

Ville Jalkanen

T622SA

HEHKUTUSLAITTEISTON LISÄÄMINEN ROBOTISOLUUN

Opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma

Maaliskuu 2015




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 27.3.2015	
Tekijä Ville Jalkanen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma	
Nimeke Hehkutuslaitteiston lisääminen robottisoluun		
Tiivistelmä Opinnäytetyö tehtiin Loval Oy:lle, ja sen tavoitteena oli vähentää materiaalin manuaalista käsittelyä, parantaa tuotteen kulkua tuotannossa, nopeuttaa läpimenoaikaa ja vapauttaa nauhauunin kapasiteettia muille tuotteille. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa toimiva hehkutusmenetelmä robottisoluun. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin eri hehkutusmenetelmiä, niiden ominaisuuksia ja kannattavuutta verrattuna vanhaan kaasunauhauunilla tapahtuvaan hehkutukseen. Toisessa vaiheessa tilattiin induktiolaitteisto, joka valittiin laskelmien perusteella tähän sovellukseen. Tässä vaiheessa myös suunniteltiin työkalut ja asennuspisteet laitteistolle. Kolmannessa vaiheessa asennettiin induktiolaitteisto ja työkalut robottisoluun. Viimeisessä vaiheessa tehtiin laitteiston säädöt ja otettiin laitteisto tuotantokäyttöön. Työn tuloksena saatiin aikaan toimiva robottisovellus, jolla on tuotteen läpimenoaikaa nopeuttava, kustannuksia alentava ja tuottavuutta parantava vaikutus Loval Oy:n tuotannossa.		
Asiasanat (avainsanat) Induktiohehkutus, automatisointi, robottisovellus		
Sivumäärä 41	Kieli Suomi	URN
Huomautus (huomautukset liitteistä)		
Ohjaavan opettajan nimi Teemu Manninen	Opinnäytetyön toimeksiantaja Loval Oy	

DESCRIPTION

		Date of the bachelor's thesis 27.3.2015
Author(s) Ville Jalkanen	Degree programme and option Electric engineering	
Name of the bachelor's thesis Increase the annealing equipment to the robot cell.		
Abstract This Bachelor's thesis was made for Loyal ltd. The main goal was to reduce manual handling of the materials, improve products flow and lead time in the production and release the belt furnace capacity for the other products. The work involved planning and building functional annealing method for the robot cell. The first part of the thesis discusses two different annealing methods and their features and profitability compared to old gas belt furnace. An induction annealing equipment which was chosen after calculations in this application. In this part I also planned tools and installation points for the equipment. The third part of the work is about installing induction annealing equipment and tools in the robot cell. In the last part was made equipment settings and the application was taken into production use. Result of the work was the functional robot application which reduces the lead time and costs and improves productivity in the production of Loyal ltd.		
Subject headings, (keywords) Induction annealing, automation, robot application		
Pages 41	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices		
Tutor Teemu Manninen	Bachelor's thesis assigned by Loyal Oy	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	LÄMMITYSELEMENTIN RAKENNE	3
3	LÄMPÖKÄSITTELY	4
3.1	Hehkutus	4
3.2	Normalisointi	5
3.3	Vastussauvan lämpökäsittely	6
4	SÄHKÖLÄMPÖTEKNIIKAT	7
4.1	Uusi hehkutusmenetelmä	8
4.2	Konduktiivinen kuumennus	8
4.2.1	Toimintaperiaate	8
4.2.2	Toimintaan vaikuttavat tekijät	10
4.2.3	Ominaisuudet	10
4.2.4	Käyttöalueet	11
4.3	Induktiivinen kuumennus	11
4.3.1	Toimintaperiaate	11
4.3.2	Sähkömagneettisen induktiokuumennuksen ominaisuudet	12
4.3.3	Induktiokuumennusjärjestelmien komponentit	13
4.3.4	Induktiokuumennuksen ominaisuudet	13
4.3.5	Sovellukset	14
5	TESTIT SOVELTUVUUDESTA LOVAL OY:N TUOTANTOON	15
5.1	Konduktiohehkutuslaitteiston testit	15
5.2	Induktiohehkutuslaitteiston testit	16
5.2.1	Laitteiston asennus laboratoriotilaan	17
5.2.2	Hehkutus- ja juotoskokeet	17
5.2.3	U-sauvan hehkutus ja jäähdytys	17
5.2.4	Suoran sauvan hehkutus	19
5.2.5	Maidonlämmittimen nippelin juotos	19
5.2.6	Kierrelaipan ja sauvan välinen juotos	20
5.3	Testien johtopäätökset	21
6	KANNATTAVUUSLASKELMAT	21
6.1	Induktio- ja konduktiokuumennuksen vertailu	21

6.2	Käyttökustannukset ja takaisinmaksuaikalaskelmat.....	23
6.2.1	Nauhauunin käyttökustannukset.....	23
6.2.2	Induktiolaitteen käyttökustannukset	23
6.2.3	Säästö ja takaisinmaksuaika.....	23
7	VANHA TUOTANTOVIRTA	25
8	UUSI TUOTANTOVIRTA	26
9	INDUKTIOLAITTEISTON RAKENNE	27
9.1	Induktiokuumnennuslaitteisto.....	27
9.2	Induktiokela	28
9.3	Jäähdytinlaitteisto	31
9.4	Elementin jäähdytyslaitteet.....	32
10	LAITTEISTON SIOITTAMINEN ROBOTTISOLUUN	34
11	KÄYTTÖÖNOTTO.....	35
12	TOTEUTUNEET KUSTANNUKSET	38
13	POHDINTA	40
	LÄHTEET.....	41

1 JOHDANTO

Tämän työn aiheena on suunnitella sähkölämmityssauvan paikallisherkutukseen robotisoluissa soveltuva laitteisto. Työn päätavoitteet ovat vapauttaa kapasiteettia ruuhkautuneelta nauhauunilta, vähentää tuotteen manuaalista käsittelyä, nopeuttaa tuotteen läpimenoaikaa ja säästää energiaa. Työssä perehdytään nykyiseen tuotantovirtaan ja menetelmiin. Tarkoituksena on löytää sopiva ja energiatehokas ratkaisu tavoitteen saavuttamiseksi. Työssä tutkitaan kahta eri periaatteilla toimivaa heikutuslaitteistoa ja verrataan niiden hankintakustannuksia, energiatehokkuutta ja sijoittamista robotisoluun. Tutkittavat menetelmät ovat konduktio- ja induktioheikutus.

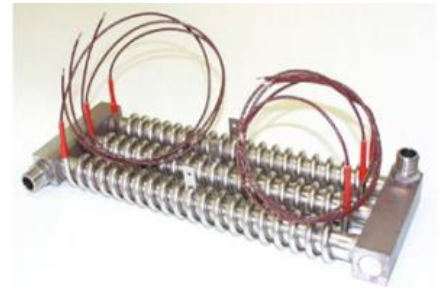
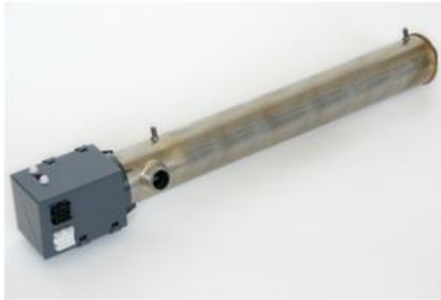
Loval Oy on perustettu vuonna 1960 ja toimipaikka on Loviisassa (kuva 1). Nykyään Loval Oy on Suomen suurin lämmityselementtien valmistaja ja yksi merkittävimmistä koko Euroopassa. Loval on kasvanut yli 200 työntekijän suuruiseksi yritykseksi ja on vuodesta 1995 lähtien kuulunut ruotsalaiseen Nibe Industrier Ab –konserniin. Loval on alansa markkinajohtaja Suomessa, ja yli 77 % tuotannosta menee vientiin. Tuotteita viedään yli 40 eri maahan. Suurimmat vientimaat ovat Saksa, Ruotsi, Sveitsi, Iso-Britannia, Hollanti ja Ruotsi. Sähkölämmityselementtejä, lämmönvaihtimia ja kokonaisratkaisuja toimitetaan jatkuvasti kaikkialle ympäri maailmaa. [1.]



KUVA 1. Loval Oy:n tehdas Loviisassa

Yritys valmistaa vuosittain yli 2 miljoonaa lämmityselementtiä ja yli 25 000 levy-
lämmönvaihdinta. Suurimmat volyymit tulevat suurtalouskeittiöiden erilaisista läm-
mistustuotteista esim. uunit, liedet, pesukoneiden lämmittimet ja veden lämmitys boilerit
sekä lämpöpumpputeollisuuteen valmistettavista lämmönvaihtimista ja virtauslämmit-
timistä (kuva 2). Kotitalouksille tutuimmat tuotteet ovat kiukaiden ja grillien vastuk-
set, sähkölämmittimet ja uppokuumentimet. Tuotantotiloja on käytettävissä 9000 m²
ja liikevaihto oli vuonna 2013 22 M€. Yrityksellä on 205 työntekijää, joista 43 on
toimihenkilöitä. [1.]

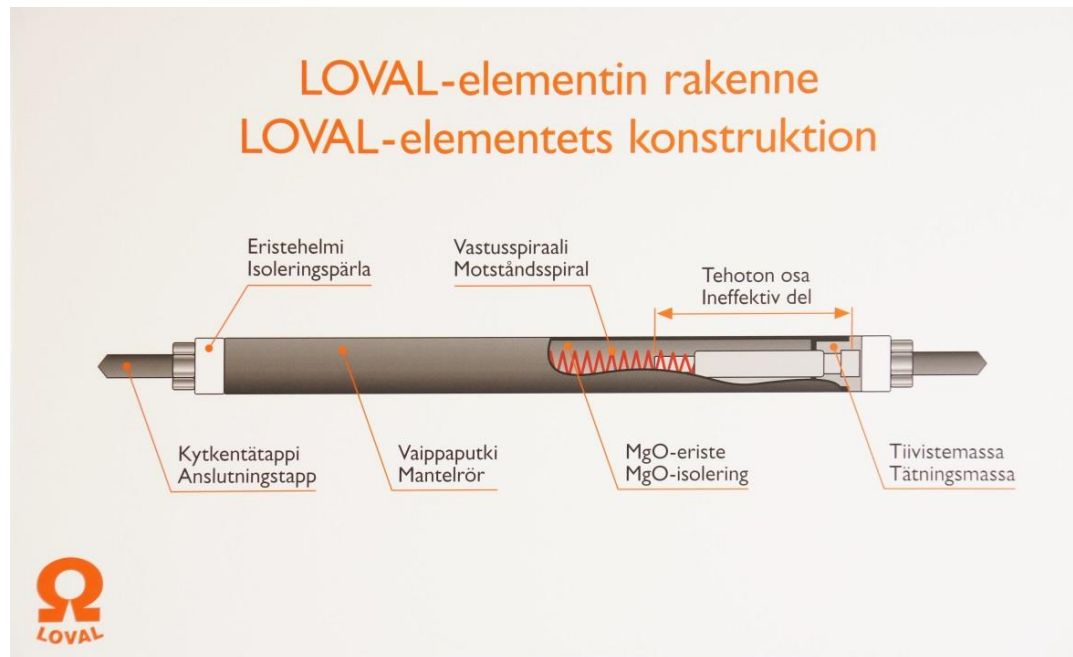
Flow through heaters



KUVA 2. Erilaisia virtauslämmittimiä

2 LÄMMITYSELEMENTIN RAKENNE

Sähkölämmityselementin rakenne on pysynyt koko historiansa ajan samanlaisena. Elementti koostuu vastusspiraalista, MgO-eristeestä, vaippaputkesta, kytkentätapista, tiivistemassasta ja eristyshelmestä (kuva 3) [1.]



