

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

LEIKATTUJEN LEVYREUNOJEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN PARANTAMISEEN
TARKOITETUN TYÖKALUPÄÄN SUUNNITTELU

DESIGNING A TOOL HEAD USED TO IMPROVE FATIGUE RESISTANCE OF CUT
EDGES OF PLATES

Lappeenrannassa 18.9.2019

Arttu Muikku

Tarkastaja TkT Tuomas Skriko

Ohjaaja TkT Tuomas Skriko ja DI Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Arttu Muikku

Leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyden parantamiseen tarkoitettun työkalupään suunnittelu

Kandidaatintyö

2019

40 sivua, 2 kuvaa, 3 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja: TkT Tuomas Skriko

Ohjaajat: TkT Tuomas Skriko ja DI Antti Ahola

Hakusanat: väsyminen, terminen leikkaus, jäännösjännitys, materiaalia lisäävä valmistus ja pikateräs.

Tämän kandidaatintyön tavoite oli suunnitella LUT-yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriolle työkalupää, jota olisi mahdollista käyttää leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyden parantamiseen. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin HiFIT-laitetta, joka on hitsin rajaviivan jälkikäsitteilyyn tarkoitettu paineilmatoiminen työkalu. Työkalupää suunniteltiin siten että se voitaisiin kiinnittää työkaluun kuten siinä alkuperinkin käytettävät työkalupäät, jotka tunnetaan myös neuloina.

Työssä perehdyttiin tutkimuksiin, jotka käsittelevät termisillä leikkausmenetelmillä leikattujen teräslevyjen väsymiskestävyyttä. Tämä vahvisti käsitystä siitä, että leikatun pinnan särmillä on korostunut rooli levymäisten kappaleiden väsymiskestävyyden kannalta. Kirjallisuusselvitystä tehtiin myös jo käytössä olevista väsymiskestävyyden parannusmenetelmistä ja siitä, kuinka nämä vaikuttavat väsymisen kannalta oleellisiin materiaalin ominaisuuksiin, kuten jäännösjännitystila, pinnanlaatu, särömäiset alkuviat ja lujuus.

Työkalun suunnittelun kannalta välttämätöntä oli perehtyä mahdollisiin valmistusmateriaaleihin, sekä näiden vaatimiin lämpökäsittelyihin. Perinteisten koneistusmenetelmien lisäksi myös materiaalia lisäävän valmistuksen työkaluvalmistukseen tarjotaan mahdollisuuksiin perehdyttiin.

Työn tuloksena voidaan todeta, että työkalupää saatiin suunniteltua ja sitä varten valitulle materiaalille suunniteltiin lämpökäsittelyohje, joka kattaa kaikki tarvittavat lämpökäsittelyn vaiheet. Kirjallisuusselvitys leikattujen levyreunojen väsymiseen ja jo käytössä oleviin väsymiskeston parannusmenetelmiin loivat uskoa siihen, että suunnitellun kaltaisella työkalulla voitaisiin saada parannettua särmien väsymiskestoa.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Arttu Muikku

Designing a tool head for improving fatigue resistance of cut edges of plates

Bachelor's thesis

2019

40 pages, 2 figures, 3 tables and 3 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Tuomas Skriko

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Tuomas Skriko and M. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: fatigue, thermal cutting, residual stress, additive manufacturing and high speed steel.

The objective of this bachelor's thesis was to design a tool head that could be used to improve fatigue resistance of thermally cut edges of steel plates. Tool head was designed to be used in HiFIT peening tool by replacing its original tool head known as needle. The needle designed in this thesis could be used in the HiFIT tool without any modifications to the tool itself. HiFIT tool is originally used for post weld treatments. The thesis was made as a part of the research work conducted in the Laboratory of Steel Structures in LUT University.

Scientific research concerning fatigue of thermally cut steel plates was examined and that reinforced the impression that the thermally cut edges have emphasized role in the fatigue of the plates.

Also, existing methods used to improve fatigue resistance were investigated. Especially their effects on the material properties related to fatigue were studied. Those properties are residual stress state, surface roughness, crack like defects and material strength.

It was necessary to get acquainted with possible raw materials for production and the heat treatments required by those materials. Both traditional manufacturing methods like machining and more modern methods of additive manufacturing were considered as possible means of manufacturing the tool head.

As the result of this thesis could be noted that a tool head was designed as well as instructions for all the necessary heat treatment procedures for the selected material. Literature review about fatigue of thermally cut edges and existing processes used to improve fatigue resistance gave confidence for the applicability of the designed tool head. Of course, a prototype of the tool head would be needed to prove the design.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 KIRJALLISUUSKATSAUS.....	9
2.1 Levyreunojen väsyminen.....	9
2.1.1 Jäännösjännitysten vaikutus väsymiskestävyyteen	13
2.1.2 Myötölujittumisen vaikutus väsymiskestävyyteen.....	15
2.1.3 Pinnankarheuden vaikutus väsymiskestävyyteen.....	15
2.1.4 Käytössä olevia väsymiskestävyyden parannusmenetelmiä.....	16
2.2 HiFIT-työkalu	17
2.3 Pikateräkset ja niiden lämpökäsittelyt	18
2.3.1 Pehmeäksihehkus	20
2.3.2 Myöstöhehkus.....	20
2.3.3 Karkaisu.....	21
2.3.4 Päästö.....	22
2.4 Työkaluteräkset materiaalia lisäävässä valmistuksessa	23
2.4.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen työkaluterästen lämpökäsittelyt.....	26
3 TYÖKALUPÄÄN SUUNNITTELU JA VALMISTUS.....	28
3.1 Materiaalit.....	28
3.2 Geometria.....	29
3.3 Pikaterästyökalupää	30
3.3.1 Työkalupään pehmeäksihehkus	31
4 TULOKSET	32
5 POHDINTA.....	34
6 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37
LIITTEET	

LIITE I: Esimerkki pikateräksisen työkalun valmistusvaiheista.

LIITE II: Vickers-kovuuden (HV10) mittauspisteet pehmeäksihehkutetusta säästöteräaihiosta.

LIITE III: Lämpökäsittelyohje, jota on tarkoitus käyttää neulan valmistuksessa.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

FAT	Väsymislukka
HAZ	Heat affected zone eli muutosvyöhyke
HFMI	High frequency mechanical impact
HiFIT	High frequency impact treatment
IIW	International Institute of Welding
R _a	Profiilin aritmeettinen keskipoikkeama [μm]
R _{max}	Maksimiprofiilinsyvyys [μm]
r _v	Keskimääräinen laakson pyöristyssäde [μm]

1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena oli suunnitella leikattujen levyreunojen tai tarkemmin leikatun pinnan särmien väsymiskestävyyden parantamiseen soveltuva työkalupää jo olemassa olevaan paineilmakäyttöiseen työkaluun. Leikkausprosessien osalta painotus on termisissä leikkausmenetelmissä. Tämän työn teettämisen taustalla oli Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratorion havainto, että leikattujen levyreunojen särmillä on korostunut rooli väsymissäröjen ydintymiskohtana. Niinpä kehittyi idea väsymiskestävyyden parantamisesta käyttäen HiFIT-työkalua, joka on nähtävissä kuvassa 1 (luku 2.2, s. 18). HiFIT on lyhenne englanninkielien sanoista high frequency impact treatment. Ja HiFIT-työkalu on DYNATEC-yhtiön kehittämä hitsien jälkikäsittelyyn tarkoitettu paineilmakäyttöinen vasara, jonka työkalupäänä toimiva neula värähtelee suurella taajuudella. Laite on tarkoitettu käytettäväksi hitsien rajaviivojen käsittelyyn HFMI-menetelmällä [high frequency mechanical impact].

HiFIT-työkalun neulat ovat kuitenkin pyöreäkärkisiä ja näin ollen soveltuvat hyvin hitsin rajaviivojen käsittelyyn jättäen jälkeensä väsymisen kannalta edullisen pyöristyksen rajaviivalle. HFMI-menetelmien väsymiskestävyyttä parantava vaikutus perustuu kuitenkin suurelta osin niillä aikaan saatavaan puristusjäännösjännitystilaan, jolloin rajaviivalle muodostuvan pyöristyksen vaikutus väsymiskestävyyteen on vähäinen. On kuitenkin helppo päätellä, kuinka tällainen pyöreä kärki soveltuisi leikatun levyn särmän vasarointiin. Kärkihän pyrki aina pomppaamaan pois terävästä särmästä, joten ideana oli suunnitella työkaluun uusi neula, joka mahdollistaisi leikatun levypinnan särmien vasaroinnin.

Leikattujen levyjen särmien käsittelyn uudella neulalla käyttäen HiFIT-työkalua ajateltiin aiheuttavan särmien muodonmuutosten seurauksena puristusjäännösjännityksiä, jotka parantaisivat väsymiskestävyyttä. Tämän lisäksi materiaali särmässä myötölujuuttuu ja myös sen pinnanlaatu voi parantua, jolloin myös väsymiskestävyys oletettavasti paranisi.

Uutta neulaa suunniteltaessa päädyttiin ratkaisuun, jossa kärjen muodoksi valmistetaan satulapinta, jonka voisi ajatella pysyvän levyn särmässä ja jota olisi mahdollista työntää eteenpäin käsittelyn aikana jättäen jälkeensä tasalaatuisen pyöristyksen koko käsitellylle

alueelle. Neulan kärjen satulapinta on muoto, jonka valmistaminen jyrsimällä vaatii numeerisesti ohjattua työstöä.

Teräsrakenteiden laboratorion oli kiinnostusta selvittää tällaisen työkalun valmistusmahdollisuutta myös materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmillä, sillä laboratoriossa nähtiin yhtenä valmistusmahdollisuutena työkalun teettäminen Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston Lasertyöstön laboratorion kanssa yhteistyössä. Niinpä työssä selvitettiin materiaalia lisäävään valmistukseen tarjolla olevia työkaluteräksiä. Kuitenkaan materiaalia lisäävällä valmistuksella ei tämän työn puitteissa ehditty neulaa valmistamaan, mutta voitiin todeta, että sellaiseen tarvittavaa teknologiaa ja materiaaleja on saatavissa.

Työn tavoitteena oli valmistaa työkalupään prototyyppi koneistamalla pikateräksestä. Alun perin ideana oli toteuttaa valmistus koneistuksineen ja lämpökäsittelyineen yliopistolla, joten työssä perehdyttiin pikaterästen lämpökäsittelyihin ja laadittiin käytettävälle pikateräkselle lämpökäsittelyohje, joka kattaisi kaikki tarvittavat lämpökäsittelyiden vaiheet. Koneistusta ei saatu toteutettua yliopistolla, joten se siirrettiin ulkopuolisen yrityksen tehtäväksi, joka sekään ei pysynyt aikataulussaan, minkä seurauksena työkalupään valmistaminen päädyttiin jättämään työn ulkopuolelle, koska aikaa valmistuskuvan toimittamisesta eteenpäin valmistavalle taholle oli kulunut yli viisi kuukautta. Työkalupään valmistuskuva jää Teräsrakenteiden laboratorion käyttöön eikä sitä julkaista tässä työssä. Työn käytännön osuus supistui käytännössä olemattomaksi, koska työkalupäätä ei saatu valmistettua eikä täten myöskään testattua.

Työssä perehdyttiin leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyteen liittyviin tutkimustuloksiin. Tutkimustuloksista voidaan todeta, että väsyminen ei ole yksinkertainen ilmiö ja että tutkimustuloksissa onkin melko paljon vaihtelua sen suhteen, kuinka leikkausprosessi ja materiaalin lujuus vaikuttavat väsymiskestoikään. Kirjallisuudesta löytyvän tiedon avulla selvitettiin myös leikkauspinnan ominaisuuksien vaikutusta väsymiskestävyyteen. Tärkeimpiä näistä ominaisuuksista ovat jäännösännitystila, särömäiset alkuviaat, pinnanlaatu ja materiaalin lujuus.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä työssä perehdyttiin termisillä menetelmillä leikattujen levyreunojen väsymiseen ja pinnan ominaisuuksien, kuten jäännösjännitystilän, pinnanlaadun ja materiaalin lujuuden, vaikutusta väsymislujuuteen. Koska tavoitteena oli suunnitella työkalu väsymiskestävyyden parantamiseen, tutustuttiin myös jo käytössä oleviin tapoihin parantaa rakenteiden väsymiskestävyyttä. Tämän lisäksi selvitettiin suunniteltavan työkalun valmistukseen soveltuvia materiaaleja ja niiden vaatimia lämpökäsittelyjä. Hitsien väsymiskestävyyden parantamiseen tarkoitettut menetelmät on tarkoituksellisesti jätetty tämän työn ulkopuolelle. Materiaaleja selvitettäessä etsittiin tietoa perinteisin koneistusmenetelmin työstettävien pikaterästen lämpökäsittelyistä sekä materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuuksista työkalun valmistuksessa.

