

Tiia Lehtinen

KENTTÄKOVUUSMITTAUKSEN KALIBROINTIPALASARJA

Opinnäytetyö
Materiaali- ja pintakäsittelytekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2012




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences	Opinnäytetyön päivämäärä 31.5.2012				
Tekijä(t) Tiia Lehtinen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka				
Nimeke Kenttäkovuusmittauksen kalibrointipalasarja					
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa teräksestä valmistettu kalibrointipalasarja kenttäkovuusmittauksille. Inspecta Oy on opinnäytetyön tilaaja, ja se aikoo hyödyntää tutkimustuloksia ja koe-kappaleita jatkossa kenttäkovuusmittauksissaan. Työssä tutkittiin, minkälaisella lämpökäsittelyllä päästään ennalta määrättyihin kovuuksiin. Opinnäytetyössä haluttiin tutkia karkaisun jälkeisen päästökäsittelyn vaikutusta materiaalin kovuuden muutokseen. Kalibrointipalojen kovuudet haluttiin välille 200 HV – 400 HV.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuudessa käytiin läpi teräksen karkaisun periaate, kovuusmittaus laboratoriossa ja kenttäkovuusmittaus sekä austeniitin hajaantuminen. Käsiteltiin myös lämpökäsittelyn aiheuttamat muutokset teräksen mikrorakenteessa.</p> <p>Kokeellinen osuus on tämän opinnäytetyön tärkein osa. Kalibrointipalat valmistettiin X10CrMoVNb9-1-teräksestä. Ensin haettiin oikeat parametrit lämpökäsittelyille, jonka jälkeen valmistettiin varsinaiset kalibrointipalat. Varsinaisista kalibrointipaloista valmistettiin hieet ja tarkasteltiin mikrorakenteet optisella mikroskoopilla. Lopuksi tehtiin kovuusmittaukset jokaiselle palalle. Kalibrointipalasarjan palojen kovuudet olivat välillä 196 HV – 334 HV. Palat onnistuivat suunnitelman mukaisesti ja Inspecta Oy pystyy hyödyntämään saatuja tuloksia omissa mittauksissaan.</p>					
Asiasanat (avainsanat) kalibrointipala, kovuusmittaus, karkaisu, päästö					
Sivumäärä 30 s + liitteet 10	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Kieli</td> <td style="width: 33%;">URN</td> </tr> <tr> <td>Suomi</td> <td></td> </tr> </table>	Kieli	URN	Suomi	
Kieli	URN				
Suomi					
Huomautus (huomautukset liitteistä)					
Ohjaavan opettajan nimi Tapio Lepistö	Opinnäytetyön toimeksiantaja Inspecta Oy				

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis 31.5.2012
Author(s) Tiia Lehtinen	Degree programme and option Materials and Surface Treatment	
Name of the bachelor's thesis Manufacturing Calibration Blocks for Field Hardness Testing		
Abstract <p>The purpose of this engineering thesis was to manufacture calibration blocks from steel. The company who ordered this engineering thesis was Inspecta Oy and they will use these research results and calibration blocks in the future in their field hardness testing. In this thesis was examined which heat treatment will give us the specific hardness we want. Important thing was also to see how hardening and quenching changes the hardness of the material. The wanted hardness of the actual blocks was from 200 HV to 400 HV.</p> <p>Subjects handled in the theoretical part of the thesis were, hardening and quenching, hardness testing in laboratory and on field, and also diffusion of austenite. The microstructure of the material was also handled in the thesis.</p> <p>Most significant part was the experimental part of the thesis. Calibration blocks were made out of X10CrMoVNb9-1 steel. First there were some prefatory tests made to find the right parameters for the heat treatments. Then the actual calibration blocks were manufactured. The calibration blocks were polished and corroded so that you could examine the microstructure with optical microscope. Then the last part of the experimental part was to do the hardness tests for each block. The hardness of the blocks varied from 196 HV to 334 HV.</p>		
Subject headings, (keywords) calibration block, hardness test, hardening, quenching		
Pages 30 p + appendix 10 p	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices		
Tutor Tapio Lepistö	Bachelor's thesis assigned by Inspecta Ltd	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	INSPECTA OY	1
3	KOVUUSMITTAUKSET.....	2
3.1	Vickers-kovuuskoe	2
3.2	Kenttäkovuusmittaus	4
3.2.1	UCI-menetelmä.....	5
3.2.2	Kimmahdusmenetelmä	7
3.2.3	Menetelmän valinta.....	9
4	TERÄKSEN LÄMPÖKÄSITTELYN TEORIAA	10
4.1	Teräksen kidemuodot ja ominaisuudet	11
4.2	Karkaisu	13
5	AUSTENIITIN HAJAANTUMINEN	14
5.1	Austeniitin hajaantuminen tasapainon mukaisesti	15
5.2	Austeniitin hajaantuminen ei tasapainon mukaisesti	16
6	KOKEELLINEN TYÖ.....	20
6.1	Koemateriaali.....	20
6.2	Kokeellisen osuuden alustavat testaukset	20
6.3	Lämpökäsittely	25
6.4	Kovuusmittaukset	25
6.5	Optinen mikroskopia, kalibrointipalojen mikrorakenteet.....	25
6.6	Tulokset	28
7	POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	30
	LIITTEET	
	1 Ensimmäisen lämpökäsittelytestin mittaustulokset	
	2 Toisen lämpökäsittelytestin mittaustulokset	
	3 Kolmannen lämpökäsittelytestin mittaustulokset	
	4 Varsinaisten kalibrointipalojen mittaustulokset	

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on valmistaa kenttäkovuusmittauksen kalibrointipalasarja. Työn tilaaja on Inspecta Oy, joka hyödyntää tutkimustuloksia ja kalibrointipaloja omissa kenttämittauksissa. Opinnäytetyössä käsitellään teoriassa metallipalojen kovuusmittaus ja lämpökäsittelyn periaate.

Rikkomaton testaus (NDT – Non Destructive Testing) on nykypäivänä yleistynyt huomattavasti, ja työn tilaaja Inspecta Oy on tämän alan huippuosaaja. Tarkoituksena on auttaa heidän työtään valmistamalla kalibrointipalasarja, jolla voidaan varmistaa, miten materiaali käyttäytyy esimerkiksi hitsausauman lämpömuutosvyöhykkeellä. Kalibraatiopaloja käytetään kenttäkovuusmittarin virittämiseen ja mittaustulosten muuttamiseen todellisuutta vastaavaksi. Samalla myös varmistetaan lopputuotteen laatu, jolla tarkastettavien kappaleiden todetaan täyttävän sille asetetut vaatimukset.

Kalibrointipalat valmistetaan X10CrMoVNb9-1-teräksestä. Kokeen tarkoituksena on tutkia, mihin kovuuteen asti lämpökäsittelmällä päästään. Huippukovuusarvon löytämisen jälkeen tehdään viiden palan kalibrointipalasarja, joiden kovuus vaihtelee 200 - 400 HV välillä.

2 INSPECTA OY

Inspecta Oy on Pohjois-Euroopan johtava tarkastus-, testaus-, sertifiointi-, konsultointi- ja koulutusalan palveluyritys. Inspecta Oy:llä on toimipisteitä kaikissa Pohjoismaissa sekä Latviassa, Virossa ja Liettuassa. Inspectan liikevaihto on vuosittain n.150 M€. /3./

Inspecta Oy:n juuret on saanut alkunsa vuonna 1975, jolloin Suomen valtio perusti Teknillisen tarkastuslaitoksen, TTL:n, varmistamaan painelaitteiden ja muiden turvallisuuskriittisten kohteiden turvallisuuden. Samana vuonna Ruotsissa otettiin käyttöön kansallisia testauspaikkoja koskeva uusi laki, ja vuonna 1977 Ruotsissa perustettiin Statens Anläggningsproving-tarkastuslaitos. Tammikuussa 1998 TTL:sta tuli Inspecta, kun Suomessa Ruotsin mallin mukaisesti testaus- ja tarkastusmonopolit vapautettiin. /3./

Vuonna 2000 Inspecta osti Suomen johtavan rikkomattoman testauksen yrityksen, Huber Testing Oy:n. Inspecta alkoi laajentaa Suomen rajojen ulkopuolelle vuonna 2005, kun se aloitti toimintansa Latviassa. Vuonna 2006 Inspecta valloitti Ruotsin markkinoita hankkimalla osia DNV:stä. Tämän jälkeen Inspecta on kasvanut sekä orgaanisesti että yritysostoin Suomessa, muissa Pohjoismaissa, Latviassa, Virossa ja Liettuassa. /3./

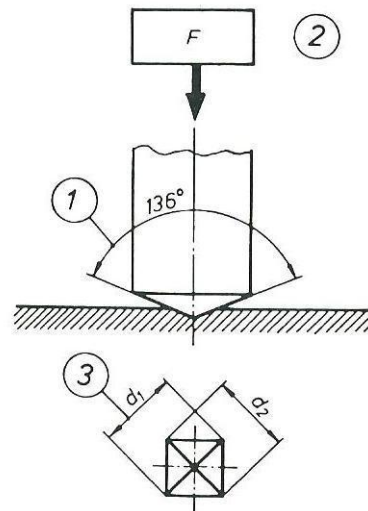
3 KOVUUSMITTAUKSET

Tässä työssä käsitellään kahdenlaista kovuusmittausmenetelmää. Oleellista kalibrointipalojen valmistuksen ja validoinnin kannalta on läpikäydä Vickers-kovuuskokeen periaate. Kappaleessa 3.2 kerrotaan myös kenttäkovuusmittauksesta.

3.1 Vickers-kovuuskoe

Kovuuskokeet ovat aineenkoetusmenetelmien fysikaalisista kokeista yleisimpiä. Niiden avulla selvitetään, kuinka kovaa tai pehmeää aine on. Aineen kovuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa siihen tunkeutuvaa vierasta esinettä. Mitä pehmeämpää aine on, sitä helpommin siihen syntyy painauma. Tätä tietoa käytetään hyväksi kovuuskokeita suoritettaessa. Kovuuskokeet suoritetaan siten, että mitattavan kappaleen pintaan painetaan koetyypin mukaan, joko kuula-, kartio- tai pyramidipainin. Syntyneen painauman perusteella selviää kappaleen kovuus. Tavallisimmin käytetyt koetyypit ovat Brinellin kovuuskoe, Rockwellin B- ja C-kovuuskoe ja Vickersin-kovuuskoe. /1, s.195./ Tässä työssä keskitymme Vickers-kovuuskokeeseen.

Vickers-kovuuskokeessa painetaan standardin mukainen timanttipyramidi tietyllä kuormituksella tutkittavan kappaleen pintaan /1, s.200/. Kuormituksen jälkeen mikroskoopilla katsotaan suurennos painaumasta ja mitataan painauman lävistäjät. Vickers -kovuus saadaan laskemalla kuormituksen ja painauman pinta-alan lukuarvojen suhde. Kuormituksen yksikkönä on newton ja pinta-alan yksikkönä mm^2 , joten Vickers -kovuus on N/mm^2 . Vickers-kovuuden yksikkö on HV. Kuvassa 1 on esitetty Vickers -kovuuskoeken periaate. /1, s.200./



KUVA 1. Vickers-kovuuskokeen periaate /1, s.200/

Kovuuskokeessa käytetään painimena suoraa neliöpohjaista timanttipyramidia, jonka vastakkaisten sivutahkojen välinen kulma on 136° . Kuormituksen tulee olla 9,8 - 981N (1-100kpl) mitattavan aineen mukaan. Tavallisimmin käytetään kuormitusta 294N (30kp). Kenttäkovuusmittauksissa yleisesti käytetään HV10 ja HV5 kuormituksia. Myös kuormitusaika vaihtelee mitattavan aineen mukaan 5-35 sekuntiin, tavallisimmin se on 10-15s. Kuvassa 2 selvennetään, kuinka Vickers-kovuus lasketaan. /1, s.200./

n:o	Tunnus	Selitys
1	–	Painimen vastakkaisten sivutahkojen välinen kulma 136°
2	F	Kuormitus (N)
3	d	Lävistäjien d_1 ja d_2 aritmeettinen keskiarvo (mm)
4	HV	Vickers-kovuus $= \frac{\text{kuormitus}}{\text{painuman pinta-ala}}$ $= \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F \cdot \sin 136^\circ / 2}{d^2}$ $= 0,1891 \frac{F}{d^2}$

Huom.

