovat samaa kokoluokkaa sekä tavanomaisessa hionnassa että suurnopeushionnassa. Suurin ero tulee lastuamisnopeudessa, mikä voi olla moninkertainen tavanomaisiin nopeuksiin nähden. Koska lastuvirta riippuu lastuamisnopeudesta, myös se on moninkertainen suurnopeushionnassa tavanomaiseen hiontaan nähden.

### 2.2.2 Lämpötilannousu prosessin aikana

Lämpötilan nousu hionnan aikana on seurausta prosessiin käytetystä energiasta. Hionnan aikana työkappaleen mikroskooppisiin pisteisiin kohdistuu lämpötilapiikkejä, jotka voivat olla lähes materiaalin sulamispisteen suuruisia. Työkappaleen kontaktipinnan kokema lämpö voidaan kuitenkin ajatella jatkuvana lämmityksenä, sillä hiomarakeet ylittävät kontaktipinnan niin usein ja nopeasti, ja tällä kontaktipinnan lämmönousulla on suurin merkitys lämpötilavaurioiden muodostumisessa. Hiontaprosessi kuluttaa paljon energiaa poistettavan materiaalin tilavuuteen verrattuna. Suurin osa tästä energiasta muuttuukin lämmöksi kontaktialueella ja johtuu työkappaleeseen. Tavanomaisella hioma-aineella, kuten alumiinioksidilla, keskimäärin 60–85 % energiasta johtuu lämpönä työstettävään kappaleeseen. (Marinescu 2004, s. 193; Malkin & Guo 2007)

Hiontaparametreilla voidaan vaikuttaa lämpenemisen keston eri kontakteissa. Hiomarakeen ja työkappaleen mikroskooppisen kokoisen kohdan kontakti kestää tyypillisesti vain yhden mikrosekunnin. Hiomarakeen aika kontaktipinnalla on tavanomaisesti 100 mikrometriä. Nämä ajat riippuvat lastuamisnopeudesta, mitä suurempi lastuamisnopeus on, sitä vähemmän aikaa kontakti kestää ja lämpöä johtuu vähemmän. Työkappaleen aika kontaktipinnassa on tavallisesti noin 10 millisekuntia, ja syöttönopeutta kasvattamalla aika lyhenee. Lastuvirta on myös likimäärin verrannollinen sen kanssa, miten paljon energiaa muodostuu hionnassa. (Marinescu 2004, s. 191–193)

## 3. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN MUODOSTUMINEN

Tämä luku käsittelee tarkemmin, mitä jäännösjännitykset tarkoittavat ja millaisia ne voivat olla. Lisäksi avataan eri jäännösjännitysten syntymekanismeja hionnan aikana.

### 3.1 Jäännösjännitykset

Jäännösjännitykset ovat staattisia kolmiaksaalisia jännitystiloja kappaleessa, ja ne ovat tasapainossa, jos kappaleeseen ei kohdistu ulkoisia voimia tai momenteja (Grum 2010). Hionnassa plastista muodonmuutosta tapahtuu työkappaleessa aina, joten myös jäännösjännityksiä muodostuu joka kerta, kun kappaletta työstetään.

Jäännösjännitykset kappaleen pinnassa ovat joko veto- tai puristusjännitystä. Yksikkönä jäännösjännityksille käytetään megapascalaita. Vetojännitys kappaleen pinnassa nimensä mukaisesti vetää pintaa auki, ja merkkisääntöjen mukaan se merkitään positiiviseksi. Puristusjännösjännitys taas päinvastoin puristaa kappaleen pintaa kasaan, ja se merkitään negatiiviseksi. Balart et al. (2004) toteavat, että jäännösjännitykset ovat aina hionnan suunnassa joko vetojännityksiä tai vähiten puristavia. Syntyvällä ja hionnan aikaisella lämpötilalla on merkitystä, kumpi jäännösjännityslaji jää voimaan kappaleen pintaan.

Jäännösjännityksien suuruudet vaihtelevat suuresti riippuen työstössä käytetyistä parametreista ja hionnan onnistumisesta. Esimerkiksi Fathallah et al. (2009) saivat tutkimuksessaan alumiinioksidilla hiomalla noin -400 MPa suuruisen jäännösjännityksen, ja kuu-tiollisella boorinitridillä hiottaessa jopa -800 MPa. Vetojännösjännitykset voivat olla useista sadoista megapascalista lähes tuhanteen megapascaliiin teräksillä, erityisesti kun hionnanaikainen lämpötila nousee useisiin satoihin celsiusasteisiin (Balart et al. 2004; Malkin & Guo 2007).

### 3.2 Syntyvät

Hionnasta johtuvia jäännösjännityksiä syntyy pääasiassa kolmella tavalla, joista mekaanisesti ja lämmön vuoksi muodostuneet ovat yleisimmät tavat. Kolmas tapa on faasimuutosten aiheuttamat tiheyden muutokset ja niistä syntyvät jännitykset. (Totten et al. 2002, s. 14; Rowe 2014, s. 113; Ding et al. 2017) Syntyvät esitellään tässä erillisinä, mutta todellisessa prosessissa kaikki syntyvät ovat mahdollisia ja osallistuvat jäännösjännitysten muodostumiseen.