2.1 Levyreunojen väsyminen

Väsyminen on ilmiö, joka aiheuttaa kappaleen murtumisen staattista kestävyyttä pienemmällä kuormilla. Väsyminen ilmenee, kun kappaletta kuormitetaan vaihtelevalla kuormalla, joka aiheuttaa rakenteeseen säröjä tai saa jo rakenteessa valmiiksi olevat säröt kasvamaan. Kun kappaleeseen muodostunut särö on kasvanut riittävän suureksi, se johtaa kappaleen murtumiseen, joka voi tapahtua joko sitkeästi tai hauraasti. Loppumurtuma voi tapahtua jopa alle myötölujuuden suuruisella jännityksellä, vaikka jännityksen laskentaan käytettäisiinkin nettopinta-alaa, josta särön osuus on vähennetty. Pelkästään poikkileikkauksen nettopinta-alan pieneneminen ja siten materiaalin murtolujuuden ylittyminen eivät selitä, miksi väsymismurtuma tapahtuu alhaisella nimellisellä jännityksellä. (Dowling 2007, s.7–9, 317–319) Tyypillisesti väsyminen alkaa rakenteiden pinnasta ja siten rakenteen väsymiskestävyys riippuukin suurelta osin seuraavista pinnan ominaisuuksista: pinnankarheus, jäännösjännitystila ja lujuus (Torbilon & Zahavi 1996, s. 183).

Leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyttä on tutkittu useissa eri tutkimuksissa useilla erilaisilla leikkausmenetelmillä, kuten laserleikkaus, plasmaleikkaus, polttoleikkaus ja koneistus, sekä eri materiaaleilla. Alla on esitetty eri tutkimusten tuloksia.

Thomas (2011) tutki kuormaa kantavien plasmaleikattujen S355 rakenneteräslevyjen väsymiskestävyyttä tavoitteena löytää optimaalisia leikkausparametreja, joilla leikatun pinnan vauriot ja mikrorakenteen muutokset saataisiin minimoitua ja sitä kautta väsymiskestävyyttä parannettua. Leikkauspinnan väsymislujuuden kannalta oleellisimpia asioita ovat materiaalin mikrorakenteen muutokset, pinnankarheus ja jäännösjännitykset. Tutkimuksessa todettiin, että väsymisvauriot alkoivat leikkauspinnan vaurioista, joita muodostui erityisesti happea leikkauskaasuna käytettäessä. Vähäisten syklimäärien alueella koneistetun ja plasmaleikatun koekappaleen väsymiskestävyyksien ero pieneni ja plasmaleikattujen kappaleiden väsymiskestoikä oli jopa parempi ja tämän todettiin johtuvan siitä, että leikatun pinnan ominaisuuksista tulee vähemmän merkittäviä, kun rakenteessa alkaa tapahtumaan suurempia plastisia muodonmuutoksia. Tätä väsymiskestävyyden paranemista selitettiin osaltaan myös plasmaleikatun reunan HAZ:in [muutosvyöhyke, heat affected zone] muutoksilla, jossa ferriitistä on muodostunut jäähtymisen yhteydessä martensiittia ja tästä seuraavan tilavuuden muutoksen yhteydessä on pintaan muodostunut puristusjäännösjännityksiä, jotka pyrkivät estämään särön aukeamista. Suurten syklimäärien alueella plasmaleikatun pinnan väsymiskestävyys on huonompi kuin koneistetun. Lopputuloksena todettiin, että väsymiskestävyyteen voidaan vaikuttaa käytettävällä leikkauskaasulla ja leikkausnopeudella. Tutkimus ehdottaakin käyttämään leikkauskaasuna happea ja leikkausnopeutena 3100 mm/min, jos tavoitellaan optimaalista väsymiskestävyyttä plasmaleikatuille osille. (Thomas 2011, s. 481–493)

Sperle (2008) toteaa, että suunnittelun pyrkiessä välttämään hitsien asettamista alueille, joissa vallitsee korkeita jännityksiä, ja kun kriittisiä hitsejä jälkikäsitellään, seurauksena on se, että myös hitsaamattomille kohdille voidaan joutua tekemään väsymistarkastelu. Tutkimuksessaan Sperle on testannut eri paksuisia teräksiä väliltä 6–12 mm, erilaisilla myötölujuuden arvoilla väliltä 240–900 MPa ja laser-, plasma-, polttoleikatuilla sekä koneistetuilla reunoilla. Väsytykset on tehty vakioamplitudisella vetotykytyksellä. Kokeen tuloksista todettiin, että todennäköisin väsymissärön alkamiskohta on leikatun ja kuumamuovattun pinnan särmässä. Myöskin todettiin, että näiden pintojen laadun suhteella on merkitystä särön muodostumiskohtaan. Yhtenä mahdollisena syynä väsymissäröjen muodostumiselle levyn särmiin ehdotettiin sekundäärisiä taivutusjännityksiä. Mahdollisten sekundääristen taivutusjännitysten syytä ei kuitenkaan ilmoitettu. Tutkimuksessa todettiin, että väsymiskestävyys kasvaa materiaalin lujuuden kasvaessa, minkä todettiin viittaavan

siihen, että leikkausprosessissa ei muodostu särönkaltaisia vikoja, jotka saisivat aikaan sen, että väsymiskestoikä määräytyisi särönkasvunopeuden perusteella, vaan että leikatun pinnan väsymiskestoikä määräytyy pääosin särön ydintymisajan mukaisesti. Pienillä säröillä väsymiskäyttäytyminen määräytyy särön ydintymisen mukaisesti ja suuremmilla säröillä materiaalin lujuuden vaikutus pienenee ja, kun tästä siirrytään särön kasvun alueelle, materiaalin lujuuden vaikutus lähestulkoon häviää. Särökokoon, jossa siirrytään särön ydintymisestä särön kasvuun vaikuttaa särön avautuma ja sitä kautta jäännösjännitystilä. Tutkimuksessa ei tehty jäännösjännitysmittauksia, mutta jäännösjännitysten roolia väsymiskestävyyteen painotettiin. Tutkimuksessa laskettiin FAT-luokat [Väsymisloukka] IIW:n [International Institute of Welding] suositusten mukaisesti koneistetuille sekä laser- ja plasmaleikatuille levyreunoille, ja tuloksena saatavat FAT-luokat ovat lähellä IIW:n FAT-loukkaa kuumamuovatuille osille, joiden reunat on koneistetut, joten tuloksena saadut FAT-loukat ovat huomattavasti suuremmat kuin IIW:n tarjoamat FAT-loukat termisillä menetelmillä leikatuille reunoille. Loppupäätelmänä todettiin laser- ja plasmaleikattujen levyjen väsymiskestävyyden olevan lähellä koneistettujen levyjen väsymiskestävyyttä ja polttoleikatuilla levyillä jonkin verran huonompi. (Sperle 2008, s. 79–92)

Mäntyjärvi, Väisänen ja Karjalainen (2009) tutkivat leikkausmenetelmän vaikutusta ultralujien terästen ja muokkauslujitettujen austeniittisten terästen väsymiskestävyyteen. Tutkittavina materiaaleina oli 4 mm paksut ultralujat-teräkset CP1100 ja CP960 sekä 3 mm paksut muokkauslujitetut austeniittiset ruostumattomat teräkset 2H+C850 ja 2H+C1000 sekä 3,2 mm paksu 2H+C700. Testattavia leikkausmenetelmiä olivat ultralujien terästen kohdalla koneistus, vesisuihkuleikkaus ja hiilidioksidilaser. 2H+C850 ja 2H+C1000 leikattiin sekä koneistamalla että hiilidioksidilaserilla. 2H+C700 leikkaukseen käytettiin hiilidioksidi- ja Yb:YAG-lasereita. Tutkimuksessa huomattiin, että laserleikkauksen pinnanlaatu on parempi, kun leikkaus tapahtuu materiaalin valssaussuuntaan kuin kohtisuoraan sitä vasten. Väsytykokeet tehtiin taivutus-vaihtojännityksellä. Väsytykokeiden tuloksista huomattiin, että laserleikatuissa kappaleissa särö alkoi useimmiten kasvamaan levyn särmästä, kun taas muilla leikkausmenetelmillä särön alkupisteiden paikoissa ja määrissä oli enemmän vaihtelua. Tuloksista todetaan, että ultralujilla teräksillä vesisuihkuleikkaamalla ja koneistamalla valmistettujen koekappaleiden väsymiskestävyys on likimain sama, mutta laserleikkeillä saadut tulokset ovat selvästi huonommat etenkin tietyllä jännitysamplitudin vaihteluvälillä. Vastaava ilmiö todettiin

myös laserleikattujen ja koneistettujen muokkauslujitettujen ruostumattomien terästen väsytyскоetulosten vertailun kohdalla. (Mäntyjärvi, Väisänen & Karjalainen 2009, s. 547–550)

Diekhoff et al. (2019) tutkivat termisten leikkausmenetelmien ja teräksen myötölujuuden vaikutusta leikatun levyn väsymislujuuteen. Tutkittavina leikkausmenetelminä olivat laser-, plasma- ja polttoleikkaus ja tutkittavat teräkset olivat 8 ja 20 mm paksuja rakenneteräksiä, joiden myötölujuuden arvot olivat välillä 355–960 MPa. Tässä tutkimuksessa ei löydetty yhteyttä materiaalin myötölujuuden kasvattamisen ja väsymiskestävyyden paranemisen välille. Laserilla leikatuilla teräksillä pienempi myötölujuus johti jopa parempaan väsymiskestävyyteen. Poltto- ja plasmaleikatuilla levyillä väsymiskestävyys vaikutti käyttäytyvän keskenään samankaltaisesti, mutta niillä ei voitu todeta materiaalin myötölujuuden vaikuttavan merkittävästi väsymiskestävyyteen. Tutkimuksessa todettiin, että leikatun pinnan laadulla on vaikutusta väsymiskestävyyteen ja että HAZ:n karkenemisen seurauksena tapahtuva reunojen haurastuminen voi johtaa herkempään särön kasvuun. Laserleikattujen pintojen pinnankarheus oli suurempi kuin muilla leikkausmenetelmillä, joten suuremmalla myötölujuudella varustettujen testikappaleiden huonomman väsymislujisuuden syyksi ehdotettiin suurlujuusterästen suurempaa herkkyyttä särön muodostumiselle. (Diekhoff et al. 2019)

Remes et al. (2013) tutkivat plasmaleikattujen näytekappaleiden väsymiskestävyyttä telakkateollisuuden näkökulmasta. Tutkittavat materiaalit olivat teräksiä, joiden nimelliset myötölujuudet olivat 355, 460 ja 690 MPa. Testikappaleena oli koiranluun mallinen väsytyскоesauva, jonka paksuus oli 15 tai 17 mm ja kapeimmasta kohdasta mitattuna leveys oli 30 mm. Kappale oli suunniteltu siten, että se kuvaisi laivoissa tyypillistä parvekkeen aukkoa, jonka pyöristetyt kulmat ovat alttiita väsymiselle. Testikappale kiinnitettiin nivelöidysti väsytyскоelaitteeseen, jottei kappaleeseen muodostuisi sekundäärisiä taivutusjännityksiä. Testikappaleita käsiteltiin leikkaamisen jälkeen kolmella telakkateollisuudelle tyypillisellä tavalla, jotta nähtäisiin niiden vaikutus väsymiskestävyyteen. Käytetyt käsittelyt olivat:

1. Särmien hionta
2. Särmien lisäksi myös leikkaus- ja valssauspintojen hionta
3. Hiekkapuhallus särmien sekä leikkaus- ja valssauspintojen hionnan jälkeen.