Kerroin $0,102 \approx 1/9,81$ johtuu yksikön kilopondi korvaamisesta yksiköllä newton.

KUVA 2. Laskukaava Vickers-kovuudelle /1, s.200/

Vickers-kovuuskoetta käytetään sekä pehmeiden, kuten alumiinin, että kovien, kuten kovametallin, kovuusmittauksiin. Vickers -kokeella voidaan mitata myös ohuita kap-

paleita, koska sen kuormitus on pieni. Tätä koetta voidaan hyödyntää myös jo valmiiden koneen osien mittaukseen, koska mittausjälki on niin pieni. /1, s.200./

Tässä työssä tullaan käyttämään HV30:tä alustavissa testauksissa, eli kuormitusta 30kp, 10 sekunnin ajan. Tämä on hyvin yleinen Vickers- kovuuskokeen suoritusmenetelmä ja näillä asetuksilla päästään kovuuksiin välillä 200 - 1000 HV. Varsinaiset kalibrointipalat mitataan HV5-kuormituksella, koska se on sama kuin kenttäkovuusmittarilla.

3.2 Kenttäkovuusmittaus

Kannettava kovuusmittaus kehittyy. Nykyään kustannuspaineet ja korkeammat laatuvaatimukset modernissa tuotantoprosessissa vaativat nopean ja taloudellisen menetelmän kiinteiden kenttäkovuusmittareiden rinnalle. Sovelluskohteita on monenlaisia. Käyttöalue sisältää yhtä hyvin suuria kuin pieniä kappaleita, ennen kaikkea kohteissa, joissa on vaikea luokse päästävyys. /2./

On olemassa kaksi fysikaalista menetelmää, joita käytetään käytännön tarkastuksessa, staattinen UCI menetelmä ja dynaaminen kimmahdusmenetelmä. Pääasiassa tarkastustehtävästä riippuu, kumpaa menetelmää tulisi käyttää. Kuvassa 3 on esitetty UCI menetelmä ja kuvassa 4 dynaaminen kimmahdusmenetelmä. /2./



KUVA 3. Vetoakselin hampaankyljen kovuusmittaus UCI-laitteella /2/



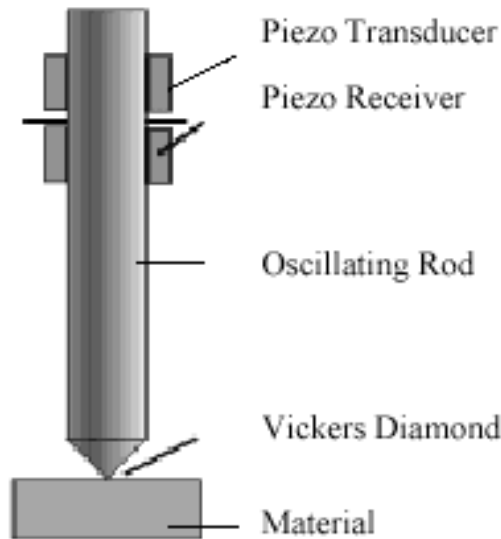
KUVA 4. Suuren hydraulisen kaivinkoneen vetopyörän kovuusmittaus käyttäen kimmahdusmittaria /2/

Kannettavat kovuusmittarit on kehitetty niin, että mittaus voidaan tehdä kappaleen luona /2/.

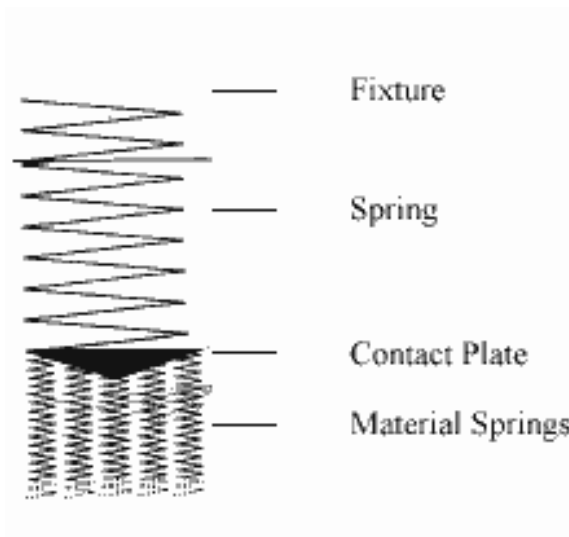
3.2.1 UCI-menetelmä

Taajuuden muutos on yksi suosittu mittaustapa. Tässä menetelmässä painetaan värähtelytanko kappaleen pintaan standardivoimalla. Tangon päässä on Vickers-timantti. Sauvassa tapahtuva taajuuden muutos mitataan ja kovuusarvo näytetään LCD-näytöllä. Periaatetta kutsutaan UCI (Ultrasonic Contact Impedance)-menetelmäksi. /2./

Käytettäessä UCI-menetelmää mitataan painauman suuruus, minkä perusteella määritetään Vickers-kovuus. Painauma ei mitata optisesti kuten tavallisesti, vaan painauma-alue määritellään elektronisesti mittaamalla ultraäänen taajuuden muutos, mikä on suoraan verrannollinen painauma-alueen pinta-alaan. Tämä voidaan esittää seuraavanlaisella kuvitteellisella kokeella. UCI-anturi sisältää metallitangon, jonka päähän on kiinnitetty Vickers-timantti (kuva 5). Piezosähköinen lähetin väräyttää tankoa käyttäen noin 70 kHz pitkittäisaaltoa. Kuvitellaan, että metallitanko (värähtelytanko) on iso kierrejousi ja sen vapaa pää värähtelee 70 kHz resonanssitaajuudella (kuva 6). /2./



KUVA 5. UCI -anturin periaatekuva /2/



KUVA 6. UCI –periaate kuvitteellisessa kokeessa: värähdysjousi on kosketuksessa materiaaliin. Jousi esittää värähdystankoa ja kosketuspinta esittää timanttia. Materiaalijousi symboloi materiaalin elastista vastusta. /2/

Jousen vapaassa päässä on kontaktipala, Vickers -timantti. Tarkastettavan materiaalin, johon Vickers -timantti koskettaa, kuvitellaan olevan myös täynnä pieniä kierrejousia, jotka ovat kohtisuorassa pintaan nähden. Kahden atomin välinen sidos toimii kuten ”jousi”. Mikäli ainoastaan yksi näistä ns. atomijousista on kosketuksessa Vickers –timanttiin, kuten erittäin kovilla materiaaleilla, joihin timantti tunkeutuu äärimmäisen vähän ja aiheuttaa pienen jäljen, kyseisen atomijousen massa kytkeytyy suurempaan jouseen. Tämä massan muutos aiheuttaa resonanssitaajuuden muutoksen värähdysjouksessa. /2./

Tämän taajuudenmuutos tulee suuremmaksi, kun lisää atomijousia on kosketuksessa timanttiin. Tämä tapahtuu timantin upotessa syvemmälle ja kosketuspinta-alan kasvaessa pehmeässä materiaalissa. Analogisesti mitä suurempi taajuuden muutos on, sitä pehmeämpi on materiaali. Timantti tunkeutuu syvemmälle materiaaliin ja jättää syvemmän jäljen. Tämä on UCI-kovuusmittauksen periaate, taajuuden muutos on riippuvainen materiaalin ja Vickers timantin kosketuspinta-alasta. Kaava 1 esittää tämän perussuhteen Vickers kovuusasteikkoon. /2./

$$\Delta f \approx E_{\text{elast}} \cdot \sqrt{A} \quad HV = F/A \quad (3-1)$$

Kaava 1: Taajuuden muutos on riippuvainen Vickers-painimen kosketuspinta-alasta. Δf = taajuuden muutos, A = kosketuspinta-ala, E_{elast} = kimmomoduli, HV = Vickers kovuus ja F = Vickerskokeessa käytetty voima. /2./

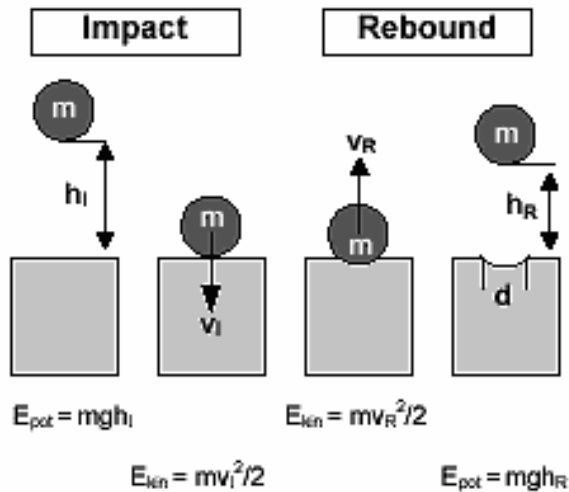
Taajuusmuutos riippuu myös kimmomodulista. Tämä on materiaaliominaisuus, joka vastaa jousivoimaa kuvitteellisessa esimerkissä ylempänä. Käytännön mittauksessa tulee huomioida kimmomodulin vaikutus UCI-menetelmään. Erilaisia materiaaleja mitattaessa on laite kalibroitava kyseiselle materiaalille, jolloin kimmomoduli tulee huomioitua. /2./

Kalibroinnin jälkeen UCI-menetelmää voi käyttää kaikilla materiaaleilla. Tuotannosta tulevat anturit on kalibroitu matalaseosteiselle tai seostamattomalle teräkselle. Laitteiden kalibrointi on kuitenkin nopeaa ja voidaan tehdä testauskohteessa esim. titaanille tai kuparille. /2./

3.2.2 Kimmahdusmenetelmä

Toinen yleisesti tunnettu kannettavien kovuusmittareiden toimintaperiaate on kimmahdusmenetelmä. Iskurungon nopeus mitataan ennen ja jälkeen sen osumisen testattavan kappaleen pintaan. Näiden kahden nopeuden ero osoittaa materiaalin kovuuden. Kovuusarvo eri materiaaleille voidaan laskea käyttäen muutostaulukkoja, jotka on tallennettu laitteen muistiin. /2./

Kovuusmittaus käyttäen Leebin menetelmää toimii selkeästi eri tavalla, vaikka aiheutetun tunkeuman koko on myös tässä tapauksessa yhteydessä kovuuteen. Varsinainen mittaus tapahtuu mittaamalla ns. iskurungon menettämää energiaa. Kuvassa 7 esitetään mittauksen fysikaalinen periaate. Massa iskeytyy testattavan kappaleen pintaan ja kimpoaa siitä muuttuneella nopeudella, eli törmäyksessä tapahtuu kineettisen energian muutos. Isku aiheuttaa pysyvän muodonmuutoksen pintaan eli painauman. Iskurunko menettää osan nopeudestaan eli energiastaan. /2./



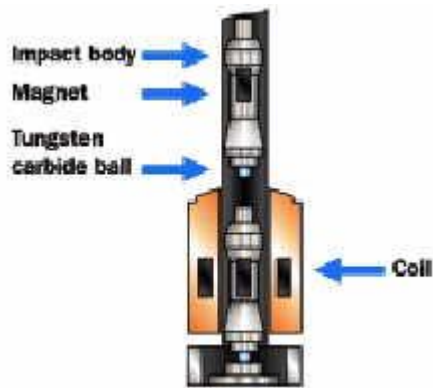
KUVA 7. Kimmahdusmenetelmän peruseriaate. d = iskupään halkaisija, E_{pot} = potentiaali energia, E_{kin} = kineettinen energia /2/

Mitä isomman painuman isku aiheuttaa, sitä enemmän iskurunko menettää nopeuttaan ja sitä pehmeämpää materiaali on. Teknisesti tämä mittausperiaate on toteutettu iskemällä jousen avulla volframikarbidikärkistä iskurunkoa kappaleen pintaan. Nopeus ennen ja jälkeen iskun mitataan. Tähän käytetään iskurunkoon upotettua pientä magneettia (kuva 8), mikä aiheuttaa induktiojännitteen keloihin. Tämä jännitteen suuruus osoittaa nopeuden (kuva 9). Dr. Leebin menetelmän käyttäminen tuottaa kovuusarvon HL, joka on laskettu isku ja kimpoamisnopeuksista seuraavalla kaavalla:

