

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Konetekniikan osasto

Hitsaustekniikan laitos

Matti Karhula

SOODAKATTILAN COMPOUND-PUTKIEN SÄRÖILY- TUTKIMUS

Diplomityö

Diplomityön aihe on hyväksytty konetekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 03.06.1992.

Tarkastaja: Yliass. TkT. Jukka Martikainen

Ohjaajat: Kehitysins. DI Juha-Pekka Juuti

Piiripääll. ins. Aimo Kaski

FM. Per-Erik Ahlers

Lappeenrannassa 23.09.1992



Matti Karhula

Yläkangaskatu 8 B 14

53100 LAPPEENRANTA

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu

Konetekniikan osasto, lokakuu 1992

Karhula Matti: SOODAKATTILAN COMPOUND-PUTKIEN SÄRÖILY-
TUTKIMUS

Diplomityö, 79 sivua, 30 kuvaa, 13 taulukkoa ja 22 liitettä

Tarkastaja: Yliass. TkT. Jukka Martikainen

Ohjaajat: Kehitysins. DI Juha-Pekka Juuti

Piiripääll. ins. Aimo Kaski

FM. Per-Erik Ahlers

Hakusanat: Soodakattila, Compound-putki, Jännityskorroosio, Säröily

Keywords: Recovery boiler, Composite tube, Stress corrosion cracking,
Cracking

Soodakattilan tulipesän pohjan compound-putkien säröily on viime vuosina aiheuttanut paljon ylimääräisiä korjaustoimenpiteitä. Säröilyä on esiintynyt compound-putken austeniittisen ruostumattoman teräksen osalla. Compound-putken korjaustoimenpiteet, yhdessä lisääntyneillä puhdistustöillä ja tarkastustoiminnalla, ovat nostaneet korjauskustannuksia korjausseisokeissa. Kun tuotannonmenetykset lasketaan yhteen korjauskustannusten kanssa, puhutaan vuosittain jo useista miljoonista markoista.

Tässä työssä rajoituttiin tutkimaan korrodoivan ympäristön osuutta säröilyn aiheuttajana kirjallisuustutkimuksen puitteissa, ja kokeellisessa osuudessa käsiteltiin laajemmin compound-putkimateriaalin käyttäytymistä soodakattilaolosuhteissa. Kokeellisessa osuudessa tehtiin metallihiiden mikroskooppitutkimus, kovuuskokeet, SEM-tutkimus ja FEM-analyysi.

Suoritetuissa tutkimuksissa, sekä mikroskooppitutkimuksessa että alkuaineanalyysissä, ei havaittu metallin kiderakenteissa muutoksia. Kovuusmittauksissa havaittiin pintakovuuksissa vain pieniä muutoksia. FEM-analyysin perusteella todettiin pintakerroksen plastisoituvan käyttöjaksojen aikana ja aina kun soodakattila on alasajettuna, austeniittinen ruostumaton teräs on myötörajan suuruisen vetojännityksen alaisena.

Tuloksia tarkasteltaessa päädyttiin siihen, että compound-putken pintakerroksen säröilyn syntymekanismi on jännityskorroosio. Nykyisin käytössä olevan compound-putkimateriaalin jännityskorroosionkestävyys ei ole riittävä soodakattilaolosuhteisiin. Säröilyn ehkäisemiseksi pitäisi joko pintamateriaali vaihtaa paremmin jännityskorroosiota kestävämpään tai muuttamalla soodakattilan pohjaputkiston konstruktioita siten, että pohjaputkien lämpötila alenee nykyisestä lämpötilasta 50...100 °C:tta.

Käytettäessä nykyisiä compound-putkimateriaaleja ei kuulapuhalluksesta, jolloin pinnoitemateriaalin pintaan saadaan aikaan puristusjännitys, ole muuta hyötyä kuin jännityskonsentraatioita tasoittava vaikutus, koska saatu hyöty häviää kun koko pinnoitekerros plastisoituu. Kuulapuhalluksesta tulee olemaan konkreettista hyötyä silloin, kun jännitysvaihtelut compound-putken pintamateriaalissa pysyvät elastisella alueella. Jännitysvaihteluväliä voidaan pienentää käyttämällä uusia pinnoitemateriaaleja, joilla sisä- ja ulkomateriaalien pituuden lämpölaajenemiskertoimien erotus pienenee, tai suunnittelemalla soodakattilan tulipesän pohjalle erillinen, noin 100 °C:tta alhaisempi vedenkierto. Näillä toimenpiteillä pinnoitteen pintakerroksen vetojännitys jää alasajon jälkeen huomattavasti alle myötörajan ja siten jännityskorroosiovaara pienenee.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin TTK:n ja Kaukas Oy:n tukemana pääosin Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa.

Työn ohjaajina toimivat piiripääll. Aimo Kaski, kehitysins. Juha-Pekka Juuti ja Per-Erik Ahlers, joille esitän parhaimmat kiitokset. Lämpimät kiitokset myös työn tarkastajalle TkT. Jukka Martikaiselle.

Teknillisen Tarkastuskeskuksen henkilökuntaa haluan kiittää erittäin mukavista hetkistä työaikana, sekä myös vapaa-aikana. Edelleen haluan kiittää LTKK:n konetekniikan osaston henkilökuntaa huumoripitoisesta - jopa opiskelua sivuavasta - ilmapiiiristä.

Matti Karhula

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
1.1 Ongelma	5
1.2 Diplomityön rajaus	6
1.3 Tutkimusorganisaatio	6
KIRJALLISUUSOSA	7
2 SOODAKATTILA	7
2.1 Yleistä	7
2.2 Sellutehtaan kemikaalikierto	8
2.3 Soodakattilan tehtävät	10
2.4 Soodakattilatyypit	11
2.4.1 BW-kattila	12
2.4.2 CE-kattila	12
2.4.3 Ahlström-kattila	13
2.4.4 Tampella-kattila	13
2.4.5 Götaverken-kattila	14
2.5 Soodakattilan toimintaperiaate	16
2.6 Tulipesässä tapahtuvat kemialliset reaktiot	17
2.7 Tulipesä	19
2.8 Compound-putket	20
2.8.1 Austeniittinen ruostumaton teräs	21
2.8.2 Hiiliteräs	23
2.9 Nykyiset ongelmat tulipesän pohjalla	24

3 ERI TEKIJÖIDEN VAIKUTUS VAURIOITUMISEEN	26
3.1 Vaurioiden kartoitus Itä-Suomen soodakattiloissa	26
3.1.1 Kaukas Oy, Lappeenranta	27
3.1.2 Laminating Papers Oy Kotkan tehtaas	28
3.1.3 Enzo-Gutzeit Oy, Tainionkoski	29
3.1.4 Sunila Oy, Kotka	30
3.1.5 Kymin Paperiteollisuus Oy Kuusanniemen sellutehdas	31
3.1.6 Yhtyneet Paperitehtaat Oy Joutseno-Pulp	31
3.2 Compound-putkiin vaikuttava ympäristö	32
3.2.1 Lämpötila	32
3.2.2 Kemikaalit	34
3.2.3 Palamisilma	37
3.2.4 Vedenkierto	37
3.3 Kattilan ylös- ja alasajot	38
3.4 Kattilan vesipesu	39
3.5 Tulipesän pohjakonstruktio	40
4 COMPOUND-PUTKIIN KOHDISTUVAT RASITUKSET	41
4.1 Hitsausjännitykset	41
4.2 Lämpöjännitykset	43
4.3 Korroosio	44
4.3.1 Jännityskorroosio	44
4.3.2 Vetyhaurastuminen	46
4.3.3 Korroosioväsyminen	48
4.4 Viruminen	49
4.5 Muut tekijät	49