Jäännösjännitysten mittaustulosten perusteella todettiin, että valssaus on aiheuttanut valssauspintaan puristusjäännösjännityksiä ja plasmaleikatun pinnan puristusjäännösjännitykset ovat hiukan suuremmat kuin valssauspinnan. Pintojen hionta kasvattaa puristusjäännityksiä molemmilla pinnoilla. Hiekkapuhallus hionnan jälkeen pienentää jäännösjännityksiä ja hiekkapuhalluksen jälkeen pinnan jäännösjännitykset vastaavat noin valssatun pinnan tilaa. Myöskin plasmaleikatulla reunalla jäännösjännitykset pienenevät hiekkapuhalluksen seurauksena, mutta eivät yhtä merkittävästi. Hiekkapuhalletun pinnan pinnankarheus on suurempi kuin leikatun, hiotun tai valssatun pinnan. Mittaustuloksien mukaan R_a -arvot [Profiilin aritmeettinen keskipoikkeama] olivat tyypillisesti välillä 0,3–1 μm hiotulle pinnalla, 1–3 μm plasmaleikatulle pinnalle, 3–10 μm valssatulle pinnalla ja 6–20 μm hiekkapuhalletulle pinnalle. On kuitenkin huomattava, että hiekkapuhalletun pinnan lovien kärkien muoto on vähemmän terävä ja täten loven muoto on parempi väsymisen kannalta. Keskimääräinen loven kärjen säde oli hiotulle pinnalle 3,2 μm ja hiekkapuhalletulle pinnalle puolestaan 8,3 μm . Tuloksena saatiin, että hiottu pinta antaa parhaan väsymiskestävyyden ja hiekkapuhalletulla pinnalla saavutetaan melkein yhtä hyvä väsymiskestävyys. Näiden molempien väsymiskestävyydet ovat huomattavasti parempia kuin tilanteessa, jossa vain särmät ovat hiotut. Materiaalin myötölujuudella todettiin olevan suuri vaikutus väsymiskestävyyteen ja suuri myötölujuus johtikin suurempaan väsymislujuuteen. Hionnan todettiin poistavan rakenteen pinnasta valssauksesta ja plasmaleikkauksesta johtuneita vikoja ja kasvattaneen pinnan puristusjäännösjännityksiä ja tämän seurauksena väsymislujuus kasvoi. Myöskin särön alkupisteiden todettiin riippuvan jälkikäsitteystä. Hiotuilla sekä hiekkapuhalletuilla kappaleilla särön ydintymiskohta oli tyypillisesti HAZ:n ja perusaineen rajan läheisyydessä lujemmilla teräksillä, kun taas teräksellä, jonka lujuus on 355 MPa, särö ydintyi tyypillisesti plasmaleikatulle reunalle. Testikappaleilla, joilla vain särmät olivat hiotut, väsyminen tapahtui tyypillisesti valssatulta pinnalta riippumatta materiaalin myötölujuudesta. (Remes et al. 2013, s. 21–29)

2.1.1 Jäännösjännitysten vaikutus väsymiskestävyyteen

Jäännösjännityksillä tarkoitetaan rakenteeseen eri valmistusprosesseissa muodostuneita jännityksiä, jotka vaikuttavat rakenteessa vaikei siihen vaikuttaisi ulkoista kuormitusta. Jäännösjännitysten täytyy olla rakenteessa sisäisesti tasapainossa siten, että jäännösjännitysjakamaa integroimalla poikkileikkauksen yli, täytyy tulokseksi tulla nolla.

Tästä seuraa, että kun jossain kohdassa rakennetta vaikuttaa puristusjäännösjännitys, toisaalla täytyy vaikuttaa vetojäännösjännitys. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 217–237)

Jäännösjännityksiä voi muodostua esimerkiksi lämpökäsittelyiden, koneistuksen ja hitsauksen seurauksena. Väsymisen kannalta toivottuja ovat puristusjäännösjännitykset, sillä ne parantavat väsymiskestävyyttä. Vetojäännösjännitykset puolestaan huonontavat väsymiskestävyyttä sekä voivat vaikuttaa haitallisesti korroosionvastustuskykyyn. Erityisesti oleellisia ovat kappaleen pinnassa vaikuttavat jäännösjännitykset, sillä väsymissäröt alkavat tyypillisesti kasvamaan kappaleen pinnasta ja puristusjäännitys pyrkii sulkemaan säröä, kun taas vetojäännitys pyrkii avaamaan ja kasvattamaan säröä. Tästä seuraa se, että puristusjäännösjännitys kappaleen pinnassa hidastaa särön ydintymistä sekä kasvua, kun taas vetojäännösjännitys nopeuttaa särön ydintymistä ja kasvua. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 217–237)

Erilaisten hiontaprosessien kohdalla muodostuviin jäännösjännityksiin vaikuttaa olennaisesti, kuinka paljon hiottavan kappaleen pinta lämpenee. Jos materiaalin pinnan lämpötila pääsee kasvamaan riittävästi, alkaa materiaalin pinnassa tapahtumaan termoplastisia muodonmuutoksia, jotka johtavat vetojäännösjännitysten muodostumiseen. Hiiliteräket kestävät tyypillisesti lämpötiloja 100–180 °C ennen kuin vetojäännösjännityksiä alkaa muodostumaan. Erilaisissa kiillotusprosesseissa lämpötila pysyy niin alhaisena, ettei termoplastisia muodonmuutoksia pääse tapahtumaan. Tällöin pinnassa tapahtuvat plastiset muodonmuutokset aiheuttavat puristusjäännösjännityksiä. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 217–237)

Jäännösjännitystila ei ole ikuisesti vakio vaan se voi muuttua esimerkiksi korkeissa lämpötiloissa, ulkoisen kuormituksen tai erilaisten valmistusprosessien kuten koneistuksen seurauksena. Työstön jäljiltä materiaalin pinnalla on paljon dislokaatioita, jotka eivät ole stabiileja korkeissa lämpötiloissa, joten korkeissa lämpötiloissa pinta hakeutuu uudelleen tasapainotilaan ja tämän seurauksena jäännösjännitysten suuruus pienenee. Ulkoisen kuormituksen seurauksena jäännösjännitykset pienenevät, jos materiaalissa tapahtuu myötäämistä. Ulkoisen kuorman vaikutus jäännösjännitystilän muutoksiin on siis yhteydessä materiaalin myötäämiseen. Siispä materiaalin korkeampi myötölujuus ja pieni

ulkoinen kuorma pienentävät jäännösjännitystilan muutoksia. (Torbilon, Zahavi 1996, s.217–237)

2.1.2 Myötölujittumisen vaikutus väsymiskestävyyteen

Myötölujittuminen on materiaalin myötölujuuden ja kovuuden kasvamista plastisen muodonmuutoksen seurauksena. Kun myötölujuus ja kovuus kasvavat, tyypillisesti sitkeys huononee. Myötölujittumista tapahtuu automaattisesti esimerkiksi lastuavassa työstössä, mutta tällöin lujittuminen vaikuttaa vain erittäin lähellä kappaleen pintaa. Kun halutaan saada aikaan merkittävän suuruista myötölujittumista, käytetään kylmämuovausprosesseja, kuten silovalssausta tai kuulapuhallusta [engl. shot peening]. Tällöin saadaan aikaan suurempi lujuuden kasvu ja myös vaikutussyvyys kasvaa. Väsyttävässä kuormituksessa pintaan muodostunut lujittunut kerros vastustaa säröjen muodostumista ja säröt voivatkin alkaa kasvaa lujittuneen kerroksen alta eikä materiaalin pinnasta, kuten käsittelemättömällä materiaalilla kävisi. Tietenkään lujittumista ei voida jatkaa loputtomiin asti kasvattamalla plastisia muodonmuutoksia, vaan jossain vaiheessa materiaaliin pintaan alkaa muodostua säröjä ja, jos käsittelyä vielä jatketaan tai se tehtiin alun perinkin liian suurella voimalla, alkavat säröt kasvamaan yhteen ja aiheuttavat pinnan lohkeilua. Myötölujittumisen vaikutukset voidaan todeta vielä kohotetuissakin lämpötiloissa, kuitenkin rekristallisaatio lämpötilan ylittyessä myötölujittuminen jopa pienentää väsymiskestoikää. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 196–217)

2.1.3 Pinnankarheuden vaikutus väsymiskestävyyteen

Pinnankarheudella on merkittävä vaikutus väsymiskestävyyteen, sillä pinnan laaksot ja huiput aiheuttavat materiaalin pintaan jännityskeskittymiä ja erityisesti laaksot toimivat väsymissäröjen ydintymiskohtina. Väsymiskestävyyden kannalta pienempi profiilin aritmeettisen keskipoikkeaman R_a -arvo on parempi ja etenkin maksimiprofiilinsyvyys R_{max} -arvo on oleellinen, sillä suurimpiin laaksoihin muodostuu myös suurimmat jännityskeskittymät. Myöskin laakson kärjen muodolla on merkitystä jännityskeskittymään ja siten väsymiskestävyyteen ja laakson kärkien terävyyttä kuvataan keskimäärisellä laakson pyöristyssäteellä r_v . Mitä suurempi loven kärjen pyöristyssäde sitä parempi se on väsymiskestävyyden kannalta. r_v -arvot eivät ole käytössä arkipäiväisessä konepajatoiminnassa tai insinööriyössä toisin kuin R_a -arvot, vaan sitä käytetään lähinnä

tutkimuksissa. Kylmämuokkausmenetelmät, kuten silovalssaus ja silopainaminen perustuvat pyöreäkärkisiin painimiin ja kuulapuhallus kuuliin, joilla käsiteltävää pintaa pommitetaan, joten nämä menetelmät myös jättävät jälkeensä pinnan, jonka laaksoilla on suhteellisen suuret pyöristyssäteet, jotka ovat väsymisen kannalta edullisia. Mikäli pinnan epäsäännöllisyydet olisivat ideaalisesti kuorman suuntaisia, tällöin väsymiskestoikä olisi noin 1,5 kertaa parempi kuin tilanteessa, jossa epäsäännöllisyydet ovat kohtisuorassa kuormitukseen nähden. Lujien terästen väsymiskestävyys on tyypillisesti herkkä pinnan epäjatkuvuuksien aiheuttamille jännityskeskittymille. Pinnankarheus voi myös huomattavasti muuttua käytön aikana ja tämä on otettava huomioon väsymiskestävyyttä tarkasteltaessa. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 183–196)

2.1.4 Käytössä olevia väsymiskestävyuden parannusmenetelmiä

Alla on esitelty muutamia teollisessa käytössä olevia väsymiskestävyuden parantamiseen soveltuvia prosesseja. Kuten jo aiemmin todettiin, hitsien väsymiskestävyuden parantamiseen käytettävät prosessit on rajattu työn ulkopuolelle, joten niitä ei käsitellä tässäkään. Siihen, kuinka hyvin esitellyt prosessit ovat sovellettavissa leikattujen levyreunojen käsittelyyn, ei oteta tässä kantaa.

Väsymiskestävyuden parantamiseen käytettävät tekniikat perustuvat yhden tai useamman edellä käsitellyn pinnan ominaisuuden: lujuus, jäännösjännitystila ja pinnanlaatu parantamiseen. Väsymiskestävyyttä parantavia menetelmiä ovat erilaiset abrasiiviset- sekä kylmämuovausprosessit. Abrasiivisiprocesseja, jotka parantavat väsymiskestävyyttä, ovat mm. kiillotus, läppäys ja superfinish-prosessi. Näille tyypillistä on erittäin pieni pinnankarheus ja ohut puristusjäännösjännityskerros. Väsymiskestävyuden paraneminen perustuukin suurelta osin hyvään pinnanlaatuun. Jos työstettävän kappaleen lämpötila pääsee kohoamaan liiaksi abrasiivisissäprosesseissa, muodostuu helposti vetojäännösjännityksiä. Kylmämuokkausprosesseja ovat muun muassa silovalssaaminen, kuulapuhallus ja silopainaminen. Kylmämuokkausprosesseilla saadaan aikaan puristusjäännösjännityksiä, jotka vaikuttavat syvemmälle materiaaliin kuin abrasiivisilläprosesseilla. Kylmämuokkausmenetelmillä saadaan myös suurempi parannusvaikutus väsymiskestävyyteen. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 183–257)

Kuulapuhalluksella saadaan aikaan puristusjäännösjännityksiä, myötölujittumista sekä väsymisen kannalta edullinen pinnanlaatu. Kuulapuhallettu pinta on täynnä pintaan iskeneiden kuulien aiheuttamia pallosektorin muotoisia painaumuksia ja niiden ympärille muodostuneita koholla olevia purseita. Painaumien muoto on seurausta kuulapuhalluksessa käytettävän kuulan koosta, joten painaumien säde on tyypillisesti välillä 0,2–1 mm. Kuulapuhalluksella voidaan saavuttaa 400–800 MPa suuruisia puristusjäännösjännityksiä ja myötölujittumisen suuruus on tyypillisesti 20–40 prosenttia. Molemmat näistä arvoista tietenkin riippuvat käsiteltävästä materiaalista ja kuulien koosta sekä nopeudesta. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 183–245)

Silovalssaamisessa pinnankarheus pienenee, pinta myötölujittuu ja pintaan muodostuu puristusjäännösjännityksiä. Silovalssauksessa myötölujittumisen yhteydessä pinnan kovuus kasvaa tyypillisesti 10–50 prosenttia ja myötölujittuneen kerroksen paksuus on tyypillisesti välillä 0,2–25 mm. Pinnankarheus riippuu käsiteltävästä edeltäneestä pinnankarheudesta ja saavutettavat R_a -arvot ovat tyypillisesti välillä 0,16–1,25 μm . (Torbilon, Zahavi 1996, s. 183–252)