KUVA 3. Vastuselementin rakenne [2]

Vastuselementin valmistus aloitetaan hitsaamalla halkaisijaltaan 10 mm putki ja käämimällä vastusspiraali. Näiden materiaali valitaan asiakkaan vaatimusten ja tuotteen käyttötarkoituksen ja kohteen mukaan. Spiraalin päihin hitsataan kytkentätapit, jonka jälkeen vaippaputken ja spiraalin välinen tila täytetään magnesiumoksidi-eristeellä. Täytön jälkeen vastusputki syötetään valssin läpi, jossa magnesiumoksidi tiivistyy kovaksi ja tuote saa lopulliset mitat. Samalla vaippaputki kovettuu kylmämuokkauksen takia ja se täytyy normalisoida hehkuttamalla.

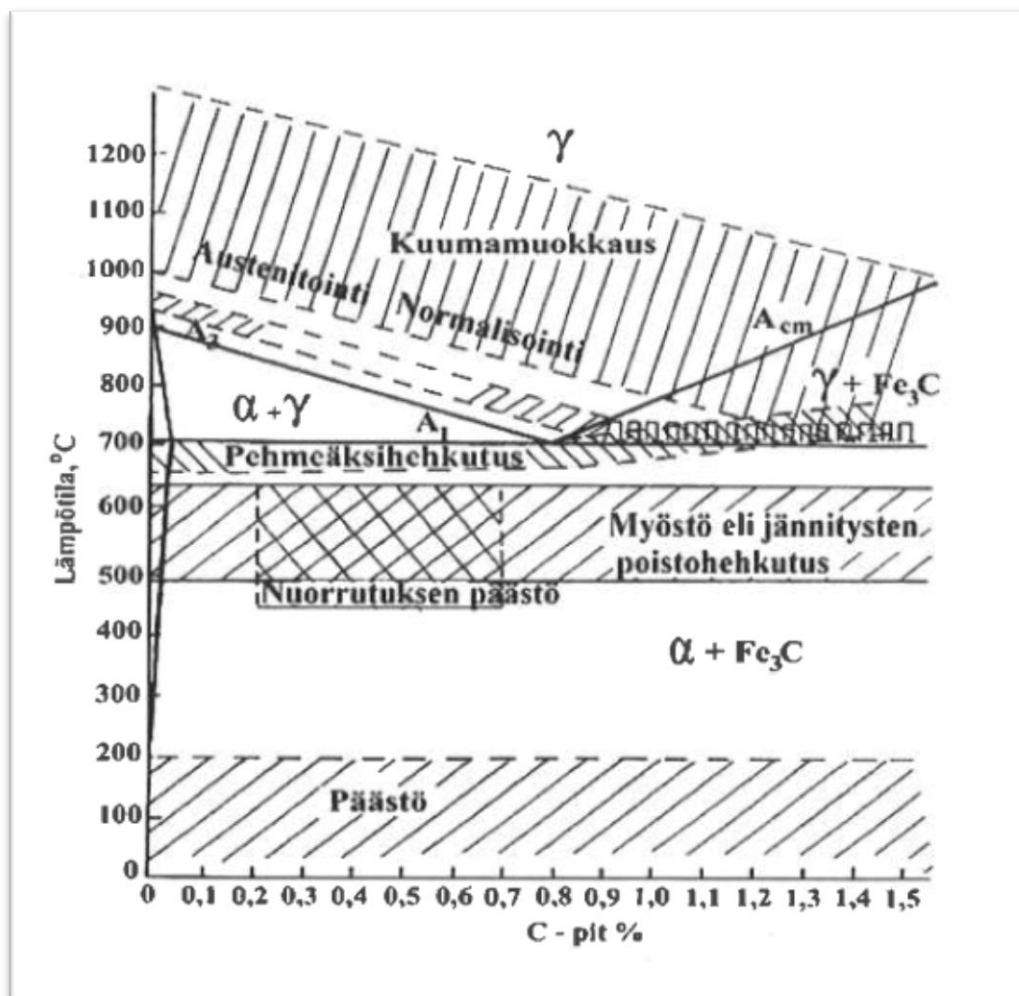
Osa vastusputkista jää suoraksi, eivätkä ne tarvitse jatkomuokkausta. Näitä putkia ei hehkuta, vaan ne siirtyvät suoraan kokoonpano-osastolle lopputuotteen kasaamista varten. Suurin osa vastussauvoista kuitenkin vaatii jatkokäsittelyjä, ja sen takia ne joudutaan hehkuttamaan.

3 LÄMPÖKÄSITTELY

3.1 Hehkutus

Hehkutuksen tavoitteena on muokata teräksen mikrorakennetta, jotta saavutetaan halutut ominaisuudet. Näitä mikrorakenteita aikaansaadaan teräkselle suoritettavilla lämpökäsittelyillä. Näillä käsittelyillä päästään joko suoraan haluttuun lopputulokseen tai sitten niiden erilaisilla yhdistelmillä. [2, s. 37.]

Lämpökäsittely on tärkeässä asemassa terästen käsittelyssä, koska sitä käytetään äärimmäisen harvoin suoraan valmistustilassa. Yleensä teräs kuumamuokataan, eli muo-
vaillaan se haluttuun muotoon kuumana. Yleisimpiä muita lämpökäsittelyjä ovat pehmeäksi hehkutus, myöstö, normalisointi, karkaisu, päästö, nuorutus ja rekristallisatiohehkutus (kuva 4) [2, s. 37.]



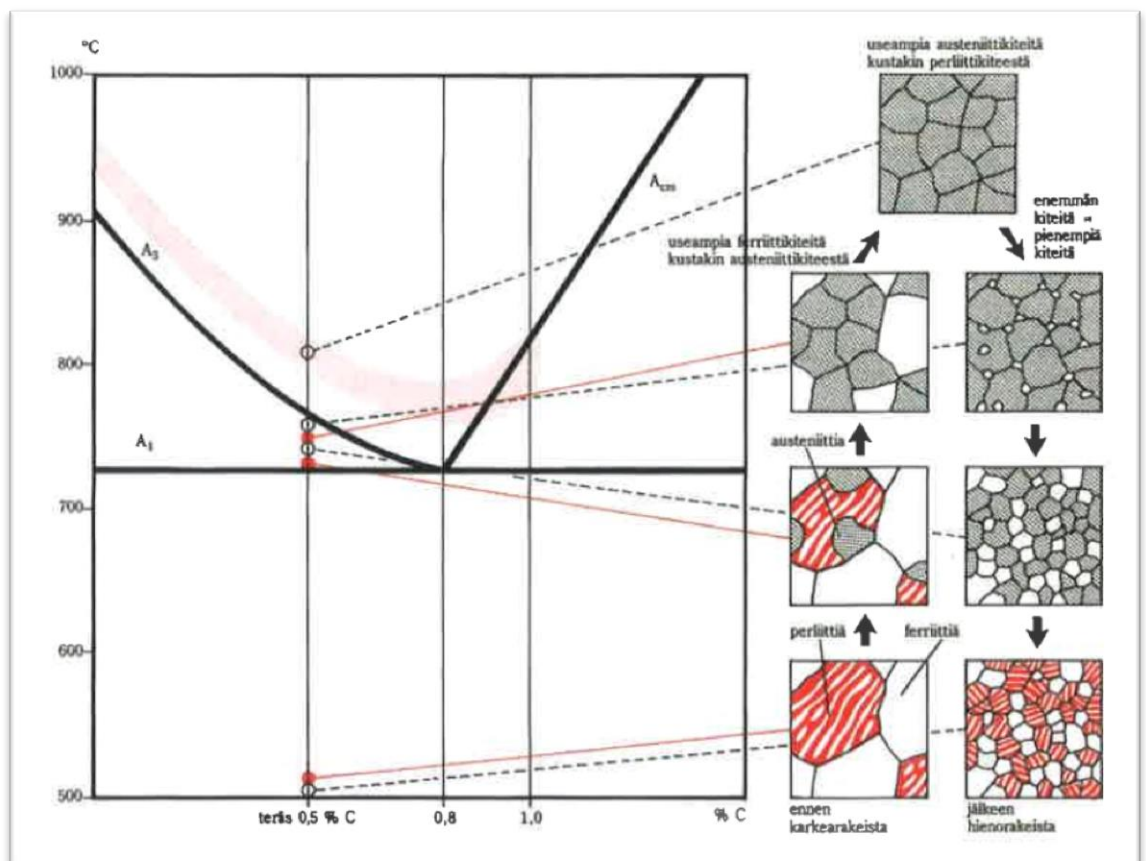
KUVA 4. Teräksen lämpökäsittelyalueet [2, s. 37]

3.2 Normalisointi

Normalisointihekkuksen tavoitteena on teräksen rakenteen tasaaminen, edellisten käsittelyjen vaikutuksen poistaminen ja aikaansaada hienorakenteinen rakenne. Yleensä teräkselle tehdään normalisointihekku, jos sen rakenne jää muokkauksen seurauksena liian suureksi ja siitä on haittaa jatkokäsittelylle. [2, s. 39.]

Normalisointi suoritetaan yleensä vähähiilisille (alieutektoidisille) teräksille, joissa on alle 0,8 % hiiltä. Teräs kuumennetaan noin 25 - 50 °C A₃ (kuva 5) rajan yläpuolelle. Tällöin saadaan hienorakenteinen mikrorakenne. Hienoraeteräkset voidaan hehkuttaa jopa 200 °C A₃- rajan yläpuolelle. Normaalisti kappaleen annetaan jäähtyä vapaasti ilmassa, jolloin saadaan pienirakeinen hyvän lujuuden ja sitkeyden omaava teräs. Joissakin tapauksissa voidaan teräs jäähdyttää nopeasti, ja tämä on jopa suotavaa.

[2, s. 40.]



KUVA 5. Raekoon pienentyminen normalisoinnissa [2. s. 39-41]

Yleensä normalisointia käytetään seuraavissa tilanteissa:

- Aikaisempien lämpökäsittelyjen mikrorakenteen tasaamiseen ja hienontamiseen
- Terävalujen sitkeyden parantamiseen
- Epätasaisten muokkausten aiheuttaneen mikrorakenteen epätasaisuuden ja karkeuden hienontamiseen
- Hitsien mikrorakenteen rakeisuuden poistamiseen
- Muokattujen terästen mikrorakenteen ja ominaisuuksien tasaamiseen.

Pienillä hiilipitoisuuksilla (> 0,3 % C) normalisointi lisää rakenteen sitkeyttä, jolloin se soveltuu hyvin myös kylmämuokattavaksi. [2, s. 40-41.]

3.3 Vastussauvan lämpökäsittely

Vastuksen lämpökäsittelyn tavoitteena on muokata metallin ominaisuuksia sopivamiksi tuotteen jatkokäsittelyä varten. Ensimmäinen lämpökäsittely tehdään nauhauunissa, jossa tuote lämmitetään 1060 °C lämpötilaan.

Yleinen hehkutuslämpötila ruostumattomalle teräkselle on 950 °C astetta, mutta Robottisolussa metalli kuumennetaan n. 100 °C astetta suositeltua korkeammalle 1050 °C kuumennusajan lyhentämiseksi. Saman syyn takia myös jäähdystä nopeutetaan vesisuihkun avulla. Robottisolussa hehkutettavat metallit eivät sisällä hiiltä, minkä vuoksi pystymme käyttämään nopeampaa kuumennusta ja jäähdystä metallin ominaisuuksien kärsimättä. Metallia ei karkene, vaikka se jäähdytetään kylmässä vesisuihkussa.

Tämä käsittely muuttaa vaippaputken rakennetta siten, että siitä tulee joustavaa ja taivuttaminen on mahdollista. Osa tuotteista taivutetaan useaan kertaan mutkien jyrkkyyden ja monimutkaisuuden takia. Jokaisen tavutuksen aikana rakenne muuttuu kovemmaksi, ja ilman uudelleenhehkutusta se murtuisi ja siitä tulisi käyttökelvoton. Tämän takia osa tuotteista ajetaan nauhauunin läpi 2 eri kertaa, joka hidastaa läpimenoaika ja ruuhkauttaa nauhauunia ja sen ympäristöä sekä hidastaa tuotteen läpimenoaika tuotannossa. Uudelleen hehkutus voidaan siirtää robottisoluun, jolloin saadaan vapautettua kapasiteettia nauhauunilta muille tuotteille. Hehkutus robottisolussa toteutetaan sinne erikseen hankittavalla induktiolaitteistolla.