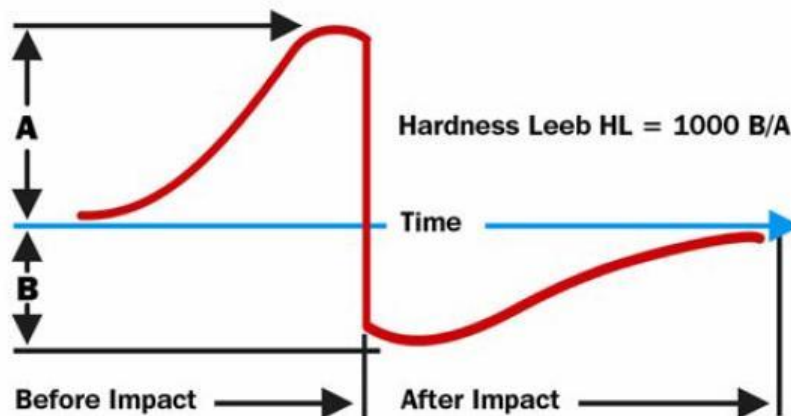
$$HL = \frac{v_R}{v_I} \cdot 1000 \quad (3-2)$$

Kaava 2: v_I = nopeus ennen kimmahdusta

v_R = nopeus jälkeen kimmahduksen



KUVA 8. Iskuanturin tyypillinen poikkileikkaus /2/



KUVA 9. Kaavamainen jännitesignaalin esitys, kun iskurunko kulkee kelan läpi. Signaali on esitetty ennen ja jälkeen kimmahduksen (VDI Raportti 308, 1978) /2/

3.2.3 Menetelmän valinta

UCI-menetelmää suositellaan testattaessa kaikenmuotoisia ja -kokoisia hienorakenteisia kappaleita. Sitä käytetään ennen kaikkea, kun kovuuden määrittämisessä vaaditaan suurta tarkkuutta. Kimmahduskovuusmittausta käytetään suurien karkearakeisten taakkeiden ja kaikentyyppisten valujen testaukseen. Iskuanturin pallopää on paljon suurempi kuin Vickers-timantti ja sen vuoksi kuvaa valun rakenteen ominaisuuksia paremmin. Pienen painumajäljen ansiosta Microdur UCI-anturia voidaan käyttää hitssaumausten lämpömuutosvyöhykkeen (HAZ) kovuuden määrittämiseen. UCI- ja iskuantureiden erilaiset testausvoimat mahdollistavat monipuoliset sovellusmahdollisuudet. Taulukossa 1 on esitetty, mihin UCI ja kimmahdusmenetelmää voi soveltaa.

/2./

TAULUKKO 1. UCI- ja kimmahdusmenetelmän soveltaminen /2/

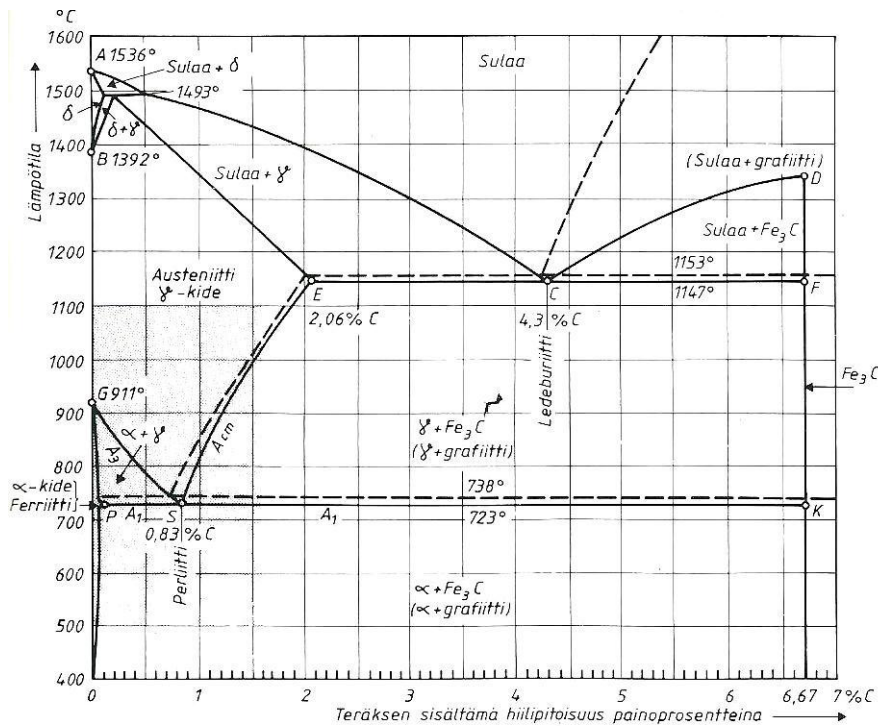
Käyttökohde	UCI-testaus	Kimmahdustestaus
Kiinteät kappaleet	+	++
Karkearakeinen materiaali	-	++
Teräs- ja alumiinivalut	o	++
HAZ hitsausaumassa	++	-
Putket: seinämäpaksuus > 20 mm	++	++
Putket: seinämäpaksuus < 20 mm	++	-
Epähomogeeniset pinnat	-	+
Ohuet kerrokset	++	-
Vaikeasti luoksepäästävät kohteet	++	+

(++ Erinomainen / + hyvä käytettävyys / o joskus käytettävissä / - ei suositella)

4 TERÄKSEN LÄMPÖKÄSITTELYN TEORIAA

Työkaluilta ja erilaisilta koneenosilta vaaditaan monenlaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi koneen akselien täytyy kestää hyvin rasituksia, kuten taivutusta, vääntöä ja leikkausta. Käsityövälineiltä sen sijaan vaaditaan hyvää lujuutta ja sitkeyttä. Seosainneiden avulla teräkselle pystytään antamaan erilaisia ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia voidaan lisäksi muuttaa sopivalla lämpökäsittelyllä. Tärkeimpiä lämpökäsittelymenetelmiä ovat karkaisu ja päästö, nuorrutus, pintakarkaisu, normalisointi, pehmeäksi hehkuttaminen ja myöstö. /1, s.164./ Tässä työssä materiaalin kovuutta muokataan karkaisulla ja päästöllä.

Puhdas rauta on pehmeä metalli, jolle ei sellaisenaan ole juuri teknistä käyttöä. Teräs on raudan ja hiilen seos, joka näiden lisäksi sisältää jonkin verran muita alkuaineita. Lämpökäsittelyllä vaikutetaan teräksen sisäiseen rakenteeseen. Kuvassa 3 on vaak akselilla teräksen sisältämä hiilipitoisuus painoprosenteina ja pystyakselilla lämpötila. Piirroksen avulla selvitetään teräksen jähmettymistä sulasta tilasta sekä sisäisiä rakennemuutoksia kiinteässä tilassa. Näin voidaan seurata, mitä teräksessä tapahtuu sen lämpötilan hitaasti muuttuessa. /1, s.164-165./

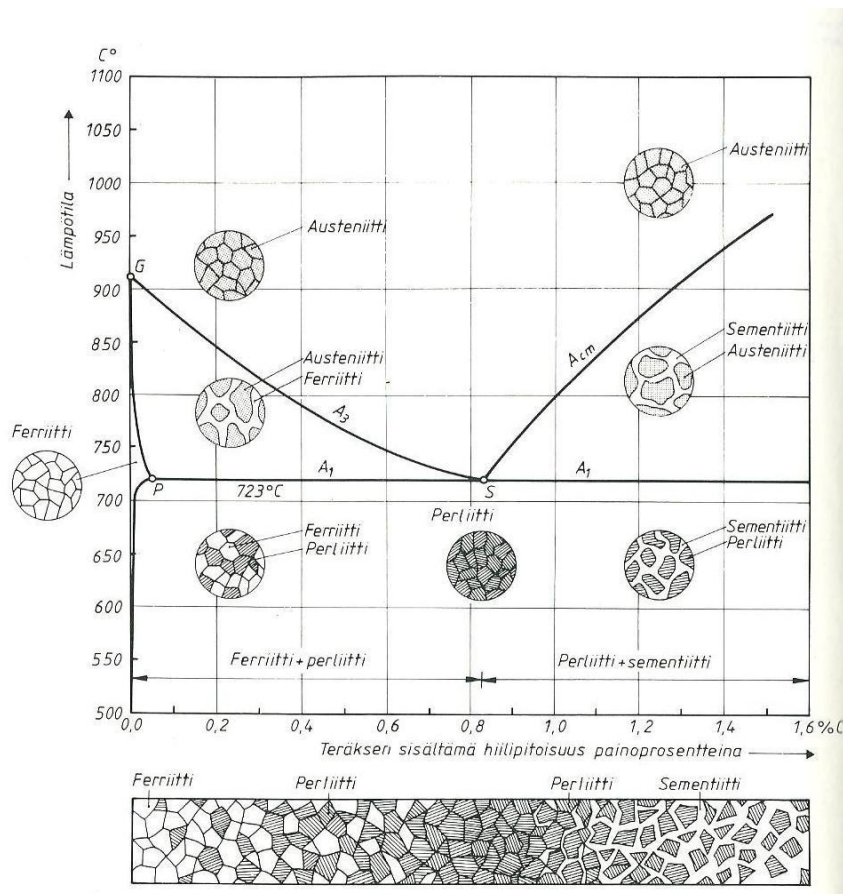


KUVA 10. Rauta-hiiliolotilapiirros /1, s.165/

Kuvasta 10 voidaan huomata, että myös sulakäyrän alapuolellakin on osittain sulassa tilassa olevaa aineesta. Aineos on kokonaan kiinteänä liuksena vasta seuraavan rajan alapuolella. Tämän rajan voi nähdä kuvassa 10 vaakasuorassa, pisteestä E oikealle eli hiilipitoisuuden ollessa yli 2,06 %. Vaakasuoran rajan lämpötilan on 1147 °C. Hiilipitoisuuden ylittäessä 2,06 % on osa hiilestä erottunut grafiitiksi. Tämä on teräksen ja valuraudan välinen raja. Teräksiksi kutsutaan seoksia, joissa hiiltä on alle 2,06 %, ja valuraudoiksi niitä seoksia, joissa hiiltä on 2,06 % tai enemmän. Valuraudassa kaikki hiili ei ole kemiallisesti yhtyneenä rautaan, vaan se on grafiitti- eli hiilihiukkaina. Hiilipitoisuuden ollessa 0 % seoksessa ei ole ollenkaan rautakarbideja. Sen sijaan hiilipitoisuuden ollessa 6,67 % rautakarbideiden määrä on 100 %. /1, s.165-166./

4.1 Teräksen kidemuodot ja ominaisuudet

Kuvassa 11 on esitelty osa rauta-hiiliolotilapiirroksista, jota tarvitaan lämpökäsittelyn yhteydessä. Kuvasta 11 huomataan, että teräksellä on useita erilaisia mikrorakenteita hiilipitoisuuden ja lämpötilan mukaan. Eri kidemuodot saadaan teräksestä esiin muutteltaessa lämpökäsittelyä. /1, s. 166./



KUVA 11. Osa rauta-hiiliolotilapiirroksesta /1, s.166/

Ferriitti on lähes hiiletöntä, eli se sisältää lähes pelkästään rautakiteitä. Ferriittikiteillä on tilakeskinen kuutiollinen rakenne. Kovuudeltaan se on erittäin pehmeää. /1, s.166./

Austeniitti on raudan ja hiilen jähmeä liuos. Austeniittikiteessä hiiliatomit ovat sijoittuneet raudan pintakeskisen kuutiollisen hilarakenteen välisijoihin. Austeniitti on pehmeää ja helposti muokattavaa. Esimerkiksi taottaessa terästä takominen suoritetaan yleensä lämpötilan ollessa austeniittialueella. /1, s.166./

Sementiitti eli rautakarbidi on raudan ja hiilen kemiallinen yhdiste Fe_3C , jossa hiiltä on 6,67 painoprosenttia. Sementiitti on erittäin kovaa, mutta samalla haurasta. /1, s.166./