Silopainamisessa työkalupäänä toimii pyöreä timantista valmistettu kärki, jota painetaan käsiteltävän kappaleen pintaan. Silopainamisella saavutetaan erinomainen pinnanlaatu ja R_a -arvoiksi saadaan jopa 0,04–0,32 μm ja työkalupään pyöreän muodon ansiosta myös pinnan laaksojen muodot ovat pyöreäkärkisiä ja täten väsymisen kannalta edullisia. Silopainamisessa käytettävät voimat ovat suhteellisen pieniä, mutta pintapaine on suuri työkalupään pienen kosketuspinnan ansiosta. Myötölujittumissyvyys onkin tyypillisesti vain 0,1–0,4 mm, mutta lujittumisen suuruus on 20–50 prosenttia. Pintaan muodostuu myös puristuksella olevia jäännösjännityksiä. Kun silopainamisen seurauksena pinnankarheus pienenee, pinta lujittuu ja siihen muodostuu puristusjäännösjännityksiä, niin tämä johtaa siihen, että väsymissäröt saattavat alkaa ydintymään ja kasvamaan ohuen lujittuneen pinnan alapuolelta. (Torbilon, Zahavi 1996, s. 252–257)

2.2 HiFIT-työkalu

HiFIT-työkalu on DYNATEC:n kehittämä paineilmakäyttöinen vasara, jota käytetään hitsin rajaviivojen käsittelemiseen HFMI-menetelmällä. Työkalun neula värähtelee suurella taajuudella, joka on säädettävissä välillä 180–300 Hz. HiFIT-työkalu ja siinä käytettävä

neula näkyvät kuvassa 1. Neulan pyöreällä kärjellä vasaroidaan hitsin rajaviivaa siten, että reunaviivalle muodostuu noin 0,2 mm syvä painauma. HiFIT-työkalun tehokkuus hitsin väsymiskestävyyden parantamisessa perustuu kolmeen tekijään:

- 1) Hitsin rajaviivalle muodostuu pyöristys
- 2) Hitsin rajaviivalle muodostuu puristusjäännösjännityksiä, jotka hidastavat särön ydintymistä ja kasvua
- 3) Materiaali lujittuu plastisten muodonmuutosten seurauksena eli myötölujittuu. (HiFIT 2018)

Tämän työn yhteydessä HiFIT-työkaluun suunnitellaan uusi neula, jota on tarkoitus käyttää termisillä menetelmillä leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyden parantamiseen, vasaroimalla leikatun levyn särmiä.



Kuva 1. HiFIT-työkalu ja irallinen neula

2.3 Pikateräkset ja niiden lämpökäsittelyt

Tässä luvussa perehdytään pikaterästen lämpökäsittelyn eri vaiheisiin kirjallisuudesta löytyvän tiedon perusteella. Pikateräksen määritelmä standardin SFS-EN ISO 4957:2018

(2018) mukaan: ”pääasiassa työstössä ja muovauksessa käytettäviä teräksiä, joilla on niiden kemiallisen koostumuksen perusteella suurin kuumakovuus ja päästönkestävyys noin lämpötilaan 600 °C asti”. Teräksien lämpökäsittelyihin löytyy suuntaa antavia lämpötiloja ja pitoaikoja kirjallisuudesta, mutta materiaalin valmistajilta on saatavissa materiaalikohtaiset lämpökäsittelyohjeet.

Pikateräksen lämpökäsittelyissä on vältettävä nopeita kuumennuksia, sillä pikateräksillä, kuten muillakin runsaasti seostetuilla teräksillä, on tyypillisesti huono lämmönjohtavuus, mikä johtaa epätasaiseen lämpöjakaumaan kappaleessa ja tämän seurauksena jännitysten kasvuun rakenteessa ja mahdollisesti materiaalin murtumiseen (Lindroos et al. 1986, s. 484).

Lämpökäsittelyitä tehdessä olisi materiaali suojattava kosketukselta ilman kanssa, sillä tämä voi johtaa raudan tai muiden teräksen seosaineiden hapettumiseen sekä hiilenkatoon. Hiilenkato on seurausta siitä, että materiaalin pinnankerroksessa oleva hiili reagoi ympäröivän hapen kanssa hiilimonoksidiksi sekä -dioksidiksi ja pääsee tämän jälkeen haihtumaan teräksestä. (Kivivuori 2016, s. 121) Hiilikato voi vaikuttaa teräkseen 0,5–2 mm syvyyteen saakka. Hiilenkatoa tapahtuu lämpötiloissa yli 600 °C. Ilman kanssa kosketuksiin pääseminen voidaan estää käyttämällä suolakylpyuunia, alipaineuunia tai suojakaasu-uunia. (Koivisto et al. 1997, s. 122–125)

Suolakylvyissä käytettävät suolat soveltuvat käytettäväksi vain tietyillä lämpötila-alueilla. Tämän seurauksena esimerkiksi pikateräksen vaiheissa toteutettavaan karkaisuun vaaditaan useampaa kuin yhtä suolaseosta. Valitsemalla suola oikein voidaan, sillä saada aikaan hiilettävä tai tyypettävä vaikutus käsiteltävän materiaaliin pintaan. Suola voidaan valita myös siten, ettei se reagoi materiaalin kanssa. Yksi suolakylpyjen etu on tarkka lämpötilansäätö. (Koivisto et al. 1997, s. 122–123; Kivivuori 2016, s. 137–138) Suolakylpyuuneja käytetään paljon työkaluterästen lämpökäsittelyissä (Koivisto et al. 1997, s. 122–123).

Alipainekarkaisukin on erittäin tavallinen karkaisutapa työkaluteräksille. Alipaineuunissa kaasutiiviiseen kammioon saadaan aikaiseksi alhainen paine, esimerkiksi 1–100 μbar , ja tätä estetään kappaleen pinnan reagointi ilman kanssa. Kappaleen lämmitys tapahtuu säteilyn välityksellä. Sammutus toteutetaan ohjaamalla kappaleeseen virtaus paineistettua typpeä. Typen painetta säätelemällä voidaan säädellä jäähtymisnopeutta. Jäähtymisnopeus

on nopeampi kuin ilmaan sammuttamalla, mutta kuitenkin hitaampi kuin öljyyn sammuttamalla. Alipainekarkaisun seurauksena pinnanlaadun muutokset ovat pienet verrattuna muihin karkaisumenetelmiin. Alipaineuunin yhteydessä voi olla myös öljyallas, joka mahdollistaa sammutuksen öljyyn. (Koivisto et al. 1997, s. 122–125)

Suojakaasu-uunissa ilma korvataan halutunlaisella kaasulla, joka voi olla inertti-, endo- tai eksokaasu. Inerttikaasuista esimerkkejä ovat mm. argon, helium ja erilaiset tyypipohjaiset seokset (Cary, Roberts 1980, s. 147; Kivivuori 2016, s. 118; Härkönen, Kivivuori 2004, s. 135). Endokaasut soveltuvat keski- ja runsashiilisten terästen käsittelyyn ja ne ovat pääosin vedyn, hiilidioksidin ja typen seoksia. Eksokaasuja käytetään vähä- ja keskihiilisille teräksille ja niitä valmistetaan polttamalla hiilivetyjä epätäydellisesti. (Koivisto et al. 1997, s. 122–125) Eksokaasulle tyypillinen koostumus on esim. noin 15 % vetyä, noin 10 % hiilidioksidia, 1 % metaania ja loput reilu 70 % typpeä (Cary, Roberts 1980, s. 151; Koivisto et al. 1997, s. 122).

Alla olevissa luvuissa käsitellään pikateräksisen tuotteen valmistuksessa tyypillisesti käytettäviä lämpökäsittelyprosesseja. Liitteeseen I on koottu kaavio, joka kuvaa tyypillistä pikateräksisen työkalun valmistusprosessia. Kaikki liitteessä I sekä alla olevat vaiheet eivät ole välttämättömiä vaiheita, sillä esimerkiksi materiaali toimitetaan tyypillisesti valmiiksi pehmeäksihehkutetussa tilassa, jolloin tämä vaihe voidaan jättää välistä.

2.3.1 Pehmeäksihehkutus

Pehmeäksihekkutuksella saadaan teräs niin pehmeäksi, että sitä voidaan työstää lastuamalla. Pehmeäksihekkutus suoritetaan pikateräksillä tyypillisesti korkeissa lämpötiloissa, jopa 800–850 °C, ja kappaletta pidetään tässä lämpötilassa 2–5 tuntia riippuen kappaleen koosta. Jäähdytys on suoritettava hitaasti nopeudella 10–20 °C/h noin 600 °C asti, jonka jälkeen loppu jäähdytyksestä voidaan suorittaa ilmassa. (Lindroos et al. 1986, s. 484)

2.3.2 Myöstöhekkutus

Myöstöhekkutus tunnetaan myös nimellä jännitystenpoistöhekkutus. Myöstöhekkutuksella pyritään pienentämään kappaleessa esimerkiksi hitsauksen, koneistuksen, kylmämuovauksen tai nopean jäähtymisen aiheuttamia jäännösjännityksiä.

Myöstöhehkutuksessa teräksen mikrorakenteessa ei tapahdu muutoksia. Hehkutuksen jälkeen sisäisten jännityksen maksimiarvot vastaavat teräksen myötölujuutta hehkutuslämpötilassa. Sisäiset jäännösjännitykset eivät voi olla materiaalin myötölujuutta suurempia ja, koska myötölujuus laskee lämpötilan kohotessa, vapautuvat hehkutuslämpötilassa vallitsevaa myötölujuutta suuremmat jäännösjännitykset hehkutuslämpötilaa vastaavan myötölujuuden suuruiseksi. (Koivisto et al. 1997, s. 114)

Jäännösjännitysten vapautuessa kappaleessa voi tapahtua muodonmuutoksia, joten suorittamalla myöstöhehkutus saadaan suurimmat muodonmuutokset tapahtumaan ja näitä muodonmuutoksia voidaan pyrkiä korjaamaan hienotyöstöllä vielä ennen karkaisua (Härkönen, Kivivuori 2004, s.79; Lindroos et al. 1986, s. 485; Koivisto et al. 1997, s. 114). Jäännösjännitysten vapautumisesta seuraaviin muodonmuutoksiin täytyy varautua jättämällä riittävä työstövara valmistettavaan kappaleeseen. (Kivivuori 2016, s.72)

Myöstöhehkutuksen jälkeen kappaleen on annettava jäähtyä hitaasti, sillä jo ilmassa jäähtyminen voi aiheuttaa niin suuria lämpötilaeroja rakenteeseen, että jännitykset alkavat kasvaa uudestaan. Tällainen hidaskäily voidaan toteuttaa esimerkiksi antamalla kappaleen jäähtyä uunin mukana. (Lindroos et al. 1986, s. 317–318)

Pikateräksen myöstöhehkutuksessa käytettävät lämpötilat ovat esimerkiksi 650–750 °C ja pitoaika riippuu materiaalivahvuudesta suhteella 1 h/25 mm (Hitachi metals 2015, s. 9).

2.3.3 Karkaisu

Pikateräksiä karkaistessa austenitointilämpötilaa ennen suoritetaan yleensä kaksi tai kolme esilämmitystä, joiden avulla tasataan lämpötilajakaumaa ja täten jännitys jakaumaa kappaleen sisällä. Täten pienentäen murtumisen riskiä. Esikuumennuksen avulla voidaan pienentää kappaleen muodonmuutoksia ja lyhentää pitoaikaa austenitointilämpötilassa. Käytettäessä kahta esilämmitystä tyypilliset lämpötilat näille ovat 600 ja 900 °C ja puolestaan kolmea esilämmitystä käytettäessä lämpötilat ovat 550, 850 ja 1050 °C. (Härkönen, Kivivuori 2004, s. 51, 82) Hitachi metals suosittelee esilämmitystä ja ohjeistaa käytettäväksi lämpötiloja 500–550 ja 900 °C käytettäessä kahta esilämmitystä ja lämpötiloja 500–550, 850 ja 1050 °C kolmea esilämmitystä käytettäessä (Hitachi metals 2015, s. 9).