Mekaanisesti jäännösjännityksiä muodostuu, kun hiomalaikan hiomarakeet aiheuttavat työkappaleeseen plastista muodonmuutosta ja materiaalia irtoaa lastuina. Näin muodostuneet jäännösjännitykset ovat puristavia. (Ding et al. 2017; da Silva et al. 2019) Mekaaninen hankaus aiheuttaa hiontavoimia yksittäisten rakeiden lastuamisreunan, sekä hiomalaikan ja työkappaleen välille. Koko hiomalaikan lastuamisvoima on kaikissa lastuamisreunoissa olevien lastuamisvoimien vektorisumma. (Klocke et al. 2014; Rowe 2014, s. 26–27)

Teräksen tapauksessa kappaleen hiottava kohta laajenee lämmitessään positiivisen lämpölaajenemiskertoimen vuoksi. Samaan aikaan hionnan lämpö saa aikaan plastista muodonmuutosta, kun kappale kokee sen myötörajaa suurempaa jännitystä. Työstön jälkeen työstetty kohta viilenee ja kutistuu, mutta plastinen muodonmuutos ei kumoudu. Tällöin kutistuminen tapahtuu muussa kappaleessa pintaa syvemmillä, johon on kohdistunut vain elastista muodonmuutosta. Näin muodostuva jäännösjännitys on kappaleen pinnassa vetojännitystä. (Balart et al. 2004; Ding et al. 2017) Mitä enemmän lämpöä syntyy hionnassa ja kappaleeseen kohdistuu lämpökuormaa, sitä enemmän jäännösjännitykset ovat vetojännityksiä (Grum 2010).

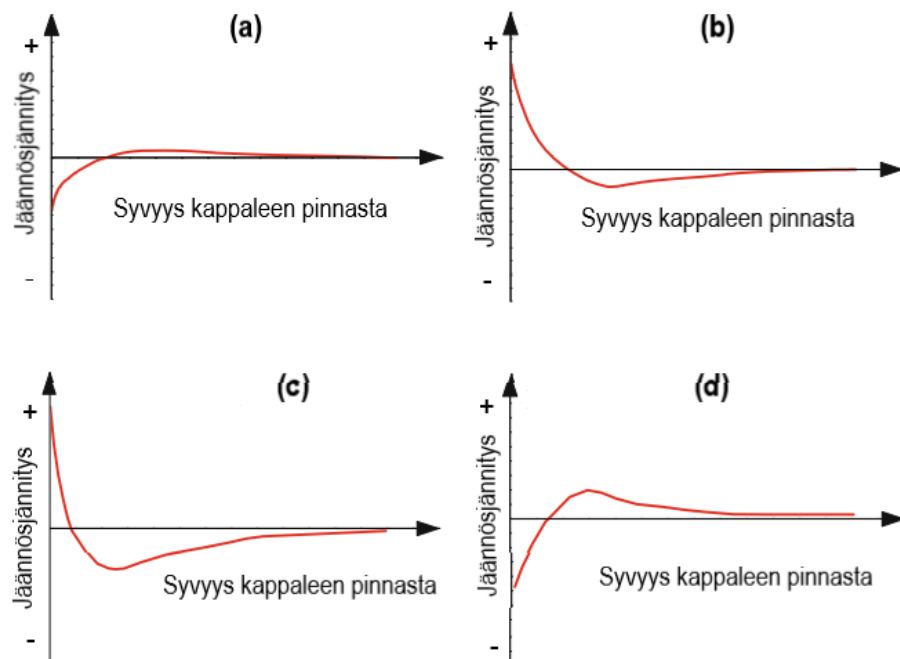
Joillekin teräksille on määritelty ohjeellisia siirtymälämpötiloja, eli missä hionnan aikaisessa lämpötilassa jäännösjännitykset siirtyvät puristusjännityksistä vetojännityksen puolelle. Balartin et al. (2004) tekemässä tutkimuksessa kahta eri teräslatua hiottiin alumiinioksidilaikalla, ja kolmatta terästä hiottiin kuutiollisella boorinitridilaikalla. Lastuamisnopeudet olivat väliltä 20–40 m/s, syöttönopeudet 0,1–0,3 m/s ja lastuamissyvyyydet 0,5–50 µm. Kahdelle ensimmäiselle teräkselle vetojännitykseen siirtymisen lämpötilaksi saatiin noin 200 °C, ja kuutiollisella boorinitridillä hiotulle teräkselle 500 °C. Samassa kohteessa havaittiin myös, että mitä korkeampi hionnan aikainen lämpötila oli, sitä enemmän jäännösjännitykset olivat vetäviä. (Balart et al. 2004)

Faasimuutokset voivat aiheuttaa joko puristus- tai vetojäännösjännityksiä, joiden syntyminen vastaa hieman lämmön aiheuttamaa plastista muodonmuutosta. Jos faasimuutoksessa uuden faasin tiheys on alkuperäistä suurempi, Dingin et al. (2017) mukaan uuden faasin tilavuus pienenee, ja syvemmillä oleva muuttumaton materiaali säilyttää tilavuutensa, jolloin pintaan jää vetojäännösjännitys. Jos taas uuden faasin tiheys on alkuperäistä pienempi, syntyvät jäännösjännitykset ovat puristavia, sillä syvemmillä oleva muuttumaton materiaali rajoittaa uuden faasin tilavuuden kasvamista (Ding et al. 2017).

Huoneenlämmössä teräksessä on yleensä faaseina ferriittiä tai sementiittiä ja perliittiä, tai perliittiä ainoastaan. Lämmön tai lämpötilanvaihtelun aiheuttamia faaseja ovat esimerkiksi bainiitti, martensiitti ja austeniitti. Faasimuutoksiin vaadittava lämpötila riippuu

vahvasti teräksen hiilipitoisuudesta, esimerkiksi AISI 52100 korkeahiilisen teräksen martensiittinen muutos tapahtuu välillä 200–400 °C ja austeniittinen muutos 800 °C molemmiin puolin. (Hamdi et al. 2004; Ray et al. 2020, s. 107–114) Esimerkiksi martensiittinen muutos hiilettyneen teräksen pinnalla synnyttää puristavan jäännösjännityksen kappaleen pintaan muodostuessaan austeniitista, sillä martensiitin tiheys on pienempi kuin austeniitin (Totten et al. 2002).

Yleisimmille jäännösjännitysten syntytaidoille tiedetään jakaumat, joita ne noudattavat kappaleessa. Kuvassa 3 on esillä tässä työssä mainittujen syntytapojen muodostamat jakaumat.



