



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Samuli Virta

Suihkusuuttimen toiminnallisuuden ja valmistettavuuden kehittäminen

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Samuli Virta

Työn nimi alaotsikoineen: Suihkusuuttimen toiminnallisuuden ja valmistettavuuden kehittäminen

Ohjaaja: Jussi Yli-Hukkala

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 31

Liitteiden lukumäärä: 1

Tämän opinnäytetyön tavoite oli kehittää induktiokarkaisussa käytettävien sammutussuihkujen valmistustapa kustannustehokkaaksi sekä tehostaa valmistamiseen kuluvaa aikaa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa sammutussuihku 3D-tulostamalla, testata tulostetun suihkun toiminta käytännössä sekä varmistaa karkaisun onnistuminen laboratoriossa.

Opinnäytetyön menetelmänä oli kehittämisprojekti toimeksiantajan yritykselle työelämälähtöisesti. Kehittämisprojektin aikana suunniteltiin 3D-tulostettava sammutussuihku induktiokarkaisuun. 3D-tulostettavan sammutussuihkun on tarkoitus tulevaisuudessa korvata hankalasti valmistettavien ja kustannuksiltaan kalliimpien vanhanaikaisten, juottamalla valmistettujen sammutussuihkujen käyttö. Kehittämisprojekti toteutettiin tiiviissä yhteistyössä yrityksen kanssa, jolla oli tarve kehittää induktiokarkaisussa käytettävien sammutussuihkujen tuotanto kustannustehokkaaksi sekä nopeaksi.

Aluksi tutkittiin 3D-tulostamisen hyödyntämisen mahdollisuutta sammutussuihkun valmistamiseen. Käytössä olevien sammutussuihkujen rakennetta tutkittiin ja sen perusteella mallinnettiin kehittyneempi ja käytäntöön paremmin soveltuva sammutussuihku. 3D-mallinnuksen pohjalta tulostettiin testiversio käytännön kokeita varten ja tulokset analysoitiin yrityksen omassa koelaboratoriossa. Tulosten perusteella voidaan jatkokehittää sammutussuihkuja myös muihin yrityksen tarpeisiin.

Opinnäytetyön liitesivu sisältää testauksessa käytettävät parametrit ja se salataan.

¹ Asiasanat: 3D-tulostus, 3D-mallinnus, karkaisu, kovuuskokeet

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Product Engineering

Author: Samuli Virta

Title of thesis: Development of quenching nozzle's functionality and manufacturability

Supervisor: Jussi Yli-Hukkala

Year:2024

Number of pages:31

Number of appendices:1

The aim of the thesis was to develop a cost-effective and rapid method for manufacturing quenching medium nozzles used in the induction hardening process.

The goal was to design and manufacture a quenching nozzle by 3D printing and to perform an induction hardening test. Laboratory measurements were executed for the hardened test piece to confirm the design of the nozzle.

The method used in the thesis was a working life-oriented development project for a manufacturing company. During the development project a 3D printable quenching nozzle for induction hardening was designed. In the future this nozzle is going to replace old nozzles that are manufactured with a time consuming and expensive soldering method. This development project was executed in close cooperation with a company that had a need to develop induction hardening quenching nozzle production to be more cost effective and less time consuming.

First the suitability of 3D printing to produce such nozzles was studied. The construction of pre-existing nozzles was investigated and then improved to create a new nozzle design. CAD program was used to create a 3D model of the nozzle. Manufacturing was based on this model. The nozzle was used in an induction hardening test and hardened pieces were examined in the company's laboratory. Based on these results further development of quenching nozzle design can be done for different types of nozzles.

An appendix containing induction hardening process parameters is confidential.

¹ Keywords: 3D Printing, Three-dimensional imaging, hardening, hardness tests

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Työn tausta	7
1.2 Työn tavoite.....	7
1.3 Työn rakenne	8
1.4 Yritys	8
2 KARKAISUN TEORIA	10
2.1 Rauta-hiili-tasapainopiirros	10
2.2 Pintakarkaisumenetelmät	11
2.3 Induktiokarkaisu	12
2.4 Päästö	14
2.5 Induktiokarkaisun sammutussuihkutus.....	14
3 SUUTTIMEN VALMISTUS AINETTA LISÄÄVÄLLÄ MENETELMÄLLÄ.....	18
4 TESTAUKSET.....	22
5 TULOKSET JA YHTEENVETO	25
LÄHTEET	30
LIITTEET	31

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Supersteel Oy:n rakennukset.	9
Kuva 3. Lämpileikkaus mallinnetusta suihkusta.	20
Kuva 4. Karkea mittapiirustus sammutussuihkusta.	20
Kuva 5 Tulostettu sammutussuihku.	21
Kuva 6. Karkaisukokeessa tarvittavat toimilaitteet.	23
Kuva 7. Karkaisuprosessi.	24
Kuva 8. Testinäyte.	25
Kuvio 1. Rauta-hiili -tasapainopiirros.	10
Kuvio 2. Jäähdytyskäyrät.	15
Kuvio 3. Jäähdytyksen vaiheet.	16
Kuvio 4. Ensimmäinen koetulos.	26
Kuvio 5. Toinen karkaisukoe.	26
Kuvio 6. Mitattavan koekappaleen painauma.	27
Kuvio 7. 34CrNiMo6 CCT-käyrä.	28
Taulukko 1. Pintakarkaisumenetelmien tyypillisimmät piirteet.	12
Taulukko 2. Taajuuden vaikutus karkaisukerrokseen.	13
Taulukko 3. Testikarkaisun ajoarvot taulukoituna.	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.

Käytetyt termit ja lyhenteet

Austeniitti	Teräksen erityinen kiderakenne.
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu.
Ferriitti	Pehmeä ja sitkeä kiderakenne, joka muodostuu teräkseen sen jäähtyessä.
Induktori	Induktiokarkaisussa käytössä oleva kela, jolla muodostetaan pyörrevirta.
Martensiitti	Erittäin kova ja hauras kiderakenne, joka muodostuu teräkseen riittävän nopean jäähtymisen seurauksena.
Perliitti	Kerrosrakenne, joka muodostuu teräkseen hitaan jäähtymisen aikana.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Supersteel Oy:ssä on pitkä historia induktiokarkaisusta. Karkaisuprosessi on kehittynyt vuosien varrella mm. nykyaikaisten NC-ohjattujen koneiden ansiosta, mutta esimerkiksi sammutussuihkut ovat rakennettu vielä yhtä työläällä tavalla kuin muutama vuosikymmen sitten. Sammutussuihkut pitää räätälöidä aina karkaistavan kappaleen mukaan, joten on perusteltua tutkia vaihtoehtoisia tapoja valmistukseen.

1.2 Työn tavoite

Sammutussuihkut ovat perinteisesti tehty sylinterimäisiä kappaleita karkaistaessa bakeliitista. Sammutussuihkun valmistaminen bakeliitista on ollut työläs ja erittäin aikaa vievä prosessi, jossa mm. emulsion virtausreiät on jouduttu poraamaan porakoneella yksi kerrallaan. Hammasruusun karkaisussa sammutussuihkun muotoilu on yleensä suorakaiteen muotoinen laatikko ja se on aiemmin valmistettu messinkilevystä juottamalla. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on:

- suunnitella ja valmistaa sammutussuihku 3D-tulostamalla
- tulostetun suihkun testaus käytännössä
- varmistaa karkaisun onnistuminen laboratoriossa.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ainoastaan rengasmaisen sammutussuihkun valmistusta. Tulosten perusteella ja toiminnan varmistuksen jälkeen yritys voi tulevaisuudessa jatkojalostaa erilaisia malleja eri tarkoituksiin helpommin CAD-ohjelmiston avulla.

Opinnäytetyön luonne on tuotekehitysprojekti, jossa haetaan uusi ratkaisu vanhan valmistusmenetelmän tilalle. Projektissa pyritään suihkun valmistettavuuteen, muokattavuuteen ja mahdollisimman alhaisiin valmistuskustannuksiin. Sammutussuihkun suunnittelussa käytetään yrityksen käytössä olevaa SolidWorks CAD-ohjelmistoa, jolla luodaan edellytykset 3D-tulostukseen.

