

SEPPO KIVIVUORI

Lämpökäsittelyoppi 1

LÄMPÖKÄSITTELYTIETOA KARKAISJOILLE



Teknologiateollisuus

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi ja saattaminen yleisön saataviin on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa.

Lupia teoksen osittaiseen valokopiointiin, skannaamiseen tai muuhun digitaaliseen kopiointiin myöntää tekijöiden ja kustantajien valtuuttamana KOPIOSTO ry. Muuhun käyttöön luvat on kysyttävä suoraan kunkin teoksen oikeudenhaltijoilta.

JULKAISIJA	Teknologiaellisuus ry
KUSTANTAJA	Teknologiainfo Teknova Oy
JA MYYNTI	Eteläranta 10, 4. krs 00130 HELSINKI puh. (09) 19231 www.teknologiainfo.net

ISBN 978-952-238-233-7

© Teknologiainfo Teknova Oy

Ulkoasu ja taitto: Public Design Oy

Kansikuva: Lämpökäsittelyä Nordic Traction Oy:n karkaisimolla.
Kuvauspaikka Nordic Traction Oy.
Kuvaaja: Jaakko Kivivuori

Painopaikka: Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu, 2019

Esipuhe

Vuonna 2004 ensimmäisen kerran julkaistu Lämpökäsittelyoppi -kirja esittää lämpökäsittelyiden suoritusta yksityiskohtaisesti. Kirja on saanut erittäin hyvän vastaanoton elinkaarensa aikana ja sitä on kaikkiaan myyty noin 1400 kappaletta kymmenen vuoden aikana. Kirja on ollut käytössä sekä oppimateriaalina ammattikorkeakouluissa ja yliopistoissa että teollisuuden lämpökäsittelyistä vastaavien yritysten sisäisen koulutuksen oppikirjana ja lämpökäsittelyjä suorittavan henkilöstön käsikirjana.

Kivivuori Consulting Oy:n laatima kirja ”Lämpökäsittelyoppi 2 – Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille” on vuonna 2016 laadittu lisäosa edellisen kirjan sisältöön. Samalla se myös palvelee erityisesti suunnittelijoita sekä lämpökäsittelyn tilausta suunnittelevia ja toteuttavia.

”Lämpökäsittely 1 – Lämpökäsittelytietoa karkaisijoille” -kirjan suunnitteluun ja laatimiseen ovat osallistuneet useat henkilöt. Kirjan laatimisen tukena käsikirjoituksen toteuttamisessa on toiminut Teknologiateollisuus ry:n Lämpökäsittelyn ja takomoiden toimialaryhmän hallitus kokonaisuudessaan sekä erityisesti työryhmä, johon ovat kuuluneet **Antti Piensoho**, Stén & Co Oy Ab, **Reeta Luomanpää**, Ovako Oy, **Kaisu Soivio**, Moventas Oy, **Erik Saviranta**, Bodycote Oy, **Arto Kivirinta**, Teknologiateollisuus ry sekä **Jaakko Kivivuori** ja **Seppo Kivivuori**, Kivivuori Consulting Oy. Heidän panoksensa kirjan sisällön kehittämisen osalta onkin ollut erittäin merkittävää.

Myös **Antti Mikkola**, AGA Oy sekä professori **Pasi Peura**, Tampereen yliopisto, ovat aktiivisesti toimineet kirjan käsikirjoituksen laatimisessa. Heidän osuutensa kirjan laatimisessa onkin ollut huomattavaa. Antti Mikkolalla on ollut merkittävä osuus kappaleiden 3, 9 ja 17 laadinnassa ja professori Pasi Peuralla on ollut merkittävä osuus luvun 13 käsikirjoituksessa.

Kirjan kuvituksesta sekä kuvituksen toteutumisesta on vastannut **Jaakko Kivivuori**, Kivivuori Consulting Oy.

Kirjan laatimista ovat rahoittaneet Teknologiateollisuus ry:n Lämpökäsittelyn ja takomoiden toimialaryhmä sekä Suomen Tietokirjailijat ry. Rahoittajien panos kirjan toteutumisessa, etenkin luovan työskentelyn osalta on ollut merkittävä.

Kirja tulee ilmestyttyään olemaan edellisen teoksen täysin uudistettu painos sekä kauan kaivattu oppi- ja käsikirja lämpökäsittelyalalla työskenteleville.