KOKEELLINEN OSA	50
5 METALLURGINEN TUTKIMUS	50
5.1 Metallihieiden mikroskooppitutkimus	50
5.2 Kovuuskokeet	54
5.3 SEM-tutkimus	55
6 FEM - TARKASTELU	58
6.1 Käsien laskenta	58
6.2 ABAQUS-laskenta	62
7 TULOSTEN TARKASTELU	68
7.1 Metallurginen tutkimus	68
7.2 FEM - tarkastelu	70
7.3 Johtopäätökset	73
8 YHTEENVETO	75
9 LÄHDEKIRJALLISUUS	77
LIITTEET	80

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

SS	Ruostumaton teräs
CS	Hiiliteräs
σ	Jännitys
σ_v	Vetojännitys
σ_p	Puristusjännitys
σ_o	Ulkokomponentin jännitys
σ_{pinnoite}	Pinnoitteen jännitys
σ_{ep}	Sisäpuolisen paineen aiheuttama kehäjännitys
p	Paine
p_s	Sisäpuolinen paine
d_u	Ulkohalkaisija
d_s	Sisähalkaisija
d	Putken halkaisija
α	Pituuden lämpölaajenemiskerroin
$\Delta\alpha$	Pituuden lämpölaajenemiskertoimien erotus
E	Kimmokerroin
E_{ss}	Ruostumattoman teräksen kimmokerroin
T	Lämpötila
ΔT	Lämpötilojen vaihteluväli
ν	Poissonin luku
t_o	Ulkokomponentin seinämän paksuus
t_i	Sisäkomponentin seinämän paksuus
$R_{p0.2}$	Ruostumattoman teräksen myötöraja (0.2-raja)

1 JOHDANTO

1.1 Ongelma

Soodakattilan tulipesän pohjaputkien säröily on viime vuosina aiheuttanut paljon ylimääräisiä korjaustoimenpiteitä ja jopa vaaratilanteita sellutehdasympäristössä. Säröilyn kohteena olevat pohjaputket ovat compound-putkia, joissa on esiintynyt säröilyä sekä hitsausliitoksissa että putken otsapinnalla - pintamateriaalissa (austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä). Tämän säröilyn syntymekanismeista on monia eri teorioita, kuten jännityskorroosio, korroosioväsyminen, viruminen ja väsymisilmiö. Soodakattilaolosuhteiden vaikutuksesta säröilyn aiheuttajana ollaan myös montaa erimieltä. Puhutaan vesipesun jälkeisen korrodoivan ympäristön vaikutuksesta, lämpösäteilyn vaihtelujen aiheuttamasta väsymisestä, vedenkiertohäiriöiden aiheuttamista ylikuumenemisesta, talteenotto-prosessin kemikaalikierrossa tapahtuneista polttoliipeän kemiallisista muutoksista jne.

Tosiasia kuitenkin on se, että vuosien 1989...1991 aikana, jolloin laajemmin tarkastettiin soodakattiloiden pohjia, havaittiin ongelman käsittävän lähes kaikkia sellutehtaita kattilan valmistajasta riippumatta.

1.2 Diplomityön rajaus

Soodakattilaolosuhteissa vaikuttavat polttoliipeän eri kemikaalit erilaisissa olomuodoissa (korrodoiva ympäristö) sekä compound-putken materiaalien eroavaisuuksista aiheutuvat jännitykset lämpötilan muuttuessa. Tässä työssä tullaan rajoittumaan korrodoivan ympäristön osuuteen sen aiheuttamista vaurioista lähinnä kirjallisuustutkimuksen puitteissa ja kokeellinen osuus tulee käsittämään laajemmin compound-putkimateriaalin käyttäytymistä soodakattilaolosuhteissa. Koska säröilyä tapahtuu puhtaasti putkimateriaalin otsapinnalla, tarkastelukohtana pidetään compound-putkea ilman hitsausliitosta.

1.3 Tutkimusorganisaatio

Diplomityö tehdään Teknillisen Tarkastuskeskuksen ja Kaukas Oy tukeamana TTK:n Lappeenrannan piiritoimistossa, Lappeenrannan Teknisessä Korkeakoulussa Konetekniikan osastolla ja Kaukas Oy:n Tutkimusosastolla.

KIRJALLISUUSOSA

2 SOODAKATTILA

2.1 Yleistä

Sulfaattisellutehtaan talteenottoprosessi on laaja, monimutkainen sarja fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja, jotka voidaan jakaa kolmeen pääasialliseen toimintoon /1/:

- 1) talteenottaa ja regeneroida keitossa tarvittavat kemikaalit
- 2) kerätä ja polttaa puuaineksesta liuennut orgaaninen aines pois päästöjen ehkäisemiseksi
- 3) kehittää höyryä (ja sähköenergiaa) palamisprosessissa syntyvistä savukaasuista

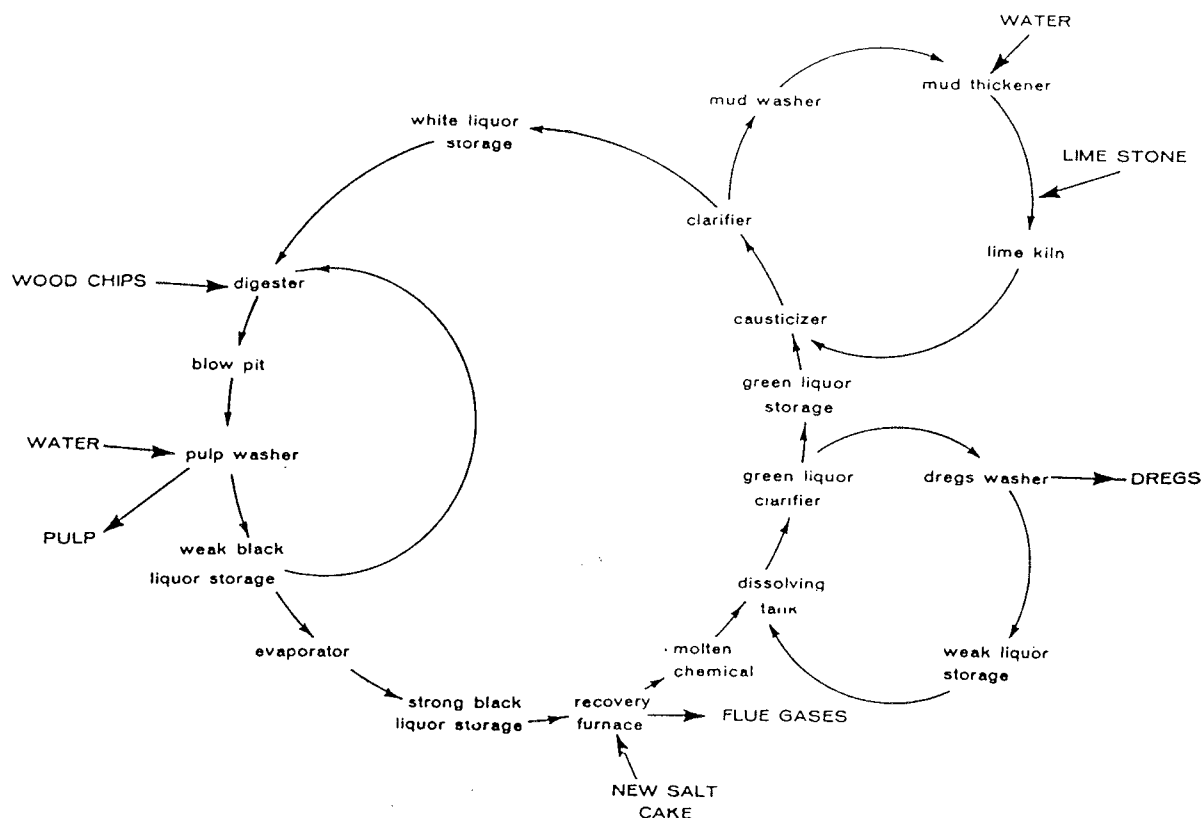
Sulfaattisellutehtaan talteenottoprosessi perustuu soodakattilaprosessiin ja kaustisointiin. Soodakattila- ja kaustisointiprosesseissa polttoliipeän (väkevöity mustalipeä) sisältämät keittokemikaalit natrium- ja rikkiyhdisteet erotetaan lipeän muista komponenteista ja saatetaan sellaiseen muotoon, että ne voidaan käyttää uudestaan keittoprosessissa.