1.3 Työn rakenne

Opinnäytetyö koostuu viidestä luvusta. Opinnäytetyön johdannossa käydään läpi työn tausta, työn tavoitteet sekä esitellään yritys. Luvussa 2 käydään läpi karkaisun teoriaa esittelemällä erilaisia pintakarkaisumenetelmiä. Lisäksi paneudutaan sammutussuihkutuksen teoriaan. Luvussa 3 esitellään jauhepetitulistusta sekä mallinnettua rakennetta. Luvussa 4 käydään läpi testauslaitteisto sekä testausprosessi. Luvussa 5 esitetään karkaisukerroksesta saadut tulokset sekä vedetään yhteen koko projekti.

1.4 Yritys

Työn toimeksiantajana toimii Parkanossa toimiva metallialan yritys Supersteel Oy. Yritys on erikoistunut voimansiirtoon liittyvien metallituotteiden valmistukseen ja toimii kansainvälisillä marine- ja offshore-markkinoilla (Supersteel, 2020). Yritys toimittaa laadukkaita ja räätälöityjä metallituotteita, kuten hammastettuja komponentteja, joita ovat mm. hammaspyörät, hammaskehät, hammasakselit ja hammaskytkimet. Lisäksi yritys tarjoaa monipuolisia alihankintapalveluja, kuten hitsausta, raskasta koneistusta, kokoonpanoa ja pintakäsittelyä.

Yritys on kehittänyt vuosikymmenten ajan induktiokarkaisuprosessia, joka on erinomainen lämpökäsittelymenetelmä tiettyjen teräslaatuojen käsittelyyn (Supersteel, 2020). Yrityksellä on Pohjoismaiden suurin kapasiteetti induktiokarkaisukäsittelylle, ja yritys suunnittelee sekä valmistaa omat induktorinsa. Lisäksi yritys osallistuu mekaanisten voimansiirtokomponenttien suunnitteluun ja valmistukseen tarjoten asiakkailleen kokonaisvaltaista palvelua voimansiirtotalan eri osa-alueille.

Supersteel Oy pystyy toteuttamaan levy- ja hitsaustöitä asiakasvaatimusten mukaisesti kustannustehokkaasti ja nopeasti (Supersteel, 2020). Kokonaisuutena yritys tarjoaa asiakkailleen monipuolisen ja laadukkaan valikoiman palveluita voimansiirron, levy- ja hitsaustöiden, sekä kokoonpanojen tarpeisiin.

Kuvassa 1 näkyvien Supersteel Oy:n nykyisten rakennusten paikalla on ollut metalliteollisuutta jo vuodesta 1962 lähtien, kun Mekes Oy aloitti tuotannon (Tuuri, 2003).



Kuva 1. Supersteel Oy:n rakennukset.

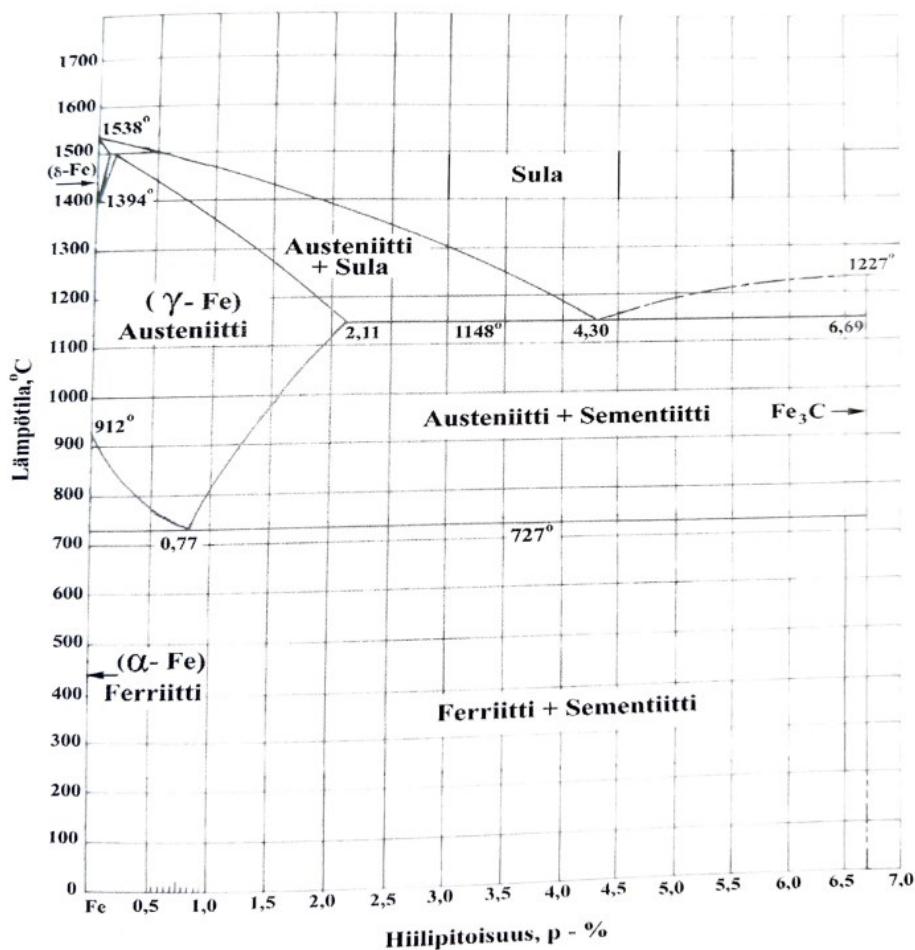
Vuodesta 1962 lähtien metalliteollisuus on jatkunut lähes katkeamatta, mutta yritysten nimet ovat vaihtuneet useaan kertaan. Muutamia tällä paikalla toimineita yrityksiä ovat olleet mm. Nordberg-Lokomo Oy, Metso, Moventas ja Takoma Gears Oy.

2 KARKAISUN TEORIA

Metallien ominaisuudet ovat muunneltavissa erilaisille lämpökäsittelyille sopiviksi. Hiiltä, rautaa, terästä sekä muita tarvittavia metalleja esim. kromia ja nikkeliä seostetaan siten, että saadaan ominaisuuksia, jotka vaikuttavat lujuuteen ja sitkeyteen (Kivivuori & Härkönen, 2009). Hiiliatomien vuorovaikutus rauta-atomien kanssa vaihtelee eri lämpötiloissa. Se mahdollistaa teräksen lämpökäsittelyn karkaisemalla. Opinnäytetyö käsittelee pääasiassa induktiokarkaisua ja sen teoriaa.

2.1 Rauta-hiili-tasapainopiirros

Kuviossa 1 esitetään rauta-hiili-tasapainopiirros. Systemissä Fe-Fe₃C havaitaan neljä jähmeää faasia: ferriitti (α), austeniitti (γ), sementiitti (Fe₃C) ja deltaferriitti (δ) (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 15).



Kuvio 1. Rauta-hiili -tasapainopiirros (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 15).

Nämä faasit eroavat toisistaan hiilirakenteensa ja ominaisuuksiensa perusteella. Ferriitin hilamuoto on tilakeskeinen kuutio, jossa rauta-atomit sijoittuvat kuution nurkkapisteisiin ja keskipisteisiin jättäen 32 % tyhjää tilaa. Tämä epäedullinen tilajärjestely rajoittaa ferriitin kykyä liuottaa hiiltä hilansa koloihin. Hiilen liukoisuus ferriitissä on huoneenlämpötilassa vain noin 10^{-7} % ja korkeimmillaan 727 °C lämpötilassa 0.2 %. Kylmämuokkauksella voidaan lisätä hilavikoja, mikä mahdollistaa hiilen liukoisuuden nostamiseen jopa 0.1 %:iin huoneenlämpötilassa. Raerajoilla hiilen pitoisuus on tasapainon osoittamaa suurempi, koska hilan järjestys häiriintyy. Hiilen läsnäolo ferriitissä korostaa myötörajaa. Suurilla kuormitusnopeuksilla ja matalissa lämpötiloissa ferriitti voi altistua lohkomurtumalle, mikä tekee siitä hauraan. Kuitenkin normaaleissa olosuhteissa ferriitti osoittaa sitkeyttä ja hyvää muovattavuutta, niin kylmänä kuin kuumana. Ferriitti on magneettinen aina 768 °C lämpötilaan asti.