**Kuva 3.** Eri jäännösjännityssyntytapojen jännitysjaakaumat (mukaillen Ding et al. 2017)

Mekaanisen hankauksen aiheuttama plastinen muodonmuutos synnyttää kuvan 3 (a) kohdan mukaisen jännitysjaakauman, eli kappaleen pintaan muodostuu puristusjäännitys. Puristusjäännitys muodostuu myös, jos kappaleessa tapahtuvassa faasimuutoksessa tilavuus kasvaa, jolloin jännitysjaakauma on kohdan (d) mukainen.

Vetojäännitys muodostuu työstetyn kappaleen pintaan, kun jäännösjännitykset ovat lämpötilan vaihtelun aiheuttamia, jolloin tilanne on kohdan (b) mukainen, tai jos faasimuutoksessa materiaalin tilavuus pienenee, jolloin jännitysjaakauma vastaa (c) kohtaa.

## 4. HIONTAPARAMETRIEN VAIKUTUKSET JÄÄN- NÖSJÄNNITYSTEN MUODOSTUMISEEN

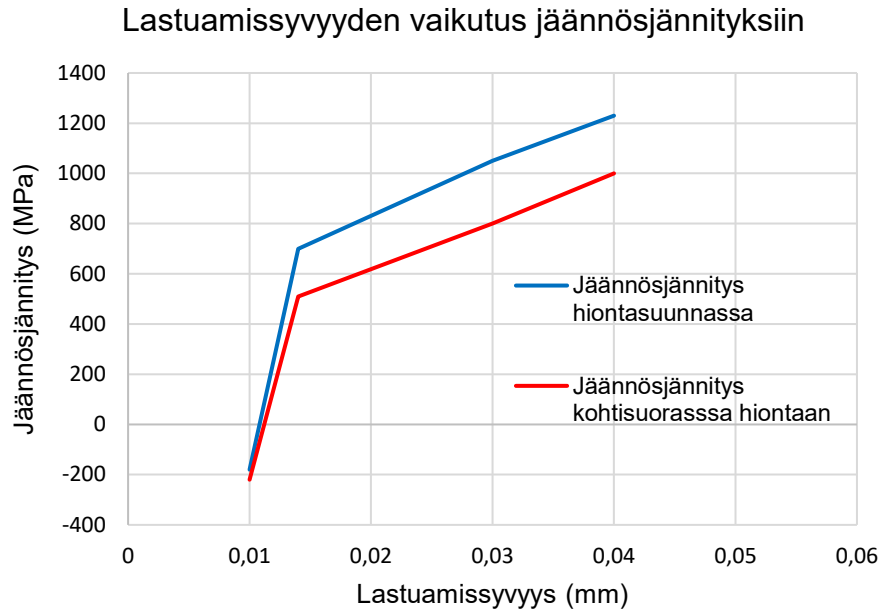
Tässä luvussa tutkitaan aiemmin esiteltyjen hiontaparametrien muutosten vaikutuksia, sekä kuinka nämä muutokset vaikuttavat jäännösjännitysten muodostumiseen. Aikaisemmat tutkimukset parametrien vaikutuksista toimivat merkittävänä tietolähteenä, ja niissä saatuja tuloksia vertaillaan.

### 4.1 Lastuamissyvyys

Kang et al. (2020) tekemässä tutkimuksessa terästä hiottiin kuutiollisella boorinitridilakalla, ja lastuamissyvydet olivat väliltä 0,01–0,03 mm, lastuamisnopeudet väliltä 30–40 m/s, ja syöttönopeudet väliltä 500 mm/min. Lastuamissyvyden nosto johti suurempiin voimiin hiottaessa, joka johtaa suurempaan mekaanisesta hankauksesta johtuvaan plastiseen muodonmuutokseen. Täten jäännösjännitykset olivat enemmän puristavia lastuamissyvyttä nostaessa. Puristavin jäännösjännitys oli -465 MPa ja vähiten puristava -223 MPa. (Kang et al. 2020)

Martell et al. (2014) tekivät myös kokeen, jossa terästä hiottiin kuutiollisella boorinitridilakalla 33 m/s lastuamisnopeudella ja 240 mm/min syöttönopeudella. Lastuamissyvyden kasvattamisella oli erilaisia vaikutuksia jäännösjännityksiin, kun tiettyyn kokonaislastuamissyvyyteen hiottiin yhdellä läpikululla verrattuna kolmeen läpikulkuun. Kaikki tulokset saadut jäännösjännitykset olivat kuitenkin puristavia, kappaleiden mittausten keskiarvoista vähiten puristavan ollessa noin -270 MPa ja eniten puristava jäännösjännitys noin -670 MPa. Yhdellä läpikululla jäännösjännityksistä tuli vähemmän puristavia, kun lastuamissyvyttä nostettiin. Kun hionta toistettiin kolmesti, jäännösjännitykset olivatkin enemmän puristavia siinä kappaleessa, jossa kokonaislastuamissyvyys oli suurempi. (Martell et al. 2014) Syytä tälle eroavaisuudelle ei tutkimuksessa määritetty, mutta yhdellä läpikululla esimerkiksi suurempi lämpötilan nousu on voinut vähentää puristusjäännösjännitystä. Varmempia johtopäätöksiä tehtäessä aineistoa tarvittaisiin enemmän.

Fathallah et al. (2009) tutkivat lastuamissyvyden muutoksen vaikutusta, kun terästä hiottiin alumiinioksidilakalla lastuamisnopeudella 22 m/s ja syöttönopeudella 0,15m/s. Lastuamissyvydet olivat väliltä 0,005–0,11 mm. (Fathallah et al. 2009) Kuvassa 4 on esillä tulokset, joita tässä kokeessa saatiin jäännösjännityksille.