Soodakattila on tällä hetkellä talteenottoprosessin tärkein ja kallein osa. Tästä syystä soodakattila myös muodostaa usein koko talteenotto-prosessin kapasiteetin pullonkaulan. Näin soodakattilan käytettävyys ja kapasiteetin turvaaminen ovat koko talteenottoprosessille ratkaisevan tärkeitä /2/.

Soodakattiloiden koko on kasvanut viime vuosina entisestään ja poltettavan lipeän kuiva-ainepitoisuudet ovat nousseet yli 70%. Erityisellä paineenalaisella haihdutusyksiköllä saavutetaan jopa yli 80% kuiva-ainepitoisuus /2/.

2.2 Sellutehtaan kemikaalikierto

Sellukeiton tarkoituksena on vapauttaa puun kuidut toisistaan liuottamalla kuitujen sidosainesta, ligniiniä. Liuennut ligniini liukenee keittonesteeseen (valkolipeä), jolloin muodostuu mustalipeää. Sulfaattimassa pestään puhtaaksi mustalipeästä pesuvedellä. Saatu heikkomustalipeä väkevöidään polttokelpoiseen muotoon haihduttamalla pois suurin osa (85...95%) sen sisältämästä vedestä. Soodakattilassa poltetaan mustalipeän sisältämä orgaaninen kuiva-aines ja syntyvä energiasisältö otetaan talteen. Kuiva-aineen epäorgaaninen aines, kemikaalisula, liuotetaan veteen liuottajassa, jolloin syntyy viherlipeä (soodalipeä). Viherlipeän muuttaminen valkolipeäksi tapahtuu kaustisointiprosessissa. Kaustisoinnissa regeneroidaan käytetty kalkki kalkkikierrossa /3/. Kuvassa 1 on esitetty sulfaattisellutehtaan talteenotto prosessi.



Kuva 1 Sulfaattisellutehtaan talteenotto prosessi /1/.

Kemikaalihäviöitä syntyy kemikaalikierron jokaisessa prosessin vaiheessa. Kemikaalikierron natrium- ja rikkihäviöt ovat kaasumaisia, pölymäisiä tai nesteen mukana poistuvia /5/.

Kemikaalikierron natrium- ja rikkihäviöiden korvaamiseen käytetään muunmuassa:

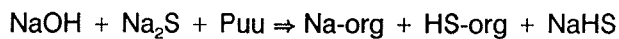
- natriumsulfaattia, mikä lisätään vahvaan mustalipeään
- natriumkarbonaattia, mikä lisätään viherlipeään
- natriumhydroksidia, mikä lisätään valkolipeään

Taulukossa 1 on esitetty yksinkertaistettuina kemikaalikierron muutamia prosesseja.

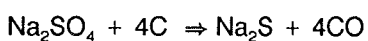
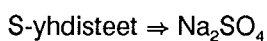
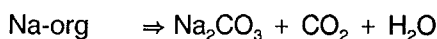
TAULUKKO 1

Kemialliset prosessit kemikaalikierrossa /1/.

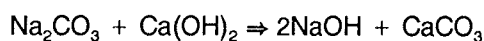
Keitto:



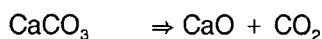
Soodakattila:



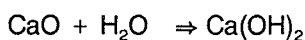
Kaustisointi:



Meesan poltto:



Sammutus:

**2.3 Soodakattilan tehtävät**

Soodakattilalla on kaksi erillistä tehtävää: 1) keittokemikaalien talteenotto ja 2) orgaanisen osuuden lämpösisällön talteenotto /4/.

Kemikaalien talteenotto:

- orgaaniseen ainekseen sitoutuneen natriumin muuttaminen regeneroitavaan muotoon eli natriumkarbonaatiksi (Na_2CO_3)
- natriumsulfaatin (Na_2SO_4) pelkistys natriumsulfidiksi (Na_2S)

Lämmön talteenotto:

- höyryn tuotanto (sähköenergian kehitys)
- osa lämmöstä kuluu tulipesäreaktioihin

Rikkiyhdisteiden muuttaminen sulfidi-muotoon pitäisi olla mahdollisimman täydellistä, koska se osa rikistä, joka ei muutu sulfidiksi, on koko suljetussa kierrossa ylimääräisenä kuormana aiheuttaen kustannuksia ja ylimääräisiä vaikeuksia /4/.

Reduktioaste ilmaisee montako prosenttia kokonaisrikistä on muuttunut sulfidiksi. Reduktioaste voidaan laskea yksinkertaistettuna seuraavalla kaavalla.

$$\text{Reduktioaste} = \frac{Na_2S [mol]}{Na_2S [mol] + Na_2SO_4 [mol]}$$

Hyvin toimivassa soodakattilassa reduktioaste on yli 95%.

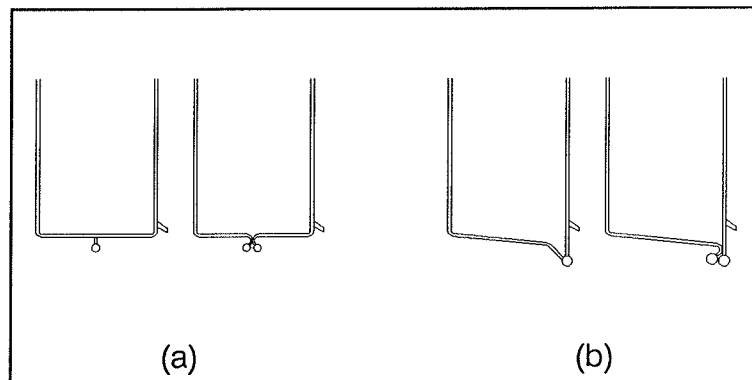
2.4 Soodakattilatyypit /19/

Perinteisesti soodakattilat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: BW-kattilat ja CE-kattilat. Periaatteellisesti kattilat eroavat toisistaan mm. lipeänruiskutustavan, pohjan kaltevuuden, vedenkierron ja ilmajaon osalta.

Suomessa edellä mainittujen kattilatyyppejen lisäksi voidaan puhua erikseen Ahlström-kattilasta ja Tampella-kattilasta, sekä ehkä myös Götaverken-kattilasta.

2.4.1 BW-kattila (Babcock & Wilcox)

BW-kattilassa lipeän ruiskutus tapahtuu kattilan etu- ja takaseiniltä yhdestä ohjattua heilahdusliikettä tekevästä lusikkasuuttimesta. Tulipesän vinon pohjan tarkoitus on johtaa sula välittömästi sulakouruja pitkin liuotussäiliöön sitä mukaa kuin sitä valuu keon läpi pohjalle. Jo alkuperäisessä BW-kattilassa ilma on tuodu tulipesään kolmesta ilmarekisteristä. Kuvassa 2 on BW- ja CE-kattiloiden pohjakonstruktiot /14/.



Kuva 2 CE-kattilassa (a) on dekanttoiva pohja, jonka kaltevuus $0...3^\circ$. BW-kattilassa (b) pohjaputket ovat vähintään 5° kaltevuudessa /14/.