Austeniitti on hilamuodoltaan pintakeskeinen kuutio ja sen atomit ovat järjestäytyneet kuution kulmiin ja sivutahkojen keskipisteisiin (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 16). Austeniitti on ferriittiä tiiviimmin pakattu, ja sen tyhjän tilan osuus on vain 26 %, mutta tyhjä tila on jakautunut siten, että suurimman kolon halkaisija on 42 % atomipallon halkaisijasta. Tämä mahdollistaa austeniitin kyvyn liuottaa hiiltä enemmän kuin ferriitti. Huipussaan liukoisuus on 2.11 % 1148 °C lämpötilassa. Austeniittiä voidaan muokata hyvin sekä kuumana että kylmänä. Kuuma muokkaus suoritetaan lähes poikkeuksetta austeniittialueella. Austeniitissä ei ole korostunut myötörajaa, eikä se ole altis lohkomurtumille. Austeniitti ei ole magneettinen.

2.2 Pintakarkaisumenetelmät

Pintakarkaisun keskeisenä päämääränä on parantaa metallikappaleen kokonaisominaisuuksia monipuolisesti (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 113). Tämä saavutetaan, kun kappaleeseen karkaistaan kova pinta ja samalla saavutetaan sisäiselle mikrorakenteelle optimaalinen sitkeys. Yksi keskeinen lisähyöty pintakarkaisulla on aikaansaada puristusjännitys kappaleen pintaan. Tämä ominaisuus parantaa kappaleen väsymisominaisuuksia, mikä on erityisen tärkeää käyttöolosuhteissa, joissa kappale altistuu toistuville kuormituksille. Vertailukohteena voidaan käyttää läpikarkaistua kappaletta, jonka pinnalle muodostuu tyypillisesti suuri vetojännitys. Pintakarkaisulla pyritään siis kokonaisvaltaisesti optimoimaan metallikappaleen mekaanisia ominaisuuksia vastaamaan paremmin käyttökohteitaan.

Induktiokarkaisu, hiiletyskarkaisu, typetys ja laserpintakarkaisu lukeutuvat pintakarkaisumenetelmiin (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 113). Tarvittavat laitteistot ja esimerkiksi vaadittava energia eroavat toisistaan paljon. Näistä induktio-, hiiletys-, ja laserpintakarkaisu perustuvat metallin martensiittisen kiderakenteen synnyttämän pintakovuuden kasvuun. Martensiittinen kiderakenne tekee materiaalista kovemman ja kestävämmän. Typetyksessä muodostuu pinnalle nitridikerros ja pinnan alle diffuusiokerrokseen nitridijakauma, ja ne kovettavat metallin pintaa. Huomionarvoista on, että typetysprosessin aikainen käsittelylämpötila on merkittävästi alhaisempi kuin sammutuskarkaisussa. Se tekee typetyksestä suositeltavan vaihtoehdon sovelluksille, joissa halutaan välttää liiallista lämpöstressiä materiaalille.

Olennaista on osata valita pintakarkaisumenetelmä käyttökohteen ja käsiteltävän materiaalin mukaan. Taulukossa 1 on kuvattu eri pintakarkaisumenetelmien saavutettavia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi pintakarkaisumenetelmän valintaan.

Taulukko 1. Pintakarkaisumenetelmien tyypillisimmät piirteet (soveltaen Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 113).

	Induktiokarkaisu	Hiiletyskarkaisu	Typetys
Tyypillinen pintakerroksen paksuus, mm	1,5...5	0,5...2,5	0,2...0,5
Pinnan kovuus, HRC	55...60	59...63	68...72
Pintapaineen kesto- kyky	Hyvä	Erinomainen	Kohtalainen
Taivutusjännitys- juus	Hyvä	Hyvä	Hyvä
Pinnan liukuominais- suudet	Huono	Hyvä	Erinomainen
Repeilyvaara käsitte- lyssä	Suuri	Pieni	Erittäin pieni

2.3 Induktiokarkaisu

Induktiokarkaisulaitteisto koostuu perinteisesti seuraavista:

- virtalähde
- suljettu vesijäähdytys virtalähteelle
- erillinen sammutusjärjestelmä karkaistavalle kappaleelle
- karkaisukone, jolla kelaa liikutetaan halutulla tavalla

- turvalaitteisto.

Induktiokarkaisuun tarvittava laitteisto on suhteellisen yksinkertainen ja verrattuna esimerkiksi hiiletyskarkaisuun energian kulutus on paljon vähäisempää (Eldec, i.a.). Kun tähän lisätään vihreällä sähköllä toimimisen mahdollisuus, induktiokarkaisulla pystytään edistämään hiilidioksidipäästötöntä tuotantoa. Tämä seikka tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon ympäristötietoisille yrityksille.

Induktiokarkaisu on lämpökäsittelymenetelmä, jossa haluttuun pintaan kohdistetaan induktiokelan ja pyörrevirran avulla suuri sähkömagneettinen kenttä (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 114). Sähkömagneettisen kentän avulla saavutetaan erittäin nopeasti kappaleen pintakerrokseen austeniittinen lämpötila. Tämän jälkeen välittömästi suoritetaan sammutus vesi- tai vesiemulsioseoksella. Sammutusprosessin nopeus on tärkeä vaihe induktiokarkaisussa, jotta kappaleeseen saadaan oikea kovuus sekä saavutetaan erittäin hyvät edellytykset martensiittiselle kiderakenteelle. Kovaa martensiittistä mikrorakennetta ja suurta puristusjännitystilaa syntyy karkaisun seurauksena, koska martensiittisen pinnan tilavuus kasvaa prosessin aikana.

Induktiokarkaisussa halutun pintakovuuskerroksen saavuttamiseen voidaan vaikuttaa sähkövirran parametreilla. Kerroksen vahvuuteen vaikuttaa muitakin asioita kuten esimerkiksi kelan liikenopeus, kelan muotoilu, sammutusnopeus ja karkaistava materiaali (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 115–116). Taajuuden vaikutusta karkaisukerroksen syvyyteen voidaan arvioida taulukon 2 mukaisesti (Foco Induction, i.a.).

Taulukko 2. Taajuuden vaikutus karkaisukerrokseen (soveltaen FOCO induction, i.a.).

Kerroksen syvyys, mm	Lämmityskelan taajuus, kHz
0,8...1,2	200...400
1...2	30...200
2...4	5...30

2.4 Päästö

Karkaistun rakenteen hehkuttaminen tunnetaan karkaisun kolmantena vaiheena, ja sitä kutsutaan päästökksi (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 56). Päästön päämääränä on parantaa rakenteen sitkeyttä ja samalla vähentää mahdollisia karkaisun aiheuttamia jännityksiä.

Induktiokarkaistavat materiaalit on aina lähes poikkeuksetta päästettävä heti karkaisun jälkeen. Päästö tehdään usein käyttämällä erillistä päästöuunia, mutta päästö voidaan tehdä myös samalla kelalla, jolla karkaisu tapahtuu.

Päästölämpötilan vaihtelu on tärkeä tekijä teräksen käsittelyssä, ja se voi vaihdella 160 °C:sta 500 °C:een tai jopa suurempaan lämpötilaan, riippuen vaatimuksista ja teräslaadusta (Bodycote, i.a.). Päästö tapahtuu yleisesti päästöuuneissa, joissa voidaan käyttää suojaavaa kaasua estämään hapettumista prosessin aikana, erityisesti korkeammissa lämpötiloissa. Päästöajan pituudella on suuri merkitys tiettyjen terästen tapauksessa, ja pidennetty aika vastaa korkeampaa lämpötilaa. On kuitenkin tärkeää huomata, että joillakin teräslaaduilla saattaa esiintyä päästöaurautta tietyissä lämpötilaväleissä, ja näitä alueita tulisi yleensä välttää. Teräksen toimittajan ohjeistoissa ilmoitetaan nämä alueet yhdessä suositellun päästölämpötilan kanssa, ja se vaihtelee kovuusvaatimusten mukaan. Tämä varmistaa, että teräksen päästö suoritetaan optimaalisissa olosuhteissa saavuttaen halutut mekaaniset ominaisuudet ja välttämällä haurautta tai muita ei-toivottuja ilmiöitä.