**Kuva 4.** Jäännösjännitykset hiontasuunnassa ja kohtisuoraan verrattuna lastuamissyvyyteen (mukailen Fathallah et al. 2009)

Kuvasta 4 huomataan, että pienellä lastuamissyvyydellä jäännösjännitys on puristava, mutta lastuamissyvyyden kasvattaminen johtaa hyvin nopeasti vetojäännösjännitykseen. Jos tuloksia verrataan Kang et al. (2020) ja Martell et al. (2014) tekemiin kokeisiin, alumiinioksidilla hiottaessa ei saavutettu läheskään sellaisia puristusjäännösjännityksiä, mitä kuutiollisella boorinitridillä tehdyissä kokeissa. Lisäksi lastuamissyvyyden kasvattamisen vaikutuksella oli vaihtelua, jolloin ei voida suoraan todeta, että parametrin muutos veisi jäännösjännityksiä aina tiettyyn suuntaan. Jos hionnan aikainen lämpötila saadaan pidettyä hallinnassa, mikä onnistuu kuutiollisella boorinitridilaikalla paremmin kuin alumiinioksidilaikalla, voi lastuamissyvyyden pieni kasvattaminen tehdä jäännösjännityksistä puristavampia. Suurempi kasvattaminen nostaa myös lämpötilaa, jolloin lämmön vaikutus jäännösjännitysten muodostumisessa kasvaa merkittävämmäksi kuin mekaaninen hankaus.

Tuloksista voidaan myös havaita, että jäännösjännitykset ovat vähemmän puristavia ja enemmän vetojännityksiä hionnansuuntaisesti, kuin kohtisuorassa olevat jäännösjännitykset, aivan kuten aiemmin todettiin Balart et al. (2004) osoittaneen.

## 4.2 Lastuamisnopeus

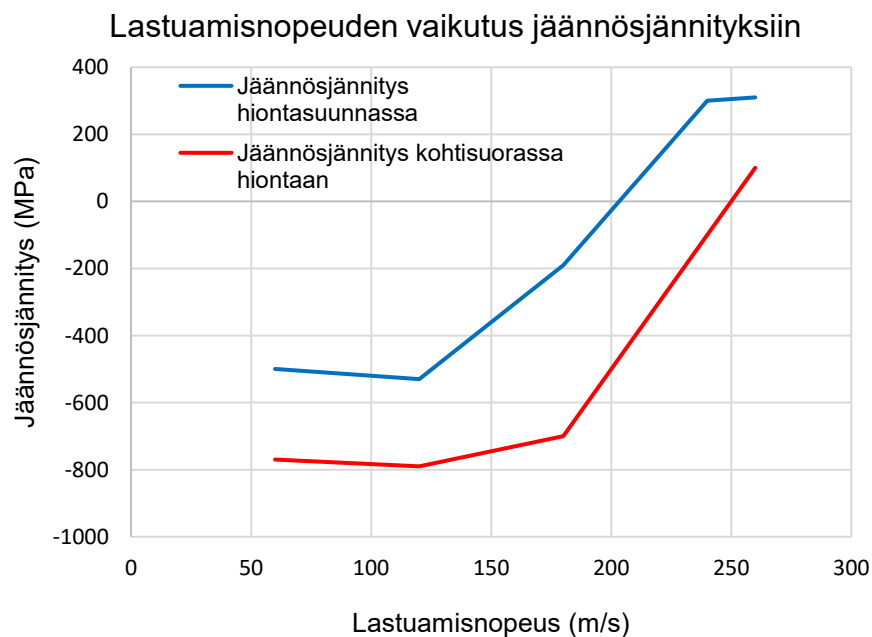
Kang et al. (2020) havaitsivat aiemmin mainitussa tutkimuksessaan, että lastuamisnopeuden nosto pienensi jäännösjännityksen puristavuutta. Muuten samoilla parametreilla tehdyissä kokeissa, mutta lastuamisnopeudella 30 m/s jäännösjännitys oli -324 MPa ja



40 m/s nopeudella -241 MPa. Pääsyyksi tälle ilmiölle todettiin pienemmät voimat hiottaessa. (Kang et al. 2020)

Marinescun et al. (2016) mukaan lastuamisnopeuden kasvaessa muodostuvat lastut ovat ohuempia ja lyhyempiä ja hionnassa muodostuvat voimat ovat pienempiä. Lastuamisnopeuden kasvaessa vielä enemmän, lämmön aiheuttama kuormitus myös kasvaa.

Fathallah et al. (2009) tekemässä toisessa kokeessa käytettiin kuutiollista boorinitridilaikkaa, ja lastuamisnopeuksia tutkittiin jopa 260 m/s asti, mikä on suurnopeushiontaa. Lastuamissyvytensä oli 0,03 mm, syöttönopeuksia kasvatettiin lastuamisnopeuden mukana välillä 0,075–0,375 m/s. Kokeessa jäännösjännitys oli eniten puristava 120 m/s lastuamisnopeudella. Tätä suuremmilla nopeuksilla jäännösjännitykset kasvavat ja vaihtuvat viimein vetojäännösjännitykseksi lastuamisnopeuden ylittäessä 200 m/s, mihin syytä on kokeessa olleet ongelmat lastuamiskehän saamiseksi kontaktipinnalle. (Fathallah et al. 2009) Myös näissä tuloksissa jäännösjännitykset ovat hionnan suunnassa joko vähemmän puristavia tai enemmän vetojännitystä. Tutkimuksen tuloksia on havainnollistettu kuvassa 5.



**Kuva 5.** Lastuamisnopeuden vaikutus jäännösjännityksiin (mukaan Fathallah et al. 2009)

Fathallah et al. (2009) arvelevat lämmön vaikutusten jääminen mekaanisten vaikutusten varjoon syyksi sille, että jäännösjännitys on puristavin juuri 120 m/s nopeudessa, eikä pienemmillä nopeuksilla. Tämä pätee, sillä aiemmin jäännösjännitysten syntytapoja esiteltäessä todettiin mekaanisen hankauksen synnyttävän puristavan jäännösjännityksen.