4 SÄHKÖLÄMPÖTEKNIIKAT

Sähkölämpötekniikoissa lämpöä tuotetaan erilaisilla sähköä käyttävillä teknisillä ratkaisuilla. Lisäksi näihin tekniikoihin kuuluu myös joitakin teollisuuden sähköisiä tuotantotapoja, jotka eivät ole termisiä. Myös rakennusten ja tilojen lämmitykseen käytetään sähkölämpötekniikkaa. [3, s. 11.]

Tärkeimmät sähkölämpötekniikat ovat vastuskuumennus, induktiivinen kuumennus, konduktiivinen kuumennus, dielektrinen kuumennus, infrapunakuumennus, valokaari-kuumennus, plasmakuumennus, laser, lämpöpumput, höyryn mekaaninen komprimointi ja kalvotekniikat [3, s. 11.].

Useimmat sähkölämpötekniikat ovat käytössä teollisuudessa. Induktiokuumennus on ollut teollisuuden käytössä jo vuosikymmeniä. Sen ympärille on rakennettu satoja erilaisia sovelluksia useille teollisuuden aloille. Uusimpiin sähkölämpötekniikoihin lukeutuu laser, joka on vasta tulossa yleiseen käyttöön teollisuudessa. Laserillekin löytyy jo paljon erilaisia sovelluksia monilla teollisuuden aloilla. [3, s. 11.]

Erilaisilla sähkölämpötekniikoilla pyritään pienentämään ympäristön kuormitusta ja energian kulutusta. Niillä pyritään saavuttamaan parempaa ja tasaisempaa laatua, sekä parempaa tuottavuutta. Huolella valittu sähkölämpötekniikka on lähes aina tehokkaampi ja taloudellisempi kuin muut vaihtoehdot. Sähkölämpötekniikoilla saadaan pienemmällä energian kulutuksella ja ympäristön kuormituksella tuotettua sama määrä tuotteita paremmalla laadulla. [3, s. 11.]

Sähkölämpötekniset laitteet ovat yleensä hyvin kompakteja ja vaativat vähän tilaa. Sähköiset laitteet ovat nopeita ylös- ja alas ajettavissa, ja ne reagoivat nopeasti olosuhteiden ja tarpeiden muutoksiin. Sääto on helppoa, nopeaa ja tarkkaa. Sähköiset laitteet ovat myös helppo liittää muihin automaatiojärjestelmiin. [3, s. 11.]

Normaalisti sähkölämpötekniikat ovat meluttomia ja vähän ympäristöä kuormittavia. Työtiloihin ei synny haitallisia päästöjä ja kaasuja. Lämpö saadaan kohdistettua todella tarkasti kohteeseen, jolloin ei turhaan lämmitetä työtiloja. [3, s. 11.]

4.1 Uusi hehkutusmenetelmä

Uutta hehkutusmenetelmää suunniteltaessa päädyttiin vertailemaan kahta eri periaatteella toimivaa sähkölämpötekniikkaa. Nämä ovat konduktiohehkutus ja induktiohehkutus. Työssä selvitettiin näiden menetelmien periaatteet ja vertailtiin niiden käytännöllisyyttä, hankintahintaa ja kustannustehokkuutta, joiden perusteella valittiin robotisoluun asennettava järjestelmä.

4.2 Konduktiivinen kuumennus

4.2.1 Toimintaperiaate

Konduktiivisessa kuumennuksessa sähkövirta johdetaan suoraan kuumennettavan kappaleen läpi. Sähkövirta johdetaan kappaleeseen sopivien elektrodien kautta. Kappale kuumenee sähkövirran ansiosta, eikä kuumennus tapahtumasta aiheudu lämpöhäviöitä eikä lämmönsiirtymis- tai kulkeutumisongelmia. Konduktiivista kuumennusta voidaan käyttää vain sähköä johtavilla materiaaleilla, ja kuumennettavien kappaleiden tulee olla tasalaatuisia ja muotoisia. [3, s. 45-46.]

Teho saadaan kaavasta 1 [3, s. 45-46]:

$$P = RI^2 = UI = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

Jossa:

- P = teho W
- R = kuumennettavan materiaalin resistanssi Ω
- $R = \rho L/A$
- I = vaihevirran tehollisarvo A
- U = Vaihejännitteen tehollisarvo V
- ρ = Ominaisresistanssi Ωm
- L = pituus m
- A = poikkipinta-ala m^2

Osa tuotetusta lämpöenergiasta W hyödynnetään tuotteen lämpötilan nousuna:

$$W = m C_p dT \quad (2)$$

jossa: m = massa kg

C_p = ominaislämpökapasiteetti J/kg °C

dT = lämpötilan nousu °C

Muu osa lämmöstä häviää kappaleen pinnoilta säteilemällä ja johtumalla. Kuumentuksen häviöt ovat sidottu aikaan ja lämpötilaan. Lämpötilan nostamiseen tarvittava energia tietyn kokoisella kappaleella on vakio. Lämmitysaika kannattaa pitää lyhyenä, jotta energian kulutus pysyy mahdollisimman pienenä. [3, s. 45-46.]

Suurilla sähkövirroilla on reaktanssi otettava huomioon. Näissä tapauksissa saadaan pätöteho yhtälöstä [3, s. 45-46]:

$$P = RI^2 = R \frac{U^2}{Z^2} = R \frac{U^2}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (3)$$

$$P = UI \cos \varphi \quad (4)$$

jossa: Z = piirin $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ impedanssi

ω = kulmataajuus $2\pi f$

f = verkkotaajuus 50 Hz

φ = vaihejännitteen ja vaihevirran välinen vaihekulma

L = induktanssi

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (5)$$

Loisteho saadaan yhtälöstä:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (6)$$

4.2.2 Toimintaan vaikuttavat tekijät

Seuraavat tekijät vaikuttavat kuumennuksen onnistumiseen ja haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseen [3, s. 49]:

- Kuumennettavan kappaleen muoto ja rakenne pitää olla tasalaatuinen ja yhtenäinen.
- Materiaalin sähkönjohtavuus pitää olla tasainen, jotta kappale kuumenee tasaisesti
- Elektrodien resistanssin oltava pieni ja kontaktin kuumennettavaan kappaleeseen hyvä, jotta vältetään kipinöitä ja ylikuumenemiselta näissä kohdissa.
- Säteilyn ja johtumisesta johtuvat lämpötilahäviöt materiaalista sekä liitoskohdista otettava huomioon mitoituksessa.
- Kuumennuksessa voidaan käyttää myös muita taajuuksia kuin 50 Hz, jos kuumennettavassa kappaleessa teho keskittyy pinnan ulkonemiin.

4.2.3 Ominaisuudet

Konduktiokuumennuksen ominaisuuksia [3, s 50-51]

Tehokkuus

- Suuri tehotiheys $100-10^5 \text{ kW/m}^2$
- Hyvä tehon muuntohyötysuhde $> 95\%$
- Hyvä Kokonaishyötysuhde $75 - 95 \%$

Edut

- Kappaleen nopea kuumeneminen
- Kohtuullisen pienet investointikustannukset
- Hyvä kokonaishyötysuhde

Haitat

- Voidaan käyttää vain tasalaatuisille sähköä johtaville materiaaleille, joissa yhtenäinen poikkileikkaus
- Elektrodien resistanssin aiheuttama lämpeneminen
- Elektrodien vaikutus pinnan ominaisuuksiin

4.2.4 Käyttöalueet

Konduktiokuumennuksen käyttö teollisuudessa [3, s. 50]:

- Metallien lämmitys ennen muokkausta
- Erilaisten aineiden välillinen sulatus. esim. lasi ja emali.
- Metallien hitaus ja juotto
- Nesteiden kuumennus
- Betonin kovettumisen nopeuttaminen
- Grafiittielektrodien muodostaminen.

4.3 Induktiivinen kuumennus

4.3.1 Toimintaperiaate

Tekniikka perustuu sähkömagneettiseen induktioon, ja sillä voidaan kuumentaa kaikkia sähköä johtavia materiaaleja, myös ei magneettisia materiaaleja. [3, s. 59-60.]

Sähkömagneettinen induktio perustuu ilmiöön jossa sähköä johtava kappale viedään vaihtovirran aikaansaamaan magneettikenttään, syntyy kappaleeseen pyörrevirtoja. Induktiokelassa kulkeva sähkövirta synnyttää magneettivuon, joka kulkee kelassa olevan kappaleen läpi ja indusoi Lenzin lain mukaan sähkömotorisen voiman, joka aiheuttaa kappaleeseen pyörrevirtoja. Pyörrevirrat muuntuvat Joulen lain mukaan lämpöenergiaksi, jolloin kuumennettava kappale lämpenee. Kun kuumennetaan magneettisia aineita myös hystereesi-ilmiö aiheuttaa kappaleen kuumenemista. [3, s. 59-60.]

Sähkömagneettinen induktio ja muuntaja toimivat samalla periaatteella. Induktiokela toimii ensiökääminä ja kuumennettava kappale toisiokääminä. [3, s. 59-60.]

Kun kuumennettava kappale on valmistettu magneettisesta materiaalista, lisää magneettinen hystereesi sähkömagneettisen induktion vaikutusta. Hystereesin ansiosta pyörrevirtojen synnyttämä teho on paljon suurempi kuin muuntuva teho kelasta kappaleeseen. Hystereesikarkaisussa hystereesistä syntyvä teho voi olla 50 % indusoituneiden virtojen energiasta. [3, s. 59-60.]

Ferromagneettisten kappaleiden saavuttaessa lämpötilan Curie-pisteen on kappaleen magneettinen permeabiliteetti lähellä arvoa 1. Kun ferromagneettinen materiaali saavuttaa Curie-pisteen muuttuu magneettinen materiaali epämagneettiseksi. Esimerkiksi raudan Curie-piste on lämpötilassa 750 °C. [3, s. 59-60.]

Kun materiaali saavuttaa Curie-pisteen, muuttuvat sen ominaisuuden ja indusoitunut sähkövirta vaihtelee huomattavasti. Sähkömagneettisessa kuumentamisessa tapahtuu kolme perättäistä fysikaalista ilmiötä:

- Energian siirtyminen induktiokelasta kappaleeseen
- magneettikentän aiheuttamien pyörrevirtojen muuntuminen lämpöenergiaksi
- kappaleessa tapahtuva lämmönjohtuminen sen ominaisuuksien mukaisesti. [3, s. 59-60.]

4.3.2 Sähkömagneettisen induktiokuumennuksen ominaisuudet

Perinteisissä lämpökäsittelyissä tarvitaan yleensä lämmönlähde, jonka lämpötila on kuumennettavaa kappaletta korkeampi, kun taas induktiokuumennuksessa teho siirretään vesijäähdytetyn induktiokelman kautta paljon kuumempaan kappaleeseen. Lämpö syntyy kuumennettavassa kappaleessa pyörrevirtojen ansiosta ilman mekaanista kontaktia. Induktiokuumennuksessa tehohäviöt ovat pienet, ja sillä voidaan siirtää suuria tehoa hyvin pienelle alueella tarkasti. Näiden ominaisuuksien ansiota induktiokuumennus on hyvin energiatehokas ja taloudellinen. [3, s. 60-61.]

Induktiokuumennuksessa indusoituvalla virralla lämmitettäessä kuumennuksen ominaisuuksiin vaikuttavat monet eri tekijät [3, s. 60-61.]:

- Kappaleessa kulkeva magneettivuo
 - o Onko kuumennettava magneettinen vai epämagneettinen
 - o Permeabiliteetin muuttuminen
 - o Magnetomotorinen voima kelassa
 - o Hystereesi-ilmiö
 - o Induktiokelman ja kuumennettavan kappaleen ilmaraon aiheuttamat häviöt, sekä laitteen häviöt
 - o Vaihtovirran taajuus

- Induktiokelan ja kappaleen sähköiset ominaisuudet
 - o Permeabiliteetti lämpötilan muuttuessa
 - o Induktiokelan ja kappaleen muotoilu. Induktio kelan on seurattava tarkasti kuumennettavan kappaleen muotoa
 - o Kappaleen malli ja ominaisuudet (onko putki vai umpiaine). Miten indusoitunut virta jakautuu kappaleessa.

