

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikka

Tutkintotyö

Reima Sintonen

**HAMMASPYÖRÄTUOTANNON HIILETYSKARKAISUN LAADUNVARMISTUS**

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 2005

Kaarlo Koivisto  
SEW Industrial Gears Oy, valvojana DI Jari Marttala

## TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Sintonen, Reima      Hammaspyörätuotannon hiiletyskarkaisun laadunvarmistus

Tutkintotyö            41 sivua + 9 liitesivua

Työn ohjaaja            Kaarlo Koivisto

Työn teettäjä           SEW Industrial Gears Oy, valvojana DI Jari Marttala

Elokuu 2005

Hakusanat              Lämpötilan mittaaminen, termoelementit, lämpökäsittelyn laadunvalvonta koepalamenettelyllä

### TIIVISTELMÄ

Työn aiheena on hammaspyörätuotannon hiiletyskarkaisun laadunvarmistus. Lämpökäsittely on kriittinen osa valmistusprosessia, ja siitä syystä laatu on kehitettävä niin korkealle tasolle, ettei lopputuotteeseen pääse virheellistä lämpökäsittelytilaa. Tämä toteutetaan laatimalla lämpökäsittelyä varten tarkastusohjeet. Hammaspyörrien lämpökäsittelyssä laadunvarmistus perustuu ennaltaehkäisevään prosessiolosuhteiden valvontaan ja koepalojen, näytteiden ja tuotantokappaleiden tutkimiseen.

SEW Industrial Gears Oy käynnistää oman karkaisulaitoksen joulukuussa 2005. Siihen saakka lämpökäsittely ostetaan alihankkijalta. Koska yksi avainprosesseista otetaan omaan hallintaan, tarvitaan prosessin mittauksissa tarkastus- ja seurantalomakkeet.

Työn teoriaosassa on käyty läpi hiiletyskarkaisun prosessiin ja laatuun vaikuttavat tärkeimmät tekijät: lämpötilan ja suojakaasun mittaaminen ja säätö. Työn loppuosassa kerrotaan karkaisutulosten tekemisestä laboratoriossa koepalamenettelyllä.

Työn tuloksena syntyi seurantaraporttipöytäkirjat, joita käytetään laadun seurantaan. Hiiletyskarkaisun tulosraporttiin kirjataan karkaisupanoksen mittaustulokset. Uunilaitteiston laaduntuottokykyä seurataan lämpötilan-, hiilipitoisuuden-, pintakovuuden tasaisuusmittauksilla. Lisäksi seurataan termoelementtejä, CO /CO<sub>2</sub>-analysointia ja happisondia. Koko lämpötilamittausketju kuuluu myös laadunvalvonnan piiriin.

Tulevaisuudessa, kun SEW Industrial Gears Oy:n karkaisulinja on saatu käyntiin, tulee huomiota kiinnittää karkaisupanosten rakentamiseen. Panostuksella on suuri merkitys kappaleiden väntymiselle ja sitä kautta laatuun.

Toinen seikka, johon tulisi kiinnittää huomiota, on koepalan korrelointi varsinaisen hammaspyörän kanssa. Koepalan ja tuotteen yhdenmukaisuutta tulisi seurata systemaattisesti.

Karkaisuväntymiä ja koepalan korrelointia hammaspyörän kanssa tulisi mitata käytännön kokeilla.

TAMPERE POLYTECHNIC

Mechanical and Production Engineering

Sintonen, Reima

Engineering Thesis

Thesis Supervisor

Commissioning Company

August 2005

Keywords

Case carburising quality control of gear wheels production

41 pages + 9 appendices

Kaarlo Koivisto

SEW Industrial Gears Oy. Supervisor Jari Marttala (MSc)

Temperature measuring, thermoelements, heat treatment quality inspection.

ABSTRACT

Because heat treatment is a critical part of gear manufacturing process there has to be quality control protocol to guarantee that the quality level meets the requirements set to the final product. Case carburising quality control is based on preventive process control and inspection of test pieces, specimens and actual production parts.

SEW Industrial Gears Oy will start up own heat treatment plant in December 2005. Because earlier heat treatment process has been totally subcontracted, it means that quality control method including inspection and process check reports has to be implemented during the start up control the process. In this engineering thesis the method to control the important parameters of case carburising, temperature and gas atmosphere as well as laboratory inspection with test piece method are presented.

The final results of the research are the quality reports which will be used daily in heat treatment department. Quality reports include case hardening report for each batch and several inspection reports used in furnace line.

Critical part in the use of SEW Industrial Gears Oy carburising line will be forming the batches. It has significant influence to parts distortion and quality. Also correlation between actual production parts and test pieces should be studied. In future it should be measured using real test batches.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 KAMMIOUNIN RAKENNE.....	7
3 HIILETYSKARKAISU.....	9
3.1 Hiiletys.....	9
3.1.1 Lämpötilan vaikutus hiiletyksessä .....	11
3.1.2 Kaasutusmenetelmät.....	12
3.2 Karkaisu.....	13
3.3 Sammutus.....	15
3.4 Päästö.....	16
4 LÄMPÖTILAN MITTAUS .....	17
4.1 Termoelementit.....	18
4.2 Määräaikaistarkastukset.....	23
4.2.1 Käyttötermoelementin tarkastus.....	23
4.2.2 Uunin mittalaitteiden tarkastus.....	24
4.2.3 Lämpötilan tasaisuusmittaus.....	25
5 SUOJAKAASUN MITTAUS JA SÄÄTÖ.....	27
5.1 Happisondimittaus.....	28
5.2 CO/CO <sub>2</sub> -mittaus.....	30
5.3 Foliomittaus.....	31
6 HIILETYSKARKAISUN LAADUNVARMISTUS.....	32
6.1 Lämpökäsittelyn laadunvalvonta koepalamenettelyllä.....	33
6.2 Pintakovuuden mittaaminen.....	34
6.3 Mikrokovuusjakauman mittaus koepalasta.....	36
6.4 Pintahiilipitoisuuden mittaus koepalasta.....	37
6.5 Mikrorakenteen tarkastelu.....	38
7 TULOKSET.....	39
LÄHTEET.....	41

## LIITTEET

- 1 Hiiletyskarkaisun tulosraportti
- 2 Lämpötilan tasaisuusmittaus
- 3 Hiilipitoisuuden tasaisuusmittaus
- 4 Pintakovuuden tasaisuusmittaus
- 5 Unin termoelementtien seuranta
- 6 CO/CO<sub>2</sub>-analysointin seuranta
- 7 Unin lämpötilamittausketjun tarkastus
- 8 Happisondin seuranta
- 9 Unikammion mittauspisteet

# 1 JOHDANTO

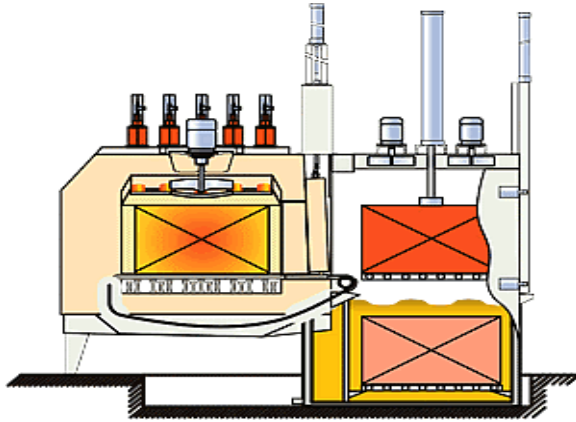
Työn aiheena on hammaspyörätuotannon hiiletyskarkaisun laadunvarmistus. SEW Industrial Gears Oy hankkii Karkkilan tehtaan yhteyteen oman lämpökäsittelylaitoksen vuoden 2005 aikana. Yhtiö ostaa tällä hetkellä kaiken lämpökäsittelyn alihankinnasta kaupalliselta karkaisuyritykseltä. Lämpökäsittelylaitoksen yhteyteen rakennetaan laboratorio, jossa karkaisupanosten tulokset tehdään ja analysoidaan. Koska yksi avainprosesseista otetaan omaan valvontaan, pitää karkaisuprosessille rakentaa uusi laadunvalvontajärjestelmä takaamaan virheettömät tuotteet. Lämpökäsittelyn laadunvarmistus on tärkeää, sillä lopputuotteen ominaisuudet saadaan aikaan lämpökäsittelyssä ja virheen tapahduttua valmiin tuotteen korjausmahdollisuudet ovat pienet.

SEW Industrial Gears Oy:n hankkii hiiletyskarkaisuun kammiouunit, joten tässä työssä keskitytään näihin uuneihin. Varsinaisia hiiletysohjelmia ei esitellä, koska ne löytyvät yhtiön omista sisäisistä standardeista ja ovat myös liikesalaisuuksia. Lämpökäsittelylaitoksen rakentaminen ja tuotannon käynnistäminen ajoittuu joulukuuhun 2005, joten tässä yhteydessä ei lähdetty tekemään karkaisutestejä koekappaleilla. Lämpökäsittelyssä laadunvarmistus perustuu ennaltaehkäisevään prosessiolosuhteiden valvontaan ja kappaleiden sekä koepalojen tutkimiseen. Työn tavoitteena on rakentaa laatujärjestelmä näiden kahden asian ympärille.

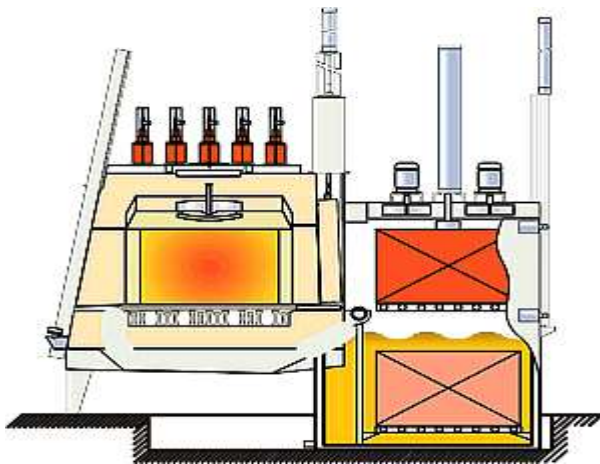
Automaattisessa kammiouunilinjassa työkappaleet käyvät läpi eri prosessivaiheita. Hammaspyörät panostetaan panoskoriin, johon sijoitetaan mukaan koepala(t). Automaattinen lataajavaunu siirtää työkappalepanosta eri työvaiheiden mukaan. Työvaiheet ovat: panostus, pesu, esilämmitys, austenointihehkus, sammutus, pesu ja päästäminen. Valmiin panoksen koepala(t) tutkitaan karkaisimon laboratoriossa ja näistä tehdään karkaisutulokset. Karkaisun jälkeen kappaleet kuulapommitetaan jolloin hampaan tyvilujuutta vahvistetaan sekä samalla kappaleet puhdistuvat. Valmis panos sekä karkaisutulokset toimitetaan takaisin osavalmistuosastolle ja edelleen siellä hiottavaksi.

## 2 KAMMIUUNIN RAKENNE

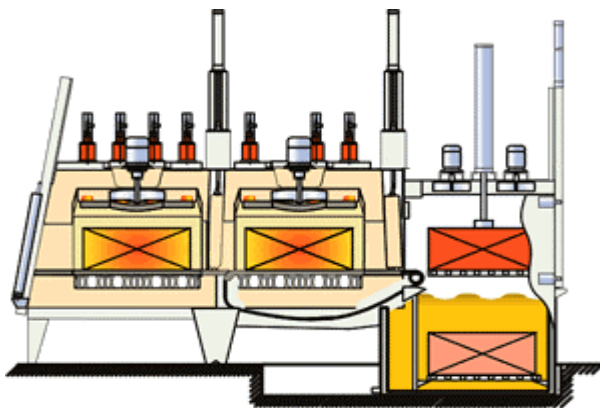
Kammiouuneja valmistetaan kolmea eri tyyppiä: yksiovinen, kaksiovinen läpisyöttöuuni ja kaksoiskammiouuni kahdella ovella (kuva1).



**Kuva 1 a)** Kammiouuni, yhdestä päästä avattava /4/



**b)** Lämpisyöttökammiouuni



**c)** Kaksoiskammiouuni, läpisyöttö

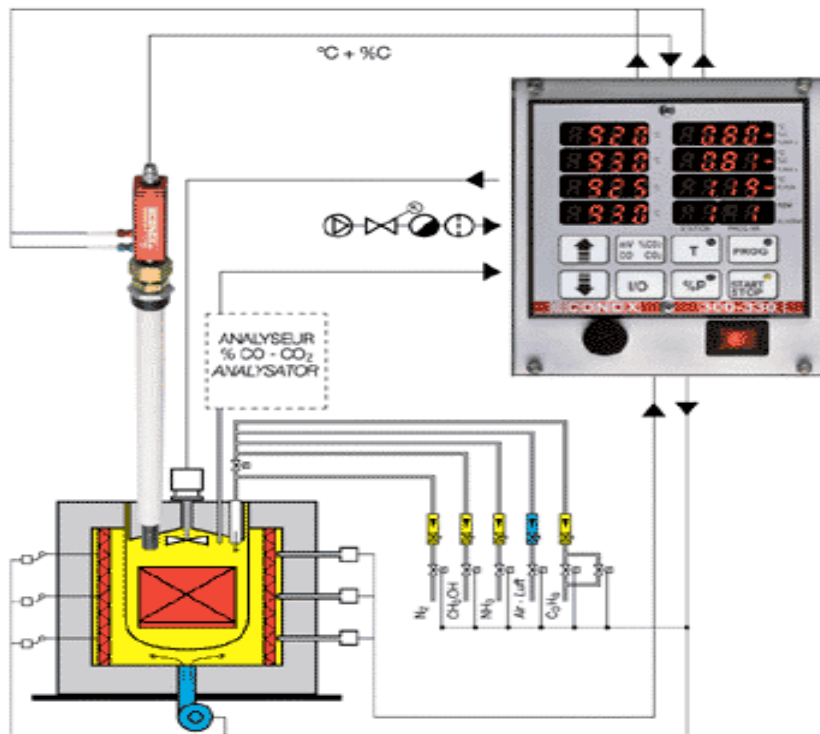
Uunin kuumennus tapahtuu sähköllä tai kaasupolttimilla. Pohjoismaissa suositaan sähkökuumennuksen käyttöä. Euroopassa ja muualla maailmassa käytetään enemmän kaasukuumennusta, koska maakaasua on hyvin saatavilla.