### 4.3 Syöttönopeus

Syöttönopeuden kasvattaminen johtaa keskimäärin paksumpiin ja pidempiin lastuihin, joten hionnassa syntyvät voimat kasvavat myös (Marinescu et al. 2016). Srivastava et al. (2020) toteavat, että syöttönopeuden kasvaessa hionnan aikainen lämpötila nousee myös, koska syntyvät lastut ovat paksumpia.

Kang et al. (2020) päättelivät, että jäännösjännityksistä tulee enemmän puristavia syöttönopeutta nostaessa, koska kontaktiaika työkappaleen ja hiomalaikan välillä pienenee tällöin. Kontaktiajan pienentyessä hiomarakeisiin kohdistuva kuorma kasvaa, joka johtaa voimakkaampaan mekaaniseen hankaukseen.

Toisaalta taas Martell et al. (2014) toteavat, että syöttönopeudella ei ole ratkaisevaa vaikutusta hiotun pinnan jäännösjännityksiin. Myös Rowe (2014, s. 32) mukaan syöttönopeuden kasvattamisella on vaikutusta tärinään, mutta muuten suhteellisen pieni vaikutus, jos lastuvirta pysyy vakiona. Lopputulos ja lopullisten jäännösjännitysten suuruus riippuukin enemmän siitä, onko mekaaniset vai lämmön nousun vaikutukset suurempia. Fathallah et al. (2009) suosittelevat kuutiollisella boorinitridilaikalla tehdyn kokeen perusteella kasvattamaan syöttönopeuttakin, jos lastuamisnopeutta kasvatetaan, jotta kappale altistuisi vähemmän hionnassa syntyvälle lämmölle.

### 4.4 Lastuvirta

Lastuvirran suuruudella on merkitystä niin hiomalaikan ja -rakeiden kulumisen kanssa, kuin kontaktipinnan lämpötilan ja lämmön aiheuttamien vaurioiden kanssa (Rowe 2014, s. 23). Grumin (2010) analysoimassa tutkimuksessa vertailtiin kuutiollisen boorinitridilaikan ja alumiinioksidilaikan eroja, kun hionnassa käytettiin lastuamisnopeutena 40 m/s ja suurehkoa syöttönopeutta 1 m/s, ja lastuvirrat olivat väliltä 1–6 mm<sup>2</sup>/s. Kyseisillä parametreillä kuutiollisella boorinitridilaikalla hiottaessa jäännösjännitykset olivat suurimmillaankin alle -200 MPa eli kaikilla lastuvirroilla puristavia, kun taas alumiinioksidilaikalla yli 2 mm<sup>2</sup>/s lastuvirrat saivat jäännösjännitykset vetäviksi. Molemmilla hiomalaikoilla kuitenkin lastuvirran kasvattaminen vähensi jäännösjännitysten puristavuutta lämpöenergian vuoksi. (Grum 2010) Rowen (2014, s. 31) mukaan lastuvirtaa kasvattaessa täytyy myös syöttönopeutta kasvattaa, aivan kuten lastuamisnopeuden kohdalla, jotta työkappaleen laatu säilyisi hyvänä.

Lastuvirta helpottaa eri hiomaprosessien tehokkuuden ja hyötysuhteen vertailua (Rowe 2014, s. 23). Koska lastuvirtaan voidaan vaikuttaa muuttamalla lastuamissyvyyyttä tai nopeutta, on tiedettävä niiden arvot ja mahdolliset muutokset ensin, ennen kuin lastuvir-

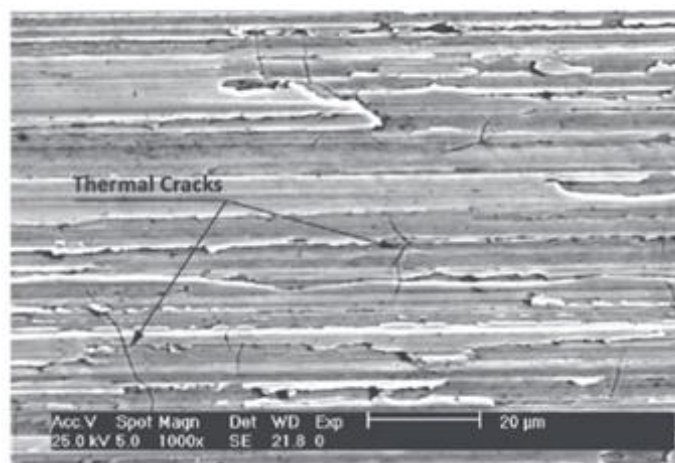
ran muutoksesta voidaan tehdä johtopäätöksiä. Jos kuitenkin lastuvirtaa nostetaan huomattavasti, jäännösjännitykset menevät todennäköisemmin kohti vetojännityksiä lämmönousun vuoksi.

## 5. JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN VAIKUTUKSET MATERIAALIIN

Pala ja Ganev (2008) toteavat, että jäännösjännitysten tila kappaleen pinnassa ja sen lähetyvillä kuuluu tärkeimpiin pinnanlaatua kuvaaviin parametreihin. Hamdin et al. (2004) mukaan jäännösjännityksillä voi olla merkittävä vaikutus kappaleen väsymis- ja kulumiskestävyyteen. Jäännösjännitysten vaikutukset jaetaan yleensä negatiivisiin ja positiivisiin. Perinteisesti puristusjännitys kappaleen pinnassa parantaa kappaleen ominaisuuksia, kun taas vetojännityksillä on haitallisia vaikutuksia kappaleen ominaisuuksiin (Totten et al. 2002). Tässä luvussa käsitellään yleisimpiä ilmiöitä ja kappaleen pettämistapoja, joihin jäännösjännityksillä on merkitystä.