2.4.2 CE-kattila (Combustion Engineering)

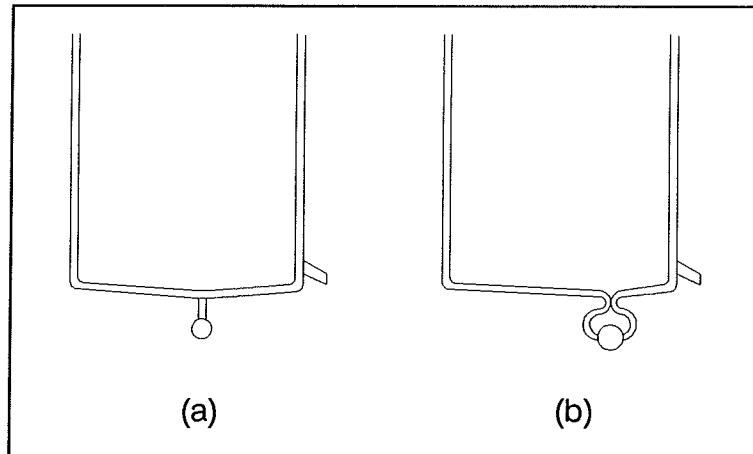
CE-kattilassa lipeän ruiskutus tulipesään tapahtuu tavallisesti kattilan kaikilta seiniltä pystytasossa heiluvilla hajotussuuttimilla. CE-tyypissä on ns. dekanttoiva pohja, jonka kaltevuus on $0...3$ astetta /14/. Sula johdetaan ylijuoksuna sulakourujen kautta liuotussäiliöön. Ensimmäisissä CE-kattiloissa oli vain ensiö- ja toisioilmarekisterit. Nykyisiin kattiloihin on lisätty lipeän polttoa varten kolmas ilmarekisteri.

2.4.3 Ahlström-kattila

Ahlström-kattila muistuttaa konstruktioltaan melko pitkälti CE-kattilatyyppejä. Kattilassa on CE-kattilan tavoin dekantoinen pohja. Pohjaputkiston vedenkierto jakaantuu (hiukan keskikohdalta sulakourujen suuntaan) sekä etu- että takaseinälle päin haarautuvalla putkistolla (tiivistystä ei tarvita). Pohjassa on muutaman asteen nousu sekä etu- että takaseinälle päin. Ilmajako on kolmetasoinen (primääri-, sekundääri- ja tertiääritaso). Kuvassa 4 on esitetty A. Ahlström Oy:n valmistama Kaukas Oy:n soodakattila SK 3 /12/.

2.4.4 Tampella-kattila

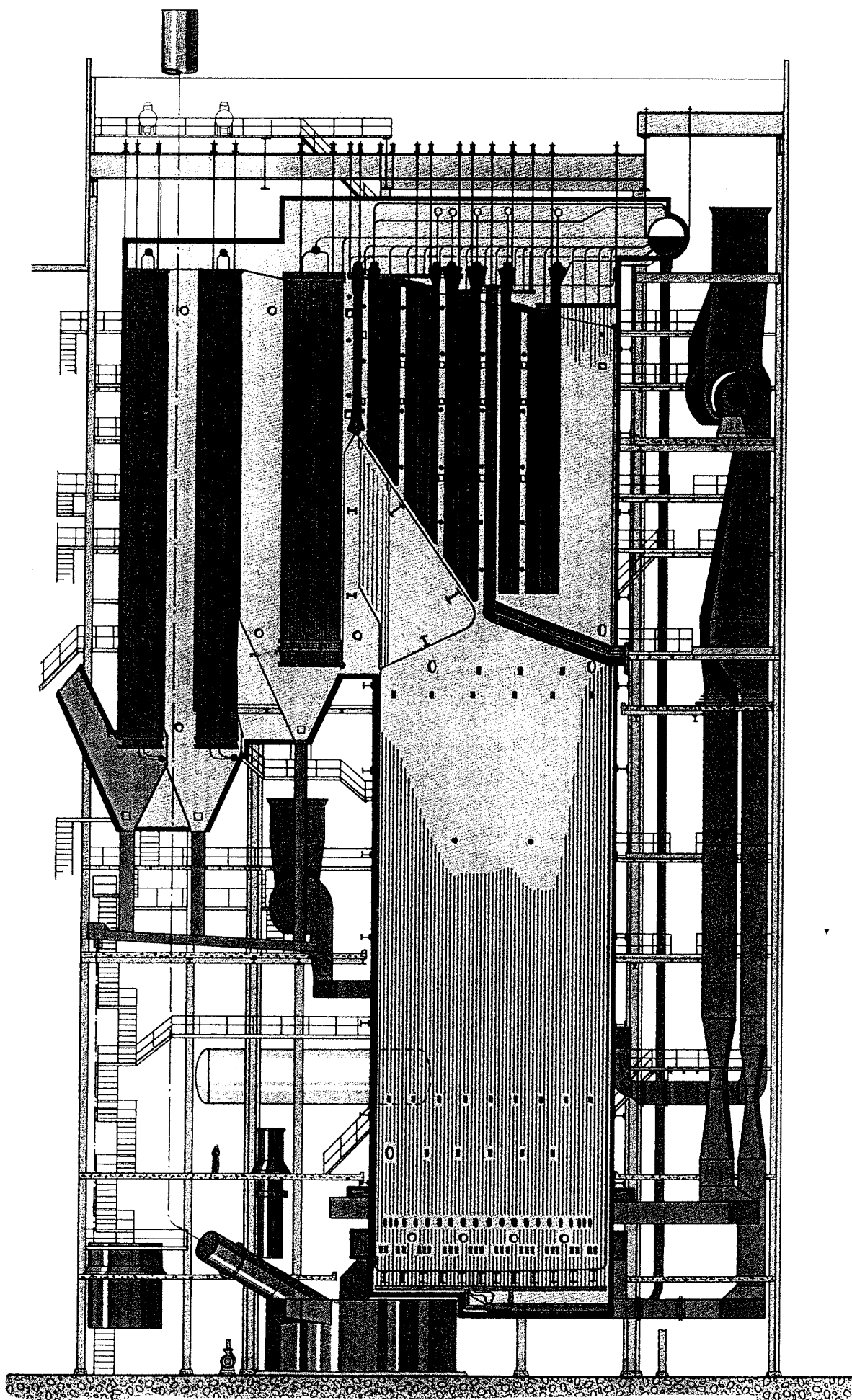
Myös Tampella-kattilassa tulipesän pohja on muutaman asteen kallistuksella ja lähentelee dekantoinen pohjaa. Suurimpana erona tulipesän alaosassa Ahlström-kattilaan verrattuna on vedenkierto pohjaputkistossa. Jako sijaitsee lähempänä sulakouruja ja jakotukilta tulee erilliset putkistot, jotka kääntyvät pohjaa pitkin sekä etu- että takaseinille päin. Tiivistys tapahtuu kamparaudoin ja tiivistemassalla. Myös ilma-aukkojen muoto on poikkeava Ahlström-kattilaan verrattuna. Kuvassa 3 on Tampella- ja Ahlström-kattiloiden pohjaratkaisut.



Kuva 3 Ahlström-kattilan (a) ja Tampella-kattilan (b) pohjakonstruktiot.

2.4.5 Götaverken-kattila

Götaverken-kattilassa on kattilatyypeistä kaltevin pohjaratkaisu, noin 5...7 astetta. Vanhemmissa kattiloissa, esimerkiksi Kuusanniemen sellutehtaassa SK 2:ssa, ilmajako jakaantuu sekä alempaan ja ylempään primääritasoon että alempaan ja ylempään sekundääritasoon. Nykyisissä malleissa on lipeän polttoa varten kolme ilmarekisteriä: primääri- ja sekundääritaso poltintason alapuolella ja tertiääritaso poltintason yläpuolella. Kattilatyyppinä Götaverken-kattila on vähiten käytetty Suomessa.