Kammion maksimityölämpötila on n. 1000 °C. Kaasutiiviin uunin sisällä on hiiletyskammio, öljyallas ja välikammio. Sammutuvaiheessa panos siirretään hiiletyskammioista etukammioon ja lasketaan hissilaitteiston avulla öljyyn. Kaikki tämä tapahtuu kaasuatmosfäärissä uunin sisällä, jolloin kappaleet eivät hapetu. Kammion karkaistut kappaleet ovat pinnaltaan paljon puhtaampia kuin esim. kuoppauunissa karkaistut kappaleet.

Hiiletyskammion seinissä ja lattiassa on tiilivuoraus. Lisäksi kammiossa on keraamiset levyt seinissä ja katossa. Kammion katossa on kaasunkierrätyspotkuri, jolla kaasuatmosfääriä sekoitetaan ja pidetään liikkeessä.

Öljyalttaassa on 2-4 kpl sekoituspotkureita. Sammutuksen yhteydessä voidaan muuttaa useita eri muuttujia. Säädetävissä on potkureiden pyöritysnopeus, -suunta, sekoitusaika ja sekoittavien potkureiden määrä. Näillä muuttujilla on vaikutusta esim. kappaleiden karkaisuväntymiin.

Kaasuhiiletyskolme päämuuttujaa ovat aika, lämpötila ja kaasuatmosfääri. Näitä prosessiparametreja valvotaan ja säädetään kammion tietokoneen avulla. Uunilaitteistoon kuuluu kaasupaneeli, jossa säädetään uuniin syötettävää kaasuatmosfääriä. Suoja eli varokaasuna käytetään typpeä. Happisondilla mitataan kaasuatmosfäärin happipitoisuutta. Termoelementeillä mitataan uunin lämpötilaa. CO / CO<sub>2</sub>-analysaattorilla mitataan kyseisten kaasujen pitoisuuksia. Näitä kaikkia mittausrvoja käytetään prosessin säätämässä (kuva 2).

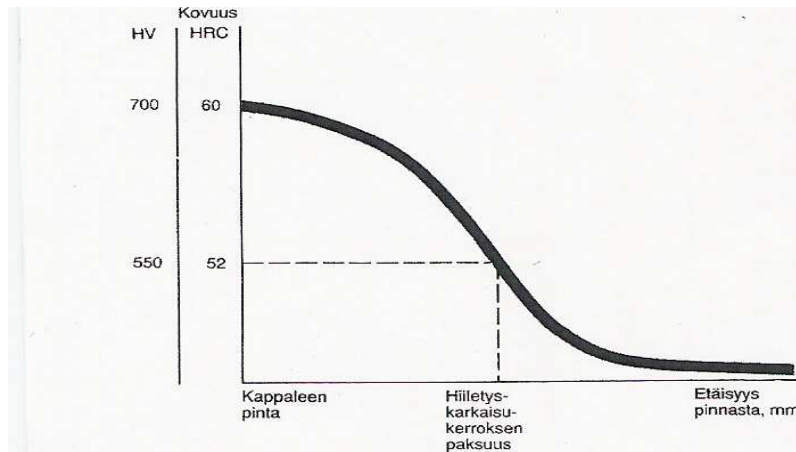


**Kuva 2** Uunin prosessin säätölaitteet / 5 /



### 3 HIILETYSKARKAISU

Hiiletyskarkaisulla tarkoitetaan lämpökäsittelyä, jossa niukkahiilistä (0.15-0.25 %C) terästä hehkutetaan austeniittialueella hiiltä luovuttavassa väliaineessa. Teräksen pintaan muodostuu 0,3...3 mm paksuinen runsashiilinen kerros (0.6-1.0 % C). Hiiletysvaiheen jälkeen kappale sammutetaan öljyyn, jolloin siinä tapahtuu sekä pintakerroksen että sydänaineen karkeneminen. Pintakerros muuttuu pääosin martensiitiksi. Sydänaineessa pyritään bainiittiseen rakenteeseen eli kovuuteen yli 320 HV.



**Kuva 3** Hiiletyskarkaisukerroksen syvyyden määritys /1/

Hiiletyskarkaisun tavoitteena on saada kappaleeseen kova ja kulutusta kestävä pintakerros sekä luja ja sitkeä sisusta. Hiiletyskarkaistut osat sopivat hyvin kohteisiin, joissa vaaditaan hyvää kulutuskestävyyttä, väsymiskestävyyttä sekä sitkeyttä. Tällaisia osia ovat hammaspyörät ja -akselit, laakerit, vetoakselit. Hiiletysvyvyys on etäisyys pinnasta, jossa kovuus alittaa 550 HV (kuva 3).

#### 3.1 Hiiletys

Hiiletyskarkaisun ensimmäinen vaihe on hiiletys, jossa kappaleen pintaan tuodaan ylimääräistä hiiltä hehkuttamalla terästä austeniittialueella hiiltä luovuttavassa väliaineessa. Väliaine on yleensä kaasu. Kaikissa hiiletysmenetelmissä hiilen siirtyminen kappaleen pintaan tapahtuu kaasufaasin kautta.

Kappaleeseen siirtyvä hiilimäärä eli kappaleen pintahiilipitoisuus ja hiilen jakautuminen pinnasta sisustaan päin riippuvat lämpötilasta, väliaineen hiiletysaktiivisuudesta ja hiiletysajasta. Hiiletysaktiivisuudella eli hiilipotentialilla tarkoitetaan sitä hiilipitoisuutta, jolla seostamaton teräs on tasapainossa hiiltä luovuttavan väliaineen kanssa. Mitä korkeampi hiilipotentiali on, sitä korkeammat ovat sekä pintahiilipitoisuus että pintakerroksen hiilipitoisuus tietyllä etäisyydellä pinnasta. Tietyn ajan jälkeen pintahiilipitoisuus ei enää kasva ajan mukaan, mutta hiiltä siirtyy edelleen kappaleen matalampihiiliseen sisustaan, joten hiilettyneen kerroksen syvyys kasvaa.

Seostamattoman teräksen pintahiilipitoisuus on hiilipotentialin määritelmän mukaisesti yhtä suuri kuin hiiletysväliaineen hiilipotentiali. Seostettujen terästen pintahiilipitoisuus voi poiketa hiilipotentialin arvosta, koska hiilen aktiivisuus

teräksessä riippuu seostuksesta. Käytännössä tämä on huomioitava, kun hiiletetään eri teräslajeja samassa panoksessa. Seostuksen vaikutusta on mahdollista arvioida laskukaavojen avulla. Käytännössä hiiletysprosessia on mitattava, jotta ohjelmat ja tulokset saadaan toimimaan halutusti. Yleisimmin käytetyt laskentakaavat ovat Neumannin, Gunnarsonin ja Sauer / Grabken kaavat. /1/

### Gunnarson

$$Lg (\%C_c / C\%) = 0,055*\%Si - 0,013*\%Mn - 0,040*\%Cr + 0,014*\%Ni - 0,013*\%Mo$$

### Neumann

$$Lg (\%C_c / C\%) = 0,062*\%Si - 0,016*\%Mn - 0,057*\%Cr + 0,014*\%Ni - 0,015*\%Mo$$

### Sauer / Grabke

$$Lg (\%C_c / C\%) = 0,075*\%Si - 0,01*\%Mn - 0,04*\%Cr + 0,02*\%Ni - 0,01*\%Mo$$

missä %C<sub>c</sub> = seostamattoman teräksen pintahiilipitoisuus

%C = seostetun teräksen pintahiilipitoisuus

%Si = teräksen piipitoisuus painoprosentteina jne.

Neumann antaa suurimman arvon seostustekijälle. Sauer/Grabken kaava vastaa mitattuja arvoja, kun käsitellään tavallisimpia hiiletysteräksiä (taulukko 1).

**Taulukko 1** Eri teräksille lasketut seostuskertoimet / 4 /

Steel type	Neumann	Gunnarson	Sauer/Grabke
	calculated	calculated	measured
CK 15	0,966	0,967	0,94
20 Cr 4	1,130	1,081	1,00
16 MnCr 5	1,360	1,091	1,05
20 MnCr 5	1,155	1,100	1,06
20 MoCr 4	1,064	1,039	1,01
22 CrMo 3 5	1,139	1,092	1,05
21 NiCrMo 2	1,046	1,021	0,98
15 CrNi 6	1,123	1,062	1,02
17 CrNiMo 2	1,132	1,070	1,01

Seostuskertoimia käytetään apuna, kun tehdään ja lasketaan hiiletysohjelmia eri teräksille. Kaava kertoo, minkä hiilipitoisuuden kappale saavuttaa tietyssä potentiaalissa. Käytännössä uudet ohjausjärjestelmät laskevat kaavan avulla arvot ja simuloivat graafisesti käyttäjälle oletetun lopputuloksen. Ohjelmien hienosäätö tehdään todellisista mitatuista hiilipitoisuuksista kappaleesta mitattuna.

Kappaleen ominaisuudet riippuvat pintahiilipitoisuuden lisäksi hiiletyskerroksen syvyydestä. Hiiletyskerroksen syvyydeksi on määritelty se etäisyys pinnasta, jossa hiilipitoisuus on 0.3 %. Käytännössä tämä hiilipitoisuuden mittaaminen tehdään spektrometrin avulla. Standardin mukaan hiiletysvyvyys on se etäisyys pinnasta, jossa kovuus alittaa 550 HV1 (kuva 3). Näiden kahden eri määritelmän tulisi luonnollisesti toteutua tuotantokappaleissa. Hammaspyörien hiiletysvyvyys määritellään suunnittelussa lujuuslaskennan yhteydessä. Haluttu hiiletysvyvyys on jokin kerroin kertaa hampaan moduuli. Esim. 0,3\*moduuli, jolloin hammaskoolle moduuli 3 tulisi hiiletysvyvydeksi 0.9 mm.

### 3.1.1 Lämpötilan vaikutus hiiletysessä

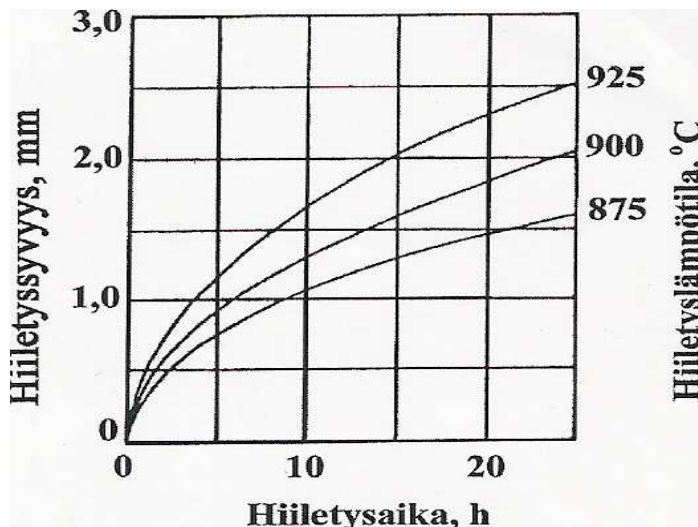
Hiiletysvyvyyteen vaikuttavat pääasiassa hiilipotentiali, hiiletyslämpötila ja –aika sekä hiiletettävän teräksen hiilipitoisuus. Hiiletysajan ja hiiletysvyvyyden välistä riippuvuutta voidaan laskea likimäärin kaavalla:

$$DC = K \sqrt{t}$$

jossa DC = Hiiletysvyvyys  
 K = Hiilipotentialista, lämpötilasta ja teräksestä riippuva kerroin  
 t = Hiiletysaika

Hiiletyslämpötila vaikuttaa hiiletysvyvyyteen voimakkaasti. Samoissa olosuhteissa eri lämpötiloilla hiiletetty panos saattaa saada jopa 50 % syvemmän hiiletysvyvyyden (taulukko 2).

**Taulukko 2** Lämpötilan vaikutus hiiletysvyvyyteen /1/



Hiiletyslämpötilan nostaminen näyttää erittäin mielenkiintoiselta, koska sillä on suora vaikutus käyttökustannuksiin ja hiiletysaikoihin. Rajat asettaa hiiletysteräksen rakeenkasvu. Raekoon kasvaminen teräksessä romahduttaa lujuusarvot. Seostettujen hiiletysterästen rakeenkasvu alkaa lämpötila-alueella 925...950 °C. Muita korkeampia hiiletyslämpötiloja rajoittavia tekijöitä ovat uunilaitteiden kestävyys, vaikeudet hiilipotentialin säädössä ja hiiletysvyödyden hallinnassa.

### 3.1.2 Kaasutusmenetelmät

Kaasuhiiletys jaotellaan kaasun valmistustavan mukaan: endoterminen, tyypipohjainen ja tiputusmenetelmä sekä suorakaasutusmenetelmä. Endotermissä menetelmässä kaasutus on kaksivaiheinen. Hiiletysuuniin syötetään endokaasua ja hiililähteenä toimivaa rikastavaa kaasua. Endokaasu tehdään erillisessä kaasugeneraattorissa (kuva 5).



**Kuva 5** Kaasugeneraattori /3/

Kaasugeneraattorin käyttölämpötila on noin 1000 °C. Kaasu syntyy kun annetaan ilman ja esim. propaanin reagoita keskenään tässä lämpötilassa. Reaktiossa hiilivetyketjut pilkkoutuvat pienemmiksi. Syntynyt kantajakaasuseos sisältää esimerkiksi 45 % N<sub>2</sub> (typpeä), 23 % CO (häkää) ja 32 % H<sub>2</sub> (vetyä). Reaktion jälkeen syntynyt kaasuseos jäähdytetään niin nopeasti, että kaasu säilyttää polttolämpötilaa vastaavan tasapainokoostumuksensa.

Kantajakaasun hiilipotentiaali on noin 0,3 %. Hiiletyksessä kaasun hiilipotentiaalia korotetaan oikealle tasolle lisäämällä sopiva määrä propaania.

Typpipohjaisessa menetelmässä hiiletysuuniin syötetään suoraan typpeä ja metanolia. Seos muodostaa uunissa endotermistä kantajakaasua vastaavan kaasuseoksen. Hiilipotentiaalin nosto halutulle tasolle tehdään samalla tavalla kuin endotermisessä kantajakaasumenetelmässä.