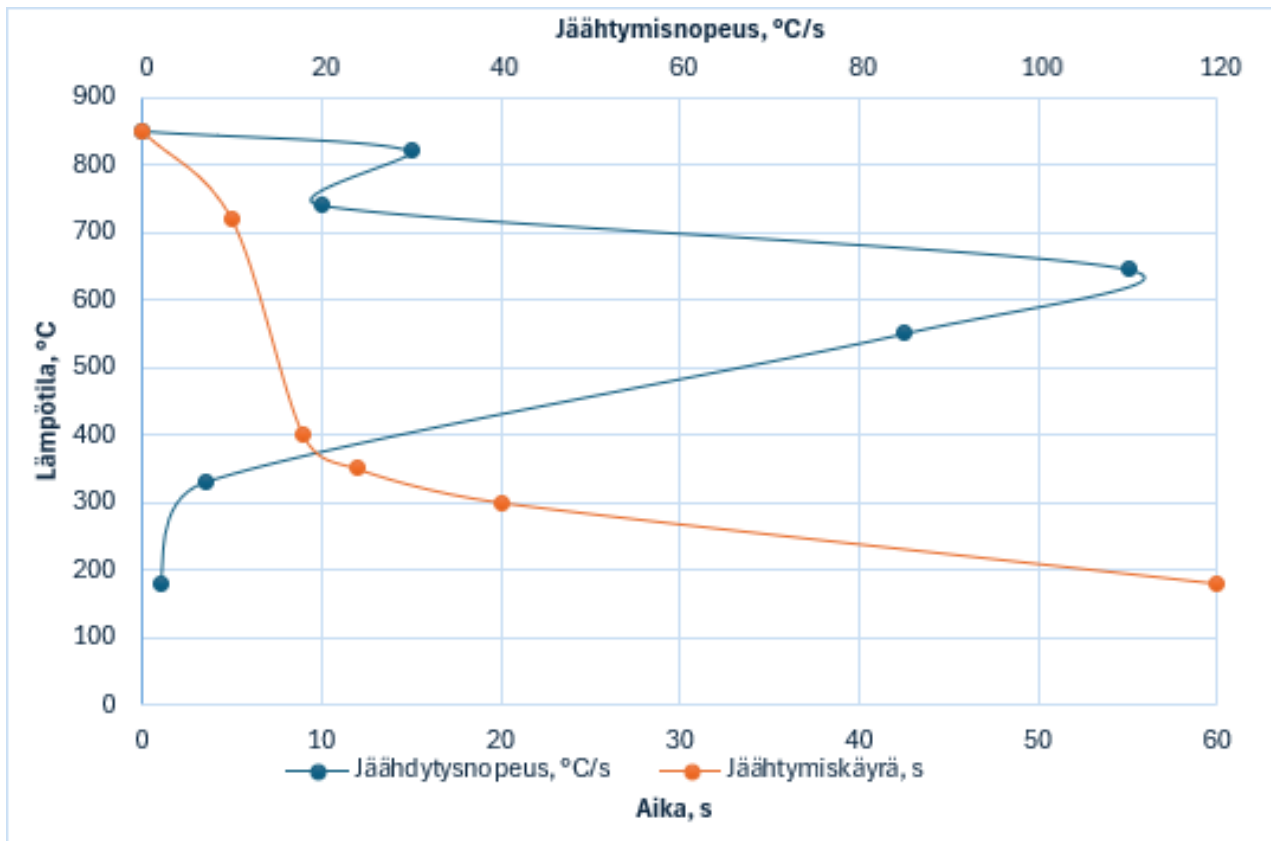
2.5 Induktiokarkaisun sammutussuihkutus

Induktiokarkaisulla voidaan karkaista monipuolisesti erilaisia kappaleen muotoja räätälöidyillä induktiokeloilla, sekä nykyaikaisella NC-ohjatulla koneella. Se asettaa haasteita toimivan sammutussuihkon muotoiluun.

Teräksen nopeaa jäädytystä austeniittialueelta kutsutaan sammuttamiseksi ja sen on tarkoitus estää austeniitin hajaantuminen ferriitiksi, perliitiksi tai bainiitiksi (Kivivuori & Härkönen, 2009, s. 52). Kriittiset lämpötila-alueet ovat 727—500°C perliittireaktiolle, sekä 400—250°C bainiittireaktiolle. Jos teräs jäähtyy näiden lämpötila-alueiden alapuolelle ilman, että austeniitti hajoaa, martensiitin muodostuminen on mahdollista. Austeniitin hajaantumisenopeus riippuu ratkaisevasti terästen seosaineista ja jäähdytysnopeudesta. Seostamattomien terästen

karkaisu vaatii suuria jäähdytysnopeuksia, jotka voidaan saavuttaa käyttämällä sammutusaineena vettä tai vesiemulsiota.

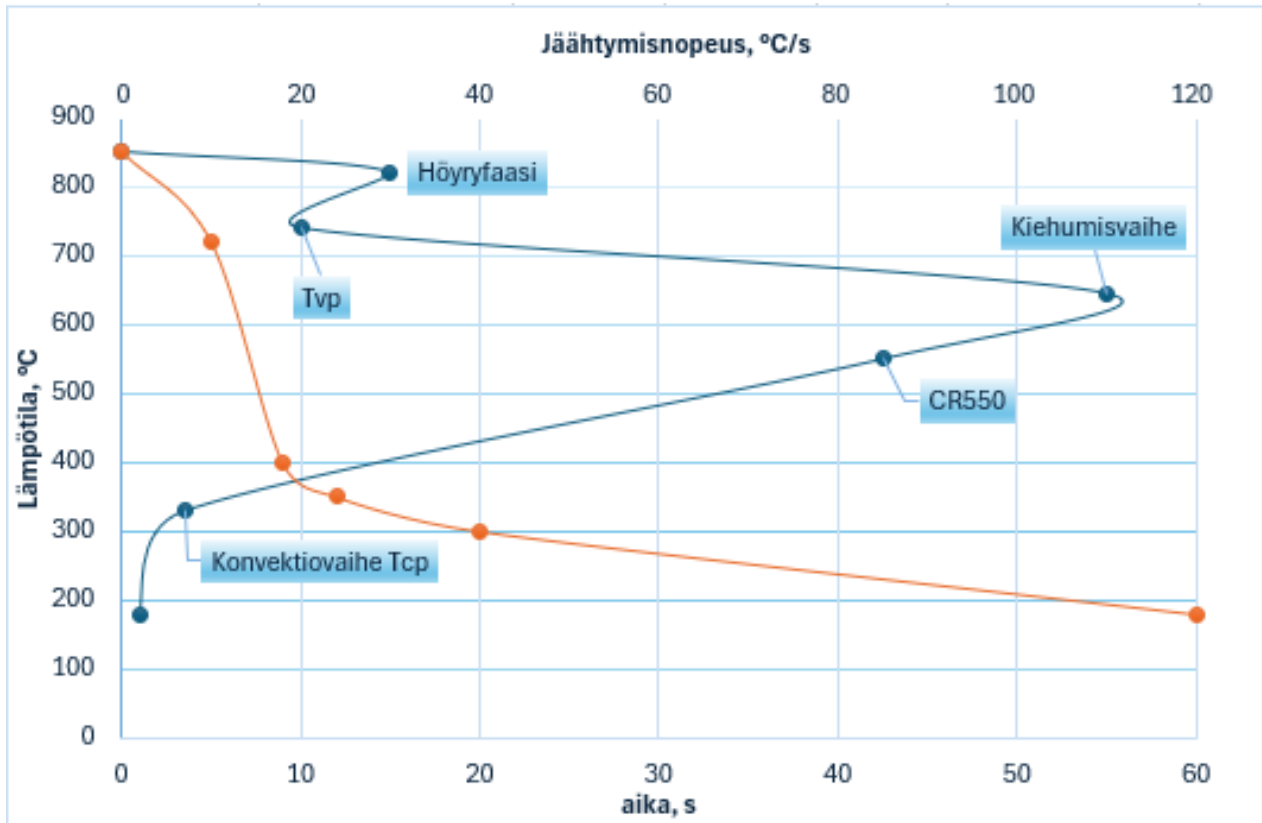
Jäähdytysaineen jäähdytystehoa kuvataan jäähdytyskäyrällä (Holm ym., 2012, s. 550). Kuviossa 1 nähdään kaksi käyrää, joista jäähdytysnopeus kuvastaa jäähdytystehoa. Jäähdytyskäyrä kuvastaa jäähdytettävän kappaleen lämpötilan putoamista ajan suhteen.



Kuvio 2. Jäähdytyskäyrät (soveltaen Holm ym., 2012, s. 550).

Jäähdytyksen vaiheet voidaan jakaa kolmeen osaan, joita kuvataan kuviossa 3. Vaiheet ovat:

- höyryfaasi
- kiehumisvaihe
- konvektiovaihe.