Oleellisinta karkaisussa on sopivan austenitointilämpötilan ja pitoajan valinta, sillä pikateräksen parhaat ominaisuudet saadaan melko kapealla lämpötila-pitoaika-alueella. Mitä korkeammaksi austenitointilämpötila valitaan sitä tehokkaammin karbidit liukenevat austeniittiin, mutta tämä myös johtaa helposti liialliseen rakeenkasvuun. Samoin käy myös liian pitkän pitoajan tapauksessa. Parhaat ominaisuudet saadaan valitsemalla austenitointilämpötila ja pitoaika siten, että riittävä määrä karbideja liukenee austeniittiin ja merkittävää rakeenkasvua ei ehdi tapahtua. Tyypillinen austenitointilämpötila pikateräksille on välillä 1200–1300 °C ja pitoaika austenitointilämpötilassa vain muutamia minuutteja. (Härkönen, Kivivuori 2004, s. 51, 82–83)

Hitachi metals yhtiön pikateräsesitteessä on austenitointilämpötilat viidelletoista pikateräslaadulle. Näiden suositellut austenitointilämpötilat ovat välillä 1050–1290 °C ja suositus on valita austenitointilämpötila materiaalille annetun alueen ylärajalta, jos vaaditaan suurta lujuutta korkeissa lämpötiloissa ja puolestaan suurempaa sitkeyttä tavoitellussa lämpötila tulisi valita alueen alarajalta. (Hitachi metals 2015, s. 8)

Karkaistavia kappaleita suunniteltaessa on hyvä tiedostaa etenkin sammutusvaiheessa tapahtuva nopea lämpötilan muutos, joka voi aiheuttaa kappaleeseen suuriakin jännityksiä. Jos nämä jännitykset ylittävät materiaalin lujuuden, kappaleeseen syntyy särö. Säröjen muodostumista voidaan välttää suunnittelemalla rakenne siten, ettei siihen synny merkittäviä jännityskeskittymiä. Suuria jännityskeskittymiä aiheuttavat muun muassa terävät kulmat, suuret poikkileikkauksen muutokset, epäsymmetrisyys, stanssatut merkinnät ja koneistusjäljet. Myöskin liian korkeasta austenitointilämpötilasta tai liian pitkästä pitoajasta johtuva rakeenkasvu altistaa rakenteen säröilylle, samoin kuin myös pinnan hiiltyminen tai hiilenkato. Kappaleisiin voi syntyä säröjä myös sammutuksen jälkeen, jos kappaletta ei päästetä välittömästi sammutuksen jälkeen. (Cary, Roberts 1980, s. 133–134) Pikateräkset tyypillisesti karkenevat jopa ilmaan, mutta ilmassa jäähdyttäessä teräksen pinta hapettuu. Tästä syystä pikaterästen sammutus tehdään tyypillisesti öljyyn, kuumaan suolakylpyyn tai painetyyppeen (Härkönen, Kivivuori 2004, s. 83).

2.3.4 Päästö

Pikateräksien päästössä jäännösausteniitin seosaineet erkautuvat karbideiksi. Kun seosaineet muodostavat hiilen kanssa karbideja, austeniitin hiilipitoisuus pienenee ja päästön

jälkeisessä jäädytyksessä muodostuu karbidien lisäksi martensiittia. Päästö suoritetaan pikateräksillä tyypillisesti 540–590 °C lämpötilassa. Kun päästö suoritetaan välittömästi sammutuksen jälkeen, estetään jäännösausteniitin stabiloituminen sekä kappaleen mahdollinen murtuminen. Jäännösausteniitista muodostunut martensiitti on vielä päästettävä, joten pikateräkselle on suoritettava päästö vähintään kahdesti, usein kuitenkin kolmesti. (Härkönen, Kivivuori 2004, s. 83)

Pitoaika päästölämpötilassa on riippuvainen materiaalivahvuudesta. Pitoajan ja ainevahvuuden suhde on tyypillisesti noin 1 h/20 mm. Päästöehkutuksen jälkeen suoritetaan ilmajäädytys. (Metalliteollisuuden Keskusliitto 2001, s. 308; Hitachi metals 2015, s. 8–9)

2.4 Työkaluteräksset materiaalia lisäävässä valmistuksessa

Materiaalia lisäävä valmistus tunnetaan myös 3D-tulostuksena, mutta termiä 3D-tulostus käytetään usein ei-teknisissä yhteyksissä ja se yhdistetään tyypillisesti alhaisen suoritus- ja hintatason laitteisiin (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017 2017, s. 8). Tästä syystä tässä työssä käytetään termiä materiaalia lisäävä valmistus. Tässä työssä tutustuttiin materiaalia lisäävään valmistukseen soveltuvien työkaluterästen tarjontaan. Selvityksen taustalla oli ajatus siitä, olisiko suunniteltu työkalupää mahdollista valmistaa materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmällä perinteisen koneistuksen sijasta ja siten yksinkertaistaen valmistusprosessia. Jauhepetisulatukseen ja suorakerrostukseen soveltuvia työkaluteräs jauheita on saatavilla useilta eri valmistajilta ja alla esitelly joitain niistä. Materiaalitiedot perustuvat verkkosivuilta saatavaan tietoon ja esimerkiksi puuttuvat kovuusarvot johtuvat siitä, etteivät ne ole saatavissa valmistajan verkkosivuilta.

EOS:än tarjonnasta löytyy työkaluteräksiä tuotenimillä maraging-teräs MS1 standardimerkinnältään 1.2709 ja ruostumaton teräs CX. Lämpökäsiteltyinä erkautuskarkaisemalla MS1:n myötölujuudeksi ilmoitetaan 2000 MPa ja kovuudeksi 50–57 HRC (EOS 2017, s. 1–5). Erkautuskarkaistulle CX:lle puolestaan ilmoitetaan myötölujuudeksi 1670 MPa ja kovuudeksi 51 HRC (EOS 2015, s. 1–4).

Sandvik:in tarjonnasta löytyy kahdeksan työkaluterästä: A6, D2, H13, M2, S2, T15, 18Ni300 ja 1.2709. (Sandvik 2015, s. 1–8)

Uddeholm valmistaa työkaluteräsjauhetta tuotenimikkeellä AM Corrax. Materiaalille voidaan saavuttaa haluttu kovuus välitä 34–50 HRC valitsemalla vanhennuskäsittelyn lämpötila ja pitoaika oikein. Teräs on suunniteltu muovien ruisku- ja suulakepuristuksessa tarvittaviin työvälineisiin. (Uddeholm 2017, s. 1–8)

Formetrix on Nanosteel-yhtiöstä vuonna 2018 omaksi yhtiökseen irrotettu materiaalia lisäävän valmistuksen liiketoimintayksikkö. He valmistavat työkaluterästä tuotenimikkeellä L-40 ja tälle materiaalille luvataan lämpökäsiteltynä myötölujuus 1350 MPa ja kovuus 50 HRC. Hiiletyskarkaisulla pinnan kovuudeksi voidaan saada jopa 70 HRC. Mahdollisiksi käyttökohteiksi esitellään esimerkiksi meistejä ja muotteja. (Nanosteel 2018, s. 1–2)

SLM Solution:in työkaluteräsvalikoimasta löytyy seuraavat vaihtoehdot: maraging-teräs 1.2709 ja kuumatyöteräs 1.2344. 1.2709:n myötölujuudeksi ilmoitetaan lämpökäsiteltynä 1935 MPa ja kovuudeksi 580 HV10. 1.2344:n myötölujuudeksi lämpökäsiteltynä ilmoitetaan 1590 MPa. (SLM Solutions, s.1–16)

VBN Components tarjoaa materiaalia lisäävän valmistuksen palvelua kehittämilleen työkaluteräksille. Heidän tarjonnastaan löytyy tuotenimikkeet: Vibenite 150, Vibenite 280, Vibenite 290 ja Vibenite 350. Vibenite 150:n kovuus saadaan valittua välille 55–63 HRC. Vibenite 280 on metallien leikkaukseen soveltuva työkaluteräs kovuudeltaan 63–70 HRC. VBN Components mainostaa Vibenite 290 materiaaliaan kovimpana kaupallisesti saatavana teräksenä kovuuden maksimiarvon ollessa välillä 68–72 HRC. Vibenite 350 on ruostumaton teräs, jolle saadaan lämpökäsittelyillä aikaan kovuus 60 HRC. Kovuuden arvo annetuilla väleillä valitaan käyttämällä sopivia karkaisu- ja päästölämpötiloja. VBN Components suosittelee, että valmistettävien kappaleiden pinnoille jätetään vähintään 0,5 mm paksu hiomavara, suurimmin kuormitetuille pinnoille kuitenkin jopa 1 mm, jotta valmistusmenetelmästä aiheutuvat pinnan viat saadaan poistettua. (VBN Components)

Voestalpine Bohler Edelstahl on aloittanut vuonna 2017 materiaalia lisäävän valmistuksen materiaalien tuotesarjan nimeltä BOHLER AMPO. Tällä hetkellä siihen kuuluu kuusi teräslaatua, joista seuraavat ovat työkaluteräksiä: W360 AMPO, W722 AMPO, M789 AMPO. W360 AMPO on kuumatyöteräs, jolle voidaan saada lämpökäsiteltynä kovuudeksi 55–57 HRC ja myötölujuudeksi 1500–1670 MPa (Böhler edelstahl 2018, s. 1–2). W722

AMPO on puolestaan maraging-teräs, jonka kemiallinen koostumus täyttää standardimerkinnän DIN 1.2709:n vaatimukset ja sen kovuus voidaan saada välille 50–54 HRC ja myötölujuus puolestaan välille 1890–2120 MPa (Böhler edelstahl). M789 AMPO voidaan lämpökäsitellä erkautuskarkaisemalla kovuuteen 50–54 HRC ja myötölujuuteen 1760–1810 MPa (Böhler edelstahl 2019, s. 1–2).

Carpenter Technology Corporationin materiaalia lisäävän valmistuksen tuotteista löytyy kaksi työkaluterästä: maraging-teräs CarTech M300/1.2709 ja kuumatyöteräs CarTech H13. (Carpenter 2018, s. 1–2)

Erasteel valmistaa useita materiaalia lisäävän valmistuksen jauheita Pearl Micro tuotesarjassaan. Sarjaan sisältyy seuraavat AISI standardinimikkeiden mukaiset kylmätyöteräkset: D2 ja D7, kuumatyöteräs: H13, pikateräkset: M4, A11 ja T15. Näiden lisäksi tarjolla on yksi maraging-teräs ja kolme pikaterästä, joille ei ole ilmoitettu vastaavuuksia standarditeräksiin. (Erasteel 2012, s. 1–2)

Deutsche Edelstahlwerken tuoteperhe Printdur sisältää kaksi kuumatyöterästä Printdur 2343, joka vastaa standardinimikettä 1.2343 ja Printdur 2344 standardinimikkeeltään 1.2344 sekä tuotenimikkeen Printdur Powderfort, jonka kemiallinen koostumus on lähellä terästä 1.2709, sen vaatimuksia kuitenkin täyttämättä. (Deutsche Edelstahlwerke 2018)

Kaikki edellä esiteltyjen yritysten tuotteet perustuvat jauhepetisulatukseen ja useat niistä ovat sovellettavissa myös suorakerrostukseen, mutta Saksalainen Gefertec valmistaa omanlaistaan ratkaisua. Gefertec myy lankahitsaustulostimia ja niissä käytettäviä materiaalilankoja. Suurin heidän laitteistaan kykenee valmistamaan jopa 3000 kg painavia kappaleita. Heidän materiaalivalikoimansa sisältävät kaksi kuumatyöterästä: 1.2343 ja 1.2367. (Gefertec)

Suomessa toimii useista yrityksiä, jotka tarjoavat metallien lisäävään valmistuksen palveluita. Näistä ainakin kaksi tarjoaa materiaaleissaan työkaluteräksiä. 3D Formtech:ltä on saatavissa EOS:än maraging-terästä MS1 standardimerkinnältään 1.2709 (3D Formtech). 3d step:n tarjonnasta löytyy maraging-teräs 1.2709 (3d step).

Esiteltyjen materiaalien ominaisuuksia on koottu taulukkoon 1. Taulukossa esitetään vain sellaiset materiaalit, joista on ilmoitettu vähintään kovuuden tai lujuuden arvo.

Taulukko 1. Esiteltyjen materiaalia lisäävään valmistukseen soveltuvien materiaalien ominaisuuksia kootusti

Valmistaja	Materiaali	Myötölujuus [MPa]	Kovuus [HRC]	Lähde
EOS	MS1/1.2709	2000	50–57	(EOS 2015, s. 1–4)
EOS	CX	1670	51	(EOS 2015, s. 1–4)
Uddeholm	AM Corrax	-	34–50	(Uddeholm 2017, s. 1–8)
Formetrix	L-40	1350	50 ^a	(Nanosteel 2018, s. 1–2)
SLM Solutions	1.2709	1935	580 HV10 ^b	(SLM Solutions, s. 1–16)
SLM Solutions	1.2344	1590	-	(SLM Solutions, s. 1–16)
VBN Components	Vibenite 150	-	55–63	(VBN Components)
VBN Components	Vibenite 280	-	63–70	(VBN Components)
VBN Components	Vibenite 290	-	68–72	(VBN Components)
VBN Components	Vibenite 350	-	60	(VBN Components)
Voestalpine Bohler Edelstahl	W360 AMPO	1500–1670	55–57	(Böhler edelstahl 2018, s. 1–2)
Voestalpine Bohler Edelstahl	W722 AMPO/1.2709	1890–2120	50–54	(Böhler edelstahl)
Voestalpine Bohler Edelstahl	M789 AMPO	1760–1810	50–54	(Böhler edelstahl 2019, s. 1–2)
a. Hiiletyskarkaisulla pinnan kovuus jopa 70 HRC. b. Kovuus ilmoitettu muista poiketen yksikössä HV10.				