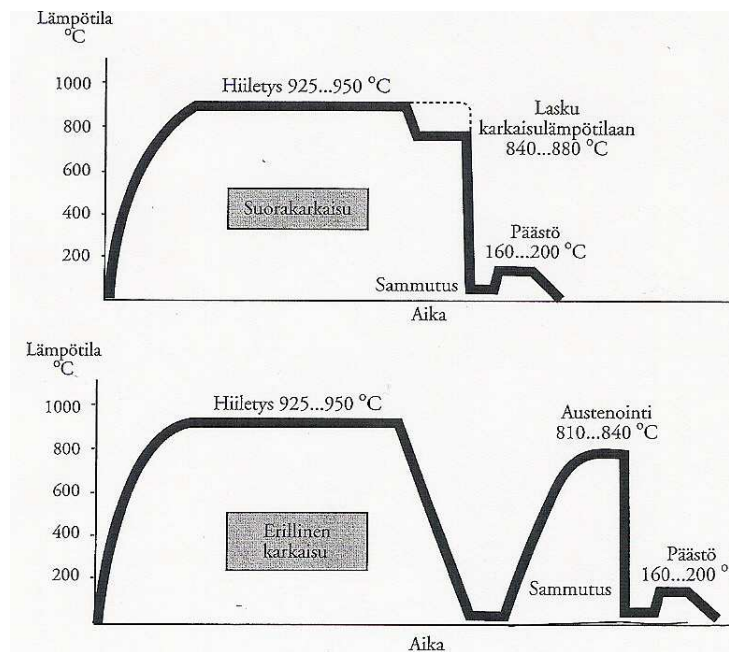
Tiputusmenetelmässä kuumaan hiiletysuuniin pumpataan nestemäinen metanolin ja etyyliasettiin tai asetonin seos. Neste hajoaa ja höyrystyy hiilettäväksi kaasuseokseksi. Myös muita hiilivetyneiteitä voidaan käyttää, esimerkiksi isopropanolia. Hiilipotentiaalia säädetään muuttamalla tiputettavan hiilivetyseoksen seossuhdetta.

Kaasuatmosfäärin hiilipotentiaalia mitataan uuneissa kastepiste-, hiilidioksidi- tai happipotentiaalimittausten avulla. Näiden mittaustulosten avulla säädetään uuniin hiilipotentiaalia.

Suorakaasutusmenetelmässä uuniin syötetään ilman ja kaasumaisen hiilivedyn seos. Uunissa muodostuva kaasuseos ei ole täysin tasapainossa, joten kaasun hiilipotentiaalia ei voi tarkasti mitata. Kaasuatmosfäärin hiilipotentiaalin oikeellisuus tulee varmistaa kokeellisesti prosessin aikana kaasuanalysointorin avulla. Hiilipotentiaalia säädetään lisäämällä uuniin syötettävän ilman määrää.

### 3.2 Karkaisu

Hiiletetyt kappaleet karkaistaan suoraan hiiletyslämpötilasta tai erillisen kuumennuksen jälkeen tavallisesti öljyyn (kuva 6).



**Kuva 6** Suora-ja erilliskarkaisu /1/

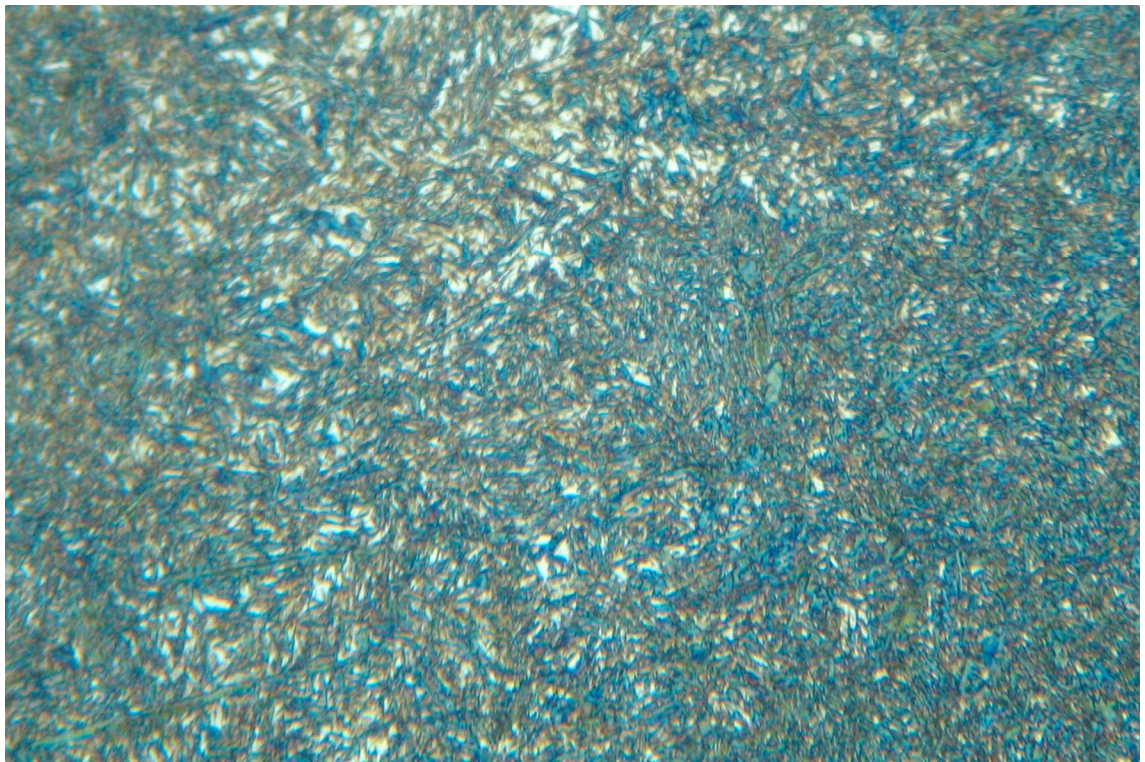
Suorakarkaisu on suositumpi taloudellisuutensa vuoksi. Vetelyt ja muodonmuutokset ovat myös paremmin hallittavissa.

Pienet kappaleet voidaan karkaista suoraan hiiletyslämpötilasta, mutta suuret monimutkaiset kappaleet tulisi jäädyttää noin 850 °C lämpötilaan ennen sammutusta. Pinnan ja sisustan lämpötilaerot tulevat tällöin pienemmiksi ja repeilyn sekä vääntelyn vaara vähenee. Lämpötilaa laskettaessa on huomioitava se, että kappaleen pintaan ei saa syntyä haitallisia raerajakarbideja.

Suorakarkaisu sopii hyvin nykyisille hienorakeisille teräksille. Uunilaitteistolta vaaditaan tarkkaa prosessin toistoa, ja tätä tuleekin jatkuvasti seurata.

Erillistä karkaisua käytetään yleensä silloin, kun hiiletetty pinta on poistettava kappaleen jostakin kohtaa ennen karkaisua. Toinen käyttösyö voi olla se, että pintahiilipitoisuutta ei voida hiilettyksen aikana säätää. Erillisessä karkaisussa hiiletetty panos jäädytetään huonelämpötilaan ja tämän jälkeen kuumennetaan takaisin ylös lämpötila-alueelle 810 - 840 °C karkaisua varten.

Sammutuksen jälkeen kappaleiden pintakerros on rakenteeltaan pääosin martensiittia. Lisäksi voi olla jäännösausteniittia tai karbidia, riippuen hiilipitoisuudesta ja karkaisulämpötilasta (kuva 7). Karbideja ei sallita hammaspyörän mikrorakenteessa.



**Kuva 7** Teräksen mikrorakennetta, martensiittia ja vaaleaa jäännösausteniittia (suurennos 750 x ) /3/

### 3.3 Sammutus

Hiiletetty panos sammutetaan öljyyn karkaisulämpötilasta 840 - 880 °C.

Kammionuunissa öljyallas sijaitsee uunin etukammion alapuolella.

Panos siirretään ketjujen avulla hiiletyskammiosta etukammioon ja lasketaan tämän jälkeen panoshissillä öljyaltaseen. Öljyaltaseen on sekoituspotkureita, joiden nopeutta ja sekoitussuuntaa voidaan säätää halutuksi.

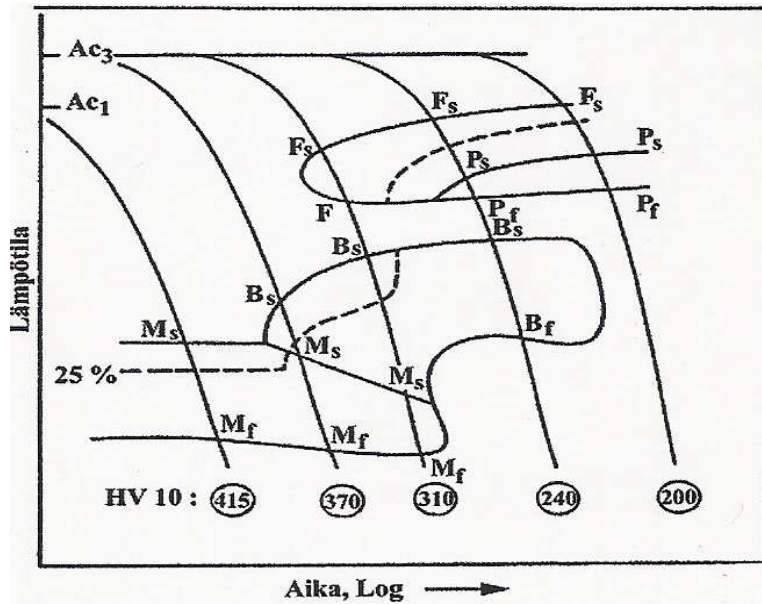
Panos on koko sammutusprosessin ajan kaasuatmosfäärissä eikä näin ollen pääse reagoimaan hapen kanssa. Tästä syystä kammionuunissa karkaistut kappaleet ovat puhtaampia kuin esimerkiksi kuoppauunissa karkaistut kappaleet.

Sammutuksen tarkoituksena on estää austeniitin hajaantuminen ferriitiksi, perliitiksi tai bainiitiksi. Perliittireaktio tapahtuu lämpötila-alueella noin 500 °C ja bainiittireaktio alueella 250 – 400 °C. Kun panos jäähtyy näiden alueiden alapuolelle ilman austeniitin hajaantumista, saadaan lopputulokseksi haluttu martensiittinen rakenne. Seostamattomien terästen karkaisussa tarvitaan suuria jäähtymisnopeuksia, jotka voidaan aikaansaada vedellä tai vesiliuoksilla. Seosteräkset karkenevat helpommin ja niiden sammutusaineena käytetään öljy- tai kaasusammutusta. Sammutusväliaineiden tehokkuutta kuvataan ns. Grossmanin H-arvolla. Mitä suurempi H-arvo on, sitä tehokkaampi on myös sammutus (taulukko 3).

**Taulukko 3** Grossmanin H-arvo /1/

Sekoitus	Sammutustehon H-arvo eri sammutusväliaineilla		
	Öljy	Vesi	Suolakylpy
ei sekoitusta	0,25...0,30	0,9...1,0	2,0
vähäinen	0,30...0,35	1,0...1,1	2,0...2,2
kohtalainen	0,35...0,40	1,2...1,3	
hyvä	0,4...0,5	1,4...1,5	
voimakas	0,5...0,8	1,6...2,0	
erittäin voimakas	0,8...1,1	4,0	

Sammutusta analysoitaessa ja suunniteltaessa on jatkuvan jäähtymisen S-käyrä tärkeä apuväline. S-käyrästä saadaan tietoa missä lämpötilassa mikäkin faasimuutos tapahtuu. Lisäksi saadaan tietoa, millaisella jäähtymisnopeudella päästään haluttuun rakenteeseen (kuva 8).



**Kuva 8** Esimerkki S-käyrästä /1/

Jäähtymisnopeuden lisäksi kuvasta nähdään myös saatavat kovuudet. Jokaista jäähtymisnopeutta vastaa tietty rakenne ja myös määrätty kovuus. Tämä pätee myös kääntäen. Jokaista rakennetta vastaa tietty jäähtymisnopeus. Rakenteen ja kovuuden perusteella voidaan siis jäljittää varsin tarkasti jäähtymisen kulku, jos jatkuvan jäähtymisen käyrästä käsitellylle teräkselle on käytettävissä.

Kappaleen jäähtyminen sammutuksessa riippuu kappalekoosta, sammutusaineen ominaisuuksista ja lämmönsiirrosta kappaleen ja sammutusväliaineen välissä sekä sammutusaineen määrästä ja virtausnopeudesta. Sammutusnopeuteen tietyssä sammutusväliaineessa ja -altaassa vaikuttavat:

- sammutukseen käytetyn väliaineen sekoitus
- teräksen ominaislämpö ja lämmönjohtavuus
- käsiteltävän kappaleen muoto ja koko
- käsiteltävän kappaleen pinnanlaatu
- panostustapa

Käytännössä päivittäisessä työssä karkaisimon henkilöstön tulee kiinnittää huomiota oikeaan panostustapaan. Sillä on suuri vaikutus jäähtymiseen ja karkaisuvääntymiin. Nämä vaikuttavat puolestaan suoraan kappaleiden laatutasoon.

### 3.4 Päästö

Päästön tarkoituksena on työkappaleen rakenteen sitkeyden parantaminen ja karkaisujännitysten vähentäminen. Sammutuksen jälkeen rakenne on kovaa martensiittia ja sisältää mahdollisesti myös jäännösausteniittia. Päästö siirtää karkaisussa pintaan syntyneitä puristusjännityksen huippuarvoja kohti kappaleen sisustaa. Sitkeyden parantuessa vastaavasti kappaleen kovuus laskee.



Hiiletyskarkaisun jälkeen kappaleet päästetään noin 150 - 200 °C lämpötilassa erillisellä päästöuunilla. Pitoaika vaihtelee kappalekoon mukaan 2 ja 10 tunnin välillä. Päästö laskee hiiletetyn pinnan kulumiskestävyyttä ja lisää iskusitkeyttä esimerkiksi hammaspyörien hampaissa. Päästön välttämättömyys riippuu käyttökohteesta. Päästö on haitallinen, jos ajatellaan pelkkää taivutusväsymiskestoa. Hammaspyörät tarvitsevat erityisesti tasapainoa taivutuslujuuden, kuoppautumisen ja iskusitkeyden suhteen. Taivutusjännityksen alaiset kappaleet eivät tarvitse päästöä, kun taas vierivän kosketuksen alaiset kappaleet on päästettävä.