Teknologiateollisuus ry:n Lämpökäsittelyn ja takomoiden toimialaryhmä kiittää osaltaan Kivivuori Consulting Oy:tä sekä erityisesti professori (emeritus) **Seppo Kivivuorta** sekä muita kirjan toteutumiseen osallistuneita ja vaikuttaneita.

Helsingissä elokuussa 2019

Teknologiateollisuus ry:n Lämpökäsittelyn ja takomoiden toimialaryhmä

Johdanto

Teräs on aikakautemme tärkein metallinen rakenneaine. Sen ominaisuuksia voidaan muunnella laajalla alueella. Tärkein materiaaliominaisuuksien muuntamisen keino on lämpökäsittely. Tämä kirja pyrkii antamaan ohjeet lämpökäsittelyiden oikeaan suorittamiseen.

Lämpökäsittelyistä tärkein on aina läpi vuosisatojen ollut karkaisu, jolla teräksen kovuus on saatu nostettua sekä kulumiskestäväksi että riittävän lujaksi ko-vaakin käyttöä silmälläpitäen. Hyvän kuvan karkaisun ja muun lämpökäsittelyn kehittämisestä voimme saada tutkistelemalla oman aikansa oppikirjoja. Esimerkiksi hyvin kelpaa insinööri *Paavo Peron* vuonna 1922 perustettua Ammattien-edistämislaitosta varten laatima oppikirja **Karkaisijan käsikirja**. Kirjan ensimmäinen painos on valmistunut vuonna 1926, siis lähes sata vuotta sitten. Se tarjoaa erittäin mielenkiintoisen mahdollisuuden tutustua sen aikaiseen, siis sadan vuoden takaiseen, tietämykseen ja työrotiineihin lämpökäsittelyn alueella. Haluan tässä johdanto-osassa tuoda muutaman esimerkin avulla kirjan sisältöä tunnetuksi, mutta lähinnä vain karkaisuun liittyviltä osin.

Alkakaamme sen ajan teräksistä ja etenkin niiden jaotteluperusteista. Jakoperusteita oli useita, kuten tänäkin päivänä. Yksi jaottelutapa, terästen jako karkaisutavan mukaan, korostaa karkaisun suurta merkitystä tuohon aikaan.

Lämpökäsittelyn perusteet olivat jo tuolloin hyvin kehittyneet, mutta eivät kai-kin osin vielä vastanneet nykyajan tietämystä.

Jos teräs jäädytetään punakuumasta, siis austeniittialueesta, äkkiä, s.o. karkais-taan, niin tapahtuu kaksi muutosta kideilmiöissä: Kidemuodon muuttumisläm-pötila (noin 700 °C), jossa hitaasti jäädytettäessä perliitin muodostuminen ta-pahtuu, alenee nyt n. 200 °C:een; toiseksi jää tuo korkeammassa lämpötilassa syn-tynyt kiinteä liuos melkein kokonansa jäljelle. Näin voidaan siis tuo kiinteä liuos, austeniitti, joka, kuten sanottu, syntyy ja säilyy vain korkeammassa lämmössä ja joka on hyvin kovaa, pidättää teräksessä. Luonnollisesti ei tämä kiinteä liuos nyt ole missään tasapainotilassa, niin kuin se on korkeassa lämmössä, vaan pakkoti-lassa, josta se tilaisuuden tultua purkautuu perliittiä muodostaen. Tällaista äkki-jäähdytyksellä aikaansaatua rautakarbidi-liuosta nimitetään martensiitiksi.

Osin voidaan tekstistä havaita valomikroskopian riittämättömän erotuskyvyn mukanaan tuoma tietämättömyys karkaistun teräksen todellisesta rakenteesta.

Martensiitti on vielä kiinteä liuos, mutta voi kuitenkin saada, paitsi neulamaisen kidemuodon, mikä muodostuu liuoksen alkaessa hajaantua, myöskin hyvin hie-nokiteisen, melkein kidemuodottoman rakenteen. Trostiitti, jota syntyy, kun kar-kaistu teräs kuunnetaan 200–400 °C, ei enää ole kiinteä liuos, vaan aivan hieno kidemuodoton raudan ja karbidin seos. Sorbiitti, jota syntyy, kun karkaistu teräs

kuumennetaan yli 400 astetta, on samanlainen, mutta hieman karkeakiteisempi seos, kuitenkin hienompi kuin perliitti.