2.4.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen työkaluterästen lämpökäsittelyt

Siltä osin kuin tietoa materiaalien lämpökäsittelyistä on saatavilla, niin lisäävän valmistuksen jälkeen joudutaan tekemään vastaavanlaiset lämpökäsittelyt kuin vastaaville perinteisillekin materiaaleille. Aiemmin esiteltyt maraging-teräkset erkautuskarkaistaan, kuten perinteistenkin valmistusmenetelmien jälkeen. Esimerkiksi W360 AMPO:n lämpökäsittely puolestaan vastaa aivan perinteisen kuumatyöteräksen lämpökäsittelyä (Böhler edelstahl 2018, s. 1–2). VBN Components toimittaa valmistetut kappaleet valmiiksi

lämpökäsiteltyinä, mutta heidän verkkosivuiltaan löytyy myös ohje Vibenite 290 karkaisuun ja päästöön. Kyseiselle materiaalille austenitointilämpötila on 1000–1200 °C riippuen halutuista ominaisuuksista ja päästö toteutetaan kolmesti lämpötilassa 560 °C, jotka molemmat ovat tyypillisiä arvoja pika- ja kuumatyöteräksille (VBN Components).

Kaikilla materiaaleilla lämpökäsittelyiden lämpötilat ja pitoajat ovat materiaalikohtaisia, ja tämän vuoksi valmistajilta on saatavissa lämpökäsittelyohjeet materiaaleilleen.

3 TYÖKALUPÄÄN SUUNNITTELU JA VALMISTUS

Tämän luvun alla käsitellään vaiheittain työkalun suunnitteluun kuuluneita vaiheita geometrian suunnittelusta materiaalivalintaan ja lämpökäsittelyihin.

3.1 Materiaalit

Työkalun käyttötarkoituksena on saada aikaan plastisia muodonmuutoksia teräslevyjen särmiin. Työkalua suunniteltaessa asetettiin tavoitteeksi, että sen toimivuutta tulnaisiin testaamaan SSAB:n Strenx 1100 rakenneteräkseen. SSAB ilmoittaa tyypillisiksi arvoiksi kyseiselle teräkselle kovuuden 43 HRC ja murtolujuuden 1340 MPa (SSAB 2018). Koska kyseisen teräksen kovuuden ja lujuuden arvot ovat noin korkeat, myös suunniteltavalta neulalta vaaditaan suurta lujuutta, kovuutta ja kulutuskestävyyttä. Niinpä materiaalivalintaa tehdessä lähdettiin miettimään erilaisia työkalu- ja pikateräsvaihtoehtoja niiden suurten kovuus- ja lujuusarvojen sekä hyvän kulutuskestävyyden takia.

Materiaalivalintaa helpottamaan yhden neulan pyöreä kärki hiottiin siten, että siihen saatiin noin 3 mm halkaisijalta oleva tasainen pinta, jotta siitä voitaisiin mitata kovuuksia. Neulaan kärkeen hiottuun tasaiseen pintaan tehtiin puolen millimetrin välein neljä kappaletta kovuusmittauksia, joiden keskiarvoksi saatiin noin 950 HV5. Myös neulan tasaista päätyä hiottiin hiukan, jotta päästiin eroon suurimmista koneistusjäljistä ja siitäkin mitattiin puolen millimetrin välein neljä kovuuden arvoa, joiden keskiarvoksi saatiin 923 HV5. Keskiarvot ovat melko lähellä toisiaan, joten voisi päätellä neulojen olevan läpikarkaistuja. Tärkeintä näissä mittauksissa oli kuitenkin saada alkuarvo, johon omaa materiaalivalintaa voidaan verrata ja miettiä tarvittavaa kovuutta. Kaikkien mitattujen pisteiden arvot sekä keskiarvot ovat koottuna taulukkoon 2.

Taulukko 2. Alkuperäisestä neulasta mitattuja kovuuden arvoja

HV5	Mittaus 1.	Mittaus 2.	Mittaus 3.	Mittaus 4.	Keskiarvo
Neulan kärki	937	947	927	988	950
Neulan perä	908	927	937	918	923

Materiaalivalinnassa päädyttiin konepajatekniikan laboratoriossa tarjolla olleeseen sorvin säästöterään. Terän kemiallista koostumusta ei pystytty selvittämään, mutta terän pinnassa olleesta tekstistä ”super cobalt” tehtiin johtopäätös, että kyseessä on kobolttia sisältävä pikateräs. Terän Vickers-kovuuden arvoja mitattiin neljästä pisteestä yhden millimetrin välein ja kovuuksien keskiarvoksi saatiin 999 HV10. Mitattujen pisteiden kovuudet on koottuna taulukkoon 3.

Taulukko 3. Säästöteräsihiosta mitattuja HV10 kovuuden arvoja

HV10	Mittaus 1.	Mittaus 2.	Mittaus 3.	Mittaus 4.	Keskiarvo
Ennen lämpökäsittelyä	996	981	1009	1011	999
Pehmeäksi hehkutettu	330	318	326	318	323

3.2 Geometria

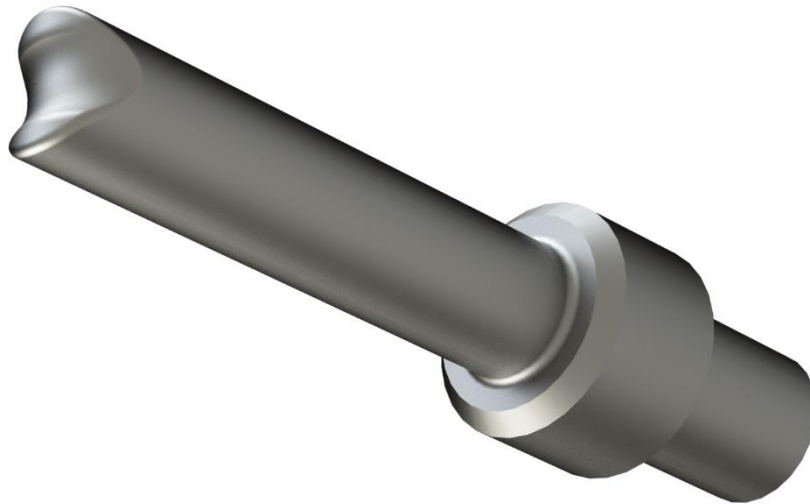
Työkalupään geometrian suunnittelu aloitettiin tutustumalla HiFIT-laitteeseen ja sen olemassa oleviin neuloihin. Työkaluun on saatavissa neuloja erikokoisilla kärjen pyöristyssäteillä, mutta muut neulan mitat, kuten halkaisijat sekä pituus, ovat vakioita. Suunnitellessa mietittiin erilaisia ratkaisuja, joilla neula voitaisiin kiinnittää työkaluun.

Neulan pään muodoksi suunniteltiin satulapinta, jonka ajateltiin pysyvän levyn särmässä hyppäämättä siitä pois ja jonka ajateltiin liukuvan särmää pitkin eteenpäin. Tämän lisäksi satulapinnan reunat ovat pyöristetty siten, ettei neulan kärkeen jää teräviä reunoja, joilla olisi mahdollista vaurioittaa käsiteltävää kappaletta. Työkalua oli tavoite päästä testaamaan, jotta nähtäisiin, toimiiko se kuten oli ajateltu, mutta valitettavasti tätä ei päästy toteuttamaan.

Erilaisia neularatkaisuja pohdittaessa mietittyjä rakennevaihtoehtoja olivat muun muassa:

- 1) Neula, jonka liityntämitat kopioidaan jo olemassa olevista neuloista ja käytännössä vain kärjen geometria suunnitellaan uudelleen
- 2) Olemassa olevan neulan kärkeen kiinnitettävissä oleva kärki, johon on muotoiltu satulapinta
- 3) Mahdollisuus suunnitella neula suuremmalla kärjen pyöristyssäteellä. Tämä vaatisi kuitenkin myös työkalun muiden osien uudelleen suunnittelua ja valmistusta.

Lopputuloksena päädyttiin neulaan, jonka kiinnitysmitat kopioitiin suoraan olemassa olevista neuloista, jolloin uusi neula saadaan kiinnitettyä laitteeseen ilman mitään muutoksia. Suunniteltu neulan geometria selviää kuvasta 2. Neljästä neulasta mitattiin mikrometrillä oleelliset halkaisijat, joiden perusteella pystyttiin tekemään arvio siitä mihin toleranssiluokkaan halkaisijoiden arvot osuvat. Myös kolmen erilaisella kärjen pyöristyssäteellä varustetun neulan massat punnittiin, jotta saadaan käsitys siitä, onko niiden massoissa suurta eroa suunniteltavan kärjen massaan. Aihio, josta työkalu oli tavoite valmistaa, punnittiin ja sen tiheys pyrittiin määrittämään riittävällä tarkkuudella, sillä sen päädyt eivät olleet täysin suorat, joten tilavuuden ja sitä kautta tiheydenkään arvot eivät ole erittäin tarkkoja. Solidworks:sta saatiin suunnitellun neulan tilavuus ja sitä kautta saatiin laskettua arvio neulan massasta, jota verrattiin olemassa olevien neulojen massoihin ja voitiin todeta sen olevan samaa suuruusluokkaa. Aikomus oli punnita neula vielä valmistuksen jälkeen. Tällöin selviäisi, kuinka suunnitteluvaiheessa tehty arvio onnistui.



Kuva 2. Suunniteltu neulan geometria

3.3 Pikaterästyökalupää

Pikateräksinen työkalu oli aikomus valmistaa kobolttia sisältävästä pikateräksisestä sorvin säästöterästä, jonka kovuus oli noin 1000 HV10. Käytettävä materiaali oli siis kovempaa kuin alkuperäiset HiFIT-neulat ja, koska kyseinen materiaali on tarkoitettu kestäämään sorvausta, voisi sen kulutuskestonkin arvella olevan riittävä. Materiaalin suuren kovuuden takia sitä ei luonnollisesti pysty koneistamaan haluttuun muotoon ilman pehmeäsihekkutusta. Pehmeäsihekkutuksen jälkeen materiaali voidaan koneistaa

haluttuun muotoon jättäen työstetyn neulan liukupinnoille pieni hiontavara, jotta pinnat voidaan hioa haluttuihin toleransseihin ja pinnankarheuteen lämpökäsittelyiden jälkeen. Koneistuksen jälkeen työkalupäälle voidaan tehdä myöstöhehkutus, jolla pienennetään koneistuksessa aiheutuneita jäännösjännityksiä ja tämän jälkeen voidaan suorittaa karkaisu sekä tarvittava päästö kolmeen kertaan.

Alun perin ideana oli valmistaa työkalupää yliopistolla koneistuksineen ja lämpökäsittelyineen. Niinpä materiaalille suunniteltiin lämpökäsittelyohje, joka kattaisi kaikki tarvittavat lämpökäsittelyn vaiheet. Suunniteltu lämpökäsittelyohje on nähtävissä liitteessä III. Kuten jo aiemmin todettu työkalupään valmistus jäi toteuttamatta, sillä koneistusta ja lämpökäsittelyä ei kyetty toteuttamaan tämän kandidaatintyön aikataulussa. Aihio kuitenkin pehmeäksihehkutettiin, koska siinä vaiheessa työtä oletettiin, että työkalupää saadaan valmistettua ja pehmeäksihehkutusta käsittelevä luku on sisällytetty työhön.

3.3.1 Työkalupään pehmeäksihehkutus

Lämpökäsittelyä suunniteltiin olettaen käsiteltävän säästöterän olevan kobolttia sisältävää pikaterästä. Terän lämpökäsittelyjen suunnittelu osoittautui hankalaksi, koska materiaalin valmistajaa tai kemiallista koostumusta ei tunnettu. Valmistajat julkaisevat materiaaleilleen lämpökäsittelyohjeet, mutta nyt sellaiseen ei päästy käsiksi. Niinpä lämpökäsittelyohje laadittiin itse käyttäen apuna muutaman pikateräsvalmistajan lämpökäsittelyohjetta kobolttipitoisille pikateräksille sekä lämpökäsittelyitä koskevaa kirjallisuutta. Koska kyseessä oli sorvin terä, on sen kovuus niin suuri, että sitä ei voi työstää lastuamalla ilman että se ensiksi pehmeäksihehkutetaan. Pehmeäksihehkutuksen jälkeen kappale koneistetaan haluttuun muotoon jättäen hiontavarat liukupinnoille, jotta ne voidaan hioa karkaisujen ja päästöjen jälkeen toleransseihin.