## 4 LÄMPÖTILAN MITTAUS

Lämpökäsittelyn ehdottomasti tärkein muuttuja on lämpötila. Hiiletyskarkaisun lämpötilansäädön tarkoituksena on saavuttaa mahdollisimman hyvin hallittu lämpötila uunin hiiletyskammioon. Ilman tarkkaa lämpötilansäätöä ei hiiletyskarkaisussa päästä haluttuihin tuloksiin. Noin 5..10 asteen lämpötilaerot eivät yleensä johda merkittävään hajontaan lämpökäsittelyn tuloksissa. Suuremmat poikkeamat näkyvät virheinä mittaustuloksissa.

Lämpökäsittelylaitteistojen monimutkaistuminen, automaation lisääntyminen, tuotantotehon kasvu ja tuotteiden laatuksien tiukentuminen ovat aiheuttaneet sen, että mittasuureiden oikeellisuutta on valvottava hyvin tarkasti. Hienoinakin automaattinen ohjausjärjestelmä on aivan avuton, jos siihen tulee virheellinen mittasignaali.

Jotta voidaan varmistua lämpötilan oikeellisuudesta, tulee ottaa huomioon mittaustulosten tarkkuus ja varmuus. Hiiletyskarkaisun laatuun vaikuttavat:

- uunin lämpötila, lämmityksen nopeus, lämmön tasaisuus ja pitoaika
- hiilipotentiali
- uunissa tapahtuvat mahdolliset kemialliset reaktiot
- jäähtymislämpötila, jäähtymisen nopeus ja pitoaika
- päästö.

Uunin lämpötilasta saadaan mahdollisimman luotettavaa tietoa, kun sitä tarkkaillaan uunin omalla mittalaitteella ja termoelementeillä. Uunin mittalaitetta tarkistettaessa kiinnitetään huomiota mittalaitteen tarkkuuteen, lineaarisuuteen, herkkyyteen ja nollapisteeseen. Tarkistusmittaukset suoritetaan kannettavan, digitaalinäytöllä varustetun elektronisen mittalaitteen avulla ( kuva 9).

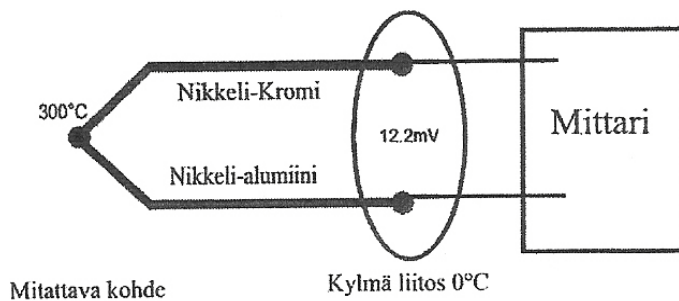


**Kuva 9** Beamex-kalibraattori /3/

Beamex-kalibraattorilla voidaan vertailla ja mitata uunin lämpötilaa erillisellä vertailutermostolementilla sekä uunin oman termoelementin lähettämien mV-arvojen kanssa. Kannettava mittalaite kalibroidaan yleensä kerran vuodessa maahantuojan huollossa tai VTT:n laboratoriossa. Kalibrointijaksot kirjataan seurantarekisteriin.

#### 4.1 Termoelementit

Termoelementin toiminta perustuu Seebeckin ilmiöön: siinä kahden eri metallin liitoksessa syntyy jännite, joka on riippuvainen lämpötilasta. Tämä pätee miltei kaikkiin metalleihin, mutta vain muutamia standardityyppejä käytetään, koska niiden jännitteet ovat stabiileja ja ne antavat suhteellisen suuria jännitteitä lämpötilan funktiona. Kuvassa 10 on K-tyyppin termopari, joka on eniten käytetty termopariyhdistelmä.



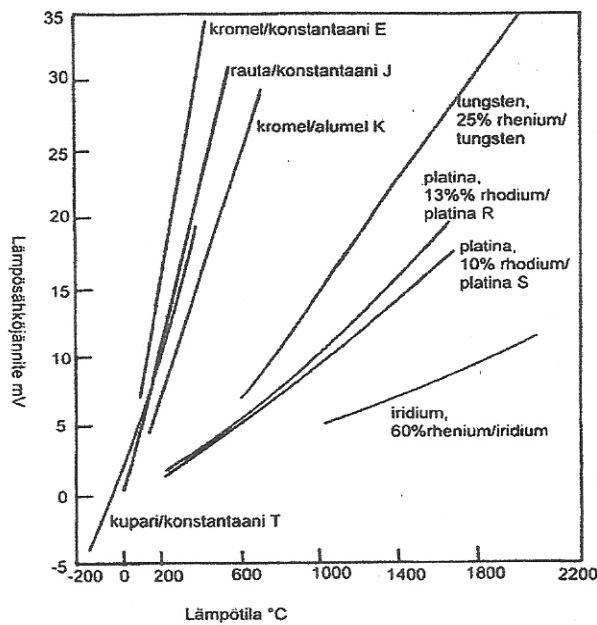
**Kuva 10** K-tyyppin termoelementti /1/

Mittauskohdan lämpötila saadaan selville mittaamalla lämpötilaeron aiheuttama elektromotorinen voima millivolttimittarilla. Tähän lukemaan lisätään referenssikohdan ja ko. termoelementtityypille laaditun emv-lämpötilataulukon nollakohdan (lämpötila, jossa elektromotorinen voima on nolla) välinen jännite-ero. Lasketun summan avulla saadaan mittauskohdan lämpötila. Käytännössä mittaaminen ei ole näin monimutkaista, vaan lämpötilalukema on suoraan luettavissa kalibraattorin näytöltä. Taulukossa 4 on tavallisimmat termoparit.

**Taulukko 4** Termoparit ja niiden käyttölämpötilat /1/

ISA-koodi	Termopari	Korkein jatkuva käyttölämpötila	Korkein hetkellinen lämpötila
T	Kupari-konstantaani (60 % Cu + 40 % Ni)	400 °C	530 °C
J	Rauta-konstantaani (60 % Cu + 40 % Ni)	700 °C	980 °C
K	Chromel (90 % Ni + 10 % Cr) – alumel (94 % Ni + 2 % Al + 3 % Mn + 1 % Si) (kutsutaan myös CrNi-Ni tai CrNi-NiAl - termoelementiksi)	1000 °C	1260 °C
N	Nicrosil (Ni, Cr, Si, Mg) / Nisil (Ni, Si, Mg)	1200 °C	1300 °C
R	10 platina-rhodium (90 % Pt + 10 % Rh) – platina	1400 °C	1650 °C
S	13 platina-rhodium (87 % Pt + 30 % Rh) – platina (94 % Pt + 10 % Cr)	1400 °C	1650 °C
	rhodium 18 (70 % Pt + 30 Rh) – platina (94 % Pt + 6 % Rh)	1500 °C	1800 °C
E	Konstantaani (60 % Cu + 40 % Ni) – chromel (90 % Ni + 10 %	800 °C	1000 °C

Termoparin antama jännite ei ole suoraan verrannollinen lämpötilaan vaan riippuvuus on epälineaarinen. Uusissa kannettavissa mittalaitteissa käytetään digitaalista linearisointia, jolloin termoelementin taulukko on tallennettu mittalaitteen muistiin. Tällä tavoin saavutetaan huomattava tarkkuuden parannus mittaustuloksissa. Kuvassa 11 nähdään eri termoelementtien tuottamat jännitteet.



**Kuva 11** Termoelementtien termojännitteet /1/

Chromel-alumel-elementti (k-tyyppi) kestää hyvin korkeita lämpötiloja, jos atmosfääri ei ole pelkistävä. Vety, rikki ja hiilidioksidi tuhoavat sen pinnan yli 1000 °C lämpötiloissa. Tästä syystä termoelementti on suojattu uunin sisällä suojaputkella. Taulukossa 5 on esitetty eri käyttötarkoituksiin sopivia suojaputkia.

**Taulukko 5** Termoelementtien suojaputkimateriaalit /1/

Käyttöympäristö	Lämpötila °C	Putkimateriaali
Päästö, ilma	< 700	X10CrAl24
Päästö, öljy	< 300	X10CrAl24
Päästö, suola	< 700	X10CrAl24
Hehkutus, karkaisu	< 1100	X10CrAl24, Kanthal D
Kaasuhiiletys	< 1100	X10CrAl24, Inconel
Korkealämpötila	< 1200	Inconel, Kanthal D
Korkealämpötila	< 1350	Kanthal A-1
Korkealämpötila	< 1600	Keraami
Etappikarkaisu	< 900	X10CrAl24, Inconel
Neutraali suolakylpy	< 1100	X10CrAl24, Inconel
Pikateräskarkaisu, suolakylpy	< 1300	X10CrAl24
Lyijy- tai tinakylpy	< 900	X10CrAl24
Sinkkikylpy	< 485	Niukkahiilinen teräs (0,04 % C)
Sinkkikylpy	485...600	Piikarbidilla tai grafiitilla seostettu tai emaloitu teräs
Alumiinikylpy	< 700	Piinitridi

Suojaputken seinämä sekä sen halkaisija eivät saa olla liian suuria, etteivät ne hidasta lämpötilan mittausta. Suoralämmitteisissä kaasu-uuneissa antaa paksuseinämainen suojaputki hitaamman mittauksen johdosta usein paremman lämpötilan tasaisuuden uunissa. Keraaminen suojaputki on kuumennettava mittauslämpötilaan hitaasti, sillä muuten se saattaa murtua. Kuvassa 12 termoelementti suojaputkineen.



**Kuva 12** Uuniin asennettava termoelementti. /3/

Termoelementin referenssipään täytyy olla tasaisessa, mittalaitteelle kalibroidussa lämpötilassa. Usein uunin lähettyvillä näin ei ole, siksi elementin referenssipää täytyy viedä kauemmaksi uunista. Termoelementtiä ei rakenneta näin pitkäksi, vaan sitä jatketaan kompensatiojohdolla. Kompensatiojohdoilla on samat termomekaaniset ominaisuudet kuin ko. termoelementillä alle 200 °C lämpötiloissa. Kutakin termoelementtityyppiä varten on omat kompensatiojohtonsa. Kompensatiojohdon napaisuus on merkittävä tekijä mittauksessa. Mikäli johto kytketään väärin liitäntäpäässä, on kytkentä tehtävä väärin päin myös mittalaitteen päässä. Mahdollisesti syntyvä virhe on johdon päiden lämpötilaero. Taulukossa 6 on esitetty mittausvirheitä eri pidennysjohdoille, kun napaisuus on vaihtunut.

**Taulukko 6** Väärän napaisuuden aiheuttama mittavirhe /1/

Termopari	Pidennysjohto	Napaisuus	Mittausvirhe °C	Mittauslämpötila °C
Fe-CuNi	Fe-CuNi	Oikein	-4,5...+4,5	600
		Väärin	-173...-163	
	NiCr-NiAl	Oikein	-41...-36	
		Väärin	-155...-145	
	PtRh 10 % - Pt	Oikein	-8...-78	
		Väärin	-107...-97	
NiCr-NiAl	Fe-CuNi	Oikein	-2...+14	1000
		Väärin	-218...-202	
	NiCr-NiAl	Oikein	-7,5...+7,5	
		Väärin	-191...-175	
	PtRh 10 % - Pt	Oikein	-98...-82	
		Väärin	-125...-109	
PtRh 10 % - Pt	Fe-CuNi	Oikein	+300...+314	1200
		Väärin	-440...-426	
	NiCr-NiAl	Oikein	+214...+228	
		Väärin	-347...-333	
	PtRh 10 % - Pt	Oikein	-7...+7	
		Väärin	-105...-91	

Myös oikean kompensatiojohdon johtimen valinta ja sen napaisuuden tunteminen on tärkeää , kuten taulukosta 7 nähdään.

**Taulukko 7** Väärän kompensatiojohdinten aiheuttama mittavirhe /1/

Termoelementti	Kompensatiojohdin	Napaisuus	Mittausvirhe °C	Lämpötila-alue °C
Fe-konstantaani	NiCr-Ni	Oikein	-11...-9	300...800
	PtRh-Pt	Oikein	-42...-35	
NiCr-Ni	Fe-konstantaani	Oikein	+15...+17	500...1100
	PtRh-Pt	Oikein	-40...-44	
PtRh-Pt	Fe-konstantaani	Oikein	+222...+197	600...1400
	NiCr-Ni	Oikein	+164...+144	
Fe-konstantaani	NiCr-Ni	Väärin	-83...-71	300...800
	PtRh-Pt	Väärin	-53...-45	
NiCr-Ni	Fe-konstantaani	Väärin	-109...-119	500...1100
	PtRh-Pt	Väärin	-54...-60	
PtRh-Pt	Fe-konstantaani	Väärin	-305...-244	600...1400
	NiCr-Ni	Väärin	-237...-193	

Termoparin herkkyys heikentyy ajan myötä termoelementin ryömimisestä johtuen.

Termoelementin ryömimiseen vaikuttavat termoelementtityypin lisäksi myös käyttölämpötila, käyttöaika sekä johdinlankojen halkaisija. Anturimateriaalien erilaiset lämpölaajenemiskertoimet, korrosio ja karkea käsittely aiheuttavat vastusmuutoksia ja sitä kautta mittausvirheitä lämpötilamittaukseen.

Merkittävän virhelähteen voi aiheuttaa lämmön siirtyminen anturijohtimia pitkin.

Virhe syntyy, kun johtimien kulkutiellä on erilainen lämpötila kuin mittauskohteessa.

Pintalämpötilaa mitattaessa on otettava huomioon lämpösäteilyn aiheuttamat mahdolliset virheet.

Kaasun lämpötilaa mitattaessa on otettava huomioon anturin suojaputken vaikutus lämpötilaan. Myös anturin ja ympäristön välinen lämpösäteily on huomioitava virhelähteenä. Säteilysuojat vähentävät usein mittausvirheitä.

## 4.2 Määräaikaistarkastukset

Lämpötilan tarkka mittaus on hiiletyskarkaisun onnistumisen kannalta erittäin tärkeää. Lämpötilan on oltava vakio määrätyissä rajoissa. Lisäksi on tiedettävä varmasti, vastaako mitattu lämpötila todellisuutta. Termoelementtien tarkistus on tärkeää, koska ne saattavat alkaa käyttäjän huomaamatta liikkua. Tätä mittatuloksen muutosta kutsutaan elementin ryömimiseksi.