Miten sitten voidaan kovaksi karkaistu teräs saattaa käyttökelpoiseen tilaan? Päästöstä oli tuona aikana hyvä tietämys, joskin sen suoritus perustui enemmänkin kokemukseen kuin tieteelliseen tietämykseen.

Harvoin voidaan käyttää lasikovaksi karkaistua terästä, sillä lasikova teräs on haurasta. Tavallisesti teräs päästetään, jolloin sen hauraus vähenee ja sen sisäiset jännitykset (karkaisujännitykset) pienenevät ja tasaantuvat. Teräs näet tulee venyvämmäksi ja sitkeämmäksi. Kuinka paljon terästä on päästettävä, se siis riippuu siitä kuinka paljon kulloinkin voidaan kovuudesta uhrata. Teräs voidaan kyllä karkaista suoraan riittävän sitkeäksi ja samalla riittävän kovaksi, mutta tämä vaatii suurta taitoa ja kokemusta sekä teräksen tarkkaa tuntemusta.

Väli-kidemuotoja aikaansaadaan toisellakin tavalla kuin lievällä karkaisulla. Siten nimittäin, että ensin karkaistaan tuimasti ja sitten uudelleen lämmitetään, siis päästetään, niin kuin karkaistaessa ja nuorrutettaessa yleensä käytännössä menetellään. Varsinkin nuorrutetun teräksen kiderakenne on tasainen ja hieno, mikä juuri onkin teräksen hyvien ominaisuuksien merkki.

Mitä mieltä sitten oltiin sen aikaisista karkaisimoista? Karkaisimon rakenteen osalta mieleen tulee siisteyttä ja valoisuutta ihannoiva työympäristö. Olihan tuolloin karkaisija todella arvostettu ammattimies ja karkaisimo huipputeknologiaa harjoittava teollisuuslaitos.

Kun karkaisutöitä on toimitettava usein tai jos on suuret määrät karkaistavia esineitä, kuten m.m. joukkovalmistuksessa on asian laita, niin täytyy karkaisemon olla ajanmukainen ja varustettu mahdollisimman täydelliseksi, sillä muuten eivät karkaisutyöt onnistu, ei ainakaan niitä voida kohtuullisilla kustannuksilla suorittaa. Karkaisemon tulee olla tasavaloinen ja tilava sekä varustettu tarpeellisilla välineillä.

Lisäksi työtilojen tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

Itse karkaisemon tulee olla siisti. Valaistuksen tasaisuuden vuoksi tulee sen ikkunain olla pohjoispuolella. Ikkunain tulee olla isot ja mieluummin sinertävällä ohuella värillä sivellyt. Kaikki työaseet ja tarpeet määrättyllä paikallaan, tarveaineet laatikoissaan tai purnukoissaan; laatikoissa purnukoissa nimet. Ajelehtivaa kamaa ei saa karkaisemossa olla.

Näillä aikansa parhaan asiantuntijan laatimilla ohjeilla siis opetettiin sen ajan karkaisijoita vaatimaan ammattiinsa. Ajat ovat muuttuneet ja tekniikat kehittyneet, näin toki myös lämpökäsittelyn alueellakin. Tämän kirjan tilaaja Teknologiateollisuuden Lämpökäsittely ja takomot-toimialaryhmä haluaa tarjota hyvän oppi-

kirjan lämpökäsittelyn ammattilaisille. Toivottavasti tämä kirja antaa ajankohdan huomioiden yhtä hyvät neuvot ja tietämyksen kuin Paavo Peron Karkaisijan käsi-kirjakin omana aikanaan.

Tämä kirja on painos vuonna 2004 julkaistusta Lämpökäsittelyoppi-kirjasta ja korvaa sen täysin uudistettuna painoksena. Lämpökäsittelyoppi-kirjaa on vuodesta 2004 alkaen myyty noin 1400 kpl ja on siten osoittanut tarpeellisuutensa lämpökäsittelyalan koulutuksen apuvälineenä.