Perliitti koostuu ferriitti- ja sementiittilamelleista, siis raudan ja rautakarbidin vuorottelevista kerroksista. Mikroskoopilla katsottaessa tämä huomataan perliitille tyypillisenä juovikkuutena. Teräksessä on tavallaan ohuita sementiittilamelleja ferriittisessä perusmassassa. Hiilipitoisuus on 0,83 %. Koska perliitti koostuu ferriitistä ja sementiitti-

tistä, on perliitin kovuus riippuvainen sementtiittilamellien keskinäisestä etäisyydestä. /1, s.166./

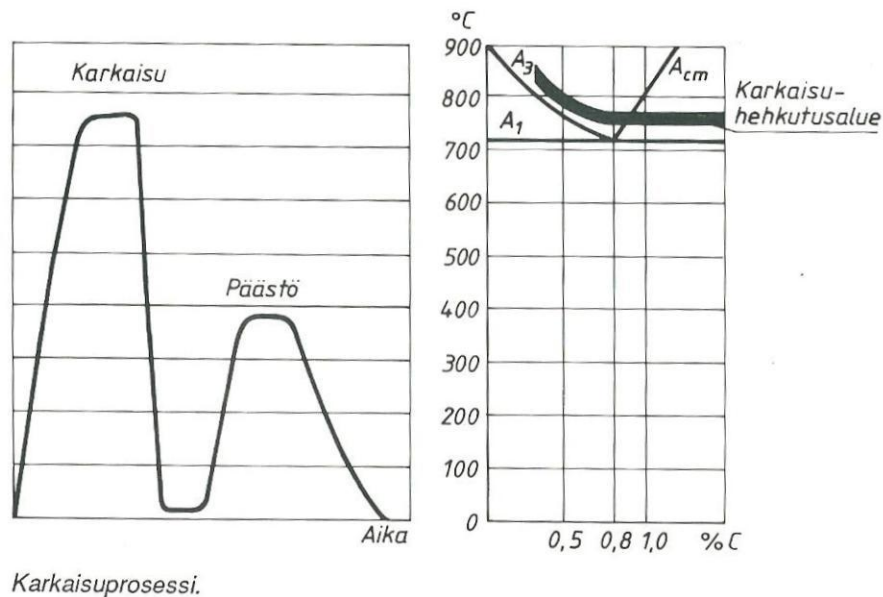
Tämän työn kannalta olennaisia rakenteita ovat myös martensiitti ja bainiitti. Martensiittia muodostuu silloin, kun austeniittinen rakenne hajaantuu niin nopeasti, ettei tasapainorakennetta (ferriitti, perliitti ja näiden seos) ehdi muodostua. Martensiittia muodostuu austeniitista alle 200 °C lämpötiloissa, ja se on tetragonaalisesti vääristynyttä hiiliylikyllästeistä ferriittia eli uusi ferriittiin pohjautuva rakenne, johon hiili on jäänyt pakkotilaan. /4./

Bainiittia puolestaan muodostuu kahdella tavalla. Niin kutsuttua yläbainiittia muodostuu korkeissa hajaantumislämpötiloissa, jossa sementtiittierkaumat ovat ferriittiliuskosten pinnoilla. Toinen bainiitin muoto niin kutsuttu alabainiitti, muodostuu matalammissa lämpötiloissa, ja se koostuu paljon dislokaatioita sisältävistä ferriittiliuskoista, joiden sisällä on sementtiittierkaumia. /4./ Austeniitin hajaantuminen käsitelty tarkemmin luvussa 5.

4.2 Karkaisu

Teräksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa monin eri tavoin, mutta tämän opinnäytetyön kannalta tärkeä menetelmä on karkaisu. Karkaisulla pystytään vaikuttamaan teräksen kovuuteen. Se on lämpökäsittelytapa, jolla lisätään teräksen kovuutta ja parannetaan sen lujuusominaisuuksia. Kaikki teräkset eivät kuitenkaan ole karkaistavia. Teräksen karkaistavuus riippuu olennaisesti sen hiilipitoisuudesta. Karkaisukelpoisina pidetään yleensä teräksiä, joiden hiilipitoisuus on vähintään n. 0.3 %. /1, s.170./

Karkenevuus on termi, jolla kuvataan metallin kykyä kovettua martensiitin muodostumisen johdosta, joka saadaan aikaan lämpökäsittelyllä. Teräs, jolla on korkea karkenevuus, on sellainen, joka karkenee syvään. Huonon karkenevuuden teräkset muodostavat martensiittia vain pintakerrokseen. /5, s.237./



Karkaisuprosessi.

KUVA 12. Karkaisuprosessi /1, s.171/

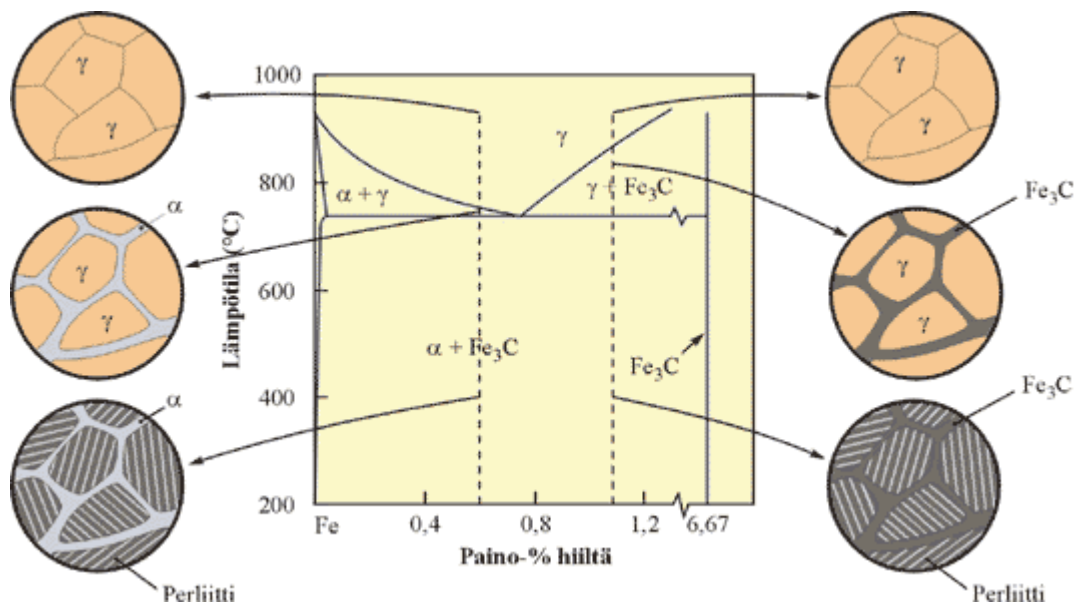
Karkaisu tehdään periaatteessa kolmessa perättäisessä työvaiheessa. Ensin teräs kuumennetaan tiettyyn lämpötilaan, jossa sitä pidetään määrätty aika. Tämän jälkeen se nopeasti jäähdytetään eli sammutetaan esim. vedessä, öljyssä tai ilmassa, riippuen teräslaadusta. Näin teräkseen saadaan uusi hienojakoinen kiderakenne, jota kutsutaan martensiittiseksi rakenteeksi. Karkaisun jälkeen teräs on kovaa mutta samalla myös haurasta. Tämän takia karkaisuun liittyy vielä ns. päästäminen, joka tavallisesti suoritetaan heti karkaisun jälkeen. Päästössä kappale uudelleen kuumennetaan n. 100 - 650 °C:n lämpötilaan halutun kovuuden ja käyttötarkoituksen mukaan. Tämän jälkeen se saa vapaasti jäähtyä. Teräs on vain hieman menettänyt kovuuttaan, mutta vapautunut karkaisujännityksistä ja saanut lisää sitkeyttä. Karkaisuprosessi (kuva 12) on periaatteeltaan yksinkertainen, mutta jokainen yksittäinen materiaali tuo täsmällisiä vaatimuksia myös työsuoritukselle. /1, s.171./

5 AUSTENIITIN HAJAANTUMINEN

Austeniitti on pintakeskisen kuutiollisen hilarakenteen mukainen rauta, jota esiintyy yli 910 °C:n lämpötilassa ja joka liuottaa hiiltä aina 2,1 % saakka. Austeniitti on mekaanisilta ominaisuuksiltaan pehmeää ja sitkeää, ja se lujittuu erittäin voimakkaasti muokattaessa. /4./

5.1 Austeniitin hajaantuminen tasapainon mukaisesti

Teräksen hiilipitoisuus määrää siihen syntyvän mikrorakenteen. Jos hiiltä on erittäin vähän, on tuloksena puhdas ferriitti. Hiilipitoisuuksilla 0,83 % asti syntyy ferriittiä ja perliittiä. Hiilipitoisuuden ollessa 0,83 % teräs on puhtaasti perliittinen. Muutos puhtaasti ferriittisestä ferriittis-perliittisen kautta perliittiseksi tapahtuu tasaisesti perliitin määrän koko ajan kasvaessa, koska hiilipitoisuudenkin määrä kasvaa. Hiilipitoisuuden kasvaessa yli 0,83 % rakenne muuttuu perliittis-sementtiittiseksi. Tätä koostumusta Fe-0,83 % C kutsutaan eutektoidiseksi koostumukseksi. Ferriittis-perliittisen teräksen ominaisuudet riippuvat voimakkaasti hiilipitoisuudesta. Perliitin lamellien paksuus riippuu jäähtymisnopeudesta ja lamellien paksuus vaikuttaa lujuuteen. Eutektoidisen tasapainon lisäksi Fe-C tasapainopiirroksessa esiintyy eutektinen ja peritektinen tasapaino. /4./

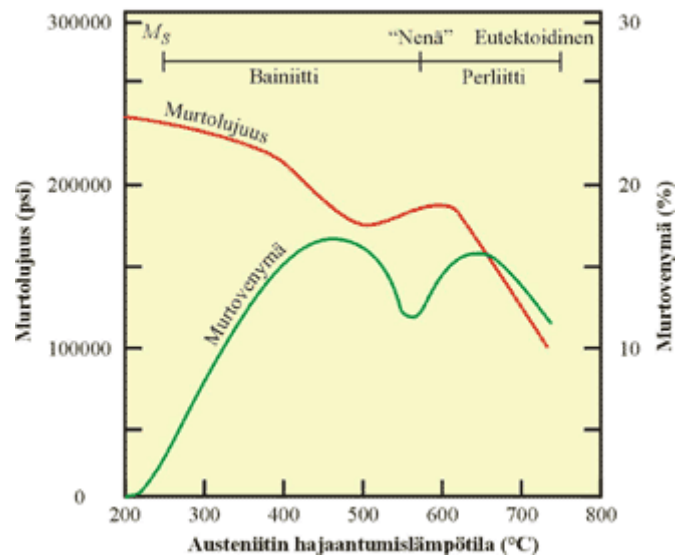


KUVA 13. Jäähtymisessä syntyvät rakenteet alieutektoidiselle ja ylieutektoidiselle teräkselle /4/

Kuvassa 13 nähdään, kuinka alieutektoidisen teräksen tapauksessa austeniitin hajaantuminen tapahtuu niin, että austeniitin raerajoille muodostuu esieutektoidista ferriittiä (α). Tämän jälkeen eutektoidisessa lämpötilassa loppuausteniitti hajaantuu perliitiksi. Rakenteena on perliittiä ferriittipohjalla. Vastaavasti ylieutektoidisessa teräksessä muodostuu perliittiä esieutektoidisen sementiitin (Fe_3C) sekaan. Lämpötilan 768 °C yläpuolella teräs ei ole enää ferromagneettista. /4./