Kuva 4 Ahlström-kattila. 2700 tka/d, 118 kg/s, 84 bar, 480°C /12/.

2.5 Soodakattilan toimintaperiaate

Rakenteeltaan soodakattilasta löytyy yhtäläisyyksiä höyrykattiloiden kanssa kuten lämmön talteenottoon ja savukaasujen puhdistukseen liittyvät osat. Polttoaineen laatu ja kemikaalien talteenotto vaativat kuitenkin eräitä erikoispiirteitä, joita ei höyrykattiloissa yleensä esiinny /4/.

Ennen mustalipeän polttoa heikkomustalipeästä haihdutetaan normaalisti 85...95% vedestä pois haihduttamalla. Saatu vahvalipeä pumpataan soodakattilan sekoitussäiliöön, missä tapahtuu sekä korvauskemikaalin lisäys että tuhkasuppiloilta (ekonomaiseri ja sähkösuodin) kerätyn keittokemikaaleja sisältävän tuhkan palautus kemikaalikiertoon.

Esilämmittimillä kuumennettu mustalipeä ruiskutetaan soodakattilaan, missä tapahtuu vielä mustalipeään sitoutuneen veden haihtuminen ja orgaanisen aineksen palaminen. Jotta palaminen olisi hallittua ja rikkiyhdisteiden pelkistyminen natriumsulfidiksi mahdollisimman täydellistä, tulipesään syötetään esilämmitettyä polttoilmaa primääri- ja sekundääritasoilta sekä tertiääri-ilmaa, mikä otetaan ilman esilämmitystä kattilarakennuksen sisältä. Jäljelle jäänyt epäorgaaninen aine sulaa korkeassa lämpötilassa ja virtaa tulipesän pohjalta sulakouruja pitkin liuotussäiliöön.

Liuotussäiliössä sula liuotetaan veteen ja meesan pesusta tulevaan heikkovalkolipeään, jolloin saadaan kaustistamolle pumpattavaa viherlipoa.

Polton aikana liekin lämpösäteily sekä myös tulipesän pohjalle syntyvästä keosta säteilevä lämpö höyrystävät kattilaputkistoissa virtaavan veden. Lieriön yläosaan keräytynyt höyry tulistetaan, eli höyryn lämpötila nostetaan yli kyllästyslämpötilan, tulistimessa ja samalla lisätään höyryn energiasisältöä. Tulistetun höyryn maksimilämpötilana pidetään yleensä 480 °C. Osa höyrystä käytetään sähköenergian kehitykseen, osa höyrystä johdetaan pienempipaineisena (esim. 10 bar tai 3 bar) tehtaan muihin tarpeisiin esim. kuivauskoneille, kaukolämpöverkkoon tms.

2.6 Tulipesässä tapahtuvat kemialliset reaktiot

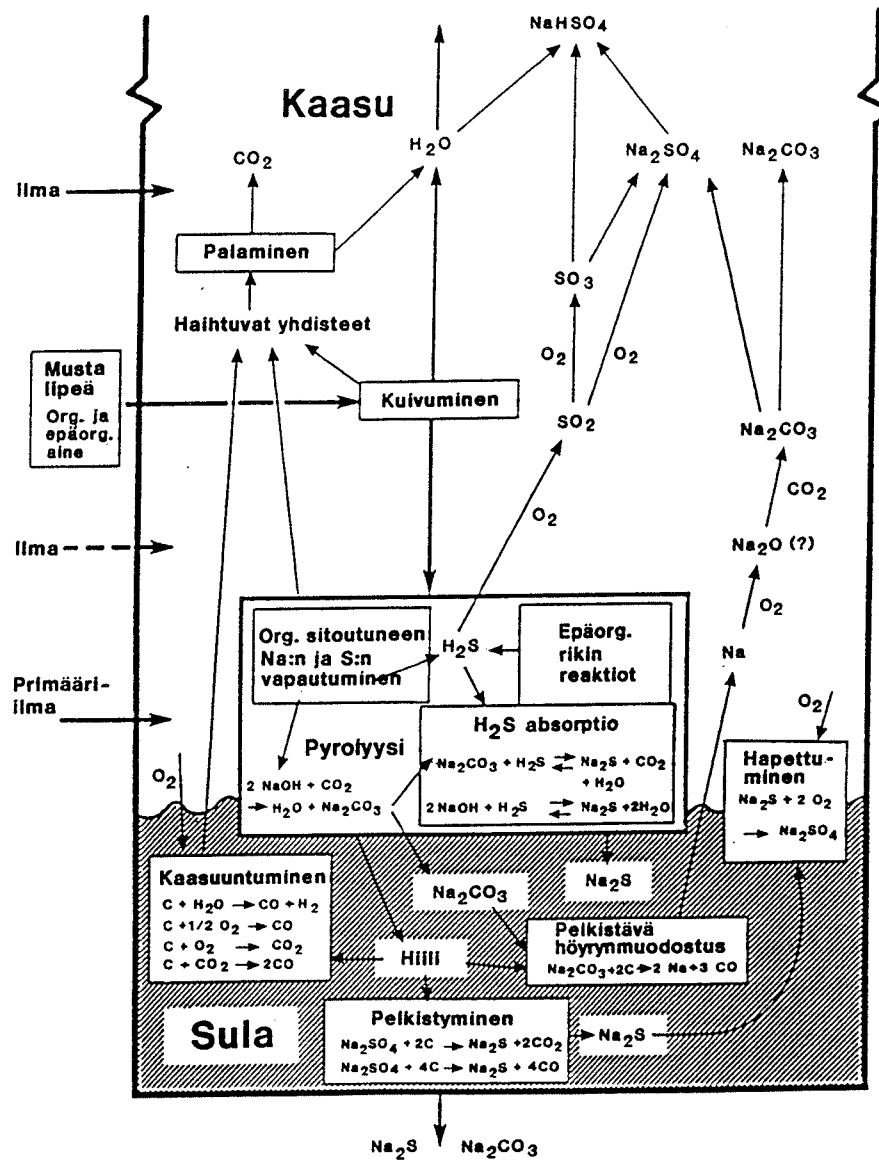
Tulipesäreaktiot ovat erittäin monimuotoisia ja vaikeasti hallittavia. Kemialliset reaktiot tapahtuvat eri vyöhykkeissä, joita ovat pelkistys-, kuivaus- ja hapettumisvyöhyke /4/.

Pelkistysvyöhykkeessä tapahtuu rikin pelkistyminen sulfidiksi. Primääri-ilman syötöllä pyritään säätämään oikea lämpötila ja riittävä happivajaus, jolloin reduktioaste olisi mahdollisimman korkea.

Kuivausvyöhykkeessä tapahtuu lipeäpisan kuivuminen siten, että kekoon päätyessään palava aine on kuivaa ja lämpötila korkea.

Hapettumisvyöhykkeessä pyritään ylläpitämään happiylimäärä, jolloin palamatta jääneet kaasut saadaan palamaan loppuun.

Kuvassa 5 on esitetty tulipesässä tapahtuvat kemialliset reaktiot.



Kuva 5 Tärkeimmät tulipesässä tapahtuvat reaktiot /13/.