Tämän kirjan lisäksi lämpökäsittelyä käsittelevään kirjasarjaan kuuluu ”Lämpökäsittelyoppi 2 – Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille kirja. Lämpökäsittelyoppi 2-kirja on tarkoitettu etenkin tuotteiden suunnittelijoiden ja lämpökäsittelyjä tilaavien henkilöiden avuksi materiaalin- ja tuotesuunnittelun sekä lämpökäsittely- ja jatkojalostustilausten osalta.

Sisällysluettelo

1 LÄMPÖKÄSITTELYN PERUSTEET	16
1.1 METALLIEN RAKENNE	16
1.2 HILAVIAT	17
1.3 METALLISEOSTEN TASAPAINOPIIRROKSET	18
1.3.1 Rauta-hiili-tasapainopiirros	20
1.3.2 Kriittiset lämpötilarajat	23
1.4 METALLIEN LUJUUS JA SITKEYS	24
1.4.1 Faasimuutokset	24
1.4.2 Liuoslujitus	25
1.4.3 Erkautuslujitus	26
1.4.4 Raekoon vaikutus sitkeyteen ja lujuuteen	28
2 AUSTENIITIN MUODOSTUMINEN JA HAJAANTUMINEN	32
2.1 AUSTENITOITUMINEN	32
2.2 AUSTENIITIN HAJAANTUMINEN	33
2.2.1 Perliitin muodostuminen ja rakenne.....	33
2.2.2 Martensiitin muodostuminen ja rakenne.....	35
2.2.3 Bainiitin muodostuminen ja rakenne.....	38
2.3 S-KÄYRÄT	39
3 LÄMPÖKÄSITTELYUUNIT JA NIIDEN ATMOSFÄÄRIT	44
3.1 UUNIATMOSFÄÄRIT	44
3.2 UUNIATMOSFÄÄRIN VALINTA.....	46
3.2.1 Lämpökäsittelyuunit ilman suojakaasua.....	47
3.2.2 Suojakaasun muodostaminen polttokaasuista.....	48
3.2.3 Kemiallisesti reagoimaton uuniatmosfääri.....	49
3.2.4 Kemiallisesti aktiivinen uuniatmosfääri	49
3.3 LÄMPÖKÄSITTELYUUNIT.....	50
3.3.1 Kertapanosteiset uunit.....	50
3.3.2 Jatkuvatoimiset uunit.....	56
3.3.3 Kylvyt	59
3.4 INDUKTIOUUNIT	61
3.5 ALIPAINEUUNIT.....	63
4 HEHKUTUKSET	64
4.1 KUUMAMUOKKAUS.....	64
4.2 DIFFUUSIOHEHKUTUS	65
4.3 NORMALISOINTI.....	66
4.4 PEHMEÄKSIHEHKUTUS.....	68
4.4.1 Austeniitin ja perliitin hajoantuminen sferoidiitiksi	70
4.4.2 Palloutusmenetelmät.....	71

4.5	ISOTERMISET HEHKUTUKSET	72
4.5.1	Isoterminen perliittihehkutus	73
4.5.2	Patentointi.....	73
4.6	MYÖSTÖHEHKUTUS	74
4.7	REKRISTALLISAATIOHEHKUTUS.....	75
4.8	VEDYNPOISTOHEHKUTUS	76
5	KARKAISU JA KARKENEUVUUS	78
5.1	KAPPALEIDEN KUUMENNUS KARKAISULÄMPÖTILAAN	80
5.2	SAMMUTUS	81
5.2.1	Sammutusväliaineet.....	81
5.2.1.1	Vesi ja vesiliuokset	83
5.2.1.2	Karkaisuöljyt	85
5.2.1.3	Kaasut	86
5.2.1.4	Leijupatjat	86
5.2.1.5	Suola- ja metallikylvyt	87
5.3	PÄÄSTÖ	87
5.4	KAPPALEEN MITTAMUUTOKSET KARKAISUSSA	89
5.5	ETAPPI- JA BAINIITTIKARKAISU	91
5.5.1	Etappikarkaisu	91
5.5.2	Bainiittikarkaisu.....	92
5.6	KARKENEUVUUS	93
5.6.1	Karkenevuuden mittaaminen	96
5.6.2	Jominykoe.....	96
5.7	LÄMMÖNSIIRTO KARKAISUSSA	98
5.8	LÄMMÖNSIIRTOKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN	99
6	TYÖKALUTERÄSTEN KARKAISU	104
6.1	TYÖKALUTERÄKSET	104
6.1.1	Kylmätyöteräket	104
6.1.2	Kuumatyöteräket	105
6.1.3	Pikateräket	106
6.2	NORMALISOINTI.....	107
6.3	PEHMEÄKSIHEHKUTUS	108
6.4	MYÖSTÖHEHKUTUS	108
6.5	TYÖKALUTERÄSTEN KARKAISU.....	109
6.5.1	Karkaisuhehkutus.....	109
6.5.1.1	Hehkutuslämpötila.....	109
6.5.1.2	Kuumennus ja kuumennusaika	110
6.5.1.3	Pitoaika	110
6.5.2	Sammutus	110
6.5.3	Päästö	111
6.5.3.1	Päästölämpötila.....	111
6.5.3.2	Seostettujen terästen päästö ja päästöhauraus	112