Pehmeäksi hehkutus toteutettiin lämmittämällä aihio noin 850°C:een, jossa sitä pidettiin 2,5 tuntia, jonka jälkeen uuni sammutettiin ja aihion annettiin jäähtyä uunin mukana huoneenlämpöön. Pehmeäksihehkutuksen jälkeen ahiosta mitattiin Vickers-kovuuden arvoja neljä kappaletta yhden millimetrin välein ja keskiarvoksi saatiin 323 HV10. Mittauspisteiden kovuuden arvot ovat koottuna taulukkoon 3. ja mittauspisteet nähtävissä liitteestä II. Liitteen II numeroiti vastaa taulukon 3 (luku 3.1, s. 29) numerointia.

4 TULOKSET

Työn tuloksena saatiin suunniteltua HiFIT-laitteeseen uusi neula. Neulaa ei kuitenkaan saatu valmistettua kandidaatintyön mukaisessa aikataulussa, joten valmistus ja neulan testaus jouduttiin jättämään työn ulkopuolelle. Koska neulaa ei valmistettu, ei myöskään voida sanoa sitä, olisiko neula toiminut suunnitellulla tavalla tai olisivatko koneistuksen jälkeiset lämpökäsittelyt onnistuneet. Käytännön osuudesta voidaan todeta, että pehmeäsihekkutus onnistui, sillä kovuus saatiin vastaavalle tasolle kuin tyypillisillä pehmeäsihekkutetuilla pikateräksillä. Pehmeäsihekkutetun aihion lastuttavuutta testattiin myös manuaalisorvilla ennen aihion toimittamista eteenpäin ja lastuaminen onnistui ilman ongelmia.

Leikattujen levyreunojen väsyminen on monimutkainen ilmiö. Mitattavissa olevia suureita, joilla on merkittävä vaikutus väsymiskestävyyteen, ovat pinnanlaatu, erityisesti särömäiset alkuviaat, jäännösjännitystilä ja materiaalin lujuus. Millainen näiden suureiden yhteisvaikutus leikatulla särmällä vallitsee, määräytyy leikkausprosessista ja sen parametreista, perusaineesta ja leikkausprosessin jälkeisistä käsittelyistä. Myöskin materiaalin mikrorakenteella ja sen muutoksilla voi olla vaikutusta väsymisketoikään. Kuten Thomas (2011, s. 481–493) tutkimuksessaan totesi, perusaineen ferriittisen mikrorakenteen muuttuminen martensiitiksi aiheuttaa HAZ:n alueelle puristusjäännösjännityksiä.

Materiaalia lisäävää valmistusta voidaan tämän kandidaatintyön puitteissa pitää hyvinkin mahdollisena valmistusmenetelmänä työkalun valmistuksessa. Näin on ainakin tekniseltä kannalta katsottuna, koska tässä työssä ei perehdytty valmistusprosessin kustannuksiin, on tässä myöskin mahdotonta ottaa kantaa valmistusprosessin valinnan vaikutuksesta lopputuotteen hintaan. Materiaalia lisäävään valmistukseen soveltuvia työkalu- ja pikateräslaatuja on saatavilla useilta valmistajilta ja niiden kovuuden arvot yltyvät parhaimmillaan yli 70 HRC. Materiaalien kehittyminen tällä saralla on ollut nopeaa viime vuosina ja todennäköisesti kehitys tulee vielä jatkumaan.

Työkalu- ja pikateräkset vaativat monimutkaisia lämpökäsittelyprosesseja ja materiaalin ominaisuudet määräytyvät pääosin karkaisulämpötilasta ja pitoajasta. Pitoajat ovat tämän

tyyppisillä materiaaleilla tyypillisesti lyhyitä ja onkin pidettävä huolta siitä, että pitoajat ja karkaisulämpötilat pidetään tarkasti halutuissa arvoissa, sillä pienilläkin muutoksilla voi olla merkittävää vaikutusta karbidien liukenemiseen ja rakeenkasvuun. Lämpökäsittelyiden aikana on myöskin huolehdittava siitä, ettei materiaali pääse kosketuksiin ilman kanssa, etenkin yli 600 °C lämpötiloissa, sillä tällöin alkaa tapahtumaan hiilenkatoa, joka on seurausta hiilen reagoimisesta hapen kanssa. Tyypillisesti lämpökäsittelyt suoritetaan suolakylpy- tai alipaineuunissa, jolloin saadaan estettyä materiaalin reagoiminen hapen kanssa.

5 POHDINTA

Yhteenvedona luvussa 2 käsitellystä leikattujen levyreunojen väsymisestä voidaan todeta, ettei kyse ole todellakaan yksinkertaisesta aiheesta, koska levyreunan väsymiskestävyys riippuu reunan lujuudesta, pinnanlaadusta, jäännösjännitystilasta ja mikrorakenteesta. Leikkausmenetelmän ja materiaalin valinnalla on vaikutusta kaikkiin näistä ja niitä voidaan muuttaa myös jälkikäsitteilyiden avulla. Esitellyissä tutkimuksissa todettiin, että leikkaus- ja valssaussuunnan suhteella voi olla vaikutusta leikkauspinnan pinnanlaatuun (Mäntyjärvi, Väisänen & Karjalainen 2009, s. 547–550). Tutkimuksissa todettiin myös, että leikkauskaasun ja -nopeuden valinnalla on vaikutusta leikkauspinnan ominaisuuksiin (Thomas 2011, s. 481–493). Myöskin jäähtymisnopeudella on suuri vaikutus HAZ:n ominaisuuksiin ja sitä kautta pinnan lujuuteen ja jäännösjännityksiin. Jäähtymisnopeus puolestaan riippuu lämmöntuonnista, ympäröivästä väliaineesta ja työlämpötilasta. Lopputulos voi siis olla erilainen, jos leikkausprosessi suoritetaan veden alla tai ilmassa. Selvästikin plasma-, laser-, ja polttoleikkaus aiheuttavat erilaisen pinnanlaadun, HAZ:n ominaisuudet ja jäännösjännitystilan, mutta myös käytettävällä leikkauskaasulla, leikkausnopeudella ja leikattavalla materiaalilla on vaikutusta näihin. Leikkauspinnan ja valssatun pinnan ominaisuuksilla on myös merkitystä siihen, mihin väsymissäröt alkavat ydintymään. Siispä, jos leikkuuprosessin ja materiaalin yhteisvaikutuksena seuraa tilanne, jossa väsymissäröt ydintyvät valssatulle pinnalle, on ymmärrettävästi turha enää koittaa parantaa leikkauspinnan ja särmän väsymiskestävyttä.

Jos materiaalin lujuudella ei havaita olevan vaikutusta tai lujempi materiaali johtaa huonompaan väsymislujuuteen, voisi arvella syyn olevan materiaaliin työstössä muodostuneissa särön kaltaisissa vioissa. Tällaiset särön kaltaiset viat johtavat siihen, että väsymiskestoikä määräytyy särönkasvunopeuden perusteella. Jos taas tällaisia vikoja ei ole, merkittävä osa väsymiskestoikästä menee ensin särön ydintymiseen, jonka jälkeen särönkasvu alkaa. Särömäisistä vioista voi päästä eroon esim. hiomalla.

Väsymiskestävyuden parantamiseen soveltuisivat erityisesti kylmämuovausmenetelmät, sillä näillä saadaan aikaan suuria ja materiaaliin syvälle vaikuttavia puristusjäännösjännityksiä, sekä voidaan saada aikaan materiaalin myötölujittumista.

Kylmämuovauksessa myöskin pinnanlaatu voi parantua huomattavasti. Tässä työssä suunnitellun iskevään työstöön perustuvan tekniikan lisäksi muita mahdollisia keinoja parantaa leikatun levyn särmien väsymiskestävyyttä voisivat olla esimerkiksi esiteltyjen silovalssauksen ja kuulapuhalluksen sovellukset.

Jos vain mahdollista neulan valmistukseen käytettävä materiaali kannattaisi valita siten, että materiaali on yleisesti käytössä olevaa laatua. Tällöin materiaalin vaatimat prosessit ovat lämpökäsittelylaitoksilla tiedossa ja jopa useiden asiakkaiden kappaleiden käsittely on mahdollista toteuttaa yhtä aikaa.

Työssä avoimiksi kysymyksiksi jäivät:

- 1) Neulan käytettävyys, kestävyys ja soveltuminen levyn särmien ja reunan käsittelyyn
- 2) Käsittelyn vaikutukset särmän jäännösjännitystilaan, pinnanlaatuun, geometriaan ja materiaalin myötölujuuttumiseen
- 3) Käsittelyn vaikutus väsymislujuuteen.

Väsytyksokeet rajattiin jo suosiolla tämän työn ulkopuolelle, joten kohtaan 3 ei tässä työssä ollut aikomustakaan saada valmista vastausta. Tavoitteena oli saada vastaus vähintään kohtaan 1 ja mahdollisesti alustavia mittauksia kohdan 2 kysymyksiin, mutta aikataulullisista syistä nämäkin jouduttiin rajaamaan työn ulkopuolelle.

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli suunnitella työkalupää, joka soveltuisi leikattujen levyreunojen väsymiskestävyyden parantamiseen. Työkalupää suunniteltiin käytettäväksi HiFIT-laitteessa ja työkalupää oli tavoitteena valmistaa, jotta nähtäisiin, toimiiko se kuten oli suunniteltu. Kaikkia tälle kandidaatintyölle asetettuja tavoitteita ei saavutettu, sillä suunniteltua neulaa ei kyetty valmistamaan työn aikataulussa ja täten suunnittelun lopputuloksen toimivuutta ei pystytty testaamaan. Väsytykokeet oli jo alkuun rajattu tämän työn ulkopuolelle, samoin kuin kattavat jäännösjännitys-, kovuus- ja pinnanlaatumittaukset. Mutta jos työkalupää olisi saatu valmistettua, niin sen toimivuutta olisi ollut tavoite testata alustavasti. Testattavia näkökulmia olisivat olleet neulan käytettävyys, kestävyys, sen jälkeensä jättämä geometria ja pinnanlaatu. Ensimmäiset arviot näistä olisi voitu toteuttaa silmämääräisesti tai yksinkertaisilla mittavälineillä. Kiinnostusta olisi myös ollut toteuttaa alustavia pinnanlaatu- ja jäännösjännitysmittauksia, jos työkalupäätä olisi päästy testaamaan ja niille olisi löytynyt aikaa.

Työn kirjallisuusselvitysosoitus kuitenkin antaa viitteitä siitä, että suunniteltu työkalu voi toimia väsymiskestävyyden parantamisessa.

Myöskin kirjallisuusselvityksen seurauksena voidaan todeta, että materiaalia lisäävä valmistus voi olla varteenotettava valmistusmenetelmä myös työkalun valmistuksessa, jossa materiaalilta vaaditaan erinomaista kovuutta, lujuutta ja kulutuksenkestoa. Ihmeisiin materiaalia lisäävä valmistukseen ei pysty, vaan kappaleilta vaaditaan tällöinkin vastaavan kaltaiset lämpökäsittelyt kuin perinteisilläkin valmistusmenetelmillä. Lisäksi materiaalia lisäävän valmistuksen jälkeen kappaleita joudutaan todennäköisesti viimeistelemään muun muassa hiomalla, jotta pinnanlaatu saadaan vaaditulle tasolle.

LÄHTEET

Böhler edelstahl. Böhler W722 AMPO. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 28.4.2019].
Saatavissa: https://www.bohler-edelstahl.com/media/Datasheet_AMPO_W722.pdf

Böhler edelstahl. 2007. Böhler S700. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 22.8.2019].
Saatavissa:
<https://www.bohler-edelstahl.com/app/uploads/sites/92/productdownloads/S700DE.pdf>

Böhler edelstahl. 2018. Böhler W360 AMPO. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 28.4.2019].
Saatavissa: https://www.bohler-edelstahl.com/media/W360En_AMPO.pdf

Böhler edelstahl. 2019. Böhler M789 AMPO. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 28.4.2019].
Saatavissa: https://www.bohler-edelstahl.com/media/M789En_AMPO.pdf

Carpenter. 2018. Advanced solutions for additive manufacturing. [www-tuotedokumentti].
[Viitattu 28.4.2019]. Saatavissa: <https://www.carttech.com/globalassets/literature-files/carpenter-additive-manufacturing>

Cary, R. A., Roberts, G. A. 1980. Tool steels. 4. painos. Ohio: American Society for Metals.
820 s.