Nämä tekijä ovat tärkeitä. Niistä riippuu kuumennettavaan kappaleeseen syntyvä lämpö määrä ja sen jakautuminen kappaleessa sekä kuumennuksen hyötysuhde.

[3, s. 60-61.]

4.3.3 Induktiokuumennusjärjestelmien komponentit

Induktiokuumennuslaitteistoon kuuluu seuraavat osat [3, s. 64.]:

- Virtalähde, muuntaja ja taajuusmuuttaja.
- Induktiokela joka siirtää vaihtovirran kuumennettavaan kappaleeseen
- Kondensaattorit
- Sovelluskohtaiset erikoiskomponentit

4.3.4 Induktiokuumenksen ominaisuudet

Induktiokuumennuksen ominaisuuksia [3, s. 64-65.]:

Tehokkuus

- Korkea tehotiheys 50–50 000kW/m²
- Hyvä hyötysuhde. Magneettiset aineet 70-90% ja epämagneettiset aineet 30-45%
- Hyötysuhde riippuu monista eri tekijästä. Induktiokelan muotoilusta, induktiokelan ja kuumennettavan kappaleen ilmaraosta, kuumennettavan kappaleen ominaisuuksista.
- Kuumennuslaitteiston teho voi olla kilowatista useisiin megawatteihin.

Edut

- Nopea kuumennus
- Paikallinen kappaleen kuumennus
- Voidaan käyttää tyhjiössä ja suojavaasussa
- Hyvä hyötysuhde
- Ei aiheuta materiaalin hilseilyä
- Pieni koko
- Ei aiheuta haittaa ympäristölle (melu, lämpö)
- Ei palavia kaasuja tai kemiallisia reaktioita

Haitat

- Monimutkaisten kappaleiden kuumentaminen
- Oma induktiokela jokaiselle kuumennettavalle kappaleelle
- Virtalähde pitää vaihtaa jos taajuusaluetta halutaan muuttaa

4.3.5 Sovellukset

Induktiokuumennusta käytetään monissa metallien kuumennussovelluksissa:

[3, s. 65.]

- Voidaan käyttää lähes kaikissa metallien lämpökäsittelyissä
- Erilaiset metallien ja näiden seosten sulattaminen
- Kuumennus ja hehkutus ennen kappaleen muokkaamista
- Lämpökäsittelyt: karkaisu, päästö yms.
- Metallien pintakäsittelyt: rasvanpoisto, kuivaus, galvanointi, emalointi, orgaanisten yhdisteiden poisto, pinnoitus, tinaus.
- Metallien hitsaus ja juotokset
- Metallien ja epämetallien liitokset.

5 TESTIT SOVELTUVUUDESTA LOVAL OY:N TUOTANTOON

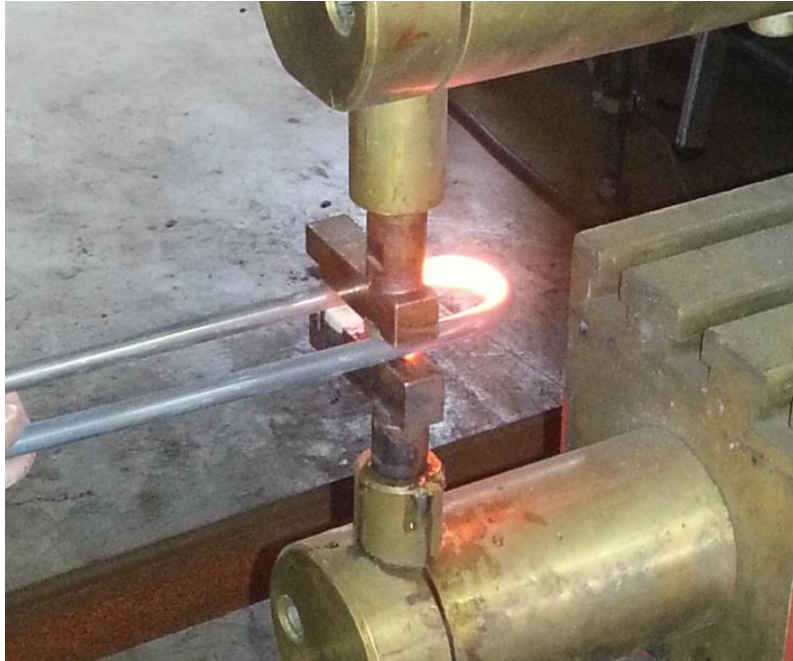
5.1 Konduktioehkutuslaitteiston testit

Vastussauvan U-mutkan kuumennusta Kemecweldin 170A -pistehitsauskoneella (kuva 6). Kuumennus onnistui kohtuullisen hyvin ko. laitteella. Muutamia ongelmia ilmeni kuumennuksen hallittavuudessa.



KUVA 6. Kemecweld 170A

Koska sähkövirta kulkee sieltä, mistä se helpoimmalla pääsee, kuumeni U-sauvan sisäpuoli ulkopuolta enemmän (kuva 7). Suurin ehkutustarve on kuitenkin juuri ulkopuolella, jonka takia laitteen säätö oli todella haastavaa. Nopeassa kuumennuksessa alkoi sisäpuoli sulamaan puhki, eikä ulkopuolelle saatu siitä huolimatta riittävää lämpötilaa. Pienemmällä teholla kuumentuminen oli huomattavasti tasaisempaa mutta liian hidasta hyödynnettäväksi robottisolussa.



KUVA 7 U-sauva kuumentunut vain sisämutkasta

Laitteisto vaatii paljon myös sähköverkolta. Sulakekoko 120 kW laitteella 250 A ja 170 kW laitteella 315 A. Lisäksi laite käyttää vain kahta vaihetta, joka lisää vino-kuormaa verkossa.. Ulkomitoiltaan laite on myös iso. Korkeus 1700 mm, leveys 400 mm ja syvyys 1115 mm. Painoa laitteella on 340 kg. Laitteen sijoittaminen robotisoluun on vaikea tilan ahtauden takia.

5.2 Induktioehkutuslaitteiston testit

Projektin alkuvaiheessa päätettiin tilata tarjotun mukainen laitteisto vuokralle, jotta voidaan varmistaa sen soveltuvuus Loval Oy:n tarpeisiin. Vuokralaite tilattiin EFD Induktionin Ab:n Saksan tehtaalta. Laite oli tyypiltään **Sinac 12 HF** (kuva 8) korkeataajuus induktiokuumennuslaite. Laitteen toimitusaika oli noin 2 viikkoa tilauksesta. Laite saapui tehtaalle n. viikko ennen sovittua aikaa, jolloin meille jäi riittävästi aikaa sen asentamiseen laboratoriotilaan.



KUVA 8. Sinac 12 HF -induktiolaite

5.2.1 Laitteiston asennus laboratoriotilaan

Laitteiston käyttökuntoon asentamiseen tarvittiin 32 A kolmivaihepistorasia ja jäähdytysvettä, jonka virtaus oli vähintään 8 litraa minuutissa ja lämpötila n. 20°C. Lisäksi tarvitaan viemäri, johon laitteiston läpi kierrätetty jäähdytysvesi johdetaan. Tuotantolaitteistoon tulee suljettu jäähdytyspiiri ja lauhdutinyksikkö.

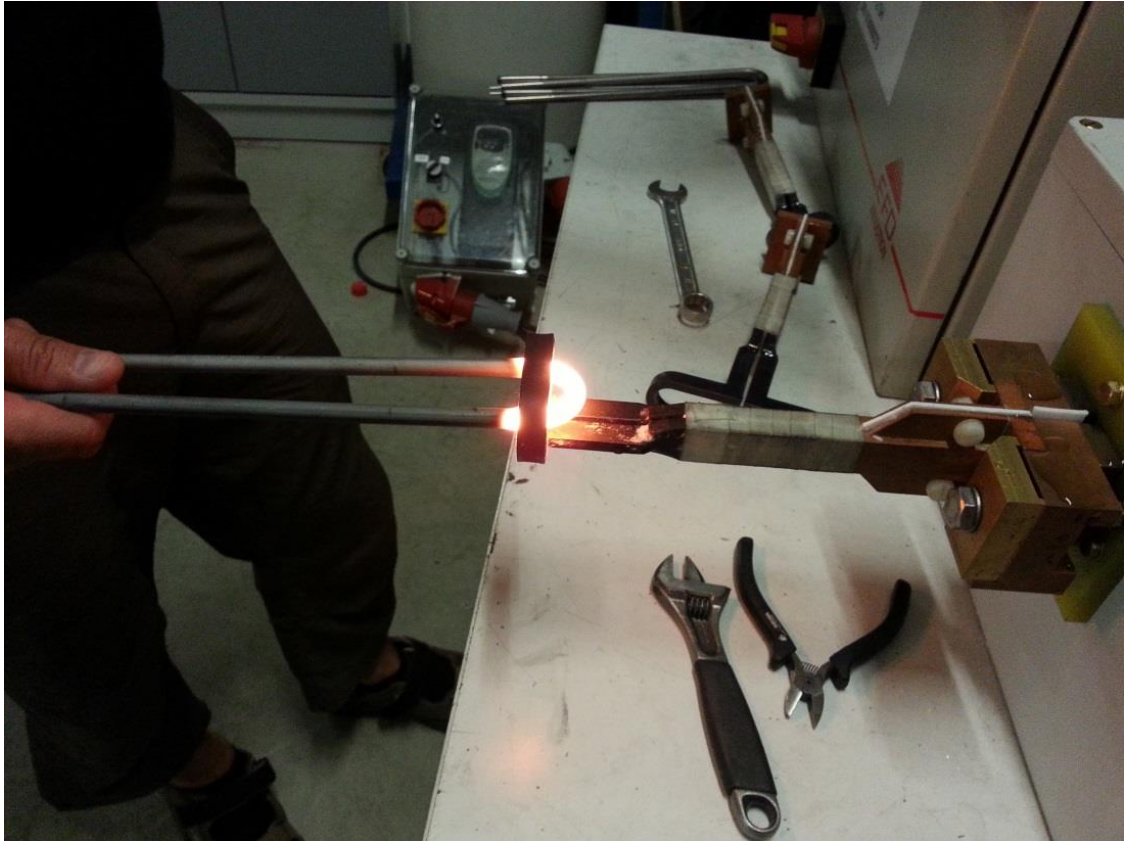
5.2.2 Hehkutus- ja juotoskokeet

Vuokralaitteistolla päätettiin keskittyä pääasiassa U-sauvan hehkuttamiseen ja sen jäähdyttämiseen eritavoilla. Muut testit tehtiin ennakoimaan tulevaisuuden projekteja induktiohehkutuksen avulla.

5.2.3 U-sauvan hehkutus ja jäähdytys

Nämä kokeet vastaavat mahdollisimman tarkasti robottisolussa tapahtuvaa U-sauvan hehkutusta (kuva 9) ja sen jäähdytystä. Hehkutusta testattiin useilla eri tehoalueilla ja jäähdytystä usealla eri tavalla. Jäähdytyksen jälkeen sauvoille tehtiin vastaava taivutus, jonka robotti tekee tuotannossa.

Hehkutuskokeiden alussa laitteisto säädettiin tehoalueelle 20 % täystehosta. Tämä teho riitti lämmittämään sauvan haluttuun lämpötilaan, mutta aikaa kului liikaa n. 30 sekuntia. Robottisolun tehokas toiminta vaatii n. 5 sekunnin lämmitysaajan. Tämä tavoite saavutettiin 50 % tehoasetuksella.



KUVA 9 U-sauvan hehkutus laboratoriossa

Sauvan jäähdystystä ja puristusta kokeiltiin neljällä eri tavalla: ilmassa jäähdystys, vesiastiassa jäähdystys, juoksevassa vedessä jäähdystys ja lisäksi puristettiin sauva punahehkuisena.