Kuvio 3. Jäähdytyksen vaiheet (soveltaen Holm ym., 2012, s. 550).

Höyryfaasissa sammutettavan kappaleen pintalämpö on erittäin korkea, joten se aiheuttaa sammutusnesteen haihtumisen ja ohuen höyrykalvon muodostumisen sammutettavan kappaleen ympärille. Tässä vaiheessa lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa säteilyn kautta höyrykalvon läpi. Höyrykalvo toimii eristävänä lämpökerroksena, mikä hidastaa merkittävästi jäähdytysprosessia. Tämän vaiheen kesto vaihtelee eri jäähdytysaineiden välillä ja siihen vaikuttavat myös muut tekijät, kuten pinnanlaatu ja lämpökuormituksen määrä. Kuviossa 3 höyrykalvon hajoamislämpötilaa kuvataan Tvp:ksi.

Kiehumisvaihe alkaa, kun pinnan lämpötila on laskenut niin pitkälle, että vakaa höyrykalvo ei enää pysy yllä riittävän säteilylämmön avulla. Tämä tilanne sallii jäähdytysaineen pääsyn kosketuksiin kuumen pinnan kanssa ja sen kiehumisen. Kiehumisen seurauksena höyrykuplat muodostuvat ja irtoavat pinnalta. Tämä on vaihe, joka mahdollistaa erittäin tehokkaan lämmönsiirron ensisijaisesti siksi, että jäähdytysaineen keittämiseen tarvitaan merkittävä määrä lämpöenergiaa. Samalla tapahtuva äärimmäisen voimakas liike jäähdytysaineen ympärillä edistää lämmön siirtymistä pois pinnalta. Kiehumisen alkaa yleensä terävistä kulmista.

Konvektion vaihe alkaa, kun käsiteltävän pinnan lämpötila laskee jäähdytysaineen kiehumispisteeseen. Tässä vaiheessa kiehumisilmiö pysähtyy ja lämmönsiirto jatkuu pinnan ja jäähdytysaineen välisen suoran kosketuksen kautta. Tällä hetkellä jäähtymisnopeus hidastuu merkittävästi ja sitä säätelee pääasiassa jäähdytysaineen viskositeetti sekä virtaus. Konvektiivinen lämmönsiirto jaotellaan kahteen eri päätyyppiin: luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio tapahtuu, kun jäähdytysainetta liikkuu sen omien ominaisuuksien, kuten tiheyserojen vuoksi, ja se johtuu lämpötilaerosta. Pakotettu konvektio edellyttää ulkoista vaikutusta, kuten pumppua jäähdytysaineen liikuttamiseksi. Konvektion alkamista ja kiehumisen loppumista kutsutaan konvektiopisteeksi, joka on merkitty kuviossa 3 T_{cp} :ksi.

3 SUUTTIMEN VALMISTUS AINETTA LISÄÄVÄLLÄ MENETELMÄLLÄ

3D-tulostus on yleiskäsite, joka kattaa useita erilaisia prosesseja käyttäen erilaisia laitteita ja materiaaleja (Schwaar, 2023,). Vaikka laitteet ja materiaalit eroavat toisistaan, niillä on myös paljon yhteisiä piirteitä. 3D-tulostamisen valmistelu alkaa aina digitaalisesta mallista. Tulostettavat mallit voidaan suunnitella CAD-ohjelmistolla tai ladata valmiina digitaalisesta kirjastosta. 3D-tulostuksen käyttäjäkunta on laajentunut valtavasti ja käytännössä tulostustekniikalla pystytään tulostamaan kappaleita esimerkiksi pienestä kynätelineestä aina toimivaan suihkumoottoriin. Tämä kertoo menetelmän potentiaalista paljon.

Tässä opinnäytetyössä valmistettavan suihkun tulostustekniikaksi valikoitui jauhepetitulos (Schwaar, 2023,). Jauhepetitulos on edistynyt 3D-tulostusmenetelmä, joka mahdollistaa monimutkaisten kolmiulotteisten esineiden valmistamisen lisäämällä materiaalia kerros kerrokselta. Prosessissa voidaan käyttää erilaisia jauhemuodossa olevia materiaaleja kuten esimerkiksi muovia, metallia tai keraamia. Tämä mahdollistaa laajan valikoiman sovelluksia aina kevyistä muoviosista metallisiin komponentteihin ja jopa monimutkaisten keeramisten rakenteiden valmistukseen. Menetelmä tarjoaa huomattavan tarkan ja monipuolisen vaihtoehdon varsinkin monimutkaisten ja tarkkojen prototyyppien sekä lopputuotteiden valmistuksessa.

Tulostus alkaa niin, että ohut kerros jauhetta levitetään tasaisesti tulostusalustalle, jota voidaan ohjata terän, telan tai pyyhkijän avulla (Protolabs Network by Hubs, i.a.). Tämän jälkeen termisen energian lähde, kuten laser, suuntaa tiettyihin pisteisiin jauhekerroksessa. Lasersäde saa jauhemaisen materiaalin sulamaan ja yhdistää sen aiemmin tulostettuun kerrokseen. Tätä sulattamisprosessia tulostin toistaa niin kauan, että koko esine on luotu.

Erityisen hyvänä puolena jauhepetitulosustekniikassa on tuki ja kapselointi (Metal 3DP, i.a.). Tulostettavan esineen ympärillä oleva jauhe toimii itsessään tukena tulostettavalle rakenteelle pitäen sen paikallaan. Lisäksi se estää lämpövääristymiä ja mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden luomisen ilman ylimääräisiä tukirakenteita. Tulostuksen valmistuttua tulostettava kappale on upotettuna käyttämättömään jauheeseen. Käyttämätön jauhe voidaan kierrättää ja käyttää uudelleen.

Suihkusuuttimen mallinnus ja piirustusten luominen 3D-tulostamista varten tapahtui SolidWorks-ohjelmistolla.

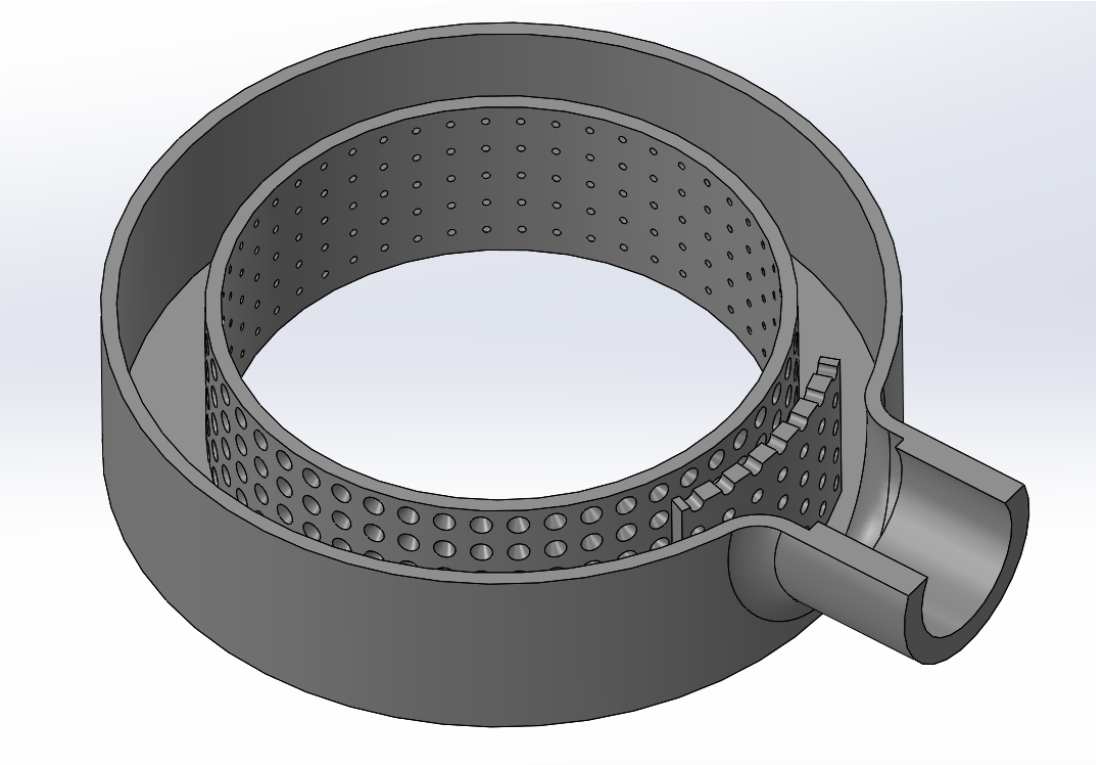
SolidWorks-ohjelmisto hyödyntää parametrista suunnittelua, mikä tekee siitä erittäin tehokkaan työkalun suunnittelijoille ja insinööreille (Technia Addnode Group, i.a.). Tämä tarkoittaa, että suunnittelija voi nähdä, miten muutokset vaikuttavat lähellä oleviin komponentteihin tai jopa koko ratkaisuun. Esimerkiksi, jos yhden komponentin kokoa suurennetaan, miten se vaikuttaisi liitokseen tai reikään, johon se on kiinnitetty. Tämä mahdollistaa ongelmien nopean havaitsemisen ja korjaamisen suunnitteluvaiheessa.