### 5.1 Säröily

Hiotun kappaleen pintaan voi muodostua säröjä lämpötilan vaihtelun tai jännityssäröilyn vuoksi. On tutkittu, että alumiinioksidilla hiottaessa yli viiden mikrometrin lastuamissyvyys voi synnyttää lämpöhalkeamia, joita vetojäännösjännitys lisää ja suurentaa (Kawagoishi et al. 1999, Fathallah et al. 2020 mukaan). Fathallah et al. (2009) mukaan lastuamissyvyyden kasvattaminen itsessään lisää näiden lämpöhalkeamien esiintyvyyttä. Grumin (2010) mukaan puristavat jäännösjännitykset ehkäisevät säröjen muodostumista ja suurenemista, ja pidentävät täten työstetyn kappaleen käyttöikä. Kuvassa 6 on pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otettu kuva teräskappaleen pinnasta hionnan jälkeen. Lastuamissyvyytenä on ollut 0,075 mm. (Fathallah et al. 2009)



**Kuva 6.** Hionnanaikaisen lämmön aiheuttamia säröjä hiotun teräksen pinnassa (Fathallah et al. 2009)

Kuvaan 6 on merkitty kaksi lämpöhalkeamaa (thermal cracks), jotka ovat syntyneet koh-tisuoraan hiontasuuntaa vastaan. Nämä säröt heikentävät pinnan eheyttä ja ovat yleensä kappaleen heikoimpia kohtia, joista esimerkiksi murtuminen tai korroosio saa alkunsa.

Fairfaxin ja Steinzigin (2016) tekemän analyysin mukaan useissa jäännösjännityksistä johtuneissa kappaleiden pettämisissä kyseessä oli useiden ilmiöiden summa, joista yleisin oli jännityssäröily eli jännityskorroosio. Se on mekaaninen ja kemiallinen ilmiö, missä kappaleeseen syntyy säröjä ja se voi murtua korroosiota aiheuttavan kemiallisen ympäristön ja pinnan vetojännityksen yhteisvaikutuksesta. Puristusjäännösjännitys kappaleen pinnassa lisää merkittävästi kappaleen käyttöikää ja kestävyyttä myös jännityssäröilyä vastaan. (Totten et al. 2002) Aspin et al. (2021) mukaan jännityssäröilyn syntymekanis-meja ei ole vielä täysin selvitetty sen yleisyydestä huolimatta, sillä syntymiseen vaikuttaa monta asiaa, kuten metallin koostumus ja mikrorakenne, sekä ympäristön tila.

Fredj et al. (2006) selvittivät alumiinioksidilaikalla hiottujen teräskappaleiden kestävyyttä jännityssäröilyä vastaan. Tutkimuksen hionnassa lastuamisnopeutena oli 30 m/s, syöt-tönopeutena 1 m/min ja lastuamissyvyytenä 0,03 mm. Tavanomaisella viilennyksellä ja näillä valinnoilla kappaleen pintaan muodostui yli 400 MPa:n vetojäännösjännitys. Pin-taan muodostui pitkiä ja leveitä säröjä, jotka kulkivat vaihteleviin suuntiin. Syvyydeltään säröt olivat 100–180 µm. Vertailukohdaksi tutkimuksessa otettiin muuten samoilla para-metreillä hiottu kappale, mutta viilennystapa oli eri, ja jäännösjännitykset olivat pienem-piä. Näin säröistä muodostui kapeampia, lyhempiä ja moninkertaisesti matalampia. Tu-losten perusteella todettiin, että pinnan säröilyn muodostelmia voidaan hallita pinnan jäännösjännityksen suuruudella. (Fredj et al. 2006)

## 5.2 Väsyminen

Väsyminen tarkoittaa materiaalin ominaisuuksien heikkenemistä, kun siihen kohdistuu jännityksiä sykleittäin. Jos kappaleessa on valmiiksi pieniä halkeamia, väsymissäröt ja -murtumat alkavat yleensä niistä. (Bathias & Pineau 2013)

Kappaleen väsymislujuuteen vaikuttaa esimerkiksi pinnan eheys. Pinnan eheydellä tar-koitetaan sen tilaa koneistuksen tai muun työstämisen jälkeen, mitä säröt, faasimuutok-set ja jäännösjännitykset heikentää (Astakhov 2010). Fathallahin et al. (2020) mukaan hallitsemalla hionnan lämpötilaa voidaan moninkertaistaa väsymislujuus. Kuten aiemmin todettiin, vetojäännösjännitykset kappaleen pinnassa altistavat kappaleen pinnan säröi-lylle ja halkeamille, jolloin pinnan eheys kärsii, ja siten väsymislujuus heikkenee.

### 5.3 Muut ilmiöt

Korroosioväsymistä esiintyy silloin, kun väsymiskestävyys pienenee huomattavasti materiaalin tavallisesta väsymislujuudesta korroosioympäristössä. Jopa materiaalien, joilla on hyvä korroosionkestävyys, on havaittu pettäneen korroosioväsymyksen vuoksi. Korroosioväsymyksen ja jännityssäröilyä yhdistävä tekijä on, että jännityksen ja korroosion osuudet vaurion synnyttämisessä vaihtelee. (Han et al. 2019; Asp et al. 2021)

Myös erilaisten pinnoitteiden tarttuvuuteen ja pysyvyyteen on jäännösjännityksillä vaikutusta. Pinnoitteet voivat heikentyä, ja samoin sillä halutut ominaisuudet. On tutkittu, että vetojännityksen kasvaessa pinnoitteiden lujuus heikentyy. (Totten et al. 2002)

## 6. YHTEENVETO

Hionnassa syntyy jäännösjännityksiä kolmella pääperiaatteella, joita kaikkia tapahtuu samanaikaisesti: hiontaparametreillä voidaan vaikuttaa siihen, minkä syntyvän vaikutus on suurin, ja mikä jäännösjännitys jää voimaan kappaleen pintaan. Mekaaninen hankaus ja sen synnyttämä plastinen muodonmuutos, sekä faasimuutoksessa pinnan tiheyden pientyminen tekee jäännösjännityksistä puristavia, kun taas lämmön aiheuttama plastinen muodonmuutos ja faasimuutoksessa pinnan tiheyden kasvaminen muodostaa vetojännityksiä.