Punahehkuisen sauvan puristaminen ei toiminut ollenkaan, vaan sauva murtui lähes heti puristamisen alkamisesta. Muilla jäähdystysmenetelmillä lopputulokset olivat hyvin toistensa kaltaisia. Sauvat kestivät hyvin puristusta, kun metallin hehkuminen oli loppunut. Ilmassa jäähdyttäessä aikaa kului liikaa, jonka vuoksi päädyttiin vesijäähdystykseen. Vesijäähdytyksessä oli kaksi eri vaihtoehtoa: upotusjäähdystys ja suihkujäähdystys. Jäähdystysjärjestelmäksi valittiin aluksi vesisuihkujäähdystys, joka päätettiin rakentaa itse.

5.2.4 Suoran sauvan hehkutus

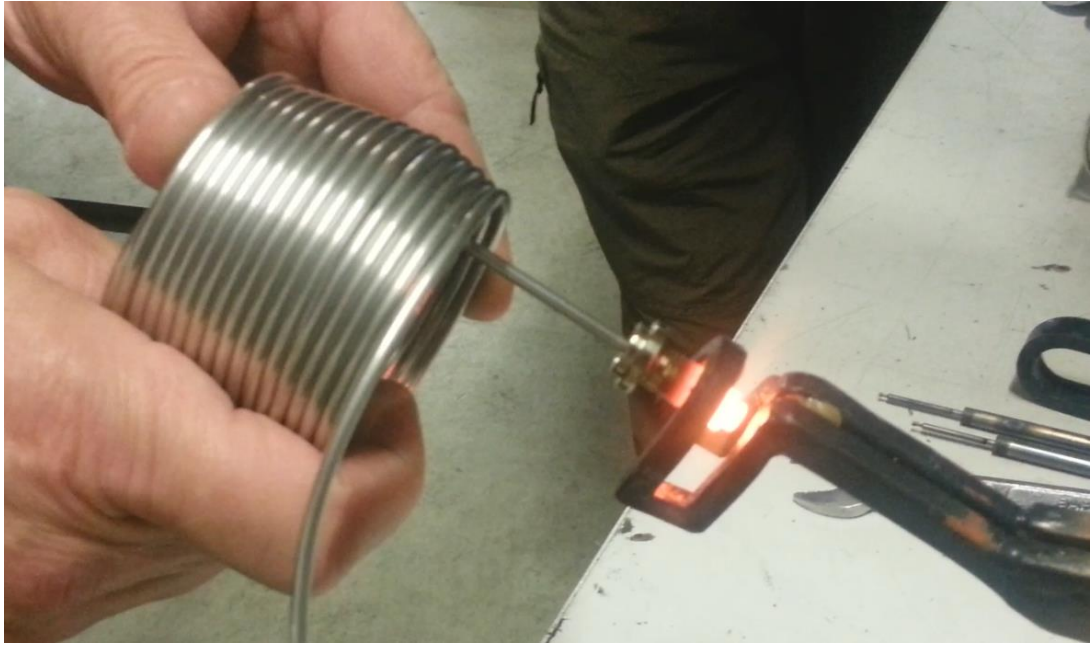
Suoran sauvan hehkutusta päätettiin kokeilla, koska tällä hetkellä tuotannossa täytetyt sauvat hehkutetaan nauhauunissa valssauksen jälkeen. Induktiohehkutuslaitteisto olisi mahdollista asentaa valssauksen yhteyteen, jolloin tuotteelta jäisi paljon manuaalista käsittelyä ja varastointia pois. Sauvat saataisiin heti valssauksen jälkeen jatkojalostukseen, eikä niiden tarvitsisi jäädä odottamaan hehkutusvuoroa kuormitetuille nauhauunille.

Testikäyttöön ei ollut täysin sopivaa induktiokelaa, mutta saimme varmistuksen siihen, että hehkutus on mahdollinen ja toimiva. Testilaitteiston teho oli 12 kW ja laskennallisesti saatiin tarvittavaksi induktiotehoksi 25 kW. Tällä teholla saadaan vastussauva hehkutettua 1040° C lämpötilaan 20 cm:n matkalla ratanopeuden ollessa 10 m minuutissa.

5.2.5 Maidonlämmittimen nippelin juotos

Tällä kokeella testattiin maidonlämmittimen nippelin juotosta. Tällä hetkellä juotos tehdään tyhjiöuunissa, ja se on erittäin haastava tuotteen muodon vuoksi. Nippelin juottaminen tyhjiössä vaatii paljon manuaalista työtä ja erilaisia juotostukia, jotta tuote säilyttäisi muotonsa tyhjiöjuotoksen aikana.

Induktiolla juotettiin 1 nippeli (kuva 10) kerrallaan käyttäen nikkelijauhetta. Nippelit saatiin jäämään kiinni putkeen, mutta nikkeli ei kulkeutunut tarvittavaa matkaa putken ja nippelin liitoksessa. Tämä johtui väärästä atmosfääristä. Nikkelijuotos pitää tehdä vetyatmosfäärissä, jotta se juoksisi hyvin juotettavassa liitoksessa. Testejä varten ei kuitenkaan nähty tarpeelliseksi tehdä kaasukammiota, vaan haluttiin nähdä, kuinka hyvin induktio kuumentaa liitoksen.



KUVA 10 Maidonlämmittimen nippelin juotos laboratoriossa

5.2.6 Kierrelaipan ja sauvan välinen juotos

Tämä testin tarkoituksena on testata mahdollisuutta korvata liekkijuotos induktiojuotoksella. Lähtökohtaisesti testilaitteena ollut korkeataajuuslaite ei ole sopiva tuotteen juottamiseen, vaan laitteen pitäisi toimia matalammalla taajuudella. Kuuminus piti suorittaa pienellä teholla ja pitkällä ajalla, jotta myös vastussauvat kuumenivat juotoslämpötilaan (kuva 11).



Kuva 11 Kierrelaipan juotos laboratoriossa

Juotoskokeet onnistuivat kohtuullisen hyvin. Ongelmia tuotti väärä taajuusalue, jonka takia laippa kuumentui nopeammin kuin sen läpi menevät vastussauvat. Induktiokela oli myös väärän kokoinen ja mallinen. Testin päätteeksi todettiin laippajuotoksen onnistuvan hyvin, ja sitä kannattaa tutkia tämän myöhemmin lisää.

5.3 Testien johtopäätökset

Kesän 2014 aikana testattiin induktiokuumennuslaitetta laitetoimittajan asiakkaan tiloissa ja induktiokuumennuslaitetta Loyal Oy:n laboratoriotiloissa. Laitteistojen toimintaperiaatteen poikkesivat toisistaan.

Testien perusteella todettiin induktiokuumennuslaitteen soveltuvan paremmin Loyal Oy:n käyttöön. Etuja induktiolaitteeseen verrattuna olivat:

- Tasaisempi kuumennustulos
- Pienempi koko. Helpompi sijoittaa robottisoluun
- Energiätehokkaampi
- Ei kuluvia osia.

6 KANNATTAVUUSLASKELMAT

Kannattavuuslaskelmissa vertailtiin vastussauvojen hehkutusta nauhauunilla ja niiden hehkuttamista robottisolussa induktiolaitteistolla sekä induktiokuumennusta ja induktiokuumennusta keskenään.

6.1 Induktio- ja induktiokuumennuksen vertailu

Induktio- ja induktio-laitteita verrattiin seuraavilla kriteereillä: hankintahinta, käyttökustannukset vuositasolla, vaatimukset sähköverkolta ja asennettavuus robottisoluun. Vertailussa oli kaksi eri induktiokuumennuslaitetta ja yksi induktiolaite.

Hankintahinnaltaan induktiolaite oli n. 5500 euroa edullisempi kuin induktiolaitteisto. Käyttökustannuksissa kuitenkin induktio on niin selvästi energiätehokkaampi, että hankintahinnan erotuksen takaisinmaksuajaksi laskettiin 1,26 vuotta (kuva 11). Las-

kelmassa on huomioitu suurimmat asennustarvikkeet, kuluvien osien vaihtokustannukset ja energiakulutus.

TAULUKKO 1. Taulukko induktio- ja konduktiolaitteistojen kustannuksista

KUSTANNUSVERTAILU								
INDUKTIOHEHKUTUS VS. PISTEHITSIHEHKUTUS								
	Hankinta	Liit.teho	Kaapeli	muut	Sähkön	kulutus	Kulut	
	Hinta	kVA		kytk.tarv	kulutus	osat	Kulut	vuosi
					vuosi	vuosi		
					0,1h*16h			
KRW B121	21 550 €	120	1 799 € Al 3x185	1 000 €	4 224 €	2 400 €	6 624 €	
SINAC 12HFP	27 000 €	17,5	492 € Al 4x25	200 €	616 €	0 €	616 €	
	Hintaero	7 557 €						
	Käyttökustannusten säästö	6 008 €						
	takaisinmaksuaika	1,26	vuotta					
Induktion lisävarusteet ei mukana laskennassa, koska näitä ominaisuuksia ei ole pistehitsikoneiden tarjouksessa.								
Pistehitsikoneiden elektrodit laskettu 1kk:n uusintavälein. Hinta n. 200€ pari. Arvioitu kunnostusaika 1 vko ja vaihto 1kk. Insuktiossa ei kuluvia osia.								
Liitymätehon nosto aiheuttaa muuntajien pieneksi jäämisen jolloin puhutaan 50-100k€:n investoinnista. Liitymätehon muutoksen hintaa/kk maksua ei ole huomioitu								
	120 kpl/h							
	3 sek/hehkutus							
sek/h	360				Sähkö hint			
laite	Aika/h	h/vrk	yht/h	teho	€/kWh	Hinta/vrk	Hinta/a	vrk/v
Piste 120	0,1	16	1,6	120	0,1	19,20	4224	
Induktio	0,1	16	1,6	17,5	0,1	2,80	616	220

Asennustarvikkeissa ei ollut isoja eroja. Suurin yksittäinen kustannus oli liitänkäapeli. Induktionlaitteen valintaa puolsivat myös kuluvien osien kustannukset, joita konduktiolaitteella olisi tullut n. 200 euroa kuukaudessa. Konduktiokuumennuksessa tarvitaan kuparielektrodit, joilla sähkö siirretään kuumennettavaan kappaleeseen. Laitteilla on myös hyvin erilainen energiankulutus. Konduktiolaitteen liitänäteho on 120-170 kVA ja induktiolaitteella 17,5 kVA. Suuren liitänätehon ja energiankulutuksen vuoksi olisi tehdaskiinteistön muuntaja jäänyt pieneksi, ja myös tämä olisi jouduttu korvaamaan isommalla muuntajalla. Näiden seikkojen ja laskelmien perusteella hylkäsimme konduktiokuumentamisen ja päätimme jatkaa projektia induktiolaitteella.

6.2 Käyttökustannukset ja takaisinmaksuaikalaskelmat

6.2.1 Nauhauunin käyttökustannukset

Nauhauunin kustannukset koostuvat erilaisista energiakuluista ja operaattorin palkkakuiluista. Nauhauuni käyttää olosuhteiden ylläpitämiseen sähköä, vetyä ja typpeä. Sähkön kulutus uunissa on 130 kW, vedyn 6 m³/h ja typen 6 m³/h. Uudelleen hehkutettavia vastussauvoja on vuositasolla 258 720 kpl, ja niihin käytetään aikaa 405.26 tuntia. Kustannuksia nauhauunilla hehkutettaessa syntyy energiasta ja henkilöstökuluista. Nauhauunin energia kustannukset ovat 18,11 euroa tunnissa ja operaattorin palkkakustannus 22 euroa tunnissa. Kokonaistuntikustannukseksi saadaan 40,11 euroa, jolloin 405 tunnin vuosittaisella käytöllä kokonaiskustannukseksi saadaan 16 254,30 euroa.

6.2.2 Induktiolaitteen käyttökustannukset

Induktiolaitteen kustannukset koostuvat ainoastaan energian kulutuksesta. Tuotteiden käsittely hoidetaan robotilla, jolloin tuotteet eivät vaadi ylimääräistä operaattorin huomiota. Energiaa laite kuluttaa kuumennuksen aikana 12kW ja jäähdytyslaite 5kW. Kuumennussykliksi on arvioitu maksimissaan 10 sekuntia. Tällä energian kulutuksella vuosikustannukseksi saatiin laskettu 745,75 euroa.