2.7 Tulipesä

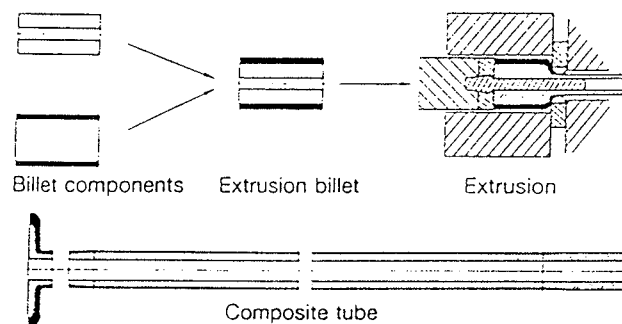
Tulipesä koostuu pohja- ja seinäputkista, jotka ovat nykyisin yleensä kaasutiiviisti hitsattua membran-rakennetta. Tulipesän pohja- ja seinärakenne voi olla rakennettu myös ilman evää putkien välissä, jolloin se on tangentiaalirakenne. Tulipesässä yhtenäisen seinärakenteen häiriökohtia ovat sularännien aukot, ilma-aukot, öljy- ja maakaasupolttimien aukot sekä polttolipeän ruiskutusaukot /4/.

Soodakattiloissa tapahtuneet muutokset, kuten painetason nousu ja pyrkiminen polttolipeän korkeampaan kuiva-ainepitoisuuteen, aiheuttavat tulipesän putkissa lämpötilan nousua sekä kaasu-, sula- ja jäähmeäfaaseissa kemiallisia muutoksia. Tästä seuraa, että perinteinen hiilliteräspanki syöpyy jopa 0.25...1.25 mm vuodessa. Syöpymisnopeus riippuu muunmuassa kattilan käyttöpaineesta, koska käyttöpaine vaikuttaa putkistossa virtaavan veden lämpötilaan /6/.

Korroosiota vastaan pyritään suojautumaan eri keinoin: tapituksella, ruiskuttamalla korroosiota vastaan suojaava pintakerros, päällehitsauksella ja compound-materiaalilla. Compound-putkimateriaalin käyttö on yleistynyt suojauskeinona korroosiota vastaan ja sillä on saavutettu hyviä tuloksia mm. seinäputkissa, ilma-aukoissa ja sularännien aukoissa /6, 7/.

2.8 Compound-putket

Compound-putket muodostuvat kahdesta eri materiaalikomponentista: sisäpuolinen materiaali on hiiliterästä ja ulkopuolinen materiaali austeniitista ruostumatonta terästä. Putket valmistetaan kuumapuristamalla materiaalikomponentit yhteen korkeassa lämpötilassa ja korkeassa paineessa, mikä saa aikaan komponenttien välille vahvan metallurgisen sidoksen. Pursotettu compound-putkiaihiio kylmävalssataan ja lämpökäsitellään, minkä jälkeen suoritetaan 100% ultraäänitarkastus. Kuvassa 6 on esitty yksinkertaistettuna putken valmistus /8,9/. Kylmämuovauksen tai hitsauksen jälkeen compound-putkeen syntyneet jäännösjännitykset voidaan poistaa osittain lämpökäsittelemällä putket 650 °C:ssa. Lämpökäsittelyn jälkeen compound-putkeen syntyy kuitenkin materiaaliaroista aiheutuvia jäännösjännityksiä /24/.



Kuva 6 Compound-putken valmistus /9/.

Suomen sellutehtaiden soodakattiloissa on tällä hetkellä käytössä pääasiassa Sandvik compound-putkea: Sandvik 3R12/4L7. Myös vanhemmaa compound-putkea Sandvik 5R10/4L7 on käytössä. Taulukossa 2 on esitetty Sandvik compound-putkien ulko- ja sisämateriaalien standardien vastaavuudet /9/.

TAULUKKO 2 Sandvik compound-putkien pinta- ja sisämateriaalien standardien vastaavuudet /9/.

Pintamateriaali:

Sandvik 3R12	AISI 304L	SS 2352	W.-Nr. 1.4306
Sandvik 5R10	AISI 304	SS 2333	W.-Nr. 1.4301

Sisämateriaali:

Sandvik 4L7	ASME SA 210 Gr A-1	SS 1435	W.-Nr. 1.0405
-------------	--------------------	---------	---------------

2.8.1 Austeniittinen ruostumaton teräs

Compound-putken pintamateriaalina käytetään tällä hetkellä austeniittista ruostumatonta terästä AISI 304L (aiemmin AISI 304), jonka seinämänpaksuus on 1.50...1.65 mm riippuen putkikoosta /9/. Pintamateriaalin tehtävänä on toimia soodakattilan tulipesän alaosassa - erittäin korrodoivassa ympäristössä - korroosionsuojana, jolloin hiiliteräs ei ole alttiina esimerkiksi pistekorroosiolle tulipesän puolella. Taulukossa 3 on esitetty pintamateriaalien kemialliset koostumukset /23/.

TAULUKKO 3

Pintamateriaalien kemialliset koostumukset
(prosentuaaliset osuudet maksimissaan) /23/.

AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
304L	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	18-20	8-12
304	0.08	2.00	0.045	0.03	1.00	18-20	8-10.5

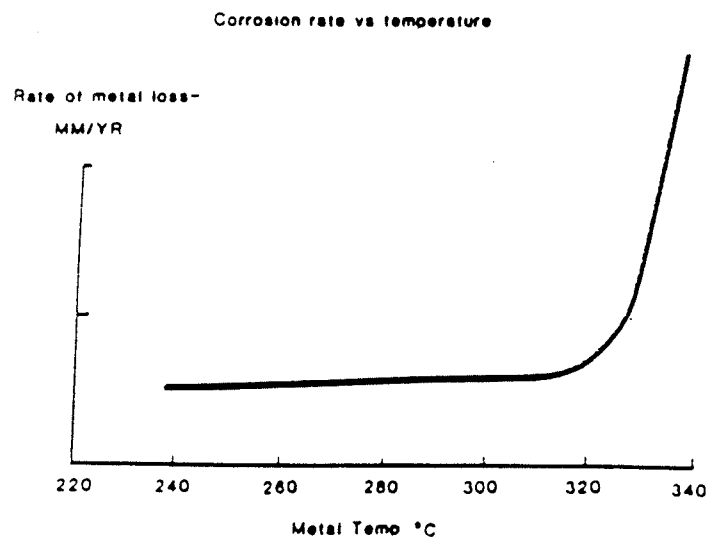
Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat kromi-nikkeli -teräksiä, joiden rakenne saadaan sopivalla lämpökäsittelyllä pysyvästi austeniittiseksi. Vaikka seosaineita on muitakin, on perustana systeemi Fe-Cr-Ni, joissa kromipitoisuus vaihtelee 16...26% ja nikkelpitoisuus 6...22%, kromin ja nikkelin pitoisuuksien summan ollessa vähintään 23% /11/.

Austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä seosaineena oleva kromi aiheuttaa teräksen pintakerroksen passivoitumisen, johon teräksen korroosionkestävyys perustuu. Nikkeli parantaa korroosionkestävyyttä jonkin verran nimenomaan heikosti hapettavissa olosuhteissa /11/. Kun nikkelpitoisuus on 7...10%, on jännityskorroosionkestävyys huonoimmillaan. Lisäämällä Ni-pitoisuutta alkaa jännityskorroosionkestävyys parantua ja kun lähestytään Ni-pitoisuutta 30%, on jännityskorroosionkestävyys jo hyvä /23 s.550/.

Koska austeniittisen ruostumattoman teräksen kidemuoto on pintakeskinen kuutiohila (kuten kuparilla ja alumiinilla), ei teräs ole magneettinen. Myöskään selvää myötörajaa ei esiinny. Herkistymisestä johtuva raerajakorroosio on nykyisin käytettävällä AISI 304L materiaalilla harvinaista, koska hiilipitoisuus on alennettu alle 0.03% ja siten hiilellä ylikyllästettyjen austeniittisten karbidien erkautuminen hidastuu eikä austeniitin raerajoille muodostu yhtenäistä vyöhykettä /11/.