6.6	LÄMPÖKÄSITTELYVIRHEET JA MITTAMUUTOKSET KARKAISUSSA	113
6.6.1	Kappaleeseen karkaisussa syntyviä jännityksiä	114
6.6.2	Lämpökäsittelyvirheet	114
6.6.3	Mittamuutosten vähentäminen	116
6.6.4	Kutistumattomat teräkset	116
6.7	PIKATERÄKSEN KARKAISU	118
6.7.1	Kuumennus	118
6.7.2	Karkaisuhehkutus	118
6.7.3	Sammutus	118
6.7.4	Päästö	119
6.7.5	Bainiittikarkaisu	119
6.8	TYÖKALUTERÄSTEN KYLMÄKÄSITTELYT	119
6.8.1	Pakkaskarkaisu	120
6.8.2	Kryokäsittely	121
6.8.3	Laitteet	122
6.9	PUHTAAT TYÖKALUTERÄKSET	123
6.9.1	Teräksen puhdistus uudelleen sulattamalla	123
6.9.2	Pulverimetallurgiset työkaluteräkset	124
6.10	ERKAUTUSKARKAISU	124
6.10.1	Maraging-terästen karkaisu	125
6.10.1.1	Lämmönjohtavat työkaluteräkset	126
6.10.2	Superseokset	126
6.11	TYÖKALUTERÄKSILLE SUOSITELTAVIA KOVUUSARVOJA	127
7	NUORRUTUS	130
7.1	NUORRUTUKSEN SUORITUS	130
7.2	TERÄKSEN KARKENEUVUUS	131
7.3	PÄÄSTÖHAURAUUS	133
7.3.1	Alempi päästöhauraus	133
7.3.2	Ylempi päästöhauraus	134
7.3.3	Päästöhaurauden ehkäiseminen	135
7.4	NUORRUTETUN TERÄKSEN OMINAISUUDET	136
7.5	NUORRUTUSTERÄKSET	138
7.5.1	Booriseosteiset nuorrutusteräkset	140
7.5.2	Sälemartensiittiset teräkset	141
8	PINTAKÄSITTELY- JA PINNOITUSMENETELMÄT	144
8.1	KULUMINEN JA TRIBOLOGIA	144
8.2	HERTZIN KOSKETUSJÄNNITYKSET	145
8.3	ADHESIIVINEN KITKA	146
8.4	PINTAKARKAISUMENETELMÄT	147
8.4.1	Induktiokarkaisu	149
8.4.2	Laserpintakarkaisu	154
8.4.3	Hiiletyskarkaisu	154
8.4.4	Nitraus	155
8.4.5	Booraus	156