6.2.3 Säästö ja takaisinmaksuaika

Edellisten kohtien laskelmien perusteella vuosisäästöksi tulee 15 508,58 euroa ja takaisinmaksuajaksi saatiin 2,8 vuotta, joka on yrityksen tavoitteiden mukainen alle 3 vuotta. Koska laskelmat osoittivat investoinnin kannattavaksi yritykselle, tehtiin siitä investointiehdotus, joka lähetettiin Loyal Oy:n omistavan Nibe-konsernin hallituksen hyväksyttäväksi.

TAULUKKO 2. Takaisinmaksuaikalaskelma induktiolaitteistolle

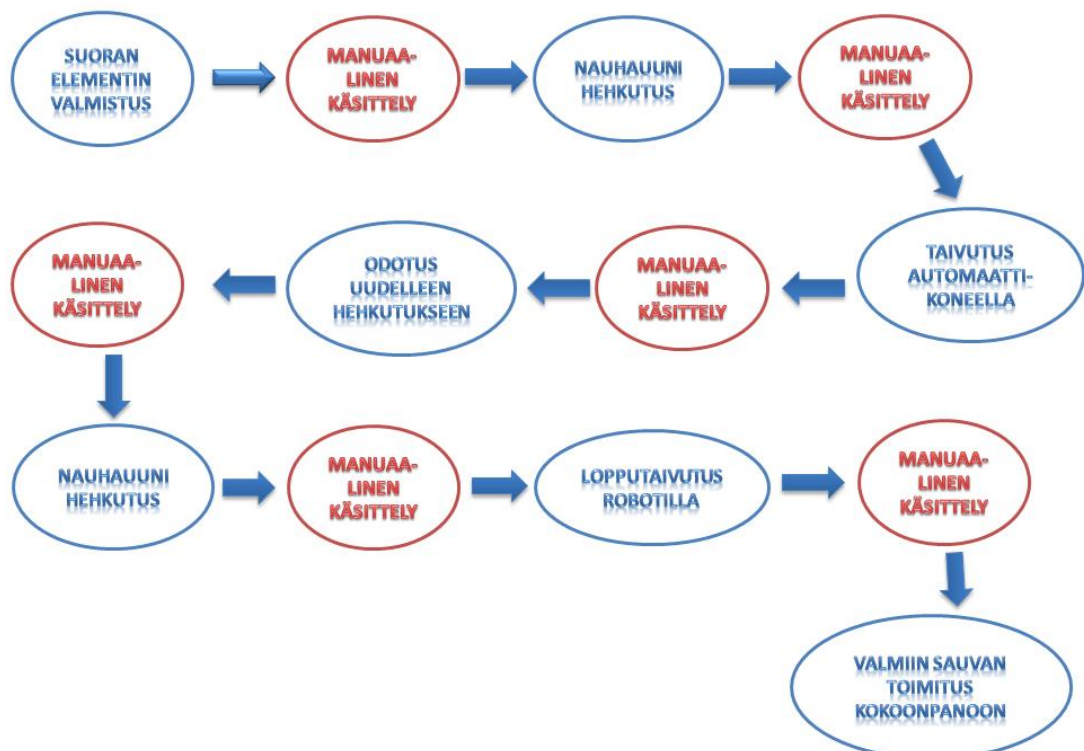
TAKAISINMAKSUAIKALASKELMA INDUKTIOHEHKUTUSLAITTEISTOLLE						
Tuotteiden kappalemäärät ja niihin käytettävä aika						
		sauvaa	s/kpl	s	h	
Tuote 1	62786	3	188358	5,66	1066106	296,141
Tuote 2	5600	1	5600	4,09	22904	6,36222 leveämpi kela
Tuote 3	9740	2	19480	7,37	143568	39,8799
Tuote 4	23263	1	23263	3,35	77931,1	21,6475
Tuote 5	1970	3	5910	5	29550	8,20833
Tuote 6	947	3	2841	16,6	47160,6	13,1002 leveämpi kela
Tuote 7	7237	1	7237	5,11	36981,1	10,2725 + purista mutka robotille myös
Tuote 8	6031	1	6031	5,76	34738,6	9,6496 + purista mutka robotille myös
		Yht.	258720 kpl			405,261 h vuodessa
	130 kW Sähkö	8,72 snt/kWh	siirtoineen			
	6 m³/h kaasut		H			
	9 m³/h		N	Typpi	105,12 €/t	
				Säiliötoimitus	26,28 €/t	
				ADR-veloitus	12,069 €	35
N	0,843 m³/kg				143,469 €/t	2,9 t
	9 m³	7,587 kg			0,14347 €/kg	
		1,0885 €/h				
H				Vety konttitoimituksena	947,3 €/1000 m³	
	6 m³	5,6838 €/h			0,9473 €/m³	
Nauhauunin kustannus välihehkutuksessa						
Kustannukset / tunti snt	€					
Sähkö	1133,6	11,336 €/h				
N		1,0885 €/h				
H		5,6838 €/h				
		18,1083 €/h				
Tuntikustannus		22 €/h		18,11		
Kustannus yhteensä		40,11 €/h				
Säästö yhteensä		16254,3 €/vuosi				
Induktio hehkutuksen kustannus. Sykli aika 10 sek/sauva						
Määrä	258720 kpl/vuosi					
aika	0,00194 h/kpl	503,07 h				
sähkö	17 kW	1,48 €/h				
Kustannus Yhteensä		745,75 €/vuosi				
Säästö Yhteensä		15508,58 €/vuosi				
Hankinta hinta	43250 €			sisältää positiot 1-1 ja 1-3		
takaisinmaksuaika	2,8 vuotta			+ jäädytyslaitteistoon ja		
				asenuksiin 10 000€		

7 VANHA TUOTANTOVIRTA

Vanhassa tuotantovirrassa (kuva 14) vastussauva lastattiin valssauksen jälkeen sauvakärreihin odottamaan hehkutusta nauhauunissa. Lähes kaikki vastussauvat vaativat hehkutuksen, jotta niitä voidaan taivuttaa ja muokata sopiviksi lopputuotetta varten. Tästä poikkeuksena suoraksi jäävät vastussauvat.

Kun sauvat on hehkutettu nauhauunissa pehmeäksi, siirtyivät ne esivalmistussoluun esitaivutuksia varten. Sauvoille tehdään esitaivutukset automaattitaivutuskoneilla ja monimutkaisemmissa malleissa käsitaivutuksena. Tämän jälkeen osa sauvoista siirtyy kokoonpano-osastolle tuotteen kasaamista varten. Osa sauvoista vaati vielä jyrkempiä taivutuksia ja muotoja, joita ei automaattikoneilla eikä yhdellä taivutuskerralla pysty tehdä.

Nämä sauvat täytyy uudelleen hehkuttaa, ja ne siirtyvät odottamaan nauhauunin odotusalueelle uudelleen hehkutusta. Uudelleen hehkutuksen jälkeen sauvat siirtyvät jälleen esivalmistussoluun käsitaivutukseen tai robottisoluun robotin taivutettavaksi. Kun kaikki tuotteen vaatimat esivalmistelutyöt on tehty, siirtyvät sauvat kokoonpano-osastolle tuotteen kasaamista varten.



KUVA 12. Vanha tuotantovirta

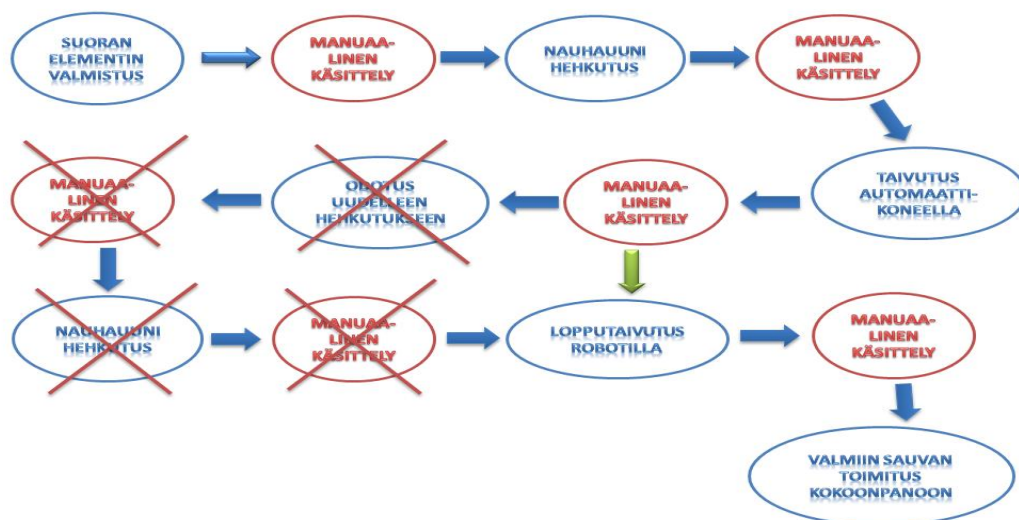
8 UUSI TUOTANTOVIRTA

Induktiokuumennuslaitteiston lisäämisen jälkeen lyhenee tuotantovirta (kuva 13) ja vastussauvan käsittely huomattavasti. Uudessa tuotantovirrassa tuote tulee samalla tavalla valssilta, jonka jälkeen ne siirretään nauhauuniin hehkutusta varten kuten aikaisemminkin. Hehkutuksen jälkeen tuote siirretään esitaivutukseen automaattikoneelle tai käsitaivutukseen. Tämän jälkeen tuotantovirta muuttuu ja sauvat syötetään esitaivutusten jälkeen suoraan robottisoluuun lopputaivutuksia varten.

Robotti ottaa sauvan käsittelyyn ja ensimmäisenä käyttää taivutettavan kohdan induktiokuumennuslaitteen kelassa. Sauvaa kuumennetaan n. 5 sekuntia. Tässä ajassa sauvan pää saavuttaa halutun 1050 °C lämpötilan. Kuumennuksen jälkeen tuote sauva siirretään jäähdytysuihkun alle. Tämä suihku on rakennettu erikseen tätä sovellusta varten, ja siinä oleva viuhkasuutin suihkuttaa vettä kuumennetun sauvan päälle, jolloin se jäähtyy nopeasti. Sauva ei karkene (kovetu) nopeasti jäähdytettäessä, koska näin käsiteltävät sauvat ovat vähän hiiltä sisältävää ruostumatonta terästä.

Kuumennuksen ja jäähdytyksen jälkeen vastussauvan vaippaputken rakenne on pehmentynyt niin paljon, että sille voidaan tehdä jatkotaivutukset ja puristukset. Näiden jälkeen tuote on valmis kokoonpano-osastolle kasausta varten.

Uudella järjestelmällä saavutettiin tuotteen nopeampi läpimenoaika, koska uudelleen hehkutus nauhauunilla jää pois. Sauvojen ei tarvitse odottaa nauhauunilla omaa vuoroaan ja samalla vapautettiin ruuhkautuneen nauhauunin kapasiteettia muille tuotteille.



KUVA 13. Uusi tuotantovirta

9 INDUKTIOLAITTEISTON RAKENNE

Tässä luvussa käsitellään Loval Oy:lle EFD Induction Ab:n tarjoamaa induktiolaitteistoa ja sen kokoonpanoa ja lisävarusteita.

9.1 Induktiokuumnennuslaitteisto

EFD Induction Ab:n SINAC 12/18SH -induktiokuumnennuslaitteisto (kuva 14) on tarkoitettu asennettavaksi kiinteästi osaksi valmistusprosessia. Laitteistolla voidaan kuumentaa nopeasti, keskitetysti ja tarkasti hyvällä toistolla kaikkia sähköä johtavia materiaaleja. SINAC 12 soveltuu moninasiin induktiokuunnensovelluksiin, kuten juottamiseen, karkaisuun, liimaliitoksien kovettamiseen ja lämpökäsittelyyn.