Deutsche Edelstahlwerke. 2018. Printdur metal powder for additive manufacturing. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 28.4.2019]. Saatavissa: https://www.dew-powder.com/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Englisch/2018-0016_DEW_Printdur_EN.pdf

Diekhoff, P., Hensel, J., Nitschke-Pagel, Th. & Dilger, K. 2019. Fatigue strength of thermal cut edges – influence of ISO 9013 quality groups. *Welding in the World* (2019), 63:394.
Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00697-7>

Dowling, N. E. 2007. Mechanical behaviour of materials Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 3. painos. New Jersey: Pearson education, Inc. 912 s.

EOS. 2017. Material data sheet EOS MaragingSteel MS1. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://cdn.eos.info/1deee2b550955632/b3615b80c80a/MS-MS1-M290_Material_data_sheet_10-17_en.pdf

EOS. 2015. Material data sheet – FlexLine EOS StainlessSteel CX. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://cdn0.scrvt.com/eos/76cfbeaa3177ce57/803b3c722d68/SS-CX-M290_Material_data_sheet_09-15_en.pdf

Erasteel. 2012. Pearl micro metal powders for additive manufacturing. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 28.4.2019]. Saatavissa: http://www.erasteel.com/sites/default/files/media/document/CORP_Brochure_AM.pdf

Gefertec [verkkoaineisto]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: <https://www.gefertec.de/en/start/>

HiFIT. 2018. HiFIT Brochure. [www-tuotedokumentti]. Viimeksi päivitetty: 12.6.2018. [Viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: https://www.hifit.de/fileadmin/user_upload/HiFIT_Unterlagen/HiFIT_Broschuere_01_18_en.pdf

Hitachi metals. 2015. YSS high speed tool steels. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 29.4.2019]. Saatavissa: https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/auto/ml/pdf/hsts_b.pdf

Härkönen, S. & Kivivuori, S. 2004. Lämpökäsittelyoppi. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy. 287 s.

Kivivuori, S. 2016. Lämpökäsittelyoppi 2 lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy. 320 s.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 1997. Konetekniikan materiaalioppi. 6. painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 349 s.

Lindroos, V., Miekk-oja, H. M., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava. 841 s.

Metalliteollisuuden Keskusliitto. 2001. Raaka-ainekäsikirja 1: muokatut teräkset. 3. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 361 s.

Mäntyjärvi, K., Väisänen, A. & Karjalainen, J. A. 2009. Cutting method influence on the fatigue resistance of ultra-high-strength steel. *International Journal of Material Forming*, 2:1. S. 547–550.

Nanosteel. 2018. BLDR L-40 metal powders for laser powder bed fusion 3p printing. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://nanosteelco.com/images/uploads/resources/L40_Data_Sheet_June_2018_web.pdf

Remes, H., Korhonen, E., Lehto, P., Romanoff, J., Niemelä, A., Hiltunen, P. & Kontkanen, T. 2013. Influence of surface integrity on the fatigue strength of high-strength steels. *Journal of constructional steel research*, 89. S. 21–29. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.06.003>

Sandvik. 2015. Osprey metal powders technical specification. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products_downloads/metal_powders/osprey-metal-powders-technical-specification.pdf

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. 2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 47 s.

SFS-EN ISO 4957:2018. 2018. Työkaluteräkset. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 76 s.

SLM Solutions. 3d metals. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/downloads/en/200EN180924-02-POWDER_WEB.pdf

SSAB. 2018. Koneistussuosituksia strenx-teräkselle. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ladattavat-tiedostot>

Sperle, J-O. 2008. Influence of parent metal strength on the fatigue strength of parent material with machined and thermally cut edges. *Welding in the World*, 52:79. S. 79–92. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03266656>

Thomas, D. J. 2011. Optimising plasma cut-edge properties for improving the durability of bridge structures. *International journal of steel structures*, 11: 4. S. 481–493.

Torbilo, V. & Zahavi, E. 1996. *Fatigue design life expectancy of machine parts*. Florida: CRC press, Inc. 321 s.

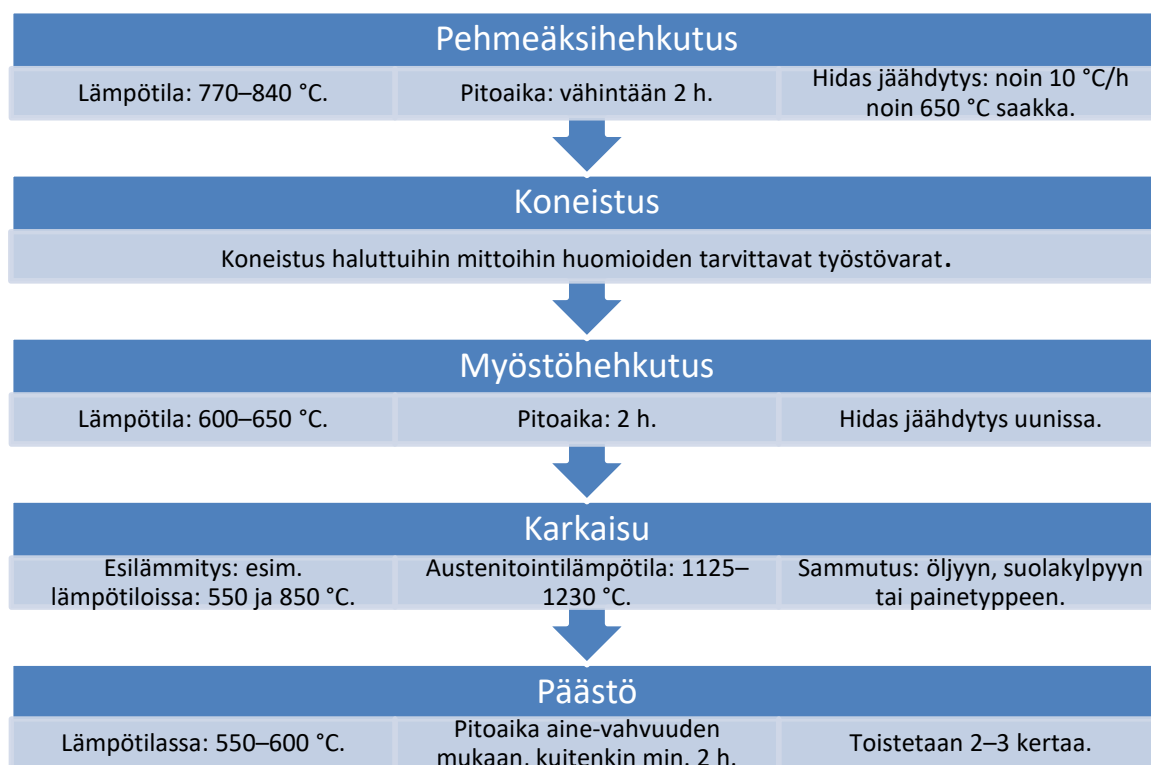
Uddeholm. 2017. Uddeholm AM Corrax. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/11/Uddeholm_AM_Corrax_eng_p_1710_e2.pdf

VBN Components. [verkkoaineisto]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: <https://vbncomponents.se/>

3D Formtech [verkkoaineisto]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: <https://3dformtech.fi/3d-tulostus/metallin-3d-tulostus/materiaalit/>

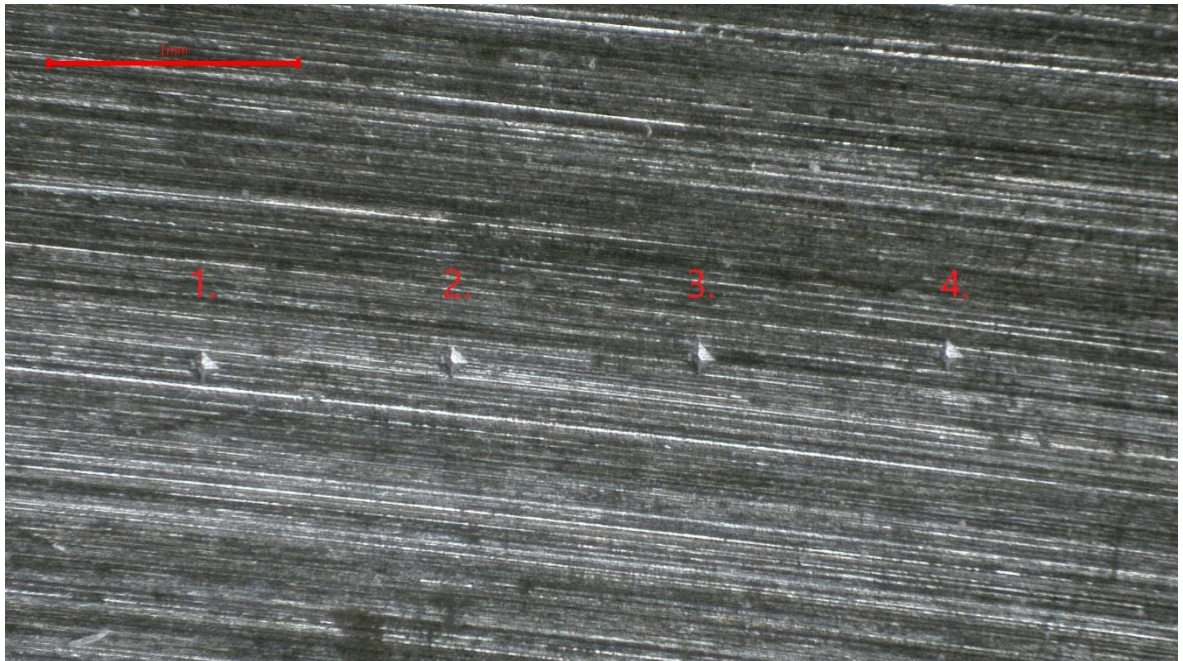
3d step [verkkoaineisto]. [Viitattu 26.4.2019]. Saatavissa: <http://www.3dstep.fi/palvelut/3dtulostus/>

Esimerkki pikateräksisen työkalun valmistusvaiheista.



Lähde kaavion lukuarvoille: (Metalliteollisuuden Keskusliitto 2001, s. 284–311)

Vickers-kovuuden (HV10) mittauspisteet pehmeäsihekkutetusta säästöteräsihiosta.



Lämpökäsittelyohje, jota on tarkoitus käyttää neulan valmistuksessa.

Lämpökäsittelyohje (”Super cobalt”)

-Kyseessä kobolttia sisältävä pikateräs (koostumus muuten tuntematon).

-Mittaa aihion kovuus (HV tai HRC) ennen pehmeäsihekkutusta, jotta saadaan vertailuarvo karkaisun onnistumiselle.

Pitoajoissa oletettu käytettävän suolakylpyjä.

Pehmeäksi hekkutus:

Lämmitys 820–880°C, pitoaika 2–3h, josta hidas jäähdys 10–20°C/h lämpötilaan 600°C asti, jonka jälkeen huoneenlämpöön ilmassa.

Myöstöhekkutus (koneistuksen jälkeen):

Lämmitys 620–680°C, jossa pitoaika noin 30 minuuttia. Jäähdytys hitaasti.

Karkaisu:

Lämmitys sisältää kolme esikuumennusta ennen austenitointilämpötilaan kuumennusta:

- 1.) Ensimmäinen esikuumennus 500–550°C, jossa pitoaika 15 minuuttia.
- 2.) Toinen esikuumennus n. 850°C, pitoaika n. 200 sekuntia.
- 3.) Kolmas esikuumennus n. 1050°C, pitoaika jälleen n. 200 sekuntia.
- 4.) Kuumennus austenitointilämpötilaan 1180–1220°C, pitoaika n. 100 sekuntia.

Sammutus öljyyn.

Päästö:

Päästö suoritetaan välittömästi karkaisun jälkeen, kun kappale on vielä lämmin sammutuksen jäljiltä. Päästö tehdään kolme kertaa, joista kolmas hiukan alemmassa lämpötilassa:

- 1.) Lämmitetään lämpötilaan 550–570°C, jossa kappaletta pidetään tunnin ajan. Tämän jälkeen jäähdytys ilmassa.
- 2.) Toista edellinen.
- 3.) Muuten sama kuin edellä, mutta pitolämpötila 510–530°C.

Kovuuden mittaus ja vertaaminen alkuperäiseen kovuuteen.

Lähteinä käytetty: (Härkönen & Kivivuori 2004; Kivivuori 2016; Hitachi metals 2015; Koivisto et al.1997; Lindroos et al. 1986; Cary & Roberts 1980; SFS-EN ISO 4957:2018 2018; Böhler edelstahl 2007)