8.5	PINNOITUSMENETELMÄT	156
8.5.1	Elektrolyttiset pinnoitukset	156
8.5.2	Terminen ruiskutus	157
8.5.3	Kaasufluoripinnoitus	158
8.5.4	Timanttipinnoitteet ja timantinkaltaiset pinnoitteet	160
8.5.4.1	Pinnoitteiden sovelluskohteita	160
9	UUNIATMOSFÄÄRIN JA KAPPALEEN VÄLISET REAKTIOT	162
9.1	UUNIATMOSFÄÄRIN HAITALLISET ILMIÖT	162
9.1.1	Terästen pinnan hapettuminen	162
9.1.1.1	Hapettumisen kulku	162
9.1.1.2	Seosaineiden vaikutus hilsekerrokseen ja hapettumiseen	163
9.1.2	Hiilenkato	165
9.1.2.1	Hiilenkadon mekanismi ja rakenteiden synty	166
9.1.2.2	Hiilenkadon edellytykset	166
9.1.2.3	Seosaineiden vaikutus hiilenkatoon ja sisäinen hapettuminen	167
9.1.3	Vetysairaus ja -hauraus	169
9.2	UUNIATMOSFÄÄRIT	169
9.2.1	Endokaasut	170
9.2.2	Eksokaasut	170
9.2.3	Inertit suojakaasut	171
9.2.4	Muut uuniatmosfäärit	171
9.2.4.1	Tyhjö	172
9.2.4.2	Suojakylvyt	172
9.2.5	Hiiletysatmosfäärit	172
9.2.6	Nitrusatmosfäärit	174
9.3	UUNIATMOSFÄÄRIEN MITTAUS JA SÄÄTÖ	175
10	HIILETYSKARKAISU	178
10.1	HIILETYS	178
10.2	KARKAISU JA PÄÄSTÖ	181
10.3	HIILETYSMENETELMÄT	182
10.4	HIILETYSKARKAISTUN KAPPALEEN OMINAISUUDET	184
10.4.1	Pinnan ja sisustan ominaisuudet	184
10.4.2	Hiiletyskarkaisukerroksen syvyys	186
10.4.3	Mittamuutokset	188
10.5	HIILETYSTERÄKSET	189
10.6	HIILIPOTENTIAALIN MITTAUS JA SÄÄTÖ KAASUHIILETYKSESSÄ	191
10.6.1	Happipotentiaalin mittaaminen	192
10.6.2	Pinnan hiilipitoisuuden määrittäminen	194
10.6.3	Ylihiiletys-tasaushiiletys	195
10.7	PANOSTUS KAASUHIILETYKSESSÄ	197
10.8	KAASUHIILETYSUUNIT	198
10.9	HIILETYKSEN SUORITTAMINEN	199
10.10	HIILETYKSEN VIRHEELLISYYDET	201

11 NITRAUS ELI TYPETYS	204
11.1 YLEISTÄ NITRAUKSESTA	204
11.2 NITRAUSMENETELMÄT	205
11.3 NITRAUKSEN SUORITTAMINEN	205
11.4 TYPPEÄ SISÄLTÄVÄN PINNAN RAKENNE	206
11.5 NITRATTUJEN TERÄSTEN PINTOJEN OMINAISUUKSIA	207
11.5.1 Pintakovuus	207
11.5.2 Mittamuutokset	209
11.5.3 Kulumiskestävyys	209
11.5.4 Korroosionkestävyys	210
11.5.5 Väsymiskestävyys	210
11.5.6 Päästönkestävyys	211
11.5.7 Nitrauskerroksen paksuus	211
11.6 NITRATTAVAT TERÄKSET	212
11.7 LÄMPÖKÄSITTELYT ENNEN NITRAUSTA	214
11.8 KAASUNITRAUS	214
11.9 SUOLAKYLPYNITRAUS	216
11.10 HIILITYPETYS	217
11.10.1 Nitraus ammoniakkin ja endokaasun seoksessa	218
11.10.2 Nitraus ammoniakkin ja eksokaasun seoksessa	219
11.11 MUITA NITRAUSMENETELMIÄ	219
12 ALIPAINEKÄSITTELYT JA KAASUSAMMUTUS	222
12.1 ALIPAINEKARKAISU	223
12.2 ALIPAINEHIILETYS	224
12.3 KAASUSAMMUTUS	226
12.3.1 Kaasusammutuksen teoriaa	227
12.3.2 Kaasun valinta	228
12.4 KAASUSAMMUTUKSELLA VARUSTETUT ALIPAINEUUNIT	229
12.4.1 Kaasun kierrätys ja jäähdytys	231
12.4.2 Kaasun virtaus ja uunityyppit	233
13 OHUTLEVYTERÄKSET JA NIIDEN LÄMPÖKÄSITTELYT	236
13.1 MUOVATTAVAT TERÄKSET	238
13.2 VÄLISIJAVAPAAT TERÄKSET	241
13.2.1 HSLA-teräket	243
13.2.2 Termomekaaninen käsittely	245
13.2.3 Lämpölujittuva teräs	246
13.2.4 Valssauskovat ja toivutushehkutetut teräket	248
13.3 ERIKOISLUJAT MUOVATTAVAT TERÄKSET	249
13.3.1 Kaksifaasiteräket	249
13.3.2 Kaksifaasiteräksen valmistus	250
13.3.3 Jatkuvan jäähtymisen S-käyrä	252
13.3.4 Kemiallinen koostumus	253
13.3.5 Mikrorakenne	255