KUVA 14. Induktiolaite Sinac 12/18SH

Induktiokuumentimen operointi voidaan suorittaa laitteiston paneelilta ajastimen, käsi­käytön, jatkuvatoimisen tai jaksottaiskuumentamisen avulla, sekä ulkoisen I/O – liittymän kautta. Laitteeseen voidaan liittää myös ulkoinen pyrometri, jolla voidaan ohjata takaisinkytkennän kautta laitteen tehoa ja kuumennusaikaa lämmitettävän kappaleen lämpötilan mukaan.

Kuumennusohjelma voidaan tehdä pelkällä ajan ja tehon säätämällä tai 10 sekvenssin ohjelmalla, johon voidaan tehdä 10 erilaista jaksoa. Jokaiseen jaksoon voidaan ohjelmoida eri aika, teho ja tehon tyyppi (ramppi / askel).

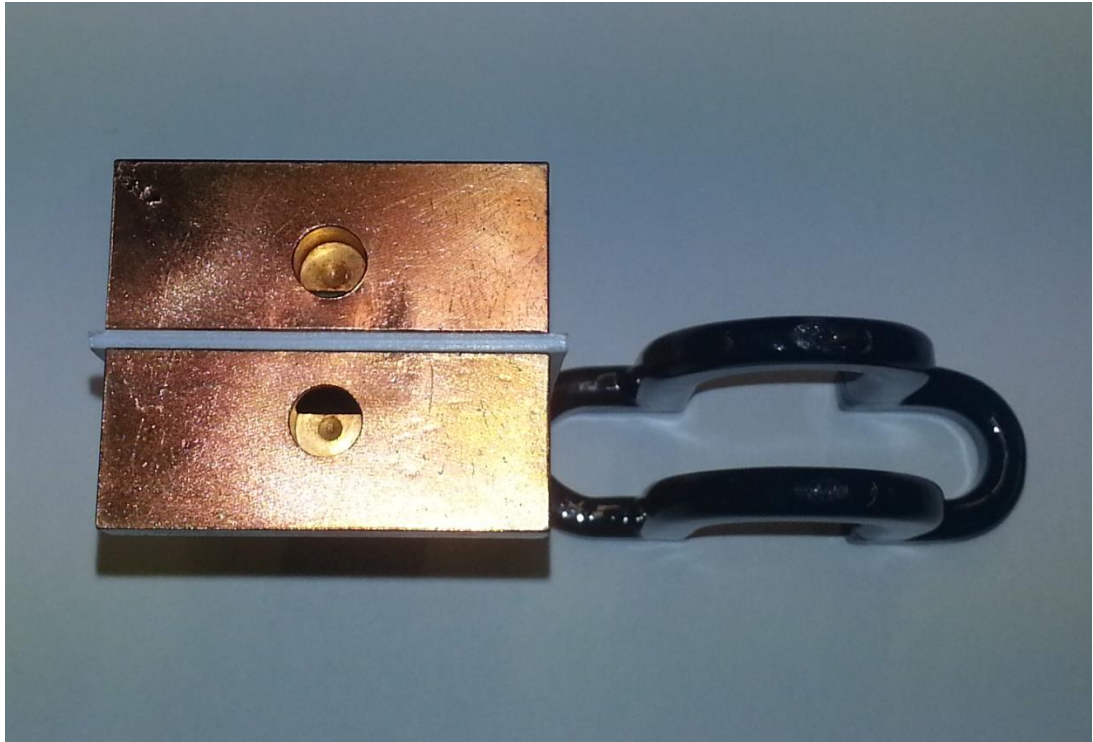
9.2 Induktiokela

Induktiokela (kuva 15) suunnitellaan tarkasti jokaista sovellusta varten erikseen. Kuumennus teho riippuu kelan muodosta ja etäisyydestä kuumennettavaan kohteeseen. Mitä kauempana kela on kuumennettavasta kappaleesta, sitä vähemmän siihen indusoituu pyörrevitaja kappaleeseen, jonka seurauksena kappaleen kuumeneminen hidastuu. Kelan muodon on seurattava mahdollisimman tarkasti kuumennettavan kappaleen muotoja, jolloin kappale myös kuumenee tasaisesti. [4 s.19.]



KUVA 15. Induktiokela U-mutkan hehkutukseen

U-sauvan hehkutukseen teetettiin kela EFD-Iductionilla. Kela on muotoiltu siten, että se kuumentaa U-mutkaa 40 mm:n matkalta. Induktiokelan sisällä kulkee jäähdytysvesikanava (kuva 16), joka estää kuparista valmistetun kelan kuumentumisen ja sulamisen. Kela on päällystetty suojavahalla, joka estää virhetilanteessa suoran kontaktin kelan pintaan.



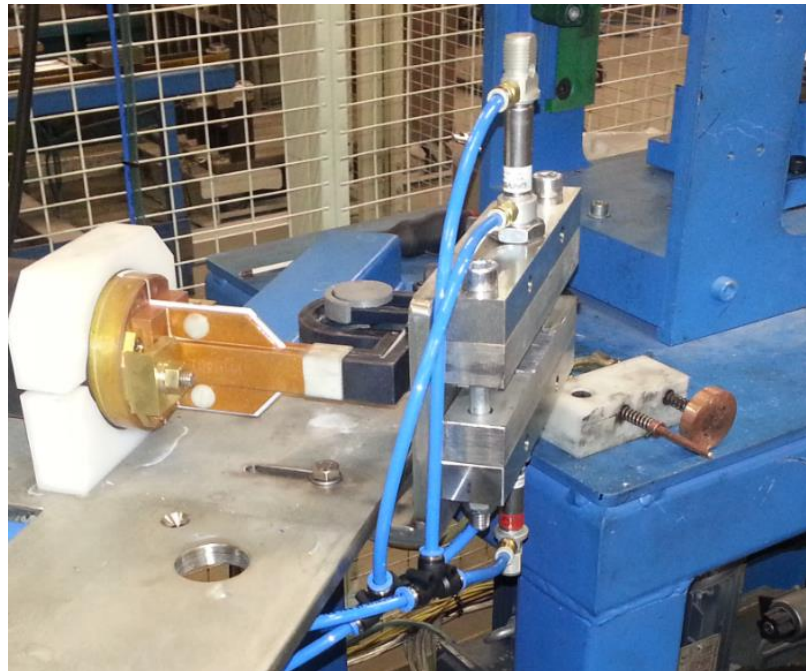
KUVA 16. Induktiokela jäähdytyskanavat

Ensimmäinen induktiokela osoittautui väärin suunnitelluksi, ja se kuumensi vastusauvan epätasaisesti. Toinen versio (kuva 17) pelasi jo huomattavasti paremmin, mutta siihenkin jouduttiin asentamaan ferriittipalat magneettivuon ohjaukseen. Ferriittipala oikosulkee magneettikentän kelan toiselta puolelta, ja oikosuljettu kenttä purkautuu vapaalta puolelta ulos, jolloin kenttä vahvistuu ja kuumennusteho paranee.



KUVA 17. Induktiokelan toinen versio. Ferriittipalat ohjaavat magneettikentän tehokkaammin kuumennettavaan kohteeseen.

Vastussauvojen esitaivutusten muoto vaihteli myös niin paljon, että jouduimme suunnittelemaan sauvalle kiinnipitopuristimen (kuva 18), jotta sauvan etäisyys ei muutu induktiokelasta. Jos etäisyys muuttuu liian paljon, ei hehkutuksesta tule tasaista ja vastussauva saattaa murtua jatkotaivutuksia tehtäessä.



Kuva 18. Vastussauvan kiinnipitopuristin

9.3 Jäähdytinlaitteisto

Induktiolaitteisto tarvitsee tehokkaan jäähdytyksen. Tätä tehtävää varten hankittiin EFD Induciton Ab:lta jäähdytyslaite M12b (kuva 19), jonka jäähdytysteho on 12kW ympäristölämpötilassa 42°C. Jäähdytyslaitteiston tarkoituksena on pitää induktiokuumennuslaitteiston virtalähde ja muuntaja toimintalämpötilassa ja estää niitä ylikuumentamasta. Laitteistossa on suljettu jäähdytysnesteen kierto, jotta laitteiston sisään ei pääse epäpuhtauksia. Jäähdytyksen hoitaa laitteen oma kylmäkompressori.



KUVA 19. Jäähdytyslaite M12b

9.4 Elementin jäähdytyslaitteet

Koska sovellus tulee käytettäväksi robotilla, on vastussauva saatava jäähtymään nopeasti, jotta robottityökalut eivät kuumene sauvan puristamisen aikana. Vaihtoehtoina tähän on tuotteen upottaminen vesiastiaan tai suihkuttamalla sen päälle kylmää vettä. Kuumennus laitteiston toimittajalla oli tarjolla tähän soveltuva laitteisto, joka sisälsi sammutusvesisuihkun ja käytetyn veden jäähdytyslaitteiston. Tämä kuitenkin jouduttiin hylkäämään sen kalliin hankintahinnan takia. Jäljelle jäi kehittää jäähdytyslaitteisto itse.

Jäähdytyslaitteiston suunnittelussa pääasia oli saada vastussauva jäähtymään riittävästi n. 5 sekunnin aikana. Ensin rakensimme vesisuihkukotelon (kuva 20) vastussauvan jäähdytykseen. Tätä päätettiin kokeilla, koska laitetoimittaja oli tarjonnut meille jäähdytysvesisuihkua elementin jäähdyttämiseen. Sammutussuihku rakennettiin RST-kytkentäkotelosta (kuva 20), jonka sisälle tehtiin tuet kahdelle suihkusuuttimelle ja etupuolelle jyrssiin U-sauvan muotoinen aukko, josta sauvan saa työnnettyä kotelon sisään. Suuttimiksi valittiin 95° viuhkasuuttimet, joiden virtaus on 9 litraa minuutissa 7 baarin paineella. Veden virtausta ohjataan magneettiventtiilin avulla, ja vesi otetaan suoraan vesijohtoverkosta. Veden poisto järjestettiin ohjaamalla ylimääräinen vesi kotelon pohjasta erilliseen pumppusäiliöön, josta vesi pumpattiin viemäriverkkoon. Vesisuihkukotelon osoittautui testeissä kuitenkin huonoksi sellaisenaan, koska jäähdytysvesi roiskui ulos kotelon aukosta ja kasteli koko robottisolun.



KUVA 20. Elementin jäähdytysuisukotelon

Kastumisongelman jälkeen päädyimme asentamaan kastoastian (kuva 21) robotisoluun. Astia valmistettiin RST-putkesta, johon hitsattiin pohja ja liitännät tulevalle ja poistuvalla vedelle. Tuloputki on säiliön pohjassa ja poistoputki ylälaudassa. Poistoputken kautta ylimääräinen vesi valuu letkua pitkin pieneen pumppusäiliöön, ja pinnan noustessa tyhjentää pumppu veden kiinteistön viemäriverkkoon. Jäähdytysvesiasiaan lisätään jokaisen robottikierroksen aikana kylmää vettä 0,5 sekunnin ajan.



KUVA 21. Vastussauvan jäähdytysastia

Vastussauvalle ei tarvinnut järjestää erillistä kuivausta, koska vastussauva on jäähdytyksen jälkeen edelleen niin kuuma, että vesi haihtuu sen pinnalta heti eikä valu lattialle.

10 LAITTEISTON SIJOITTAMINEN ROBOTTISOLUUN

Induktiokuumennus laitteen virtalähteelle suunniteltiin tukeva teline, joka sijoitettiin robottisolujen aidan ulkopuolelle. Näin säätö ja huoltotoimenpiteet on helpompi suorittaa kuin ahtaassa robottisolussa.

HHT400-muuntajalle, induktiokelalle ja kiinnipitopuristimelle suunniteltiin kiinnityslevy (kuva 22) robottisolun sisälle. Jäähdytysastia sijoitettiin induktiokelan alapuolelle.



KUVA 22 Induktiokelan, kiinnipitopuristimen ja jäähdytysastian sijoitus robottisoluun

Induktiolaitteelle asennettiin 32A:n ja jäähdytyslaitteelle 16A:n voimapistorasiat. Jäähdytysletkut ja sähköjohtimet tuotiin soluun turva-aitaan tehtyjen läpivientien kautta. ABB hoiti robotin ohjainyksikköön lisää lähtöjä, jotta induktiokuumennuslaite saatiin käyttöön.