Sammutussuihkun mallinnusvaiheessa suihkun rakenteen sisälle mallinnettiin ohjauslevy, jonka tarkoituksena on ohjata emulsion virtaukset niin, että suihkusuuttimesta saadaan mahdollisimman tasainen virtaus koko sisäpinnan alalta (kuvassa 3). Yrityksellä on paljon kokemusta sammutussuihkujen valmistuksessa ja mallinnuksessa käytettiin paljon jo hyväksi todettuja ratkaisuja. Kierrettä, jolla sammutussuihku kiinnitetään koneeseen, ei tehty vielä tulostusvaiheessa, vaan se tehtiin vasta tulostuksen jälkeen kierrepakalla, jotta kierteestä tulisi mahdollisimman hyvälaatuinen ja tiivis.

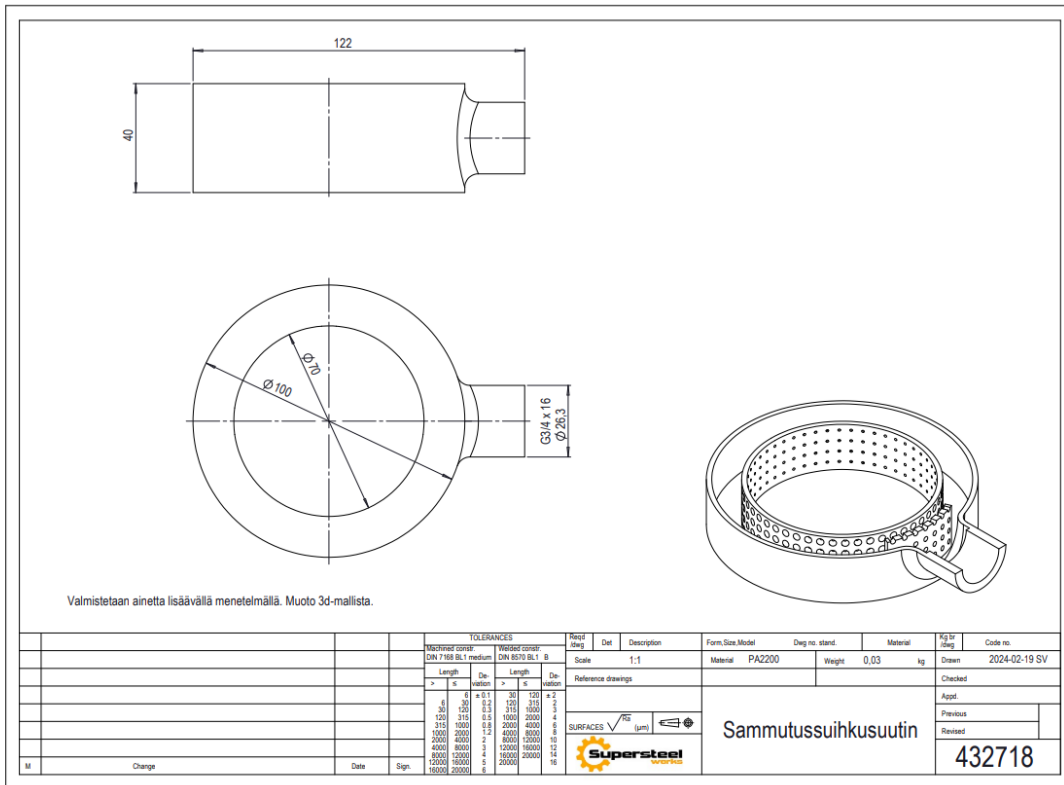
Sammutussuihkulta vaaditaan seuraavia ominaisuuksia:

- mekaanisesti kestävä
- hyvä kemiallinen kestävyys
- suuren lämpötilan tuottaman lämpösäteilyn kesto
- tasainen nestepaine kauttaaltaan
- merkitään selkeästi piirustusnumerolla.

Rakenne pyrittiin mallintamaan niin, että se on mekaanisesti mahdollisimman tukeva ja että koneeseen asetuksia tehtäessä suihkun rakennetta ei tarvitse erikseen varoa. Karkaisutapahtuma tuottaa runsaasti lämpökuormaa myös sammutussuihkulle, joten seinämien pitää olla sopivan ohuet, jotta suihkun tulostetut seinämät eivät lämpene liikaa.



Kuva 2. Läpileikkaus mallinnetusta suihkusta.



Kuva 3. Karkea mittapiirustus sammutussuihkusta.

Kuvassa 4 näkyy sammutussuihkun mitoitus karkeasti.

Sammutussuihkun tulostusmateriaali on PA2200, joka on PA12-pohjainen nylon.

PA12-pohjainen nylon on vakiintunut materiaali, jota käytetään selektiivisessä lasersintrauksessa 3D-tulostusmenetelmässä (Materflow, i.a.). Tätä materiaalia pidetään standardina 3D-tulosteiden raaka-aineena sen jäykkyyden, suuren lujuuden ja erinomaisen kemiallisen kestävyuden ansiosta. Se on tehokas tekninen muovi monenlaisissa sovelluksissa. Lisäksi se on yleensä edullisin vaihtoehto komponenttivalmistukseen ja sitä käytetään eniten sekä tuotannossa että käytössä.



Kuva 4 Tulostettu sammutussuihku.

Kuvassa 5 valmis tulostettu sammutussuihku. Tulostusjälki on hyvin onnistunut, ja tulostuksessa käytetty jauhe lähti suihkun sisältä pois hyvin. Kaikki suutinreiät pysyivät tulostuksen jälkeen auki, mutta täysin pyöreinä ne eivät pysyneet. Suihkun toimintaa tämä seikka ei kuitenkaan merkittävästi haittaa. Tulostettavaan suuttimeen tulostettiin myös piirustusnumero, jotta karkaisukoneeseen asetusta tehtäessä ei tule sekaannuksia. Mahdollisen rikkoutumisen seurauksena piirustusnumero helpottaa myös oikean mallinnuksen löytymistä.

4 TESTAUKSET

Suihkun toiminnallisuuden testaaminen toteutettiin yritykseltä löytyvällä karkaisukoneella. Testikoneena toimi EFD Inductionin vuonna 2006 valmistama laitteisto, joka on mallimerkinä VXL-1000.1000.1-SST Sinac 100–150-SMFC. Laitteisto on NC-ohjattu ja ohjauksena toimii Siemens Sinumerik 840D.

Jotta testaustulokset ovat mahdollisimman luotettavat, määritettiin muutamia alkuparametreja:

- valitaan yritykselle mahdollisimman tuttu karkaistava materiaali
- yritykseltä valmiina löytyvä induktori
- karkaistavan kappaleen koko sopivan kokoinen jatkotestauksia varten.

Näiden määritysten jälkeen testattavan aineen materiaaliksi määriteltiin 34CrNiMo6, joka soveltuu erittäin hyvin induktiokarkaistavaksi materiaaliksi. Yrityksellä on vuosikymmenten kokemus 34CrNiMo6 karkaisusta, joten se helpottaa karkaisuarvojen määrittelyä. Karkaisukoetta varten sorvattiin pituudeltaan 350 mm ja halkaisijaltaan Ø45 mm akseli, johon löytyi induktori jo valmiina. Akselin pitää olla riittävän paksu, jotta karkaisukerros ei mene akselin keskiöön asti ja näin ollen välttyään läpikarkenemiseltä. Läpikarkenemistä pyritään välttämään sen takia, jotta mittaustuloksista päästään tulkitsemaan martensiitin ja perusaineen rajapintaa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia sammutuksen onnistumista ja näin ollen suihkun kykyä tuottaa tarvittavaa laatua. Kuvassa 6 karkaisukoneeseen kiinnitettynä on sorvattu testikappale, induktori, sekä opinnäytetyössä käsitelty tulostettu sammutussuihku. Sammutussuihku kiinnittyy kierreliitoksella karkaisukoneessa jo valmiina olevaan messinkiinseen jalkaan.