Laadukkaan hiiletyskarkaisun suorittaminen edellyttää mitta- ja säätölaitteiden määräaikaistarkastuksia, jotka kirjataan seurantakaavakkeisiin. Tulokset arkistoidaan ja säilytetään vähintään 3 vuotta.

### 4.2.1 Käyttötermoelementin tarkastus

Käyttötermoelementin tarkastus perustuu vertailevaan mittaukseen. Tarkistus suoritetaan vertailu-termoelementillä (tarkastusermoelementti), joka luotettavuuden säilymiseksi käytetään vain tarkistusmittauksiin. Vertailuelementin on oltava samanlaatuinen kuin uunissa oleva käyttötermoelementti. Määräaikaistarkastusten suositusväli on kerrottu taulukossa 8.

**Taulukko 8** Määräaikaistarkistusväli /2/

Uunityyppi	Termoelementtitarkistus		Mitta- ja säätölaite tarkistus Tarkistusväli
	Tarkistusväli	Termoelementtivaihto <sup>2)</sup>	
Universaaliuunit (suoja-kaasu)	1 kk	6 kk	6 kk
Suoja-kaasukehittimet	1 kk	3 kk	6 kk
Kammiouunit (ilma)	3 kk	1 vuosi	1 vuosi
Kuoppauunit (suoja-kaasu)	1 kk	6 kk	6 kk
Päästöuunit	3 kk	1 vuosi	6 kk
Esikuumennusuunit (ilma)	6 kk	1 vuosi	1 vuosi
Lämpökaapit	6 kk	—	—
Suolakylvyt 900°C	1 kk	3 kk	6 kk
Pikateräskylvyt	kerran vuorossa	1 kk	1 kk
Vaihekarkaisukylvyt	6 kk	1 vuosi	1 vuosi
Tyhjöuunit	1 kk	3 kk,	6 kk
		1 vuosi <sup>1)</sup>	—
Öljyaltaat	6 kk	—	—
Pesualtaat	6 kk	—	—
Tripesualtaat <sup>3)</sup>	kerran vuorossa	—	—
Höyrystimet	6 kk	—	—

1) 1 vuosi tyhjöpäästöuunilla.

2) Termoelementin vaihto huolimatta tarkastustuloksesta.

3) Kts. tripesulaitteen käyttöohjetta.

Vertailutermostoelementti työnnetään uunin sisään omasta läpiviennistään. Uunirakenne on yleensä sellainen, että käyttötermostoelementin vieressä on toinen läpivienti uuniin. Jos läpivientä ei ole, pitää uunivalmistajaa pyytää sellainen tekemään vertailutermostoelementtiä varten. Vertailutermostoelementin kärki työnnetään samalle syvyydelle uunin sisään kuin käyttötermostoelementin kärki on. Vertailutermostoelementin ilmaisema lämpötila mitataan kannettavalla kalibraattorilla (potentiometrillä). Mittaustulos kirjataan ylös seuranta-akkeeseen (Liite 5). Sallittu poikkeama on  $\pm 1\%$  °C. Mikäli mittaustulos poikkeaa uunin omista mittauslaitteiden tuloksista, saattaa vika olla missä tahansa mittalaitteessa. Mittaamalla kalibraattorilla suoraan käyttötermostoelementin antama lämpötila voidaan päätellä, onko vika käyttötermostoelementissä vai jossakin muualla mittausketjussa. Toleranssin ylittävä käyttötermostoelementti vaihdetaan heti uuteen.

Vertailutermostoelementti on myös määräajoin tarkastettava. Tämä tarkastus perustuu myös vertailevaan mittaukseen. Mittausvertailu tehdään kalibrointitermostoelementin avulla. Kalibrointitermostoelementin tarkastaa riippumaton tarkastuslaitos. Kalibrointi tehdään kerran vuodessa. Tarkastustulokset kirjataan erilliseen seuranta-akkeeseen. Kalibrointielementin tarkkuusvaatimus on lämpötila-alueella 275-1200 °C  $\pm 0.38\%$  °C.

#### 4.2.2 Uunin mittalaitteiden tarkastus

##### **Käyttötermostoelementin ulostulosignaalin tarkastus**

Käyttötermostoelementti mitataan kannettavalla kalibraattorilla. Kompensaatiolangat kytketään suoraan käyttötermostoelementin liittimiin ja mitataan elementin antama jännite ja vastaava lämpötila. Käyttötermostoelementin liittimiin voidaan tehdä valmiiksi erilliset pikaliittimet helpottamaan tarkastusmittausta. Kalibraattori kytketään suoraan pikaliittimiin, jolloin ei tarvitse alkaa irroittaa kytkentäjohtoja. Mittaustulokset kirjataan seuranta-akkeeseen (Liite 5).

##### **Uunin mittalaitteen tarkastus**

Kalibraattori kytketään suoraan käyttötermostoelementin liittimiin kiinni kuten edellä. Termostoelementin toisesta navasta irroitetaan toinen kytkentäjohtoista. Kalibraattorilla syötetään haluttu mV-jännite uunin mittalaitteeseen. Kalibraattorin syöttämää lämpötilaa (jännitettä) verrataan uunin mittalaitteen näyttämään lämpötilaan. Lämpötilaero ei saa ylittää 3 °C. Jos ero on suurempi, korjataan lämpötilansäätäjää takaisin oikealle alueelle. Mittaustulokset kirjataan seuranta-akkeeseen (Liite 7).

##### **Uunin mittalaitteen lineaarisuus**

Kytkentä tehdään samalla tavalla kuten edellä tehtiin. Uunin mittalaitteeseen syötetään kolmea eri lämpötilaa vastaavat mV-jännitteet. Näitä lämpötiloja lähestytään sekä ylhäältä sekä alhaalta päin. Uunin mittalaitteen tulee vakiintua 3 °C:n tarkkuudelle asetetusta tavoitelämpötilasta, eivätkä saavutetut lämpötilat ylhäältä tai alhaalta suoraan tavoitteeseen tullessa saa erota toisistaan yli 0,5 °C. Mittaustulokset kirjataan seuranta-akkeeseen (Liite 7).



### 4.2.3 Lämpötilan tasaisuusmittaus

Hiiletyskarkaisu-uunien lämpötilan tasaisuutta on ajoittain mitattava. Uudet uunit mitatetaan vastaottotarkastuksen yhteydessä ja muiden uunien tasaisuus määrävälein. Mittaus tehdään myös, jos on syytä epäillä lämpötilan tasaisuutta. Termoelementtimittaukset täytyy tehdä ennen lämpötilan tasaisuuden mittausta. Tasaisuusmittauksen suositukset on kerrottu taulukossa 9.

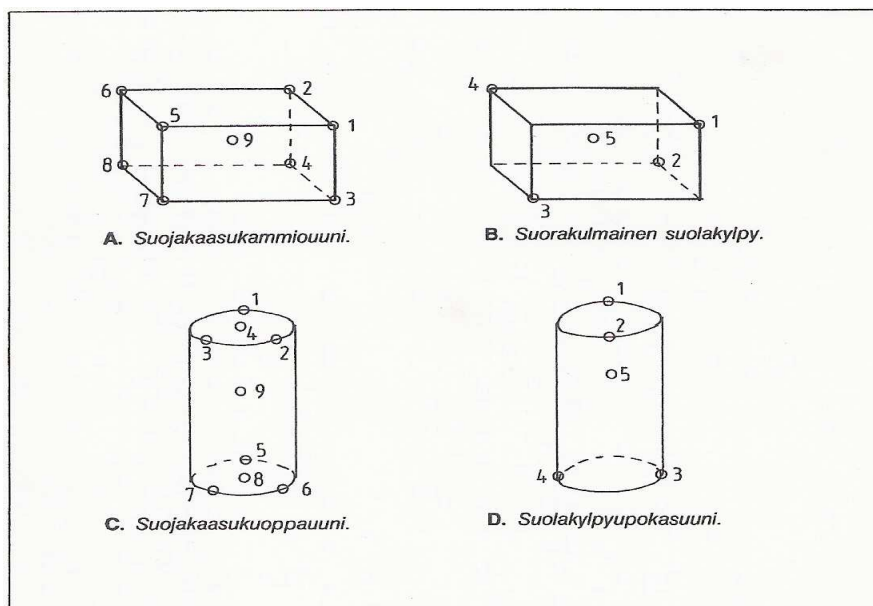
**Taulukko 9** Lämpötilan tasaisuusmittauksen suositus /2/

Uunityyppi	Sallittu poikkeama	Koestuslämpötilat	Mittausten määräajat
Universaaliuunit (suojakaasu)	10°C	575°C <sup>1)</sup> , 850°C, 950°C	1 vuosi
Kaasukehittimet	10°C	1000°C	1 vuosi
Kammiouunit (ilma)	10°C	800°C, 900°C	1 vuosi
Kuoppauunit (suojakaasu)	10°C	800°C, 950°C	1 vuosi
Päästöuunit	5°C	200°C, 55°C	1 vuosi
Esikuumennusuunit	15°C <sup>2)</sup>	400°C	1 vuosi
Suolakylpy, alle 900 °C	10°C	850°C	1 vuosi
Pikateräskylpy	5°C	1250°C	6 kk
Vaihekarkaisukylpy	10°C	180°C, 550°C	1 vuosi
Tyhjööuni	5°C	800°C, 1000°C 1200°C	6 kk
Tyhjööuni, päästö	5°C	550°C	6 kk

1) Jos uuneja käytetään hiililytetyksittelyyn, mitataan se 575°C.

2) Jos esikuumennusuunia käytetään päästöön on sallittu poikkeama 5°C.

Karkaisu-uunin lämpötilan tasaisuusmittaus tehdään hiiletyskammiotilassa. Uunin tarkastuksessa mitattavat lämpötilat valitaan läheltä todellisia käyttölämpötiloja. Lämpötilan tasaisuusmittauksessa panostetaan uuni normaalilla tuotantopanoksella tai vastaavanlaisella romupanoksella. Tärkeää on, että kammiotilassa on lämmitettävää massa, jolloin tilanne vastaa todellista hiiletystilannetta. Mittaavat termoelementit sijoitetaan kuvan 13 mukaisesti.



**Kuva 13** Termoelementtien sijoitus lämpötilan tasaisuusmittauksessa /2/

Uunia ei saa kuumentaa mittauslämpötilan ohi, vaan sen on annettava rauhassa vakiintua asetusarvoonsa. Suositeltavaa on pitää lämpötilaa tasaisena useita tunteja, jopa yön yli, ennen kuin tulokset mitataan.

Termoelementtien tulee olla riittävän pitkiä, jotta ne saadaan tuotua panostilasta ulos saakka. Uunin hiiletystilan seinässä on läpivienti, josta termoelementit saadaan ulos. Reikäkohtaan laitetaan eristevillaa, jotta lämpötilahäviö olisi pieni. Vähemmän suositeltavaa on tuoda termoelementit välikammion kautta ulos. Tällöin sisäovi ei mene kokonaan kiinni ja oven alareunaan jää 3 - 5 mm rako. Ilmeistä on, että lähinnä sisäovea olevat termoelementit antaisivat väärää mittaustietoa. Kuvassa 14 termoelementit aseteltuna panoskoriin.



**Kuva 14** Termoelementit mittauspisteissä /3/



**Kuva 15** Termoelementtien läpivienti uuniin /3 /

Termoelementit mitataan kalibraattorin avulla yksi kerrallaan ja tulokset kirjataan muistiin (liite 2). Mittauksessa havaitut lämpötilapoikkeamat eivät saa ylittää annettua toleranssia. Mittauspiste, joka poikkeaa eniten asetusarvosta, määrää uunin lämpötilapoikkeaman. Jos toleranssi ei täyty, pitää lämpötilansäätäjään asettaa korjausarvo lämpötilalle. Korjauksen jälkeen mittaus tehdään uudelleen, kunnes annettu toleranssi täyttyy.

## 5 SUOJAKAASUN MITTAUS JA SÄÄTÖ

Hiiletyskaasuatmosfääreissä mitataan useimmiten seuraavia parametrejä:

- lämpötila
- hiilidioksidipitoisuus CO<sub>2</sub>
- hiilimonoksidipitoisuus CO
- happipitoisuus.

Hiiletyskarkaisussa työkappale hiilettyy pääasiassa CO-kaasun ja teräspinnan välisten reaktioiden kautta. Tärkeimmät hiilettymistä kuvaavat reaktiot ovat:



Metaanin ja teräspinnan välinen reaktio



Tämä reaktio on käytännössä niin hidas, että sillä ei ole käytännössä suurta merkitystä. Kaavaa 2 ja 3 sitoo ns. vesikaasureaktio



Reaktiot 1, 2 ja 4 ovat hiiletettävän kappaleen pinnassa lähes tasapainossa. Reaktioiden 1 ja 2 tasapainosta määritetään kantajakaasumenetelmissä kaasun hiilipotentiali, jolla tarkoitetaan kaasun kanssa tasapainossa olevan seostamattoman teräksen hiilipitoisuutta. Mitä enemmän hiiletyskaasussa on hiilimonoksidia (CO), sitä suurempi on kaasun kanssa tasapainossa olevan teräspinnan hiilipitoisuus (teräkseen liunneen hiilen määrä C(Fe)).

Metaanin (CH<sub>4</sub>) hajoaminen on hidasta, eikä kappaleen pintahiilipitoisuutta voida siten reaktion 3 tasapainon mukaan määrittää.

Suorakaasutus- ja alipainehiiletysessä sekä useissa tiputushiiletysmenetelmissä reaktioilla 4 on merkitystä.

Reaktion 1 tasapainoa mitataan hiiletyskaasun kastepisteen avulla. Kaasun kastepisteellä tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa kaasussa oleva kosteus tiivistyy. Mitä korkeampi kaasun kastepiste on, sitä enemmän siinä on vettä.

Reaktion 2 tasapainoa mitataan hiiletyskaasun hiilidioksidipitoisuuden mukaan tavallisesti infrapunahiilidioksidimittarilla.