11 KÄYTTÖÖNOTTO

Laitteiston käyttöönotto aloitettiin tarkastamalla jäähdytysveden kierron riittävyys. Vesimäärän pystyy tarkastamaan laitteen Status Info Menusta. Käytössä olevan kelan läpi virtasi laitteen maksimi paineella (6bar) 10,9 litraa minuutissa, kun laitteen vaatima minimi on 14 litraa minuutissa. Totesimme kelan vesikanavien olevan hieman liian ahtaat jotta tarvittava vesikierto saataisiin aikaan. Käyttöönottoa jatkettiin valitsemalla erikoisasetus, joka sallii käytön pienemmällä vesimäärällä. Tätä ei suositella tehtävän täydellä kuormituksella. Tämän jälkeen laite oli käyttövalmis.

Kuumennus aloitettiin ajastintoiminnolla. Tehoksi valittiin 60 % 18 kW:sta ja ajaksi 5 sekuntia, joka oli kuumennuksen tavoiteaika. Tässä ajassa pitäisi U-mutkan lämmitä 1050 °C. Näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan vastussauva lämpeni vain ylä- ja alapuolelta (kuva 23).



KUVA 23. U-mutkan vääränlainen kuumeneminen

Kuumennusta yritettiin monella eri ajalla ja teholla, mutta tasaista lämpenemistä ei saatu aikaiseksi. Ulkomutka ei lämmennyt riittävästi, jonka takia ei sauva kestänyt taivutusta (kuva 24). Totesimme kelan suunnittelun olevan pielessä ja toivottua kuumennuslämpötilaa ja aikaa pystyttyä saavuttamaan. Oikeanlainen lämpötila saavutettiin 15 sekunnin kuumennusajalla ja 25 % teholla, joka ei ollut missään nimessä riittävä. Lyhyemmällä kuumennusajalla vastussauvat hajosivat taivutuksessa (kuva 25) Tässä vaiheessa lopetimme testit ja laitoimme kelan uudelleen suunnittelun, jotta lämpö saataisiin jakautumaan tasaisemmin.



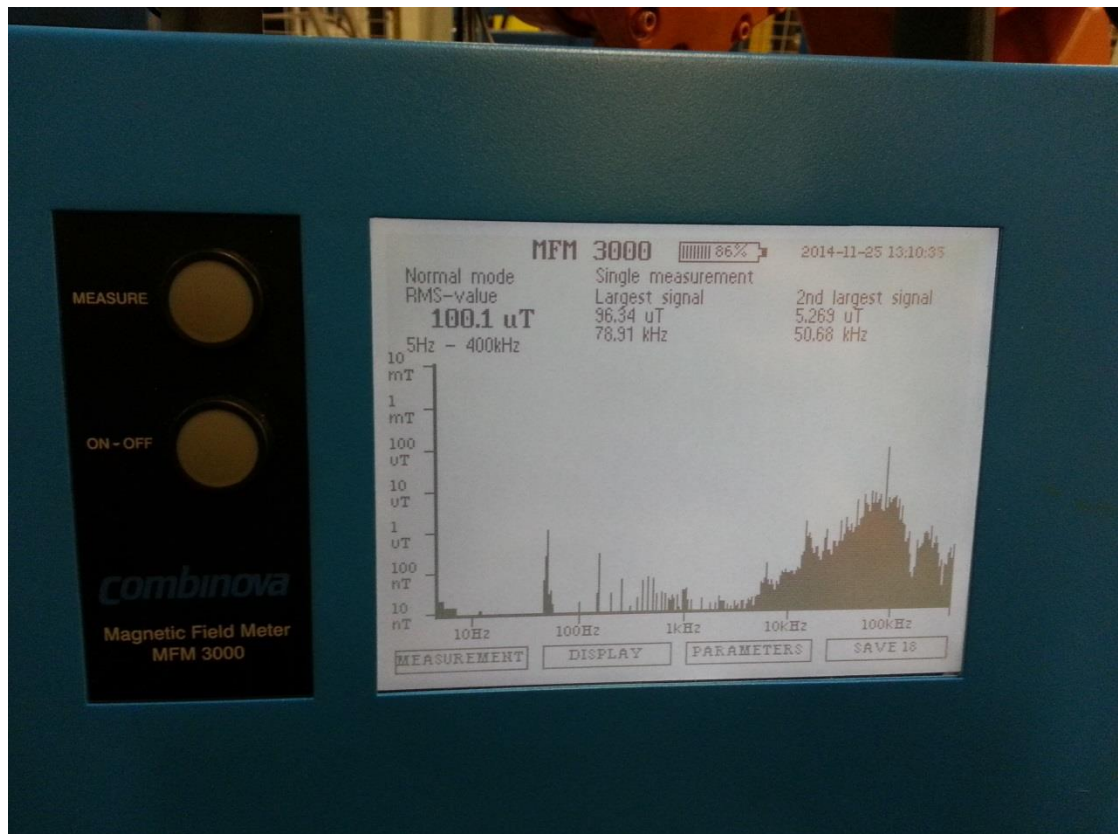
KUVA 24. Hajonneet vastussauvat

Uusi induktiokela saatiin tehtaalle vajaassa viikossa (kuva 25). Kelan muotoilua oli paranneltu, ja siihen oli asennettu ferriittipalat magneettikentän ohjaamiseksi vastussauvan sisämutkaan. Nyt vastussauva kuumentui paljon tasaisemmin ja ulkomutka kuumeni voimakkaimmin niin kuin tavoite oli. Myös kuumennusaika saatiin huomattavasti lyhyemmäksi. Kuumennusajaksi saatiin 5 sekuntia, joka on hieman tavoiteltua nopeampi. Myös tehon tarve pienentyi huomattavasti alkuperäisestä arviosta. Koeajoissa arvioitiin tehon tarpeeksi 12 kW, mutta oikeanlaisella kelansuunnittelulla pystyttiin teho tiputtamaan 4,4 kW:iin.



KUVA 25. Uuden induktiokelan oikeanlainen kuumennus

Induktiolaitteiston virtalähteessä ja muuntajassa on varoitustarrat sähkömagneettisesta säteilystä. Tämän takia päätettiin mitata säteilytasot ennen laitteen ottamista tuotantokäyttöön. Virtalähteen osalta ei laitteen ulkopuolella havaittu kohonneita arvoja. Induktiokelan magneettikentän voimakkuudeksi 10 cm etäisyydellä kelasta saatiin mitattua $100,1 \mu\text{T}$ (kuva 26). Raja-arvo on $100 \mu\text{T}$, jonka ylityttyä liikkumisesta alueella pitää varoittaa selkeillä merkeillä. Tässä tapauksessa ei merkintöjä tarvinnut tehostaa, koska induktiokela on sijoitettu robottisoluun suoja-aitojen sisäpuolelle, jonne ei pääse kuumennuksen ollessa käynnissä.



KUVA 26. Muuntajan sähkömagneettinen säteily

12 TOTEUTUNEET KUSTANNUKSET

Investointilaskelmat eivät pitäneet aivan paikkaansa. Kustannukset alittuivat lähes 4000 eurolla. Investoinnin lopullinen arvo oli 39 577 euroa. Myös käyttökustannukset pienenevät pienemmän energiankulutuksen ansiosta 626 euroon vuodessa. Lopullisilla lukemilla ja laskelmilla myös takaisinmaksuaika lyheni 2,5 vuoteen (taulukot 3 ja 4).

TAULUKKO 3. Investoinnin lopulliset kustannukset

INVESTOINTI				
VJ003/14				
INDUKTIOHEHKUTUS ROBOTISOLUUN				
LASKETUT KULUT			43350	
KÄYTETTY			39557	
JÄLJELLÄ			3793	
KULUT				
Induktiolaite			27050	
Kela			1150	
Varakela			950	
HHT-kiinnikkeet			125	
Jäähdytyslaite			6200	
Tullimaksu			1082	
Sauvan jäähdytyskotelo			150	
Sähköasennukset			200	
kiinnityslevy			250	
Jäähdytys			100	
Putkiasennukset			1300	
Robotin ohjelmointi			1000	

TAULUKKO 4. Uusi takaisinmaksulaskelma

Nauhauunin kustannus välihehkuksessa			
Kustannukset / tunti	snt	€	
Sähkö	1133,6	11,336	€/h
N		1,088499	€/h
H		5,6838	€/h
		18,1083	€/h
Tuntikustannus		22	€/h
Kustannus yhteensä		40,11	€/h
Säästö yhteensä		16254,32	€/vuosi
Induktio hehkuksen kustannus. Sykliaika 10 sek/sauva			
Määrä	258720	kpl/vuosi	
aika	0,002778	h/kpl	718,67 h
sähkö	10	kW	0,87 €/h
Kustannus Yhteensä		626,68	€/vuosi
Säästö Yhteensä		15627,65	€/vuosi
Hankinta hinta		39557	€
takaisinmaksuaika		2,5	vuotta

13 POHDINTA

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella sähkövastussauvan hehkutukseen soveltuva laitteisto robottisoluun, jolla saavutetaan tuotteen suoraviivaisempi virtaus tuotannossa, nopeampi läpimenoaika ja tasalaatuinen lopputulos. Projektin alussa perehdyttiin metallien lämpökäsittelyyn ja erilaisiin sähkölämpötekniikoihin. Tämän jälkeen vertailtiin induktio- ja konduktiokuumentuksen etuja ja haittoja. Vertailun perusteella valittiin laitteistoksi induktiokuumentuslaite.

Testaukset suoritettiin Loval Oy:n laboratoriossa vuokralaitteella, jolloin saatiin varmuus laitteiston sopivuudesta käyttötarkoitukseen. Testeissä käytettiin 400 kHz laitteistoa ja yleismallisia keloja tuotteiden kuumentamiseen. Tämä antoi tehon tarpeesta väärienlaisen kuvan, ja tilattu laitteisto on yhtä koko liian tehokas tarpeeseen nähden. Jos pieni tehontarve olisi osattu arvioida, olisi laitteen hinta tippunut noin 4000 eurola, jolloin takaisinmaksuaika olisi ollut paljon lyhyempi.

Työn kaikki tavoitteet saavutettiin käyttöönoton myöhästyminen lukuun ottamatta. Myöhästyminen johtui pitkistä toimitusajoista ja kesälomien osumisesta projektin aloitusaikaan. Uusi tuotantovirta on paljon suoraviivaisempi, ja vastussauvat saadaan nopeammin loppukokoonpanoon. Myös nauhauuninkapasiteettia saatiin vapautettua muun tuotannon käyttöön. Induktiohehkutuslaitteisto on erittäin taloudellinen ja ympäristöystävällinen paikalliseen kuumentamiseen. Verrattuna nauhauuniin ei siitä aiheudu minkäänlaista melu- ja lämpöhaittaa tehdashalliin.

Tämän työn läpi vieminen oli erittäin mielenkiintoista ja tärkeää minulle. Oli mukava tehdä työ, jolla suuri vaikutus tuotteen valmistusprosessiin. Työ on myös tuonut arvokasta tietoa induktiokuumentamisesta Loval Oy:lle sekä koko Nibe-konsernille, jossa on jo vastaava laitteisto suunnitteilla Ruotsiin.

LÄHTEET

- 1 Loyal Oy. Yrityksen verkkosivut. <http://www.loyal.fi>. Päivitetty 4.8.2014. Luettu 4.8.2014
- 2 Kivivuori Seppo & Härkönen Seppo. Lämpökäsittelyoppi. Helsinki : Teknologiainfo Teknova (Tampere : Tammer-paino) 2004.
- 3 Rajagopalan Venkatavhari. Sähkölämpötekniikat. Helsinki ; Espoo : Otatieto, (Helsinki : Hakapaino) 1995.
- 4 EFD-Induction Ab. Esite. Verkkodokumentti. <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/Applications.ashx>. Päivitetty 12.6.2014. Luettu 12.6.2014.