Vetojäännösjännitys kappaleen pinnassa ei ole haluttu, sillä se heikentää usealla tavalla kappaleen ominaisuuksia. Halkeamia esiintyy enemmän ja ne kasvavat helpommin, väsymislujuus pienenee ja kappale altistuu herkemmin jännityssäriöllylle ja korroosioväsymykselle. Pinnoittaminen voi olla vaikeaa tai pinnoite ei pysy kappaleen pinnalla yhtä hyvin, kuin puristusjännityksellä olevassa pinnassa. Työn merkittävyys korostuukin tähän: kuinka ei-halutut ominaisuudet vältetään hionnassa, miten hiontaparametrit tulisi valita, jotta saadaan kappaleen pintaan puristava jäännösjännitys.

Hionta- ja työstöparametreillä vaikutetaan erityisesti hionnan aikaisiin kuormituksiin ja lämpötilaan. Liiallinen lämpötila johtaa vetojäännösjännitykseen. Parametrien muutoksilla hallitaan myös muodostuvan pinnan eheyttä. Taulukkoon 3 on koottu työssä tarkastellut hiontaparametrit ja näiden vaikutukset jäännösjännityksiin. Koska jäännösjännitysten muodostumisessa moni tekijä vaikuttaa, ei yksittäisestä parametristä voida luoda ehdottomia johtopäätöksiä, että muuttaminen veisi jäännösjännityksiä aina samaan suuntaan.

Taulukko 3. *Yhteenveto hiontaparametreista ja niiden muutosten vaikutus jäännösjännityksiin*

Parametri	Vaikutus jäännösjännityksiin
Lastuamissyvyys	Pieni kasvattaminen voi tehdä jäännösjännityksistä puristavampia. Paljon kasvattamalla jäännösjännitykset kasvavat kohti vetojäännösjännityksiä.
Lastuamisnopeus	Pääsääntöisesti isommalla kasvattamisella jäännösjännitykset menevät kohti vetojännityksiä.
Syöttönopeus	Kasvattaminen saa jäännösjännityksistä puristavampia. Erityisesti lastuamisnopeutta kasvattaessa syöttönopeuden kasvattamisesta on hyötyä puristusjäännösjännitystä tavoiteltaessa.
Lastuvirta	Todennäköisesti suurempi kasvattaminen vie jäännösjännityksiä kohti vetojännitystä. Jos halutaan kasvattaa lastuvirtaa, myös syöttönopeutta on kasvatettava.

Lastuamissyvyyden pienellä kasvattamisella saatava puristavampi jäännösjännitys perustuu suurempiin hiontavoiimiin mekaanisen hankauksen johdosta. Liian suurella kasvattamisella kuitenkin lämpötila nousee liikaa, ja lämpötilan vaihtelun synnyttämä vetojäännösjännitys on suurempi kuin mekaanisen hankauksen aiheuttama. Lastuamisnopeutta kasvattaessa sekä hiontavoimat vähenevät että lämpötila kontaktipinnalla kasvaa, joten nostaminen itsessään vie jäännösjännityksiä vetäviksi. Syöttönopeus vähentää työkappaleen altistumista hionnan lämmölle, ja näin jäännösjännityksistä tulee puristavampia. Lastuvirran kasvaminen johtaa helposti myös jäännösjännitysten kasvuun, jos lämpötilan hallinnasta ei pidetä huolta, ja myös sitä kasvattaessa olisi syytä kasvattaa syöttönopeutta.

Todellisessa prosessissa kyse on eri jäännösjännitysten muodostumistapojen välillä tasapainoilusta. Lastuamissyvyys on tasohionnassa pidettävä maltillisena. Lastuamisnopeutta voidaan kasvattaa ja täten lastuvirtaa, jos syöttönopeuttakin nostetaan. Syntyvää lämpötilannousua on seurattava, ja mielessä on pidettävä eri materiaaleille tutkittuja vetojäännösjännityksiin siirtymisen lämpötilarajoja, sekä faasimuutosten vaatimat lämpötilat.

Tutkimuskysymyksiin löydettiin vastauksia, ja ohjeita siihen, miten hiontaparametrejä tulisi valita vetojäännösjännityksiä välttämiseksi, löydettiin, eli työn tavoite täytettiin. Työn tekemisessä suurimpia rajoitteita olivat kandidaatintyön pituuden asettamat rajat, ja yhtenäisessä kokonaisuudessa pysyminen. Eri tutkimusten tulosten vertailukelpoisuuden arvioimiseksi vertailtiin myös hioma-aineiden ominaisuuksia, missä todettiin, että kuutiollisella boorinitridihiomalaikalla on paremmat lämpöominaisuudet. Sen käyttö hionnassa luokin paremmat edellytykset puristusjäännösjännityksille, kuin alumiinioksidilain käyttö. Hionta- ja työstöparametrejä on lukuisia, joilla useimmilla on jokin vaikutus jäännösjännitykseen, mutta kaikkia ei tässä työssä voitu tarkastella tarkemmin. Lisäksi hionnan lopputuloksen laatuun vaikuttavat muut tekijät, kuten pinnankarheus ja eri palamisen muodot vaikuttavat hiontaparametrien valintaan, mutta näitä ei tässä työssä otettu huomioon. Rajauksena oli teräksen tasohionta, mutta jäännösjännityksiä esiintyy aina, kun materiaalia työstetään, joten jatkotutkimusideoita aiheesta löytyy lukuisia.