2.8.2 Hiiliteräs

Kantavana sisämateriaalina compound-putkessa käytetään hiiliterästä (ASME SA 210 Gr A-1), jonka seinämänvahvuus on 3.58...4.93 mm riippuen putkikoosta /9/. Puhtaasti hiiliteräksestä olevan putken ongelmia soodakattilaolosuhteissa ovat putken nopea syöpyminen tulipesän puolelta metallin lämpötilan noustessa yli 320 °C (kuva 7) sekä sula-aukkojen ja ilma-aukkojen säröily /6/.



Kuva 7 Hiiliteräksen korroosioasteen kasvu lämpötilan funktiona soodakattilaolosuhteissa /6/.

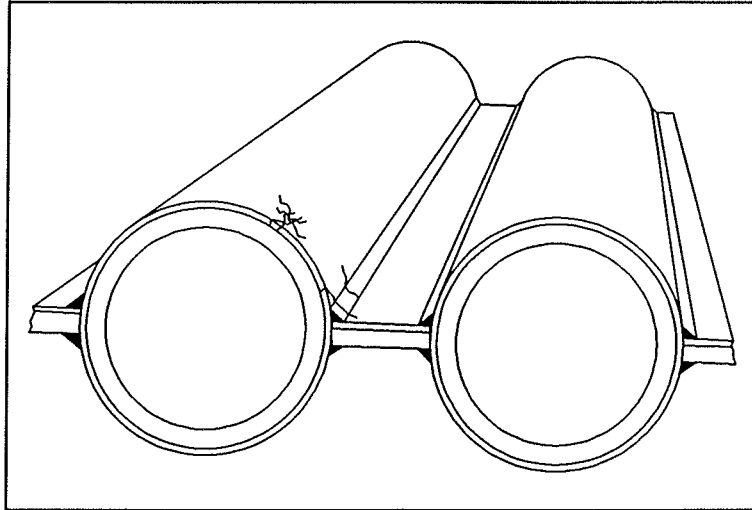
2.9 Nykyiset ongelmat tulipesän pohjalla

Tulipesän pohjan compound-putkien austeniittisen pintakerroksen säröily on tullut nykyisin ongelmaksi soodakattiloissa. Säröilyä esiintyy evähitseissä sekä putken pinnalla austeniittisella alueella.

Säröilyn edetessä syvemmälle kohti austeniittisen ruostumattoman teräksen ja hiiliteräksen rajapintaa tapahtuu särön haaroittumista, ja kun etenevä särö saavuttaa rajapinnan pysähtyy särönkasvu säteensuunnassa. Särön kasvua tapahtuu tämän jälkeen rajapinnan suunnassa. Säröilyn laajuuden kasvaessa tapahtuu pintakerroksen irtoamista hiiliteräksen pinnasta jolloin korroosio pääsee tapahtumaan vapaasti hiiliteräksessä.

Tulipesän pohjan vaurioita on korjattu päällehitsauksella sekä vaihtamalla vaurioituneita putkia uusiksi. Korjauksien aiheuttama rahallinen kulu ei ole pelkästään korjauskustannuksista aiheutuva, vaan tuotannon menetyksistä aiheutuvat rahalliset menetykset voivat nousta suuriksi soodakattilan käytettävyyden alentuessa. Korjauskustannusten lisäksi sekä pohjan puhdistustyöt että pohjatarkastus lisäävät kustannuksia. Keskikokoisessa soodakattilassa (pohja-ala noin 80 m²) voidaan arvioida pohjan puhdistöiden ja pohjatarkastuksen kustannukseksi noin 250 000 mk. Suomessa sijaitsevan keskikokoisen sellutehtaan keskimääräinen tuotannonmenetys on noin 900 000 markkaa vuorokaudessa.

Tulipesän pohjan compound-putkien säröilyä on esitetty kuvassa 8, jossa membran-rakenteisen pohjaputkiston evähitsissä ja otsapinnalla on säröjä.



Kuva 8 Compound-putkien säröilyä sekä evähitsissä että putken otsapinnalla.

Liitteissä 1, 2 ja 3 on esitetty säröilyä Kaukas Oy:n soodakattila 2:n tulipesän pohjaputkissa.

3 ERI TEKIJÖIDEN VAIKUTUS VAURIOITUMISEEN

3.1 Vaurioiden kartoitus Itä-Suomen soodakattiloissa

Tällähetkellä lähes kaikissa soodakattiloissa esiintyy tulipesän pohjalla jonkinasteista säröilyä riippumatta kattilavalmistajasta. Jotta saataisiin kattava selvitys vaurioiden esiintymisestä, tarkastellaan TTK:n Itä-Suomen piirissä olevia soodakattiloita. Lisäksi rajoitutaan suunnittelupaineeltaan yli 80 bar:n paineluokkaa oleviin kattiloihin muutamaa poikkeustapausta lukuunottamatta (käyttöpaine on 60...84 bar, jolloin pohjaputkistossa virtaavan veden lämpötila on alle 300 °C).

Tutkittavat soodakattilat (suurin sallittu käyttöpaine merkitty ja valmistusvuosi):

Enso-Gutzeit Oy Tainionkosken tehtaas,

CE-4	96.4 bar	1961
------	----------	------

Kaukas Oy,

SK 2	93.2 bar	1971
------	----------	------

ja SK 3	110 bar	1991
---------	---------	------

Kymin Paperiteollisuus Oy Kuusanniemen sellutehdas,

SK 2	97 bar	1977
------	--------	------

Laminating Papers Oy Kotkan tehtaas,

CE-2	96 bar	1959
------	--------	------

Sunila Oy,

SK 10	79.5 bar	1965
-------	----------	------

SK 11	85 bar	1988
-------	--------	------

Yhtyneet Paperitehtaas Oy Joutseno-Pulp,

BW	65.5 bar	1954
----	----------	------

CE	93.1 bar	1962
----	----------	------

Soodakattiloissa tulipesän alaosassa tapahtuneista korjaustoimista ja tulipesään toimintaan vaikuttavista muutoksista luetellaan vain tärkeimmät.

3.1.1 Kaukas Oy, Lappeenranta

SK 2 (Ahlström-kattila, käyttöpaine 84 bar):

Kaukaan SK 2 poistettiin käytöstä syyskuussa 1991. Sitä ennen kattilassa esiintyi runsaasti säröilyä tulipesän pohjan compound-putkissa. Liitteessä 4 on dokumentoitu säröjen esiintymisalueet joulukuun -89 ja sen jälkeen tehdyissä tarkastuksissa (neljä tarkastusta).

Tärkeimmät kattilalle tehdyt muutokset ja korjaukset:

- kattilaan uusittiin tulipesän alaosa 8.9 m:n korkeuteen saakka 1981. Materiaali Sandvik 5R10/4L7 mitat: 63.5 x 7.25 mm
- kattilan tehonnostoon liittyvät syöttövesi- ja putousputkistojen muutokset 1986
- pohjan säröjen korjaushitsausta jouluna 1989
- pohjan säröjen korjaushitsausta ja neljän pohjaputken vaihto keväällä 1990. Materiaali Sandvik 3R12/4L7 mitat: 63.5 x 6.53 mm
- pohjan säröjen korjaushitsausta jouluna 1990
- pohjan säröjen korjaushitsausta kesällä 1991

Sk-3 (Ahlström-kattila, käyttöpaine 84 bar):

Kaukaan uusi 2700 tds/d soodakattila otettiin käyttöön lokakuussa 1991 ja tähän mennessä ei tulipesän alaosassa ole suoritettu tarkastustoimintaa, joten mahdollisesta pohjaputkien säröilystä ei ole saatavana tietoa.

3.1.2 Laminating Papers Oy Kotkan tehtaat

CE-2 (CE-kattila, käyttöpaine 75 bar):

Soodakattilan tulipesän pohjaputkista on löytynyt pääsääntöisesti säröjä vuodesta 1989 alkaen. Vuodesta 1986 alkaen ylösajot suoritettu maa-kaasulla (aikaisemmin öljyllä).