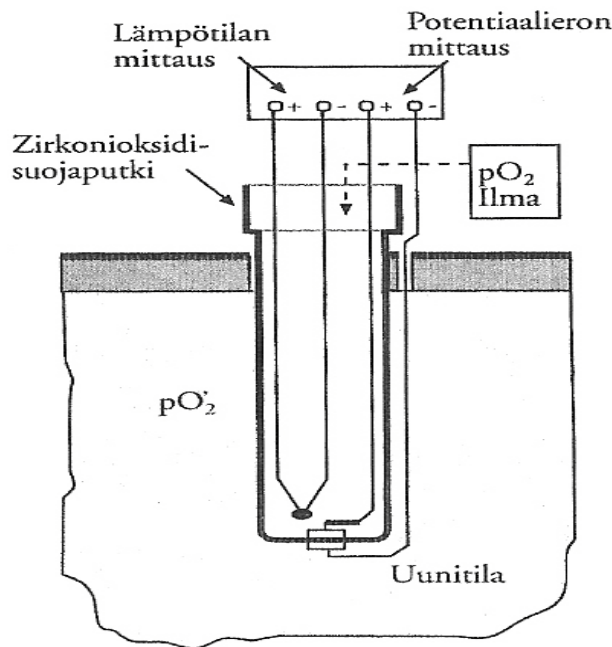
Kaasun hiilipotentialia mitataan yleisesti kaasun happitasapainon avulla seuraavasti:



Reaktioiden tasapaino eli happipotentialia mitataan tavallisesti zirkonioksidikennolla (happisondi). Reaktio 5 kuvaa reaktion 1 ja 6 reaktion 2 tasapainoa. Happipotentialimittauksella saadaan siten määritettyä tärkeimpien hiiletysreaktioiden keskimääräinen tasapaino. Happipotentialimittaus on käytetyin mittaustapa hiiletyskarkaisussa.

## 5.1 Happisondimittaus

Happipotentialin mittaus happisondilla on yleisin vertaileva mittaus tunnetun happipitoisuuden ja mitattavan happipitoisuuden välillä (Kuva 16).

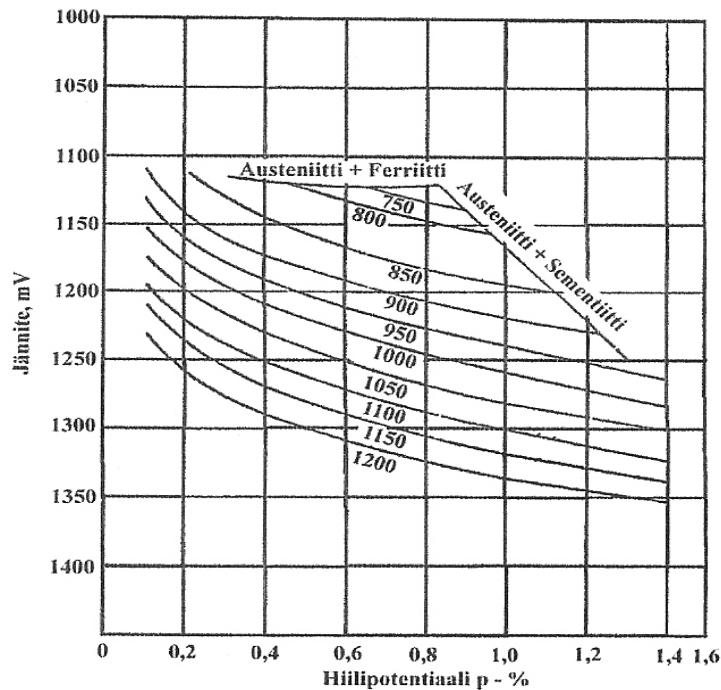


**Kuva 16** Kaaviokuva happisondistista /1/

Happisondin muodostaa zirkonioksidiputki, jonka umpinaisessa päässä on ulko- ja sisäpinnalla platinaelektrodit johtimineen. Zirkonioksidiputki on sijoitettu keraamiseen suojaletkeen, jonka päässä on kaasun virtaukselle aukot. Laitteeseen kuuluu lisäksi vertailuilman pumppausjärjestelmä, elektroninen vahvistin ja lisäksi myös termoelementti. Nykyään happisondeissa ei ole kokonaista zirkonioksidiputkea vaan tulenkestävä putki, jonka päähän on tiiviisti liitetty zirkonioksidikappale. Toimintaperiaatteena on verrata hiiletysatmosfäärin hapen painetta tunnetun referenssikaasun hapen paineeseen. Sondin putken sisäpuolelle pumpataan ilmaa, jonka hapen osapaine on tunnettu. Koska hapen osapaine hiiletysatmosfäärissä on pienempi kuin ilmassa, alkaa ionisoitunut happi vaelttaa  $\text{ZrO}_2$ -kappaleen ja putken läpi. Zirkonioksidi toimii siis kiinteänä elektrolyytinä, ja siihen kiinnitettyjen

platinaelektrodien välille syntyvä jännite on verrannollinen hapen osapaineiden eroon zirkonioksidin sisä- ja ulkopinnalla. Eri jännitteitä vastaavat hiiletysatmosfäärissä vallitsevat hapen paineet. Hiilipotentiali eri lämpötiloissa saadaan laskettua termodynamiikan avulla.

Kuvassa 17 eri hiilipotentialiaaleja vastaavat jännitteet atmosfäärissä, jossa  $\text{CO}_2 + \text{CO} = 23\%$  (propanista valmistettu hiiletyskaasu).



**Kuva 17** Happisonidin jännite/hiilipotentiali /1/

Jännitettä ja kaasuseosta vastaava hiilipotentiali saadaan myös laskemalla. Fermater Oy myy kaupallista ohjelmää kaasuatmosfäärin laskentaan. Laskennan lähtötietoina tarvitaan happisonidin lämpötila, lämpötilaa vastaava mV-lukema ja  $\text{CO}$ -osapaine (luetaan analysaattorilta). Tämä laskentamenetelmä on osoittautunut huomattavasti tarkemmaksi menetelmäksi määrittää hiilipotentiali kaasuatmosfäärissä kuin esim. yleisesti käytetty foliomittaus.

Happipotentialin mittauksella on useita etuja verrattuna  $\text{CO}_2$ - ja kastepistemittaukseen:

- Mittaustarkkuus on parempi.
- Hiiletysatmosfäärin kaasujen kemiallinen tasapaino ei ole niin tärkeä, koska mitattava suure riippuu happea sisältävien kaasukomponenttien suhteista eikä vain yhden komponentin osapaineesta kuten kastepiste- ja  $\text{CO}_2$ -mittauksessa.
- Näytekaasun keräysjärjestelmää ei tarvita, sillä mitta-anturi voidaan asentaa suoraan uuniin.
- Happisonidin reagointiaika on lyhyt, joten aikaviivettä ei ole.

Mittauksen huonoja puolia ovat:

- happisondin mahdollisesti lyhyt kestoikä ja korkea hinta
- platinaelektrodien fysikaalisten ominaisuuksien muuttuminen hiiletysatmosfäärissä, josta seuraa mittausarvojen ryömintä virheelliseksi
- happisondin rajoitettu mekaanisen ja termisen rasitusten kestävyys.



**Kuva 18** Happisondi uuniin asennettuna /3/

## 5.2 CO/CO<sub>2</sub>-mittaus

Kaasuatmosfäärin hiilidioksidipitoisuutta (CO<sub>2</sub>) ja hiilimonoksidipitoisuutta (CO) mitataan kaasuanalyssaattorilla. Uunilta johdetaan näytekaasua analyssaattoriin, joka mittaa kaasua jatkuvana mittauksena. Yhteen analyssaattoriin voidaan kytkeä useamman hiiletysuunin näytekaasuputket. Hiiletysuunia ohjaava tietokone käyttää mittaustulosta prosessin säätöön.

Analyssaattori kalibroidaan kerran viikossa, koska laitteistolla on taipumus ryömiä pitkällä ajanjaksolla. Kalibrointi tehdään tunnetuilla vertailukaasuilla, jotka ovat puhdas tyyppi ja tunnettu CO-kaasu. Vertailukaasut analysoidaan kaasun toimittajalla omassa laboratoriossaan. Aluksi laitteistoon syötetään puhdasta tyyppiä, jolloin analyssaattorin tulee näyttää CO/CO<sub>2</sub>-pitoisuuden nolla-arvoa. Tämän jälkeen syötetään tunnettu CO-kaasu, jolloin analyssaattorin tulee näyttää tätä tunnettua arvoa. Jos arvot poikkeavat toisistaan, säädetään analyssaattori kalibroitiruvun avulla paikalleen. CO/CO<sub>2</sub>-analyssaattori kalibroidaan kerran viikossa ja tulokset kirjataan seuranta-kaavakkeeseen (liite 6).

Kuvassa 19 on esitetty CO/CO<sub>2</sub>-analyssaattori.



**Kuva 19** CO/CO<sub>2</sub>-kaasuanalysaattori /3/

### 5.3 Foliomittaus

Yksi vanhimmista hiilenmääritysmenetelmistä on gravimetrinen foliokoe. Foliokoetta käytetään kaasun hiiliprosenttiarvon määrittämiseen. Kokeessa annetaan seostamattomasta hiiliteräksestä valmistetun, analysoidun, ohuen teräsfolion hiillettyä kaasuatmorfäärissä vakioprosessiarvoilla. Folioliuska puhdistetaan ja paino punnitaan ennen kuin se työnnetään näytetangon avulla uunin sisään (kuva 20).



**Kuva 20** Foliotangon pää, johon folioliuska asetetaan /3/

Tietyn pitoajan kuluessa folioon vakiintuu kaasun kanssa tasapainossa oleva hiilipitoisuus. Folio otetaan pois uunista ja punnitaan uudelleen. Folion painonmuutoksesta saadaan määritettyä kaasun tasapainohiiliprosentti. Lopputuloksesta päätellään, onko uunin sisällä olevan kaasuatmosfäärin hiilipitoisuus oikea. Kun otetaan huomioon foliokokeen manuaalinen, työläs suoritus ja suuret virhemahdollisuudet, ei käytännössä ole suotavaa käyttää foliokoea hiiletyskaasun ohjaamiseen tai ohjauslaitteiden kalibrointiin. Käytännön mittauksissa on havaittu suuria poikkeamia tuloksissa. Joillakin kaasutusmenetelmillä foliokoe ei anna järkeviä mittaustuloksia (tiputusmenetelmät).

Häiriötilanteissa foliokokeesta saattaa olla apua virhelähteiden selvittämiseksi.

## 6 HIILETYSKARKAISUN LAADUNVARMISTUS

Lämpökäsittelyn oikea suorittaminen edellyttää laadunvarmistusjärjestelmää, jonka avulla haluttuun laatuun päästään. Lämpökäsittely on kriittinen osa valmistusprosessia ja siitä syystä laatu on kehitettävä niin korkealle tasolle, ettei lopputuotteeseen pääse virheellistä lämpökäsittelytilaa. Tämä voidaan toteuttaa laatimalla lämpökäsittelyä varten työ- ja tarkastusohjeet. Nämä kootaan ohjeistoksi, joka muodostaa lämpökäsittelyn laadunvarmistusjärjestelmän.

Koska virheiden toteaminen lopputuotteessa edellyttää lähes aina aineen rikkovaa tutkimista, on hiiletyskarkaisun laadunvalvontajärjestelmä ainoa keino varmistua lopputuotteen laadusta. Lämpökäsittelyn laadukas suorittaminen perustuu kolmeen keskeiseen osatekijään:

1. henkilökunnan tietoon, taitoon ja haluun sekä vastuuntuntoon tuottaa kunnollista laatua
2. lämpökäsittelylaitteiden laatuun, kuntoon ja kykyyn tuottaa moitteettomia kappaleita
3. lämpökäsittelyn laadunvarmistusjärjestelmään asianmukaisine näytteenottoineen ja tarkastuksineen.

Tuotteiden lämpökäsittelyssä laadunvarmistus perustuu toisaalta ennaltaehkäisevään prosessiolosuhteiden valvontaan ja toisaalta koepalojen, näytteiden ja tuotantokappaleiden tutkimiseen. Tarkastusmenettelyt jaetaan kahteen osaan: ainetta rikkomattomat menetelmät ja aineen rikkovat menetelmät.

Oleellisen osan laadunvarmistusjärjestelmää muodostaa mittaus- ja tarkastustulosten sekä huolto- ja kalibrointitoimenpiteiden säännöllinen kirjaaminen (tulosten dokumentointi). Tietojen kirjaamisen perusteena voidaan pitää laadunvalvonnan toiminnan seuranta, joka tekee mahdolliseksi laadun edelleen kehittämisen. Lisäksi laatusertifikaatit edellyttävät tulosten asiallista kirjaamista. Reklamaatiotapauksissa voidaan haluttaessa jälkikäteen selvittää kyseisen tuotteen koko lämpökäsittelyprosessi. Huollon näkökulmasta voidaan hiilletysprosessista kerätä tietoa ja seurata sitä SPC-menetelmällä (Statistical Process Control). SPC:ssä huomio kiinnitetään tuotteiden tarkastuksen sijasta prosessin kehittämiseen.



## 6.1 Lämpökäsittelyn laadunvalvonta koepalamenettelyllä

Jokaisesta lämpökäsitellystä karkaisupanoksesta tehdään karkaisutulokset. Panoksen mukaan laitetaan koepala, joka tutkitaan karkaisimon laboratoriossa. Koepalamenettelyä käytetään yleensä silloin, kun itse tuotantokappaleet ovat arvokkaita. Koepalan ja tuotantokappaleen välisistä eroista mitat, muodot, panostus ym seikat tulee ottaa huomioon verrattaessa koepalan tutkimustuloksia itse tuotantokappaleeseen asetettuihin vaatimuksiin. Jokainen yritys voi itse suunnitella minkälainen koepala soveltuu parhaiten omaan tuotantoon. Kuvassa 21 koepaloja.



**Kuva 21** Karkaisupanoksen koepaloja /3/

Koepalan tulokset kertovat lähinnä prosessin toimivuudesta. Joskus puhutaankin prosessipalasta. Tarpeen vaatiessa on itse tuotantokappale rikottava, ja siitä tehdään samat tutkimukset kuin normaalisti koepalasta. Kuvassa 22 koepala sijoitettuna karkaisupanokseen.