5.2 Austeniitin hajaantuminen ei tasapainon mukaisesti

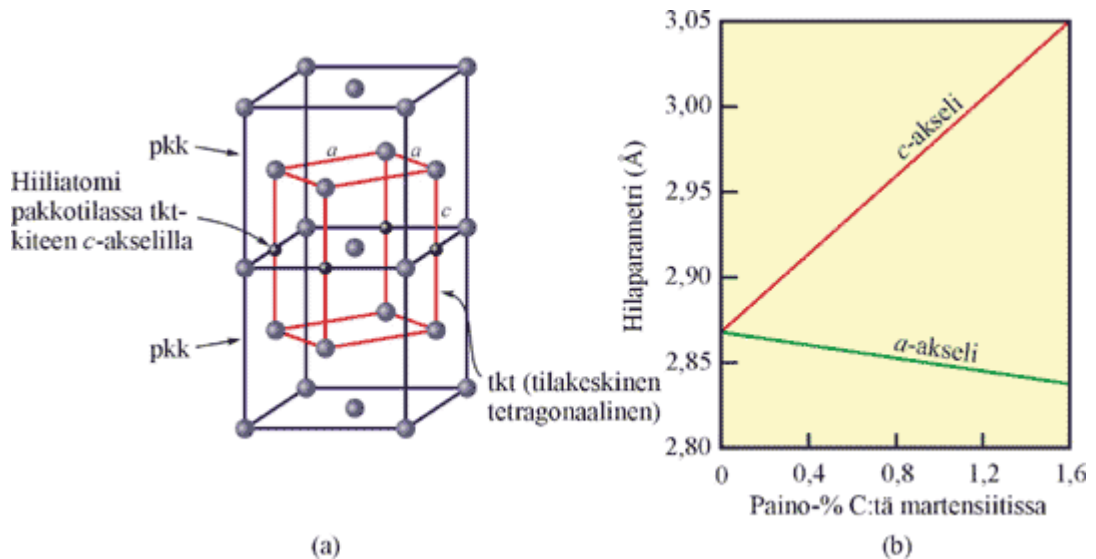
Rakenteeksi teräkselle tulee bainiittia tai martensiittia, kun austeniitin hajaantuminen tapahtuu niin nopeasti, ettei tasapainorakennetta ehdi muodostua. Bainiitti syntyy matalan lämpötilan eutektoidisen reaktion tuloksena. Martensiitti muodostuu ilman diffuusiota martensiittimekanismilla. /4./



KUVA 14. Teräksen lujuus ja sitkeysarvot austeniitin hajaantumislämpötilan funktiona /4/

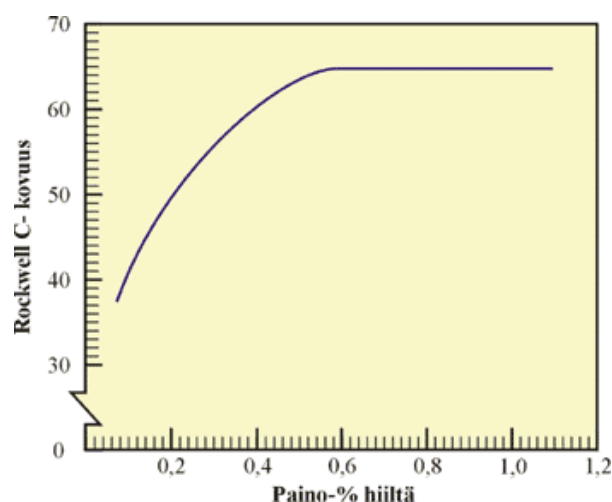
Bainiitti on ferriitin ja sementiitin ei-lamellaarinen seos. Kuvassa 14 on esitetty eutektoidisen teräksen lujuus ja sitkeysarvot austeniitin hajaantumislämpötilan funktiona. Kuvassa esiintyvät kuopat ja kyhmyt selitetään kahden eri bainiittilajin muodostumisella. Korkeissa hajaantumislämpötiloissa muodostuu yläbainiittia, jossa sementiittiehkäumat ovat ferriittiliuskojen rajoilla. Yläbainiitti on kovaa, korkeanlujuuksista ja haurasta. Matalammissa lämpötiloissa muodostuvaa bainiittia koostuu paljon dislokaatioita sisältävistä ferriittiliuskoista, joiden sisällä on sementiittierkaumia. Tällaisella rakenteella on erinomaiset lujuus- ja sitkeysarvot. Alabainiitin rakenne on tärkeä erikoislujissa nuorrutetuissa rakenneteräksissä. /4./

Martensiitti muodostuu austeniitista alle 220 °C lämpötiloissa. Diffuusio ei tapahdu riittävän nopeasti suurilla jäähtymisnopeuksilla, vaan austeniitti hajaantuu leikkautumismekanismilla. Se on hyvin nopea mekanismi, ja martensiittia muodostuu erittäin suurillakin jäähtymisnopeuksilla. /4./



KUVA 15. Martensiitin ja austeniitin ”yksikkökoppien” yhteys sekä martensiitin tetragonaalisuuden riippuvuus hiilipitoisuudesta /4/

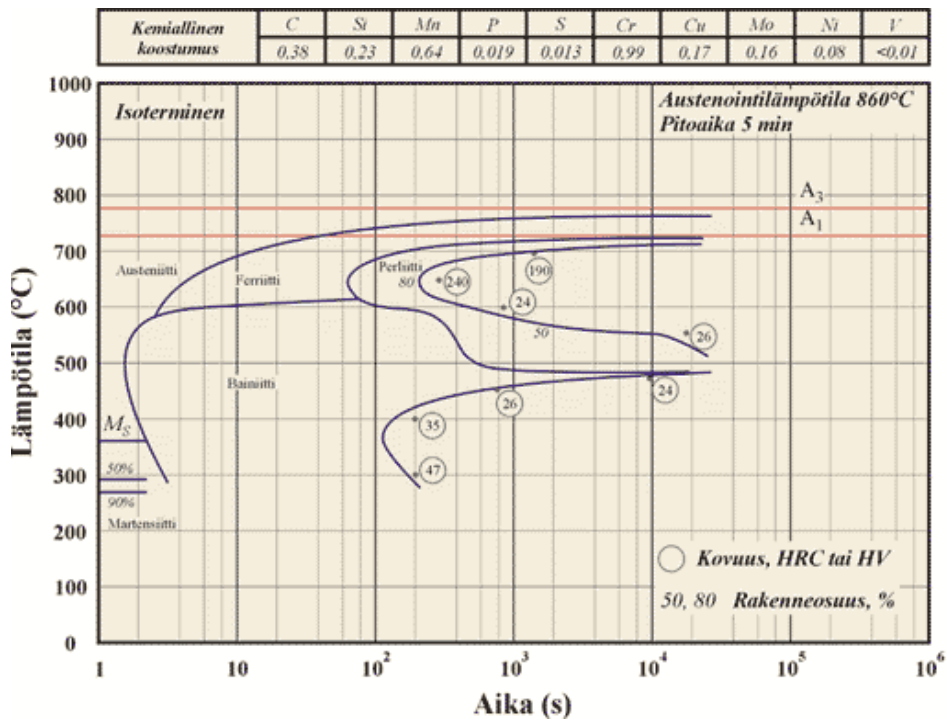
Kuvassa 15 nähdään martensiitin ja austeniitin ”yksikkökoppien” yhteys sekä martensiitin tetragonaalisuuden riippuvuus hiilipitoisuudesta. Martensiitteja esiintyy teräksellä kahta erilaista. Hiilipitoisuuden ollessa korkeampi ja/tai jäähtymisnopeuden hitaampi on tuloksena levymartensiittia. Se on ominaisuuksiltaan kovaa ja haurasta, ja sillä on taipumus lohkomurtumiseen. Puolestaan hiilipitoisuuden ollessa matalammalla ja/tai jäähtymisnopeuden ollessa nopeampi syntyy sälemartensiittia. Se on kovaa, lujaa ja kohtuullisen sitkeää. Muodostuneen martensiitin kovuus riippuu hiilipitoisuudesta (kuva 16). Muodostuva martensiitti on usein niin haurasta, että sitä pitää sitkistää päästön avulla. /4./



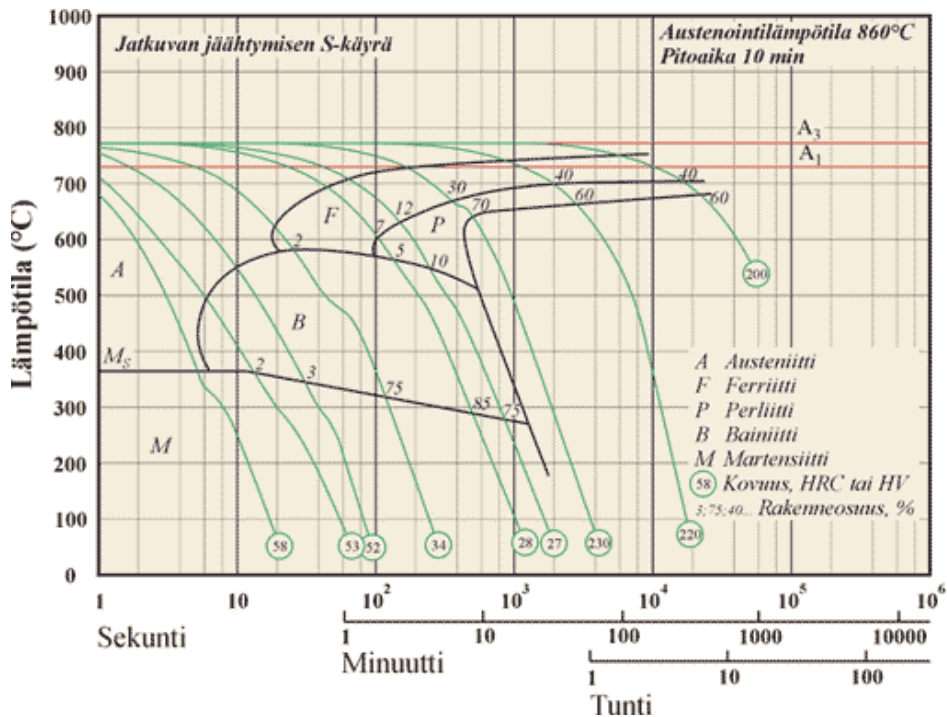
KUVA 16. Martensiitin kovuus vs. hiilipitoisuus /4/

Austeniitin hajaantumisessa syntyviä rakenteita voidaan kuvata lämpötilan ja ajan funktiona S-käyrien avulla, samalla tavalla kuin tasapainorakenteita voidaan kuvata

tasapainopiirroksilla. S-käyrät ovat saaneet nimensä niiden pohjana olevien faasimuutostöskäyrien muodon perusteella. S-käyriä määritetään sekä jatkuvalla jäähtymiselle (CTT-käyrä) että isoteremiselle eli vakio­lämpötilassa tapahtuvalle faasimuutokselle (TTT-käyrä). Kummastakin tyypistä on esitetty esimerkki kuvissa 17 ja 18. /4./