# LÄHTEET

Asp, R., Tuominen, T. & Hyppönen, H. (2021). Korroosionesto: Esiintymismuodot. Opetushallitus. Viitattu 13.3.2021. Saatavilla: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html)

Astakhov V. (2010). Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance. In: Davim J. (eds) *Surface Integrity in Machining*. Springer, London. Viitattu 2.4.2021. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2_1)

Balart, M.J., Bouzina, A., Edwards, L. & Fitzpatrick, M.E. (2004). The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing*, vol. 367, no. 1, pp. 132–142. Viitattu 21.2.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.239>

Bathias, C. & Pineau, A. (2013). *Fatigue of materials and structures: fundamentals*. 1st edn, Wiley, Somerset. Viitattu 14.3.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdvt/cdi\\_igpublishing\\_primary\\_WILEYB0011788](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdvt/cdi_igpublishing_primary_WILEYB0011788)

Ding, W., Zhang, L., Li, Z., Zhu, Y., Su, H. & Xu, J. (2017). Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 9, pp. 2939–2968. Viitattu 26.1.2021. Saatavilla: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s00170-016-8998-1>

Fairfax E.J. & Steinzig M. (2016). A Summary of Failures Caused by Residual Stresses. In: Bossuyt S., Schajer G., Carpinteri A. (eds) *Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. Vol. 9, pp. 209–214. Viitattu 13.3.2021. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21765-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21765-9_26)

Fathallah, B.B., Fredj, N.B., Sidhom, H., Braham, C. & Ichida, Y. (2009). Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. *International journal of machine tools & manufacture*, vol. 49, no. 3, pp. 261–272. Viitattu 5.3.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.005>

Fathallah, B.B., Braham, C. & Sidhom, H. (2020). Combined effects of abrasive type and cooling mode on fatigue resistance of AISI D2 ground surface. *International Journal of Fatigue*, vol. 138. Viitattu 3.2.2021. Saatavilla: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.ijfatigue.2020.105665>

Fredj, N.B., Sidhom, H. & Braham, C. (2006). Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling. *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 16, pp. 4846–4860. Viitattu 10.4.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.04.050>

Grum, J. (2010). Residual Stresses and Microstructural Modifications. In: Davim J. (eds) *Surface Integrity in Machining*, pp. 67–126. Springer, London. Viitattu 2.3.2021. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2_3)

Hamdi, H., Zahouani, H. & Bergheau, J. (2004). Residual stresses computation in a grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 147, no. 3, pp. 277–285. Viitattu 1.3.2021. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00578-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00578-8)

Han, L., Liu, M., Luo, S. & Lu, T.J. (2019). Fatigue and corrosion fatigue behaviors of G105 and S135 high-strength drill pipe steels in air and H<sub>2</sub>S environment. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 124, pp. 63–74. Viitattu 13.3.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.023>

Kang, B., Ma, H., Li, J. & Xu, B. (2020). Effect of grinding parameters on surface quality, microstructure and rolling contact fatigue behaviors of gear steel for vacuum pump. *Vacuum*, vol. 180. Viitattu 3.2.2021. Saatavilla: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.vacuum.2020.109637>

Klocke F., Brouck R., Duscha M. & Weiß M. (2014). Grinding Process. In: Mang T. (eds) *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Springer, Berlin, Heidelberg. Viitattu 21.2.2021. Saatavilla: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2\\_169](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_169)

Lindsay, R.P. (1989). *Principles of Grinding*. Volume 16, Machining. ASM International, Ohio. Viitattu 15.4.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.a0002150>

Malkin, S. & Guo, C. (2007). Thermal Analysis of Grinding. *CIRP annals*, Vol. 56, no. 2, pp. 760–782. Viitattu 26.1.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.005>

Marinescu, I.D. (2004). *Tribology of abrasive machining processes*, William Andrew Pub, Norwich, NY. Viitattu 15.4.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910621218905973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910621218905973)

Marinescu, I.D., Hitchiner, M.P., Uhlmann, E., Rowe, W.B. & Inasaki, I. (2016). *Handbook of machining with grinding wheels*, CRC Press, Florida. Viitattu 26.1.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910678610705973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910678610705973)

Martell, J.J., Liu, C.R. & Shi, J. (2014). Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, no. 9, pp. 1381–1392. Viitattu 3.2.2021. Saatavilla: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s00170-014-6089-8>

Pala, Z. & Ganev, N. (2008). The impact of various cooling environments on the distribution of macroscopic residual stresses in near-surface layers of ground steels. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 497, no. 1, pp. 200–205. Viitattu 25.2.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.07.001>

Ray, B.C., Prusty, R.K. & Nayak, D. (2020). *Phase transformations and heat treatments of steels*, CRC Press, Boca Raton, Florida. Viitattu 5.3.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9911203782305973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911203782305973)

Rowe, W.B. (2014). *Principles of modern grinding technology*. Elsevier/William Andrew, Amsterdam. Viitattu 26.1.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9911208861505973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9911208861505973)

da Silva, L.R., da Silva, D.A., dos Santos, F.V. & Duarte, F.J. (2019). Study of 3D parameters and residual stress in grinding of AISI 4340 steel hardened using different cutting fluids. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 1, pp. 895–905. Viitattu 3.2.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2763-6>

Srivastava, A., Awale, A., Vashista, M. & Yusufzai, M.Z.K. (2020). Monitoring of thermal damages upon grinding of hardened steel using Barkhausen noise analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, pp. 2145–2151. Viitattu 3.2.2021. Saatavilla: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/s12206-020-0435-6>

Totten, G.E., Howes, M.A.H., Inoue, T. (2002). *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, Ohio. Viitattu 26.1.2021. Saatavilla: [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_skillsoft\\_books24x7\\_bke00042650](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_skillsoft_books24x7_bke00042650)