**Kuva 22** Koepala sijoitettuna karkaisupanokseen /3/

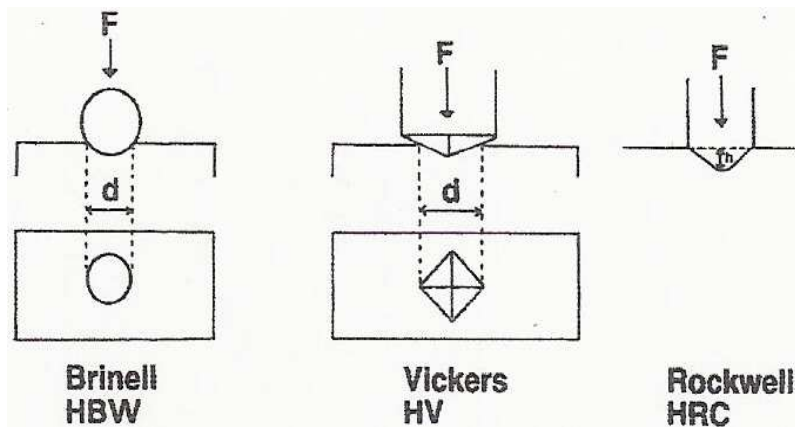
Perusvaatimus on se, että koepalamateriaali on samaa raaka-ainestandardin mukaista laatua kuin varsinaiset tuotantokappaleetkin. SEW:n terässtandardeissa on määritelty kunkin teräksen vaatimukset ja toleranssirajat. Koepalojen tulee täyttää nämä asetetut vaatimukset. Käytännössä koepalamateriaalia tilattaessa terästoimittajalta pyydetään eri terässulatusten todistukset. Näitä tuloksia vertaillaan keskenään ja valitaan paras sulate koepalamateriaaliksi. Koepalat koneistetaan ja niihin stanssataan tunniste.

Koepaloista tutkitaan:

1. pintakovuus HRC
2. hiiletysyvyyden määrittäminen mikrokovuusmittauksella (kovuusjakaumakäyrä)
3. sydänaineen kovuus
4. pintahiilipitoisuus
5. hiilipitoisuus hiiletysyvyydellä (550HV syvyydellä)
6. mikrorakennetarkastelu materiaalimikroskoopilla.

## 6.2 Pintakovuuden mittaaminen

Kovuuskokeilla tarkoitetaan aineenkoetusta Rockwellin, Brinellin tai Vickersin mukaan. Kovuusmittauksen tarkoituksena on todeta, täyttävätkö lämpökäsitellyt kappaleet ja koepala piirustuksessa esitetyt kovuusvaatimukset. Kovuuden mittauksissa on perinteisesti käytetty menetelmiä, joissa kova kappale on painettu tietyllä voimalla mitattavan kappaleen pintaan ja mitattu syntyneen painauman halkaisija tai syvyys (Kuva 23).



**Kuva 23** Kovuusmittausmenetelmät /1/

Standardin SFS-EN ISO 6506-1 mukaisessa Brinellin kovuusmittauksessa teräs- tai kovametallikuulaa painetaan materiaaliin 10...15 sekunnin ajan tietyllä voimalla. Painauman jäljestä on laskettavissa Brinell-luku. Käytännössä luku katsotaan taulukosta tai kovuusmittariin integroitu laskin laskeen kovuuden valmiiksi.

Standardin SFS-EN ISO 6507-1 mukaisessa Vickersin menetelmässä materiaaliin painetaan 10...15 sekunnin ajaksi timanttipyramidi. Painauman molemmat lävistäjät

mitataan, ja kovuusluku katsotaan vastaavasti taulukosta tai kovuusmittari laskeen sen valmiiksi näytölle, kuva 24.

Standardin SFS-EN ISO 6508-1 mukaisessa Rockwellin menetelmässä teräkseen painetaan timanttikartio. Painauman syvyys mitataan, mistä saadaan vastaava kovuusluku. Rockwell-mittareihin on rakennettu mittakello, josta kovuus on suoraan luettavissa. Rockwellin menetelmässä on useita eri mittapäitä ja kuormia mitattavan materiaalin mukaisesti. Niin sanottua C-asteikkoa käytetään karkaistuille ja nuorrutetuille teräksille.

Kovuuslukua ilmoitettaessa käytetään kirjainlyhenteitä, jotka ilmoittavat mistä menetelmästä on kysymys. Brinell- ja Vickers-mittauksen lyhenteessä ilmoitetaan käytetty koevoima sekä Brinell-mittauksessa lisäksi paininkärjen halkaisija. Kovuusmittaukset tehdään joko kiinteästi asennetuilla tai kannettavilla kovuusmittareilla.



**Kuva 24** Vickers-kovuusmittari /3/

SEW:n tarkastusmenettelyssä jokaisesta panoksesta mitataan Rockwell-kovuus koepalasta ja tuotantokappaleesta, joka otetaan satunnaisesta kohtaa panoskorista. Kovuusvaatimus kappaleelle on 59...62 HRC. Tulokset kirjataan ylös tarkastusraporttiin Liite 1.

### 6.3 Mikrokovuusjakauman mittaus koepalasta

Koepalasta sahataan irti näyte, joka mahtuu mikrokovuusmittarin näytepöydälle. Näyte voidaan valaa myös haluttaessa muoviseksi näytenapiksi. Sahaus tehdään koepalasaamalla, jossa on hyvä nestejäähdytys. Sahauksessa on erityisesti varottava näytteen kuumentumista leikkauksessa ja hionnassa. Hionta voidaan tehdä erilaisilla paperi- tai timanttilaikkakarkeuksilla. Lopuksi näyte kiilloitetaan timanttihallalla tai alumiinioksidisuspensiolla peilikirkkaaksi. Mikrokovuusmikroskoopi kuvassa 25.



**Kuva 25** Mikrokovuuden mittauslaitteisto /3/

Mikrokovuusmittauksella mitataan todellinen saavutettu hiiletysvyvyys. Samassa yhteydessä mitataan myös sydänaineen kovuus. Toinen tärkeä alue jolla mikrokovuusmittauksia tehdään, on erilaisten näytteiden kovuuden mittaukset. Tällaisia ovat mm. hammasvaihteiden vaurioanalyysit. Koepalojen lisäksi tutkitaan tarvittaessa myös varsinaisia tuotantokappaleita. Näytepalan irrottaminen suuresta tuotantokappaleesta on vaativaa työtä. Kappale voidaan pilkkoa aluksi lankasahalla tai kovametalliteräisellä kaarisahalla, ennen varsinaista näytesahausta. Pilkkomisvaiheessa tutkittavan kappaleen pinta ei saa kuumentua eikä myöskään muokkaantua .

Näyte asetetaan mikrokovuusmikroskoopin näytepöydälle. Ensimmäinen mittauspiste tehdään näytteen pinnasta 0.15 mm syvyydelle. Tästä lähdetään noin 0.1 mm portaalla kappaleen sisään päin. Mittauksia tehdään, kunnes ollaan reilusti ohi kovuuden 550 HV (hiiletysvyvyden määrittäjäraja). Mitatuista pisteistä piirretään graafinen käyrä, josta syntyy kovuusjakaumakäyrä. Jos mittaus tuloksissa epäillään jotakin poikkeavaa, mittausaskelta pienennetään noin 0.05 mm ja tehdään uusi käyrä.

Kovuusjakaumakäyrän tulee mennä pintakovuuden ja tavoitesyvyydelle asetetun toleranssilaatikon läpi. Kaikki mitatut tulokset kirjataan tarkastusraporttiin liite 1.

#### 6.4 Pintahiilipitoisuuden mittausta koepalasta

Hiiletyskarkaisun tulosta joudutaan arvioimaan myös kappaleen pinnan hiilipitoisuuden perusteella. Pintahiilipitoisuudelle ja hiilettyssyvyyden (S550HV) hiilipitoisuudelle on määritetty toleranssirajat. Eri teräksille on omat toleranssirajansa. Toleranssialueet on kerrottu SEW:n omissa standardeissa. Hiilipitoisuuden määrittäminen voidaan tehdä seuraavilla tavoilla:

- analysoimalla lastunäytteen hiilipitoisuus polttomenetelmällä
- analysoimalla kiinteästä pinnasta hiili spektrometrillä

Koepalasta voidaan tehdä myös hiilipitoisuuskäyrä. Palan tasopinta hiotaan n.0.1 mm syvyydeltä puhtaaksi ja mitataan hiilimäärä spektrometrin avulla. Hiotaan lisää 0.1 mm askelmalla ja mitataan hiili. Näin jatketaan kunnes haluttu hiilettyssyvyys on saavutettu. Mittaustuloksista piirretään hiilipitoisuuskäyrä. Tämä analyysitapa on melko työläs, ja sen käyttöä jokapäiväisissä tarkastuksissa tulee harkita.

Normaalissa tarkastuksessa hiotaan koepalan pinta puhtaaksi 0.1 mm syvyydeltä ja tästä mitataan hiilipitoisuus. Seuraavaksi koepala hiotaan nimellissyvyydelle puhtaaksi, eli hiilettyssyvyys 0.7 mm hiotaan 0.7 mm syvyydelle. Tästä mitataan hiilipitoisuus. Molemmat mittaustulokset kirjataan tarkastusraporttiin liite 1. Hionta tehdään tasohiomakoneella. Kuvassa 26 spektrometri, joka mittaa useita teräksen seosaineita yhdellä mittauksella.



**Kuva 26** Spektrometri /3/

## 6.5 Mikrorakenteen tarkastelu

Hiiletyskarkaistun kappaleen/koepalan mikrorakennetarkastelu suoritetaan tarkoitukseen soveltuvalla metallimikroskoopilla (kuva 27).



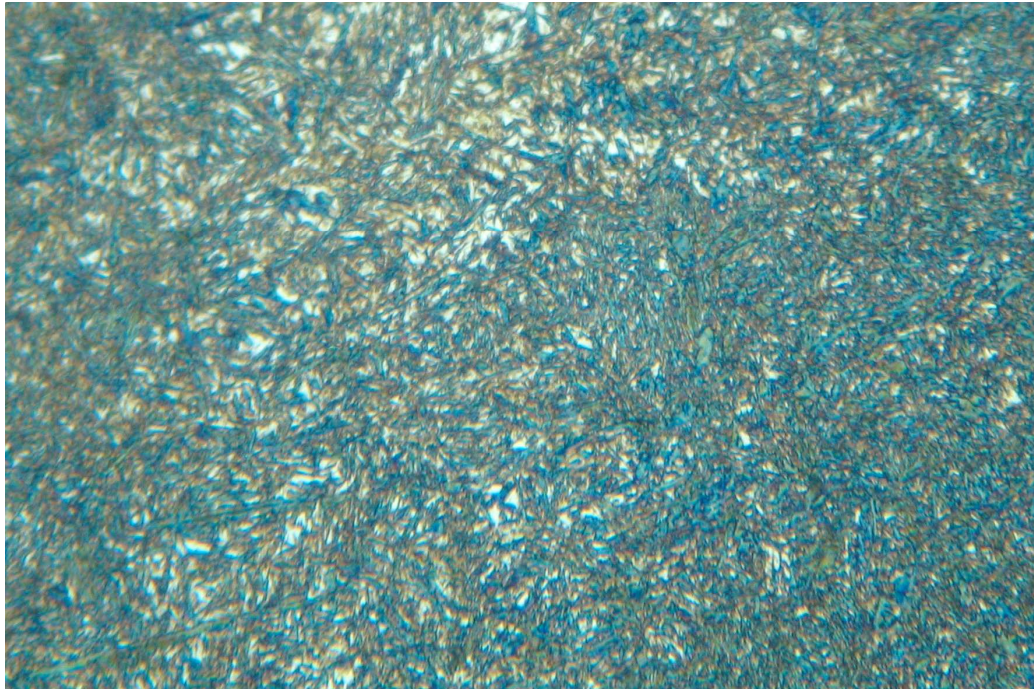
**Kuva 27** Metallimikroskooppi /3/

Koska lämpökäsittelyllä pyritään tiettyyn mikrorakenteeseen, on metallimikroskoopilla tapahtuva näytteiden tutkiminen tärkeä osa lämpökäsittelyn laadunvalvontaa. Kiilloitettu näyte syövytetään kiiltävältä pinnalta välittömästi ennen mikroskooppitarkastelua. Pinta syövytetään 4-prosenttisella Nital-syövytteellä (etyylialkoholi+typpihappo) noin 15 sekuntia, jolloin metallin mikrorakenne paljastuu peilin alueelta. Näytettä tutkitaan 150 - 750 kertaisella suurennuksella. Teräksen eri rakenneosien tunnistaminen vaatii kokemusta ja koulutettua tutkijaa, mutta tiettyjen haitallisten rakenneosien esiintymisen pystyy havaitsemaan kohtuullisen nopeasti. Mikroskooppiin on välttämätöntä kytkeä valokuvauskamera, jolla rakennekuvat saadaan dokumentoiduksi tarkastuspöytäkirjaan. Näytteestä tutkitaan normaalisti hiiletyskerroksesta martensiitti, raerajakarbidit, jäännösasteniittipitoisuudet, pinnan hapettumakerroksen paksuus ja poikkeavien faasien esiintymistä. Pintakerroksista tutkitaan hiilenkato, hiilettyminen, mahdolliset hiontahalkeamat.

Hiiletysteräksen käyttö suorakarkaisuun edellyttää niiltä hienoa raekokoa toimitustilassaan sekä raekoon pysymistä hiiletyslämpötilassa muuttumattomana. Hiiletysteräksen toimittaja takaa yleensä tämän hienorakeisuuden aineodistuksessa. Raekoko on kuitenkin syytä tarkistaa ajoittain varsinkin suurten hiiletysvyökyksien ollessa kyseessä. Korkeat hiiletyslämpötilat aiheuttavat rakeen kasvua. Raekoko määritellään seuraavasti:

1. Tutkitaan normaali koepala, joka on ollut karkaisupanoksen mukana.
2. Näyteen pinnasta hiotaan reilusti ainetta pois (noin 2 mm). Näyte kiilloitetaan ja syövytetään.
3. Hiepinnasta nähdään metallimikroskoopilla raerajaverkko, jota verrataan SFS 2420 vertailukuvasarjaan (samalla suurennoksella).

Määritetty raekoko ei saa olla ISO G7:ää suurempi, jolloin teräs on määritelty hienorakeiseksi. Raekoon kasvu vaikuttaa haitallisesti kappaleiden lujuusominaisuuksiin. Kuvassa 28 karkaistun teräksen mikrorakennetta.



**Kuva 28** Teräksen mikrorakennetta, martensiittia ja jäännösausteniittia /3/

## 7 TULOKSET

Tutkintotyön tuloksena syntyivät seuraavat seuranta- ja raportointilomakkeet.