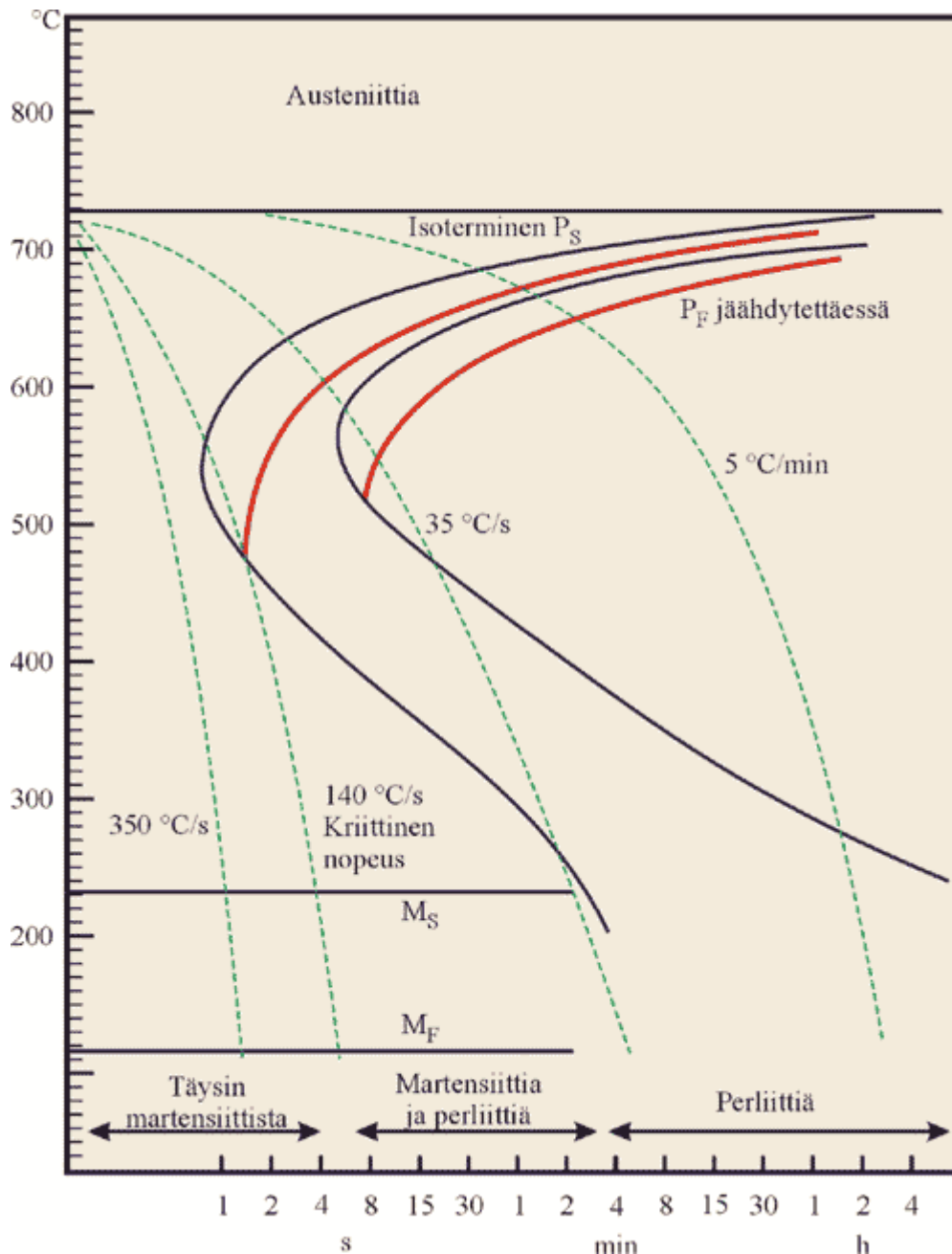


KUVA 17. Isotermisen faasimuutoksen avulla määritetty TTT-käyrä /4/



KUVA 18. Jatkuvan jäähtymisen CCT-käyrä /4/

S-käyrät ovat materiaalikohtaisia. Kuvassa 19 on esitetty, kuinka S-käyrää tulisi käyttää. Jäähdytysnopeuden ollessa välillä 35 °C/s - 5 °C/min on tuloksena perliittiä. Hitaalla jäähdytysnopeudella syntyy karkealamellista ja nopealla jäähdytyksellä hienolamellista perliittiä. Jäähdytysnopeuksilla $>140\text{ °C/s}$ on tuloksena martensiitti rakenne. Seostuksen tarkoituksena on ”muuttaa” S-käyrien muotoa siten, että jäähdytysnopeutta voidaan pienentää. /4./



KUVA 19. S-käyrän soveltamisen periaate. HUOM! Tässä kuvassa esitetty sekä TTT- että CCT-käyrä /4/

6 KOKEELLINEN TYÖ

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa suoritettiin aluksi testauksia materiaalin hukkapaloilla, jotta löydettiin oikeat parametrit virallisiin kokeisiin. Alustavien testausten jälkeen lämpökäsiteltiin lopulliset kalibrintipalat. Lämpökäsittelyn jälkeen palat kiilotettiin, syövytettiin mikrorakenteen tutkimista varten ja lopuksi suoritettiin standardin mukainen Vickers-kovuuskoe. Jokaisesta kalibrintipalasta otettiin 30 kappaletta kovuusmittauksia ja niistä laskettiin keskiarvo.

6.1 Koemateriaali

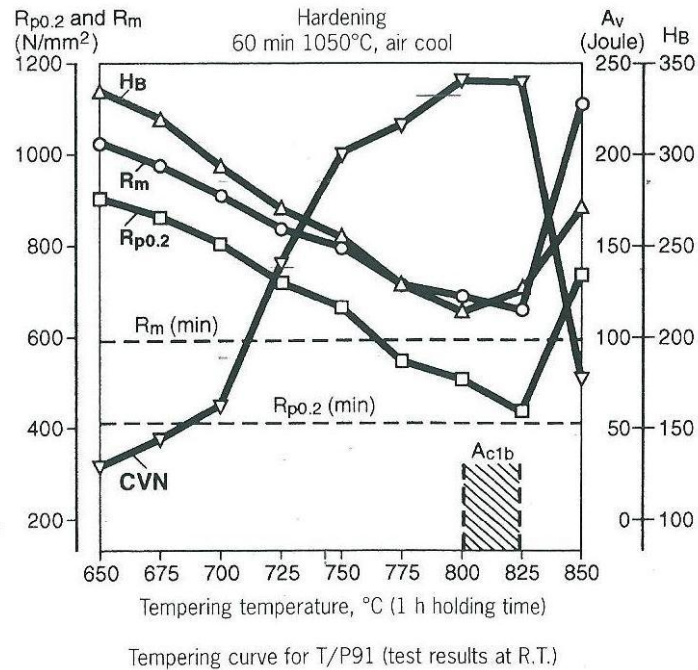
Koemateriaalina oli X10CrMoVNb9-1, jonka opinnäytetyön tilaaja toimitti. Niin kutsutun P91-teräksen kemiallinen koostumus on esitetty alla olevassa taulukossa 2. Ominaisuuksiltaan P91-teräs on pehmeä, mutta sitkeä teräs, ja peruskäsittelyillä, tässä tapauksessa karkaisulla ja päästöllä, helposti käsiteltävissä kovemmaksi.

TAULUKKO 2. X10CrMoVNb9-1 Materiaalin kemiallinen koostumus

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Ni	Mo	V	Nb
0.11	0.32	0.47	0.014	0.0030	0.038	0.018	8.5	0.13	0.85	0.22	0.076

6.2 Kokeellisen osuuden alustavat testaukset

Kokeellinen osuus lämpökäsittelyn osalta aloitettiin siten, että Inspectan toimittamista hukkapaloista leikattiin sopivan kokoisia testauspaloja. Inspectan oma testauslaboratorio oli toimittanut materiaalintoimittajan teettämän päästökäyrän (kuva 20), josta katsottiin suoraan tarvittavat päästölämpötilat halutuille kovuuksille.



KUVA 20. Materiaalintojittajan määrittämä päästökäyrä

Aluksi testauspalat austenoitiin 1050 °C asteessa, jossa niitä pidettiin 1h, jonka jälkeen palojen sammutus tapahtui antamalla niiden jäähtyä ilmassa. Seuraavana päivänä paloille tehtiin päästö. Päästö suoritettiin niin, että kappale lämmitettiin päästölämpötilaan ja annettiin olla siinä 1h. Sammutus tapahtui myös ilmaan jäädytyksellä. Alla olevassa taulukossa 3 näkyy päästökäyrästä määritetyt päästölämpötilat ensimmäiselle testauspala erälle ja arvioidut kovuudet, joihin lämpökäsittelyllä pitäisi päästä. Tarkoituksena on saada viiden kalibrointipalan sarja, joiden kovuudet ovat välillä 200-400 HV.

TAULUKKO 3. Päästölämpötilat ja tavoitellut kovuudet

Koekappaleen nro	Päästö °C	HV
1	725	250
2	745	300
3	790	350
4	250	400

Kovuusmittaukset aloitettiin kalibroimalla kovuusmittarimme (Valmet) Mikkelin ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa. Kalibroinnin jälkeen alettiin tutkia testikappaleita. X10-teräksen oletettiin olevan käsittelemättömänä kovuudeltaan n.220 HV luokkaa, mutta alustavat kovuusmittaukset osoittivat, että todellinen kovuus

on n. 237 HV. Kaikki testauspalojen kovuusmittaukset suoritettiin 30 kp kuormituksella, 10 sekunnin ajan. Tämän jälkeen mikroskoopilla otettiin kuva painaumasta, jonka timanttikärki kappaleeseen teki, ja laskettiin sen lävistäjien keskiarvo. Keskiarvon perusteella laskettiin Vickers-kovuusarvo.

Ensimmäinen testauseri ei onnistunut niin kuin sen olisi pitänyt. Virheeksi paljastui päästökäyrän väärä tulkitseminen. Taulukossa 4 on ensimmäisen lämpökäsittelyn keskiarvo kovuudet ja liitteessä 1 on esitetty ensimmäisen lämpökäsittelyn kaikki tulokset.

TAULUKKO 4. Ensimmäisen lämpökäsittelyn keskiarvokovuudet

Koekappaleen nro	Päästö °C	HV
1	725	263
2	745	239
3	790	200
4	250	346

Ensimmäisen testin jälkeen arvioitiin, että oikein luettuna päästökäyrä piti melkein paikkaansa. Tärkeää tietoa oli myös testauspalan 3 kovuuden tulos. Suoritettaessa päästö 790 °C päästiin 200 HV kovuuteen. Tieto on tärkeää, koska kalibrointipalat halutaan kovuudeltaan välille 200 - 400 HV ja nyt tiedetään, kuinka 200 HV voidaan saavuttaa. Kokeellista osuutta lämpökäsittelyn osalta jatkettiin toisella testauspalarajalla. Taulukossa 5 esitetään toisen testipalaerän päästölämpötilat ja toivotut kovuudet.

TAULUKKO 5. Päästölämpötilat ja tavoitellut kovuudet

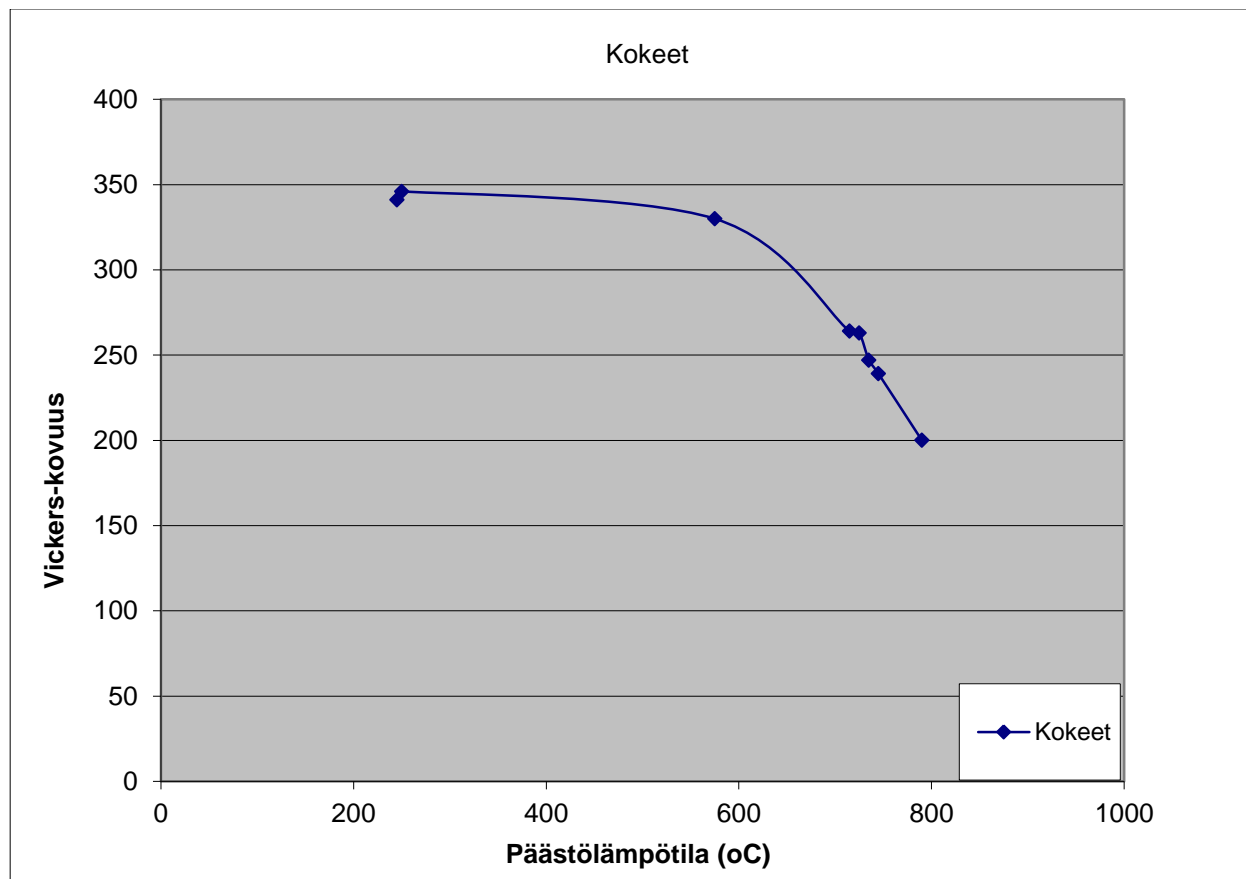
Koekappaleen nro	Päästö °C	HV
1	735	250
2	715	300
3	245	350
4	575	400

Toisen lämpökäsittelyerän keskiarvokovuudet on esitetty taulukossa 6 ja kaikki mittaus tulokset liitteessä 2. Toinen testierä kuitenkin antoi epäilyksen päästökäyrän epäluotettavuudesta ja päädyttiin tekemään kolmas testipalaerä.