Kuva 5. Karkaisukokeessa tarvittavat toimilaitteet.

Testauksessa akselin molemmista päistä karkaistiin pituussuunnassa n. 50 mm pituinen alue. Kuvassa 7 näkyy karkaisuprosessissa tapahtuvat asiat, eli induktorin avulla lämmitetään testikappaletta samalla liikuttaen sitä hitaasti ylöspäin, suihkulla sammutetaan tapahtuma sekä koneen pöytää pyöritetään. Koneen pöydän pyöritys on oleellinen asia rengasinduktorilla karkaistaessa, koska se takaa tasaisen karkaisukerroksen karkaistavaan kappaleeseen.



Kuva 6. Karkaisuprosessi.

Testauksessa käytetyt ajoarvot määriteltiin alkuun jo tunnettujen arvojen perusteella. Ajoarvoja kuitenkin hienosäädettiin. Ajoarvojen taulukko löytyy liitteestä, joka salataan.

5 TULOKSET JA YHTEENVETO

Koekarkaisumateriaalista mitataan kovuudet yritykseltä löytyvällä Buehler Omnimet kovuusmittakoneella. Yrityksen omaan kovuusmittauslaboratorioon kuuluu myös Buehler Delta merkinen pyörösaha sekä Buehler Simplimet merkinen puristin, jolla puristetaan kuvassa 8 näkyvä koepala varsinaista kovuuden koneellista mittaamista varten. Pyörösaha on varustettu tehokkaalla jäähdytyksellä, joka poistaa tehokkaasti leikkauskohdasta syntyvän lämmön pois leikattavasta materiaalista.

Pinnan valmistelu tulee tehdä huolellisesti niin, että se on naarmuton eikä kovuus muutu liiallisen kuumuuden tai kylmämuokkauksen vaikutuksesta (SFS, 2023, s. 8).

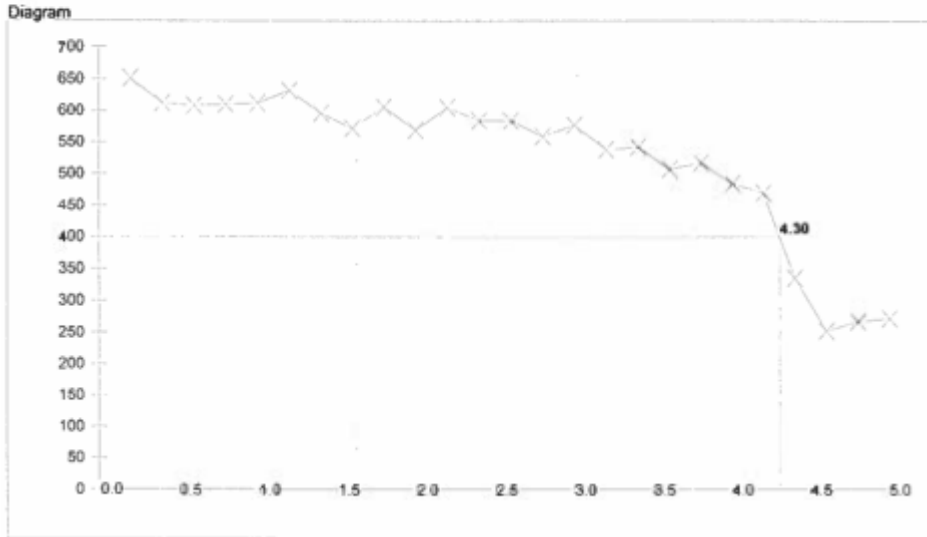
Yrityksellä käytössä olevalla tasohiomakoneella varmistetaan naarmuton sekä kiillotettu pinta. Kuvassa 8 näkyvä koepala on hiottu ja kiillotettu ja sen jälkeen hapotettu suolahapolla. Suolahappo saa karkaisukerroksen näkyviin ja auttaa ainoastaan visuaaliseen tarkasteluun.



Kuva 7. Testinäyte.

Report Buehler Omnimet MHT Report

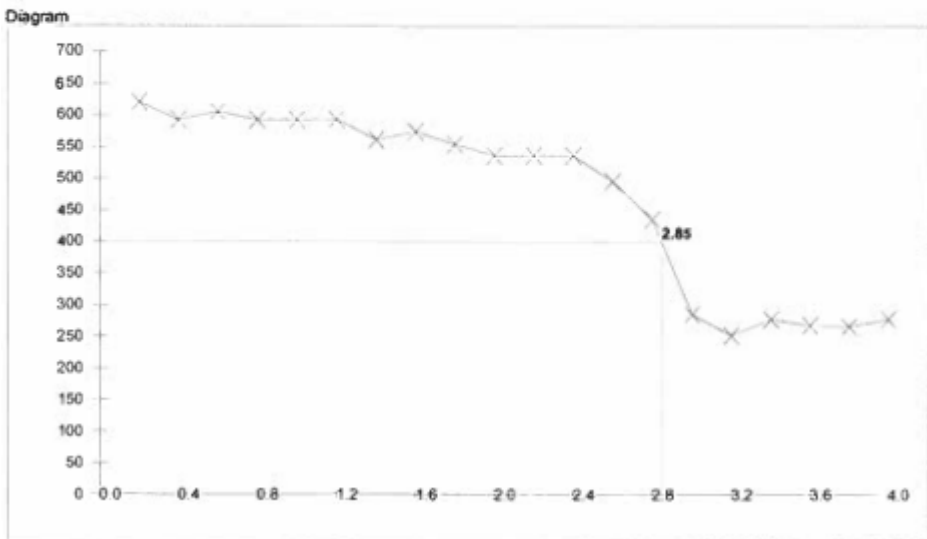
Date: 2/16/24	Time: 2:35:51 PM	File: #967-40%.mht
Customer: Development	Work no: YK210	Product: Akseli
Dwg no:	Test piece no: #967-40%	Mat. test no:
Space no: 1-40%	Load: 1000.00 gf	
Test section: Middle	Magnification: 40x Blue	
Flank/root and side: Flank 1	Calibration: 0.195801 µm/pixel	
DIN 30911: R3x3mm	Dwell time: N/A	



Kuvio 4. Ensimmäinen koetus.

Report Buehler Omnimet MHT Report

Date: 2/16/24	Time: 1:38:18 PM	File: #967-39%.mht
Customer: Development	Work no: YK210	Product: Akseli
Dwg no:	Test piece no: #967-39%	Mat. test no:
Space no: 1-39%	Load: 1000.00 gf	
Test section: Middle	Magnification: 40x Blue	
Flank/root and side: Flank 1	Calibration: 0.195801 µm/pixel	
DIN 30911: R3x3mm	Dwell time: N/A	



Kuvio 5. Toinen karkaisukoe.

Vickersin menetelmässä materiaalin kovuus määritetään käyttämällä laitteistoa, joka sisältää neliöpohjaisen säännöllisen timanttipyramidin. Tässä menetelmässä koekappaleeseen painetaan timanttipyramidi tietyn koevoiman F avulla. Kun koevoima poistetaan, koekappaleen pintaan jää painauma, jonka lävistäjät mitataan mikroskoopin avulla arvoilla d_1 ja d_2 (kuvio 6).

Standardin SFS-EN ISO 6507-1:2023 (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2023, s. 6) mukaan vicker-kovuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$HV = \frac{1}{g_n} \times \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (1)$$

missä

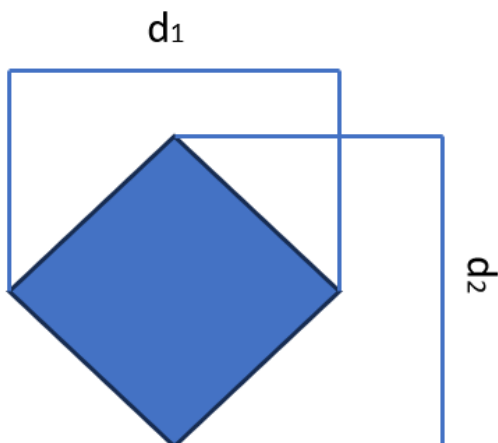
HV on vickers-kovuus

g_n on painovoimasta johtuva kiihtyvyys

α on paininkärjen vastakkaisten sivutahkojen välisen kulman keskiarvo

d on lävistäjien d_1 ja d_2 aritmeettinen keskiarvo

F on koevoima newtoneina (N)



Kuvio 6. Mitattavan koekappaleen painauma.