13.4	FERRIITTIS-MARTENSIITTISESTA RAKENTEESTA POIKKEAVAT TERÄKSET	256
13.4.1	TRIP-teräkset.....	257
13.5	UUDET KOLMANNEN SUKUPOLVEN LUJAT MONIFAASITERÄKSET	258
13.6	MUOTTIIN KARKAISTAVAT TERÄKSET	260
14	VALURAUTOJEN JA -TERÄSTEN LÄMPÖKÄSITTELYT	262
14.1	SUOMUGRAFIITTIVALURAUTA.....	263
14.2	TYLPPÄGRAFIITTIVALURAUTA.....	264
14.3	PALLOGRAFIITTIVALURAUTA	264
14.3.1	Pallografiittivaluraudan lämpökäsittelyt.....	265
14.3.2	Pallografiittivaluraudan nuorrutus.....	267
14.3.2.1	Austenitointihehkutus.....	267
14.3.2.2	Sammutus	267
14.3.2.3	Päästö	268
14.4	BAINIITTINEN JA AUSFERRIITTINEN PALLOGRAFIITTIVALURAUTA	268
14.4.1	Ylä- ja alabainiitti	269
14.4.2	Jäännösausteniitti.....	269
14.4.3	Austemperointi.....	270
14.5	VALKOINEN VALURAUTA.....	271
14.6	TEMPERVALURAUTA.....	271
14.7	SEOSTETUT VALUTERÄKSET	272
15	RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN LÄMPÖKÄSITTELYT	274
15.1	RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET	274
15.2	HERKISTYMINEN JA RAERAJAKORROOSIO	275
15.3	AUSTENIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET	277
15.3.1	Austeniittisten ruostumattomien terästen peruslämpökäsittelyt.....	277
15.3.1.1	Liutushehkutus	278
15.3.1.2	Jännitystenpoistohehkutus	278
15.3.2	Työstökarkeneminen	278
15.4	FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET.....	279
15.5	MARTENSIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET	280
15.6	RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN ERIKOISLÄMPÖKÄSITTELYT	282
15.6.1	Hiiletuspintakarkaisu	282
15.6.2	Matalan lämpötilan hiiletys.....	282
16	ALUMIINIEN JA KUPARIEN LÄMPÖKÄSITTELYT	286
16.1	ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET	286
16.1.1	1xxx-sarja	287
16.1.2	2xxx-sarja	287
16.1.3	3xxx-sarja	287
16.1.4	4xxx-sarja.....	288
16.1.5	5xxx-sarja.....	288
16.1.6	6xxx-sarja.....	288
16.1.7	7xxx-sarja.....	288