1. Hiiletyskarkaisun tulosraportti. Raporttiin sisältyvät seuraavat mittaukset:
  - Mikrokovuusjakauma koepalasta
  - Pintakovuus koepalasta
  - Pintakovuus tuotteesta
  - Sydänaineen kovuus koepalasta
  - Merkitään haluttu hiiletysvyvyys
  - Merkitään toteutunut hiiletysvyvyys
  - Mikrorakenteen tarkastelu

- Pintahiilipitoisuus koepalasta
- Hiilipitoisuus koepalasta hiiletysvyödyteltä ( 550 HV syvyys)

Raporttipohjaan on merkitty toleranssilaatikat pintakovuudelle ja jokaiselle hiiletysvyödytellemälle. Tulosraportti tehdään jokaisesta karkaistusta panoksesta.

2. Lämpötilan tasaisuusmittaus  
Lämpötilan tasaisuusmittaus hiiletyskammiossa yhdeksällä termoelementillä mitattuna. Termoelementit sijoitetaan ohjekuvan 9 mukaisesti mittauspisteisiin. Toleranssi +/- 5 C°. Mittaus tehdään uuden uunin vastaanottotesteissä ja tämän jälkeen vuoden välein.
3. Hiilipotentialin tasaisuusmittaus  
Hiilipitoisuuden tasaisuusmittaus yhdeksällä koepalalla mitattuna. Koepalat sijoitetaan ohjekuvan mukaisesti mittauspisteisiin. Toleranssi -0.05...+0.05 %C. Mittaus tehdään uuden uunin vastaanottotesteissä ja tämän jälkeen vuoden välein.
4. Pintakovuuden tasaisuusmittaus  
Pintakovuuden tasaisuusmittaus yhdeksällä koepalalla mitattuna. Koepalat sijoitetaan ohjekuvan mukaisesti mittauspisteisiin. Toleranssi -2...+2 HRC. Mittaus tehdään uuden uunin vastaanottotesteissä ja tämän jälkeen vuoden välein.
5. Uunin termoelementtien seuranta  
Uuniin asennettujen termoelementtien tarkastusmittaus. Toleranssi mitattavalle lämpötilalle asetusarvosta -1...+1%. Mittaus tehdään uuden uunin vastaanottotesteissä ja tämän jälkeen kerran kuukaudessa.
6. CO/CO2-analysointin seuranta  
Uunista analysoitavan näytteenäytteen mittauksen seuranta. Toleranssi vertailukaasun mittaukselle -2...+2 %. Mittaus tehdään uuden uunin vastaanottotesteissä ja tämän jälkeen kerran viikossa.
7. Uunin lämpötilamittausketjun tarkastus  
Kannettavalla kalibraattorilla simuloidaan haluttua lämpötilaa ja sitä vastaavaa jännitettä. Signaali lähetetään uunin mittalaitteille. Lämpötiloja lähestytään sekä ylhäältä että alhaalta. Mittalaitteiden tulee vakiintua -1.5...+1.5 °C tarkkuudelle asetetusta tavoitelämpötilasta, eivätkä ylhäältä tai alhaalta suoraan asetusarvoon tultaessa saa erota toisistaan yli 0.5 °C. Mittaus tehdään 6 kuukauden välein.
8. Happisonnin seuranta  
Sondin toimintaa tarkkaillaan kaasuatmosfäärin hiilipitoisuuden avulla, joka mitataan useasta eri mittauspisteestä. Todellinen hiilipitoisuus mitataan koepalasta ja tätä verrataan sondin asetusarvoon. Toleranssialue -0.1...+0.1 % C. Tarvittaessa sondin korjauskerrointa muutetaan tulosta vastaavaksi. Mittaus tehdään kerran viikossa.



## LÄHDELUETTELO

### Painetut lähteet

- 1 Härkönen Seppo- Kivivuori Seppo, Lämpökäsittelyoppi. Teknoliateollisuus ry. ISBN 951-817-849-6. Teknoliateollisuuden julkaisu nro 9/2004.
- 2 MET 11/85. Tekninen tiedotus: Lämpökäsittelyn laadunvalvonnan käsikirja. Suomen metalliteollisuuden keskusliitto, Metalliteollisuuden kustannus Oy 1985. ISBN 951-817-255-2.

### Painamattomat lähteet

- 3 Blomster Kari, Tekniikan tohtori. Fermater Oy. Useita keskusteluja SEW Industrial Gears Oy, Tianjin , China 2004-2005.

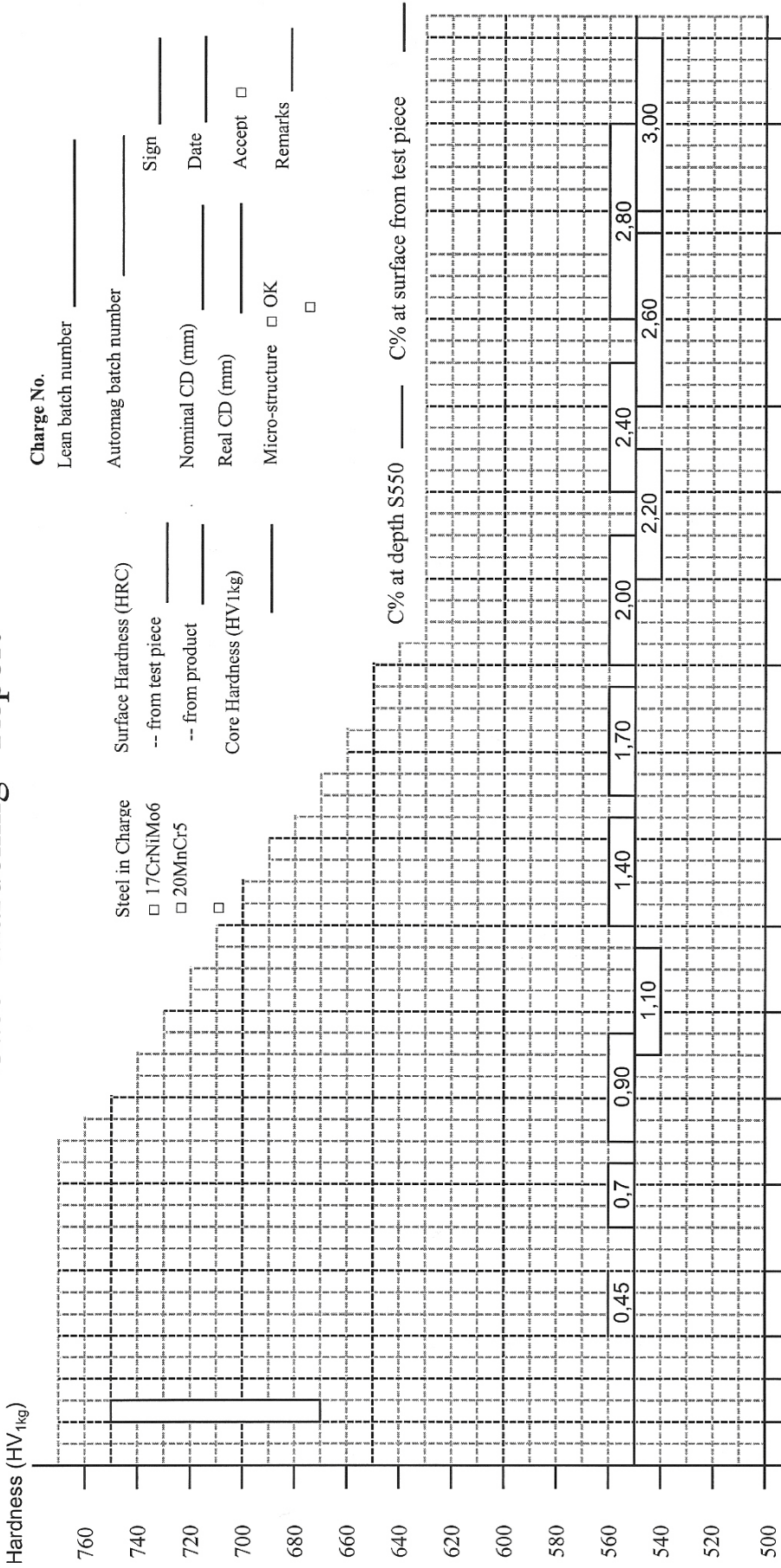
### Sähköiset lähteet

- 4 Ipsen International GmbH. [www-sivu] Saatavissa: <http://www.ipsen-international.com>
- 5 Econox SA [www-sivu ] Saatavissa: <http://www.econox.ch>



# SEW Industrial Gears Oy Case Hardening Report

Liite 1



## Lämpötilan tasaisuusmittaus

Toleranssialue lämpötilan tasaisuudelle on +/- 5 C termoelementeillä mitattuna.  
 Hiiletysuunin mittauslämpötilat 850 C/ 930 C.  
 Matalalämpötilauunin mittauslämpötilat 200 C/500 C.

Uuni nro:		Tavoitelämpötila	
		Tulos	Erotus
	Termoelementti nro 1		
	Termoelementti nro 2		
	Termoelementti nro 3		
	Termoelementti nro 4		
	Termoelementti nro 5		
	Termoelementti nro 6		
	Termoelementti nro 7		
	Termoelementti nro 8		
	Termoelementti nro 9		

Uuni nro:		Tavoitelämpötila	
		Tulos	Erotus
	Termoelementti nro 1		
	Termoelementti nro 2		
	Termoelementti nro 3		
	Termoelementti nro 4		
	Termoelementti nro 5		
	Termoelementti nro 6		
	Termoelementti nro 7		
	Termoelementti nro 8		
	Termoelementti nro 9		

## SEW Industrial Gears Oy

Liite 3.

Hiilipitoisuuden tasaisuusmittaus.

Hiilipitoisuuden toleranssi +/- 0.05 %C. Mittaus spektrometrillä mitattuna.

Mittaus 9:llä koepalalla jotka sijoitetaan liitteen 9 mukaisesti. Mittaus suoritetaan täydellä panospainolla.

Mittaus hiilettyssyvyyksillä 0.7 mm ja 2.0 mm

Uuni nro:	
-----------	--

Hiil.syvyys	
-------------	--

Tavoite C % pinnassa	
----------------------	--

Koepala nro: 1  
 Koepala nro: 2  
 Koepala nro: 3  
 Koepala nro: 4  
 Koepala nro: 5  
 Koepala nro: 6  
 Koepala nro: 7  
 Koepala nro: 8  
 Koepala nro: 9

% C Tulos	Erotus

Tavoite C % syvyydellä S550 HV	
--------------------------------	--

Koepala nro: 1  
 Koepala nro: 2  
 Koepala nro: 3  
 Koepala nro: 4  
 Koepala nro: 5  
 Koepala nro: 6  
 Koepala nro: 7  
 Koepala nro: 8  
 Koepala nro: 9

% C Tulos	Erotus

## Pintakovuuden tasaisuusmittaus

Pintakovuuden tasaisuusmittaus 9:llä koepalalla mitattuna. Koepalat sijoitetaan mittauspisteisiin liitteen 9 mukaisesti.

Toleranssialue +/- 2 HRC.

Uuni nro:	
-----------	--

Koepala nro: 1  
 Koepala nro: 2  
 Koepala nro: 3  
 Koepala nro: 4  
 Koepala nro: 5  
 Koepala nro: 6  
 Koepala nro: 7  
 Koepala nro: 8  
 Koepala nro: 9

Hiilettyisyvyys	
-----------------	--

Tulos	Erotus

Uuni nro:	
-----------	--

Koepala nro: 1  
 Koepala nro: 2  
 Koepala nro: 3  
 Koepala nro: 4  
 Koepala nro: 5  
 Koepala nro: 6  
 Koepala nro: 7  
 Koepala nro: 8  
 Koepala nro: 9

Hiilettyisyvyys	
-----------------	--

Tulos	Erotus



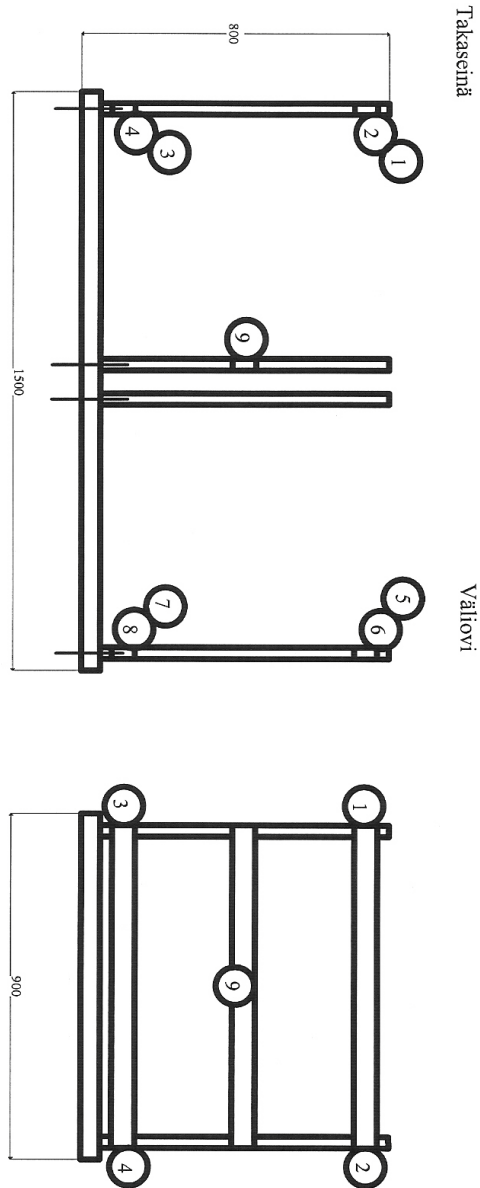








Liite 9



$z =$	$h =$	Tolaste ja asema: Tol zone and position:	$e$	
$m_f$	$x =$		$d$	
Perusprofiili: Standard tooth profile:	$\Delta ha =$	$d =$	$c$	
	$W =$	$a =$	$b$	
$\alpha_n =$	$\beta =$	Välivoiä $z =$ Mating gear	$a$	
Käisyys: Hand:	$W_i =$	Välivoiä $x =$ Mating gear		Muutos/Revision Pvm./Date
		EUROPEAN PROJ 	SHIDESCALE <b>1:</b>	LASTUAMISTOLERANSSIT MACHINING TOLERANCES ISO2768-m
NIMI/TYÖN NIMI <b>Uunikammion mittauspisteet</b>		P.D. pvm	SII	<b>160304RSI</b>
		T.C. pvm	SII	
		IL/A R.Sintonen		