TAULUKKO 6. Toisen lämpökäsittelyn keskiarvokovuudet

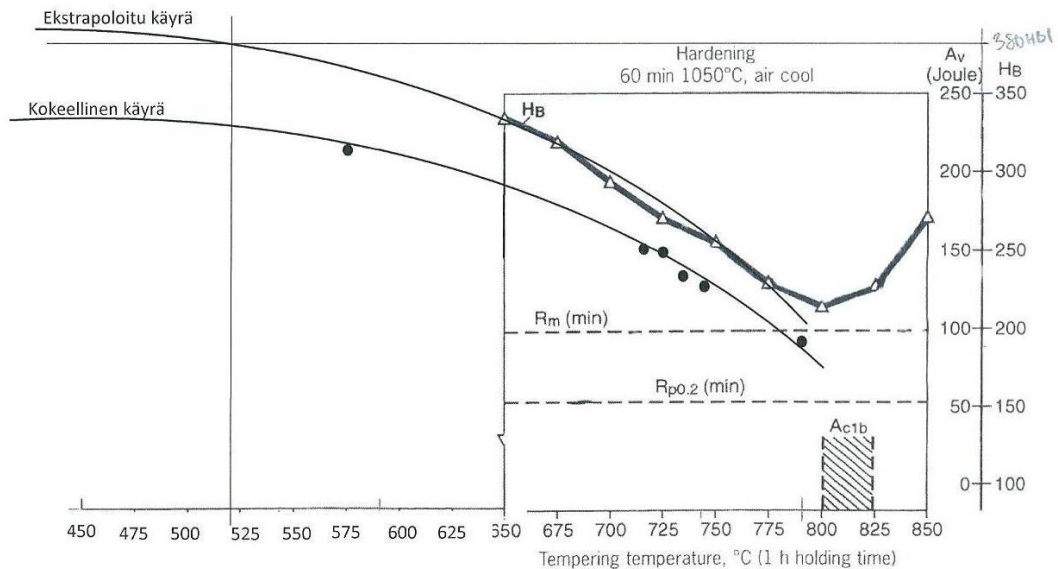
Koekappaleen nro	Päästö °C	HV
1	735	247
2	715	264
3	245	341
4	575	330

Kolmannelta testipalaerästä testattiin kovuus kappaleesta heti austenoinnin jälkeen. Tämän tarkoituksena oli selvittää, mihin kovuuteen austenoimalla päästään. Tulokseksi saatiin 339HV, joka kertoo 400HV:n kovuuden olevan mahdotonta saavuttaa. Kuvassa 21 on hahmotelma päästökäyrästä omien tuloksien perusteella.

**KUVA 21. Koemateriaalin päästökäyrä omien kokeiden perusteella**

Kovuusarvot osoittautuivat jäävän tasaisesti materiaalitoimittajan määrittämän päästökäyrän alapuolelle, jolloin alettiin epäillä, että päästökäyrä ei pidä paikkaansa tälle materiaalierälle tai kovuusmittauslaite ei antanut oikeaa tulosta. Päästökäyrä ei ole tehty tästä materiaalierästä, joten erot seosaineiden määrissä testattavan materiaalierän

kohdalla voivat myös aiheuttaa käyrän virheellisyyden. Kuvassa 22 on testitulokset yhdistettynä lämpökäsittelykäyrään. Kuvasta voidaan huomata, kuinka kokeellisen käyrän tulokset jäävät aina ekstrapoloidun käyrän alle. Virhe näyttäisi olevan sama jokaisen testin kohdalla.



KUVA 22. Testitulokset suhteessa päästökäyrään

Haluttiin pois sulkea kovuusmittauslaitteen virheen mahdollisuus, ja palat käytiin mitaamassa Varkaudessa, Inspecta Oy:n omassa laboratoriossa. Kovuusmittaukset osoittautuivat pitävän paikkaansa, joten päädyttiin lopputulokseen, että testattavan materiaalin seostuksessa on eroja verrattuna materiaaliin, josta päästökäyrä on tehty.

Suoritettiin päästö vielä kahdelle testauspalalle, koska haluttiin löytää päästölämpötila, jolla saadaan palalle aikaan kovuus välillä 270 - 300 HV. Tällä kertaa lämpötila katsottiin oman kokeellisen käyrän mukaan. Kokeellinen käyrä osoittautui pitävän hyvin paikkaansa, sillä päästölämpötilalla 650 °C saatiin kovuudeksi 295 HV ja päästölämpötilalla 675 °C:ssa saatiin kovuudeksi 282 HV. Tarkemmat mittaustulokset ovat liitteessä 3.

6.3 Lämpökäsittely

Alustavan testauksen tuloksien jälkeen päädyttiin tekemään neljän palan kalibrointipalan sarja. Koska kovuuteen 400HV ei päästä, jätettiin ensin suunnitellusta viiden palan sarjasta yksi pala pois. Palojen päästölämpötilat ja kovuudet on esitetty taulukossa 7. Kolmelle palalle tehdään austenointi ja päästö. Yksi pala säilytetään siinä olotilassa, kuin se materiaalintoimittajalta saatiin.

TAULUKKO 7. Kalibrointipalojen päästölämpötilat ja tavoitellut kovuudet

Kalibrointipalan nro	Päästö °C	HV
1	250	345
2	650	295
3	790	200
4	-	240

6.4 Kovuusmittaukset

Varsinaisten palojen kovuusmittaukset suoritettiin Varkaudessa Inspecta Oy:n omassa rikkovan testauksen laboratoriossa. Kovuusmittaus suoritettiin Wolpert-Amsler-kovuusmittauslaitteella. Jokaiseen palaan tehtiin kovuusmittaus 30 kertaa, tasaisesti palan läpi. Mittauksien keskiarvot on esitetty taulukossa 8 ja tulokset liitteessä 4.

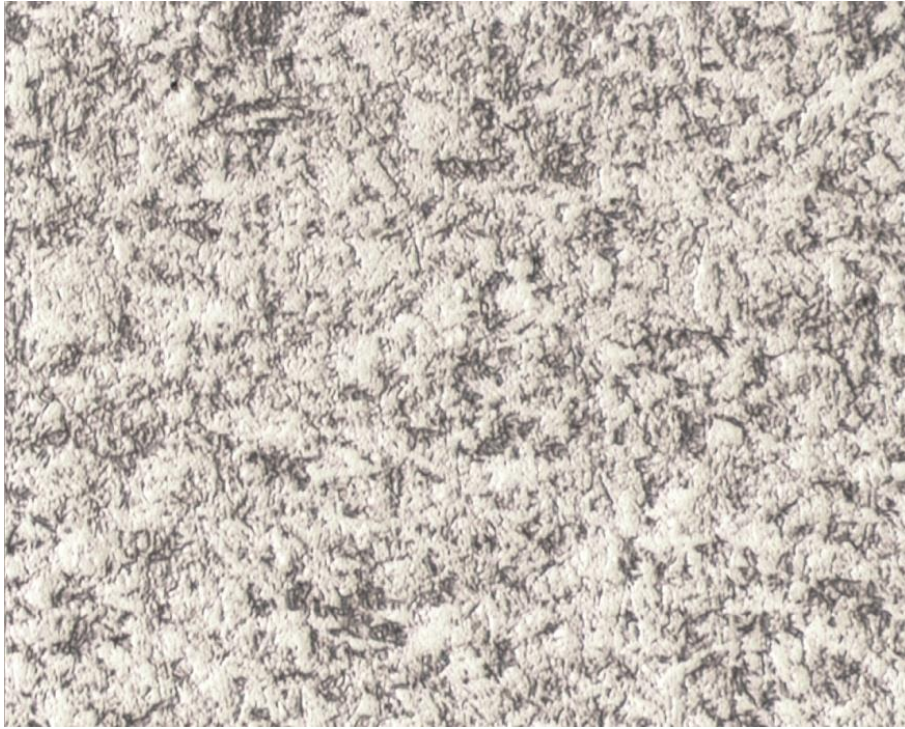
TAULUKKO 8. Kalibrointipalojen kovuudet

Kalibrointipalan nro	HV
1	334
2	294
3	196
4	241

6.5 Optinen mikroskopia, kalibrointipalojen mikrorakenteet

Haluttiin tutkia myös jokaisen kalibrointipalan mikrorakennetta. Tiedettiin, että ennen lämpökäsittelyä mikrorakenne on martensiittinen. Tehtiin hie jokaisesta kalibrointipa-

lasta, jotta nähtäisiin, kuinka mikrorakenne muuttuu lämpökäsittelyn vaikutuksesta. Hieen teon jälkeen pinta syövytettiin ns. kuningasvedellä (HCl , H_2O , HNO_3), huuhdeltiin vedellä ja lopuksi etanolilla. Mikrorakennetta tutkittiin optisella mikroskoopilla. Kuvissa 23, 24, 25 ja 26 on esitetty jokaisen palan mikrorakenne.



KUVA 23. Kalibrointipalan 1 (päästö 250 °C, 334 HV) mikrorakenne, suurennos 400x

Ensimmäisen kalibrointipalan rakenne on päästömartensiittinen.



KUVA 24. Kalibrointipalan 2 (päästö 650 °C, 295 HV) mikrorakenne, suurennos 400x

Toisen kalibrointipalan mikrorakenne on myös päästömartensiittinen.



KUVA 25. Kalibrointipalan 3 (päästö 790 °C, 196 HV) mikrorakenne, suurennos 400x

Kolmannen kalibrointipalan mikrorakenne on selvästi martensiittinen.



KUVA 26. Kalibrointipalan 4 (lämpökäsittelemätön, 241 HV) mikrorakenne, suurennos 400x.

Neljännän kalibrointipalan mikrorakenne on martensiittinen, kuten ennen kokeiden aloitusta oli jo tiedossa, sillä neljäs kalibrointipala on lämpökäsittelemätön.

6.6 Tulokset

Tulokset varsinaisista kalibrointipaloista olivat onnistuneet. Ne osoittivat, että ne parametrit, jotka haettiin alussa testaamalla pienempiä paloja eri päästölämpötiloissa, osoittautuivat oikeiksi. Jokaisen kalibrointipalan kovuus oli sitä, mitä haluttiinkin.

Mikrorakenne kuvat onnistuivat myös hyvin. Hien teko oli vaikeaa, mutta oikeanlainen pinta saatiin lopulta aikaan ja mikrorakennekuvat olivat selkeät. Kaikissa kalibrointipaloissa mikrorakenne oli martensiittinen, mutta kahdessa kovimmassa oli huomattavissa myös ala-bainiittista rakennetta.

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli etsiä oikeat parametrit, joilla voitaisiin valmistaa kalibrointipalasarja, joiden kovuudet olisivat välillä 200HV – 400HV. Aluksi parametrien etsiminen näytti helpolta, koska Inspecta Oy toimitti koemateriaalin X10CrMoVNb9-1 materiaalin toimittajan määrittämän päästökäyrän. Testien aloittamisen jälkeen kävi kuitenkin ilmi, että työn tekeminen ei olisikaan niin yksinkertaista, koska jouduttiin hakemaan oikeat parametrit testaamalla, eikä vain suoraan päästökäyrästä katsomalla.