16.2	ALUMIINISEOSTEN LÄMPÖKÄSITTELYT.....	288
16.2.1	Erkautuskarkaisu.....	290
16.3	KUPARIN JA KUPARISEOSTEN LÄMPÖKÄSITTELYT.....	291
16.3.1	Pehmennyshehkutus ja jännitystenpoistohehkutus.....	293
16.3.2	Kupariseosten erkautuskarkaisu.....	295
16.3.3	Uuniatmosfääri.....	296
17	LÄMPÖTILAN MITTAUS JA SÄÄTÖ.....	298
17.1	SÄHKÖINEN LÄMPÖTILAN MITTAUS.....	299
17.1.1	Termoelementit.....	299
17.1.2	Termoelementtimittauksen rajoituksia.....	305
17.1.3	Lämpötila-antureiden mittaussnopeus eli toisto aika.....	305
17.2	OPTINEN LÄMPÖTILAN MITTAUS.....	306
17.2.1	Säteilypyrometrit.....	306
17.2.2	Osittaissäteilypyrometrit.....	307
17.2.3	Kokonaissäteilypyrometrit.....	307
17.2.4	Suhdepyrometrit.....	308
17.2.5	Pyrometrimittauksen rajoituksia.....	309
17.2.6	Infrapuna-lämpömittari.....	309
17.3	LÄMPÖTILAN MITTAUKSESSA HUOMIOON OTETTAVIA SEIKKOJA.....	311
17.4	MITTAUSLAITTEIDEN TARKISTUS.....	312
17.4.1	Termoelementin tarkistus.....	312
17.4.2	Pyrometrien tarkistus.....	313
17.5	LÄMPÖTILAN SÄÄTÖ.....	314
17.5.1	On/ei-säätö.....	315
17.5.2	PID-säätö.....	315
18	LÄMPÖKÄSITTELYN LAATU.....	318
18.1	LÄMPÖKÄSITTELYN LAATUPOLITIikka.....	318
18.1.1	Laatujärjestelmä.....	318
18.1.2	Laatujohdaminen.....	319
18.1.3	Laadun varmistus.....	319
18.1.4	Laadunohjaus.....	319
18.1.5	Laadun valvonta ja tarkastus.....	319
18.1.6	Vastuu laadusta.....	319
18.2	MATERIAALIN VASTAANOTTO.....	320
18.3	LÄMPÖKÄSITTELYN LAATUSUUNNITELMA.....	320
18.4	LÄMPÖKÄSITTELYPROSESSIN AIKAINEN LAADUNVALVONTA.....	322
18.4.1	Uunin lämpötila, lämmön tasaisuus ja pito aika.....	322
18.4.2	Määräaikaistarkastukset.....	323
18.4.3	Uunissa tapahtuvat mahdollisesti haitalliset kemialliset reaktiot.....	324
18.4.4	Jäähdytyslämpötila ja -aika.....	324
18.4.5	Jäähdytys.....	325
18.5	LÄMPÖKÄSITTELYN JÄLKEISET TARKASTUKSET.....	325
18.5.1	Metallografiset tarkastukset.....	325
18.5.2	Aineenkoetus.....	326
18.5.3	Ainetta rikkomattomat tarkastukset.....	334

18.6 KARKENEMISSYVYYDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	335
18.7 PINTAKÄSITTELYJEN SYVYYDET	335
18.7.1 Induktiokarkaisu.....	336
18.7.2 Nitraussyvyys.....	337
18.7.3 Hiiletyskarkaisu.....	338
18.8 KUNNOSSAPITO OSANA LAADUN VARMISTAMISTA.....	340
19 AUTOMAATIO	342
19.1 ASIAANTUNTIJA- JA MALLINNUSOHJELMAT	343
19.2 LÄMPÖKÄSITTELYLINJOJEN AUTOMATISOINTI	344
19.2.1 Lämpökäsittelyprosessien tietokoneavusteinen ohjaus.....	345
19.3 LÄMPÖKÄSITTELYN ROBOTISOINTI JA JOUSTAVA AUTOMAATIO	347
19.3.1 Robotti karkaisimossa.....	348
19.3.2 Kappaleen kuumennus.....	351
19.3.3 Sammutus	353
19.3.4 Päästö	353
20 TYÖTURVALLISUUS LÄMPÖKÄSITTELYTEOLLISUUDESSA	356
20.1 TYÖTURVALLISUUS LÄMPÖKÄSITTELYLAITOKSISSA.....	357
20.1.1 Tapaturmat	357
20.1.2 Työpaikan hengitysilma.....	359
20.2 SAMMUTUSVÄLIAINEET	362
20.3 KAASUTURVALLISUUS.....	362
20.4 TYÖTURVALLISUUS HUOLTOTÖISSÄ	364
21 LÄMPÖKÄSITTELYYN LIITTYVÄ STANDARDOINTI.....	366
21.1 SFS-STANDARDIT	366
21.1.1 Eurooppalainen standardisointi.....	366
21.1.2 Yleisstandardit.....	366
21.1.3 Testaus.....	367
21.1.4 Turvallisuusstandardit	367
21.2 VAHVISTETUT EUROOPPALAISET STANDARDIT	368
HAKEMISTO	371