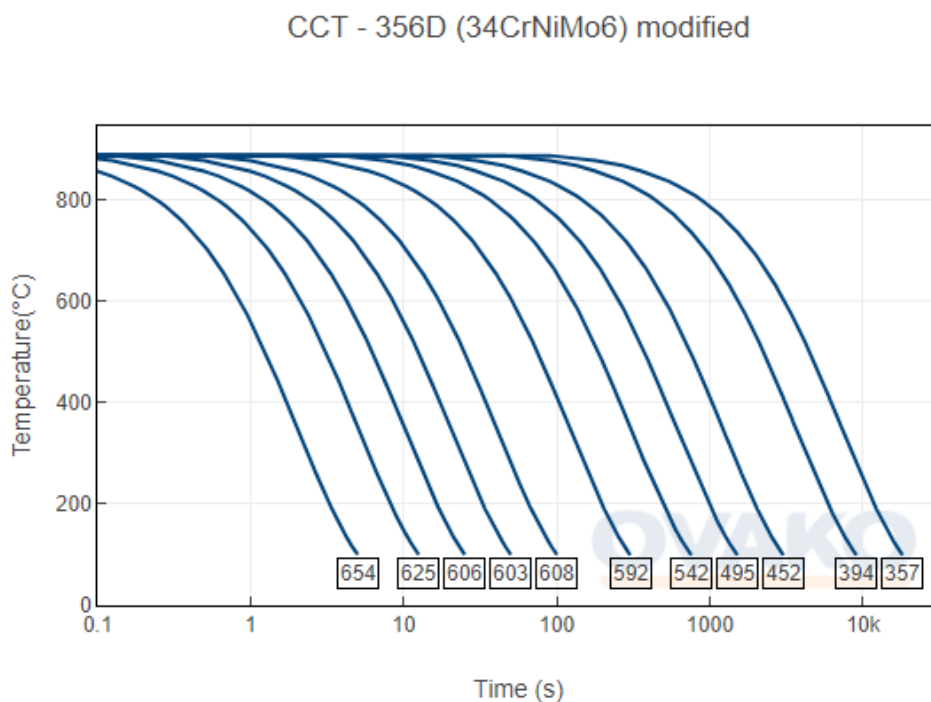
Kuviossa 4 ja 5 näkyvät koetulokset, jotka on luotu yrityksen omalla kovuustestauslaitteistolla. Laitteisto perustuu vickers-mittaukseen. Mittaus aloitettiin koekappaleen

ulkohalkaisijalta ja eteni kuvassa 8 esiintyvien punaisten nuolien mukaisesti 0,2 mm välein aina 4 mm syvyyteen asti.

Kokeessa käytetylle materiaalille 34CrNiMo6+QT löytyy niin teoriassa kuin käytännön asiakasvaatimuksissakin erilaisia kovuusvaatimuksia. Tyypillisin lienee 52—57 HRC (n. 545—640HV) mutta väljempääkin 55 ± 5 HRC (n. 510—700HV) esiintyy. Supersteel käyttää omissa suunnittelulaskemissa 55 ± 3 HRC (n. 545—650HV).

Induktiokarkaisussa saavutettavaan kovuuteen materiaalin osalta vaikuttavat sen lähtörakenteen lisäksi seostus ja eritoten hiilipitoisuus.

Laatupäällikkö Törmä (2024) toteaa, että jotta saataisiin tarkempi teoreettinen vertailuarvo saavutettavissa olevasta kovuudesta juuri kokeessa käytetylle materiaalille, käytettiin Ova-
kon rakentamaa ohjelmaa, joka antaa mm. laskennallisen CCT-kuvaajan materiaalin kemialliseen koostumukseen perustuen (Heat Treatment Guide, 2024). Materiaalin sulatuseräkohtainen kemiallinen koostumus on ilmoitettu materiaalin valmistajan materiaalitodistuksessa.



Kuvio 7. 34CrNiMo6 CCT-käyrä

Tämän laskennan perusteella kokeessa käytetyn materiaalin korkein saavutettavissa oleva kovuus olisi luokkaa 654HV (Kuvio 7). Kokeissa saavutetut pintakovuudet ovat luokkaa 625 ja 650HV.

Laatupäällikkö Törmän (2024) mukaan molemmissa kokeissa kovuuskäyrän muoto on hyvin samankaltainen. Perusaineen ja karkaisukerroksen väliin jäävässä vyöhykkeessä on havaittavissa kovuuden alenema. Se on tyypillinen nuorrutetun teräksen induktiokarkaisussa ja huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa. Havaittavissa on kuitenkin n.1,5 mm syvyysero tulosten välillä. Ero johtuu siitä, että kokeissa käytettiin erilaisia parametreja, joka näkyi myös kovuserona. Syvyydelle ei etukäteen asetettu tavoitteita. Tehtyjen käytännön testien ja karkaisukokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, että suunniteltu ja 3D-tulostusmenetelmällä valmistettu sammutussuihku toimi halutulla tavalla ja saavutti sille asetetut toiminnalliset tavoitteet.

Tulevaisuudessa tämän opinnäytetyön tutkimusten perusteella voidaan laajentaa suihkumalleja myös hammaspyörien karkaisuun sekä muihin sovellutuksiin. Suihkumallit ovat helposti muokattavissa CAD-ohjelmistolla, ja suihkujen alhainen tuotantokustannus helpottaa erilaisten mallien suunnittelua ja käytännön kokeilua. Sammutussuihkun muotoilua pystytään vielä varmasti kehittämään paremmaksi muokkaamalla esimerkiksi suihkun sisällä olevia levyjä, joilla pyritään saamaan kauttaaltaan tasainen suihku. Kemiallinen kesto selviää vasta myöhemmässä vaiheessa.

LÄHTEET

- Bodycote. (i.a.). *Päästö*. <https://www.bodycote.com/fi/palvelut/lampokasittely/karkaisu-ja-paasto/paasto/>
- Eldec. (i.a.). *Induction Hardening*. <https://www.eldec.net/en/applications-processes/induction-hardening>
- Holm, T., Olsson P., & Troell, E. (2012). *Steel and its Heat Treatment a Handbook*.
- FOCO induction. (2023). Haettu 15.2.2024, <https://www.focoinduction.com/induction-heating-frequency-selection-factors-and-criteria/>
- Kivivuori, S., & Härkönen, S. (2009). *Lämpökäsittelyoppi*. Teknologianinfo Teknova.
- Materflow. (i.a.). *PA2200*. Haettu 19.2.2023, <https://www.materflow.com/tuotanto-materiaalit/pa2200/>
- Metal 3DP. (i.a.). *3D-tulostustyypit*. <https://met3dp.fi/3d-printing-types/>
- Ovako. (2024). *Heat Treatment Guide*. <https://steelnavigator.ovako.com/heat-treatment-guide/calculate>
- Protolabs network by hubs. (i.a.). *What is SLS 3D printing?* <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- Schwaar, C. (2023). The 7 Main Types of 3D Printing Technology. <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2023). *Metallien Vickersin kovuuskoe. Osa 1: Menetelmä (SFS-EN ISO 6507-1:2023)*
- Supersteel. (2020). *Power with Quality*. Haettu 14.1.2024, https://www.esitteemme.fi/supersteel_oy/WallView/
- Technia addnode group. (i.a.). *What is solidworks?* Haettu 17.2.2024, <https://www.technia.com/blog/what-is-solidworks/>
- Tuuri, H. (2003), *Mekeksestä Metsoon ja Holmingiin – Parkanon Konepaja*. Holming Works /Metso.
- Törmä, J. (Laatupäällikkö, Supersteel). (20.2.2024). Karkaisukokeiden tulosten tulkinta. [asiantuntijahaastattelu].

LIITTEET

Liite 1. Testikarkaisussa käytetyt ajoarvot (salattu)

Liite 1.