Työn haasteellisin osuus oli kokeellinen osuus, jossa tehtiin monta alkutestausta ennen varsinaisten kalibrointipalojen tekoa. Näiden testien aikana kävi myös ilmi, että kovuutta 400HV ei voitaisi saavuttaa. Kokeellisessa osuudessa vaikein osuus oli kuitenkin hieen teko. Kalibrointipala oli kooltaan niin suuri, että hieen tekemiseen sai tehdä kunnolla töitä, ennen kuin se oli tarpeeksi kiiltävä syövyttämiseen ja mikrorakenteen tarkkailuun. Lopputulos oli kuitenkin onnistunut, ja mikrorakenteet saatiin selkeästi esiin.

Lopputuloksena opinnäytetyö tuotti neljä kalibrointipalaa, joiden kovuudet vaihtelevat välillä 196 HV – 334 HV. Jälkeenpäin katsottuna opinnäytetyö oli opettavainen ja yhteistyö Varkauden laboratorion kanssa oli myös hyvin antoisaa. Yrityksen mukana olo opinnäytetyössä oli hyvä lisä oppimisen kannalta, koska pääsi kommunikoimaan yrityksen eri henkilöiden kanssa. Tämä antoi myös lisävalmiuksia työelämän kommunikointitilanteisiin.

LÄHTEET

1. Ansaharju, Tapani, Ilomäki Osmo, Katainen Harri, Maaranen Keijo ja Mäkinen Armas. Materiaalitekniikka. Porvoo: WSOY.1989
2. Frank, Dr. Stefan. Käännös Packalen Tapani Kannettavat kovuusmittarit sovel-lusohje. Helmikuu 2001.
3. Inspecta Oy. Yrityksen www-sivut. <http://www.inspecta.com/fi/tyopaikat/> Päivitetty 18.3.2012. Luettu 18.3.2012
4. Tampereen teknillinen yliopisto, materiaaliopin laitos http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1.php Luettu 18.4.2012
5. William D. Callister, Jr. ”Materials science and engineering an introduction”, Kanada: John Wiley & Sons, Inc. 1997.

Ensimmäisen lämpökäsittelytestin mittau tulokset

Näyte 1,päästö 250°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lä- vistäjä keskiar- vo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,402	0,401	0,402	345
	0,410	0,400	0,405	339
	0,399	0,399	0,399	349
	0,403	0,402	0,403	343
	0,398	0,398	0,398	351
			Keskiarvo:	345,6
			Keskihajonta:	4,8
			Minimi:	339,1
			Maximi:	351,1
Näyte 2,päästö 725°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lä- vistäjä keskiar- vo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,466	0,460	0,463	259
	0,461	0,457	0,459	264
	0,463	0,458	0,461	262
	0,464	0,463	0,464	259
	0,456	0,450	0,453	271
			Keskiarvo:	263,1
			Keskihajonta:	4,9
			Minimi:	258,9
			Maximi:	271,0
Näyte 3,päästö 745°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lä- vistäjä keskiar- vo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,517	0,492	0,505	219
	0,482	0,472	0,477	244
	0,482	0,471	0,477	245
	0,485	0,479	0,482	239

Ensimmäisen lämpökäsittelytestin mittau tulokset

	0,472	0,478	0,475	247
			Keskiarvo:	238,8
			Keskihajonta:	11,6
			Minimi:	218,5
			Maximi:	246,5
Näyte 4,päästö 790°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lä- vistäjä keskiar- vo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,536	0,535	0,536	194
	0,521	0,524	0,523	204
	0,528	0,529	0,529	199
	0,528	0,529	0,529	199
	0,518	0,524	0,521	205
			Keskiarvo:	200,2
			Keskihajonta:	4,4
			Minimi:	194,0
			Maximi:	204,9

Toisen lämpökäsittelytestin mittaustulokset

Näyte, päästö 575°C	Painuman lävistäjä [mm]	d ₁	Painu- man lävistäjä d ₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,420		0,435	0,428	304
	0,424		0,416	0,420	315
	0,398		0,396	0,397	353
	0,408		0,402	0,405	339
	0,404		0,405	0,405	340
				Keskiarvo:	330,3
				Keskihajon- ta:	19,9
				Minimi:	304,3
				Maximi:	352,9
Näyte, päästö 715°C	Painuman lävistäjä [mm]	d ₁	Painu- man lävistäjä d ₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,458		0,455	0,457	267
	0,460		0,461	0,461	262
	0,454		0,451	0,453	272
	0,458		0,461	0,460	263
	0,463		0,466	0,465	258
				Keskiarvo:	264,4
				Keskihajon- ta:	5,2
				Minimi:	257,8
				Maximi:	271,6
Näyte, päästö 735°C	Painuman lävistäjä	d ₁	Painu- man	Painuman lävistäjä kes-	Vickers kovuus

Toisen lämpökäsittelytestin mittaustulokset

	[mm]	lävistäjä d ₂ [mm]	kiarvo [mm]	[HV 30]
	0,483	0,469	0,476	245
	0,484	0,474	0,479	242
	0,471	0,476	0,474	248
	0,473	0,470	0,472	250
	0,473	0,475	0,474	248
			Keskiarvo:	246,7
			Keskihajonta:	2,9
			Minimi:	242,4
			Maximi:	250,2
Näyte, päästö 245°C	Painuman lävistäjä [mm]	Painu- man lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,404	0,406	0,405	339
	0,404	0,406	0,405	339
	0,403	0,401	0,402	344
	0,399	0,404	0,402	345
	0,406	0,405	0,406	338
			Keskiarvo:	341,1
			Keskihajonta:	3,2
			Minimi:	338,3
			Maximi:	345,0

Kolmannen lämpökäsittelytestin mittaustulokset

Vickers kovuudet				
Näyte 1, päästö 650°C	Painu- man lävistäjä d₁ [mm]	Painu- man lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,433	0,434	0,434	296
	0,435	0,434	0,435	295
	0,435	0,435	0,435	294
	0,434	0,434	0,434	295
	0,437	0,439	0,438	290
			Keskiarvo:	293,9
			Keskihajon- ta:	2,4
			Minimi:	289,9
			Maximi:	296,0
Näyte 2, päästö 675°C	Painu- man lävistäjä d₁ [mm]	Painu- man lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV 30]
	0,446	0,441	0,444	283
	0,442	0,445	0,444	283
	0,442	0,446	0,444	282
	0,444	0,447	0,446	280
	0,445	0,443	0,444	282
			Keskiarvo:	282,0
			Keskihajon- ta:	1,0
			Minimi:	280,2
			Maximi:	282,8

Varsinaisten kalibrointipalojen mittau tulokset

Vickers kovuudet				
Pala 1, Päästö 250°C	Painu- man lävistäjä d ₁ [mm]	Painu- man lävistäjä d ₂ [mm]	Painuman lävistäjä kes- kiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV5]
	0,169	0,166	0,168	329
	0,164	0,167	0,166	332
	0,166	0,165	0,166	336
	0,164	0,163	0,164	345
	0,164	0,164	0,164	345
	0,165	0,165	0,165	341
	0,165	0,163	0,164	345
	0,165	0,165	0,165	341
	0,167	0,166	0,167	332
	0,167	0,167	0,167	332
	0,166	0,166	0,166	336
	0,166	0,166	0,166	336
	0,169	0,165	0,167	332
	0,167	0,169	0,168	329
	0,167	0,165	0,166	336
	0,166	0,167	0,167	332
	0,168	0,166	0,167	332
	0,168	0,167	0,168	329
	0,168	0,166	0,167	332
	0,168	0,167	0,168	329
	0,167	0,167	0,167	332
	0,168	0,166	0,167	332
	0,165	0,166	0,166	336
	0,167	0,166	0,167	332
	0,168	0,169	0,169	325

Varsinaisten kalibrointipalojen mittaustulokset

	0,167	0,167	0,167	332
	0,166	0,167	0,167	332
	0,167	0,166	0,167	332
	0,167	0,167	0,167	332
	0,168	0,167	0,168	329
			Keskiarvo:	333,8
			Keskihajonta:	5,1
			Minimi:	325,0
			Maximi:	345,0
Pala 2, päästö 650°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä keskiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV5]
	0,179	0,178	0,179	289
	0,178	0,176	0,177	296
	0,177	0,178	0,178	293
	0,178	0,177	0,178	293
	0,178	0,178	0,178	293
	0,179	0,178	0,179	289
	0,177	0,177	0,177	296
	0,178	0,176	0,177	296
	0,176	0,177	0,177	296
	0,178	0,178	0,178	293
	0,180	0,175	0,178	293
	0,175	0,178	0,177	296
	0,175	0,177	0,176	299
	0,180	0,174	0,177	296
	0,178	0,180	0,179	289
	0,176	0,177	0,177	296
	0,177	0,176	0,177	296
	0,176	0,178	0,177	296

Varsinaisten kalibrointipalojen mittau tulokset

	0,178	0,176	0,177	296
	0,177	0,177	0,177	296
	0,175	0,178	0,177	296
	0,177	0,176	0,177	296
	0,174	0,177	0,176	299
	0,180	0,177	0,179	289
	0,174	0,176	0,175	303
	0,175	0,176	0,176	299
	0,176	0,176	0,176	299
	0,178	0,176	0,177	296
	0,176	0,178	0,177	296
	0,178	0,177	0,178	293
			Keskiarvo:	295,1
			Keskihajonta:	3,3
			Minimi:	289,0
			Maximi:	303,0
Pala 3, päästö 790°C	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä keskiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV5]
	0,214	0,215	0,215	201
	0,219	0,218	0,219	193
	0,219	0,218	0,219	193
	0,219	0,216	0,218	195
	0,217	0,217	0,217	197
	0,218	0,217	0,218	195
	0,216	0,217	0,217	197
	0,217	0,216	0,217	197
	0,216	0,218	0,217	197
	0,216	0,215	0,216	199
	0,217	0,218	0,218	195

Varsinaisten kalibrointipalojen mittaustulokset

	0,219	0,217	0,218	195
	0,217	0,218	0,218	195
	0,219	0,217	0,218	195
	0,218	0,215	0,217	197
	0,216	0,216	0,216	199
	0,215	0,217	0,216	199
	0,216	0,219	0,218	195
	0,216	0,217	0,217	197
	0,219	0,219	0,219	193
	0,215	0,217	0,216	199
	0,220	0,218	0,219	193
	0,216	0,216	0,216	199
	0,218	0,215	0,217	197
	0,216	0,215	0,216	199
	0,219	0,219	0,219	193
	0,217	0,218	0,218	195
	0,217	0,216	0,217	197
	0,216	0,218	0,217	197
	0,218	0,217	0,218	195
			Keskiarvo:	196,3
			Keskihajonta:	2,2
			Minimi:	193,0
			Maximi:	201,0
Pala 4, lämpökäsittelemätön	Painuman lävistäjä d₁ [mm]	Painuman lävistäjä d₂ [mm]	Painuman lävistäjä keskiarvo [mm]	Vickers kovuus [HV5]
	0,196	0,198	0,197	239
	0,195	0,194	0,195	244
	0,196	0,197	0,197	239
	0,199	0,193	0,196	241

Varsinaisten kalibrointipalojen mittau tulokset

	0,198	0,195	0,197	239
	0,196	0,200	0,198	236
	0,198	0,197	0,198	236
	0,198	0,200	0,199	234
	0,195	0,198	0,197	239
	0,197	0,197	0,197	239
	0,196	0,198	0,197	239
	0,197	0,200	0,199	234
	0,195	0,194	0,195	244
	0,197	0,198	0,198	236
	0,196	0,194	0,195	244
	0,197	0,197	0,197	239
	0,195	0,194	0,195	244
	0,198	0,194	0,196	241
	0,194	0,192	0,193	249
	0,192	0,190	0,191	254
	0,195	0,193	0,194	246
	0,195	0,195	0,195	244
	0,196	0,196	0,196	241
	0,198	0,195	0,197	239
	0,196	0,196	0,196	241
	0,197	0,194	0,196	241
	0,196	0,197	0,197	239
	0,196	0,196	0,196	241
	0,194	0,193	0,194	246
	0,194	0,197	0,196	241
			Keskiarvo:	241,0
			Keskihajonta:	4,3
			Minimi:	234,0
			Maximi:	254,0