Tärkeimmät kattilalle tehdyt muutokset ja korjaukset:

- tulipesän alaosan uusiminen alkuvuodesta 1981. Materiaali Sandvik 5R10/4L7
- täystarkastus pohjan uusimisen vuoksi toukokuussa 1981
- sulakourujen ohituksen uusiminen jouluna 1984. Materiaali Sandvik 5R10/4L7
- kesäseisokissa 1986 pohjaputkien ja -palkkien välillä oli välystä 10...15 mm palkkien päissä 500 mm matkalta. Lisätukien asennus pohjaputkien ja -palkkien välille
- säröjä löydettiin elokuussa 1989 pohjasta sekä molemmilta sivuilta evähitseistä että myös keskemmältä n. 3.3 m etuseinästä pahoja säröjä myös putken otsapinnalta (liite 5)
- sula-aukkojen putkien vaihto elokuussa 1990 ja säröjen korjausta liitteen 6 mukaisesti
- pohjantarkastus syyskuussa 1991: runsaasti säröjä, varsinkin pohjan etuseinän puoleiselta osuudelta. Säröt ulottuivat compoundin rajapintaan asti (liite 7)
- etu- ja takaseinän korjausta (esim. -86, -89)

3.1.3 Enzo-Gutzeit Oy, Tainionkoski

CE-4 (CE-kattila, käyttöpaine 82 bar):

Vuonna 1983 soodakattilaan asennettiin compound-pohja (Sandvik 5R10/4L7), joka uusittiin vuonna 1989 (Sandvik 3R12/4L7). Säröjä on löytynyt paljon molemmista pohjista. Tangentiaalirakenne.

Tärkeimmät kattilalle tehdyt muutokset ja korjaukset:

- keväällä 1983 hiiliteräspohja korvattiin compound-putkimateriaalilla (Sandvik 5R10/4L7 50.8 x 5.5 mm)
- 1986 sulakourujen aukkoja nostettiin 135 mm
- 1987 uusittiin molemmilta sivuilta 2 reunimmaista pohjaputkea ja samalla uusittiin myös tiivistekamparaudat
- 1987 pohjan massaus
- vappuna 1989 pohja tarkastettiin oikeasta etukulmasta. Säröt poistettiin hiomalla
- 2.4.1989 kattilavaurio (sularäjähdys liuottajassa)
- huhtikuussa 1989 tulipesän alaosassa havaittiin etuseinän käyrissä säröjä. 5 kpl käyriä vaihdettiin (Sandvik 5R10/4L7)
- kesäkuussa 1989 pohjan säröjen korjausta
- elokuussa 1989 tarkastettiin takaseinän puoleiset pohjaputket n. 700 mm:n leveydeltä
- syyskuussa 1989 kattilaan vaihdettiin uusi compound-pohja (Sandvik 3R12/4L7 50.8 x 5.08), etu- ja takaseinä 2350 mm pohjataipeesta ylöspäin. Samalla pohjaa nostettu keskeltä 50 mm sekä etu- ja takaseiniä 87 mm
- lokakuussa 1990 pohjan tarkastus ja korjausta (oikea reuna 7 reunimmaista putkea)
- vappuna ja marraskuussa 1991 pohjan tarkastusta ja korjaushitsausta: säröjä oikeassa reunassa

3.1.4 Sunila Oy, Kotka

Sunilassa kaksi soodakattilaa, joissa poltettava lipeä on pääpiirteittäin samaa. Joissakin tapauksissa jätehappoa poltettu SK 11:lla polttoliipeän joukossa ja SK 10:lla poltettu suopaa polttoliipeän joukossa.

SK 10 (Tampella-kattila, käyttöpaine 62.5 bar):

Soodakattilassa on hiiliteräspohja, jossa kuitenkin etu- ja takaseiniltä ulottuu compound-putkea (Sandvik 5R10/4L7) pohja-alueelle n. 1.5 m. Hiiliteräspanputket ulottuvat pohja-alueella sivuseiniin asti. Säröjä esiintyy paljon compound-alueella etenkin sulakourujen puolella. Kattilassa on öljypolttimet (4 kpl).

SK 11 (Tampella-kattila, käyttöpaine 62.5 bar):

Soodakattilassa on compound-pohja (Sandvik 3R12/4L7), jossa on tarkastettu sularännien puolelta n. 1/3, eikä ole havaittu säröjä. Kattilassa on maakaasupolttimet (6 kpl).

3.1.5 Kymin Paperiteollisuus Oy Kuusanniemen sellutehdas

SK 2 (Götaverken-kattila, käyttöpaine 79 bar):

Soodakattilassa on normaalia jyrkempi vino pohja. Kesäseisokissa 1991 tarkastettiin pohjasta 80%, jolloin suoritettiin yksittäisten säröjen päällehitsausta sulakourujen edessä (vinon pohjan yläosaan jäi korjaamattomia säröalueita). Jouluseisokissa 1991 tehtiin kattilan pohjalle erittäin perusteellinen tarkastus, jossa pohjan kunto selvitettiin. Tällöin löydettiin liitteen 8 mukaisesti vaurioituneita alueita. Pääosin löydettyt säröt hiottiin ja päällehitsattiin. Oleellista on vaurioalueen keskittyminen vinon pohjan yläosaan eikä niinkään sulakourujen puolelle. Säröjen keskittymiseen tälle alueelle vaikuttanee se, että siellä compound-pohja on useasti joko täysin paljaana tai ohuen sulakerroksen alla, jolloin keon "romahtamisesta" putken päälle syntyy paikallisesti suuria lämpöjännityksiä voimakkaan lämpötilan kohoamisen johdosta.

3.1.6 Yhtyneet Paperitehtaat Oy Joutseno-Pulp

BW-kattilassa (käyttöpaine 62 bar) on compound-vyöhykettä pohja-alueella vain noin 0.5 m:n alueella sekä etu- että takaseinien edessä. Tarkastuksissa ei ole löydetty säröjä.

CE-kattilassa (käyttöpaine 82 bar) on compound-vyöhykettä etu- ja takaseinien edustalla noin 1 m:n matkalla. Tarkastuksissa on löytynyt sulakourujen edestä pieniä määriä säröjä.

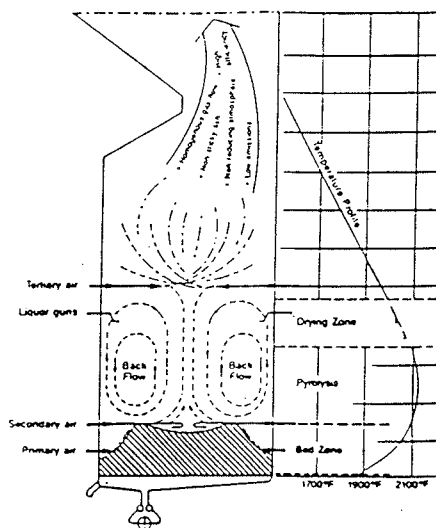
Molemmissa kattiloissa on öljypolttimet. Alasajon jälkeen molempien soodakattiloiden pohjalle jää vain ohut sulakerros (50...100 mm) ja siten kattilapesun jälkeinen kuivaus onnistuu pohja-alueella hyvin.

3.2 Compound-putkiin vaikuttava ympäristö

Tulipesän alaosassa vaikuttava ympäristö on koostunut monista eri tekijöistä, joita kaikkia ei tällä hetkellä täysin ymmärretä. Pohja-alueella vaikuttavat korkea ja vaihteleva lämpötila, kemikaaleja erilaisissa faaseissa sekä jatkuvasti vaihtelevat palamisilma- ja savukaasuvirtaukset.

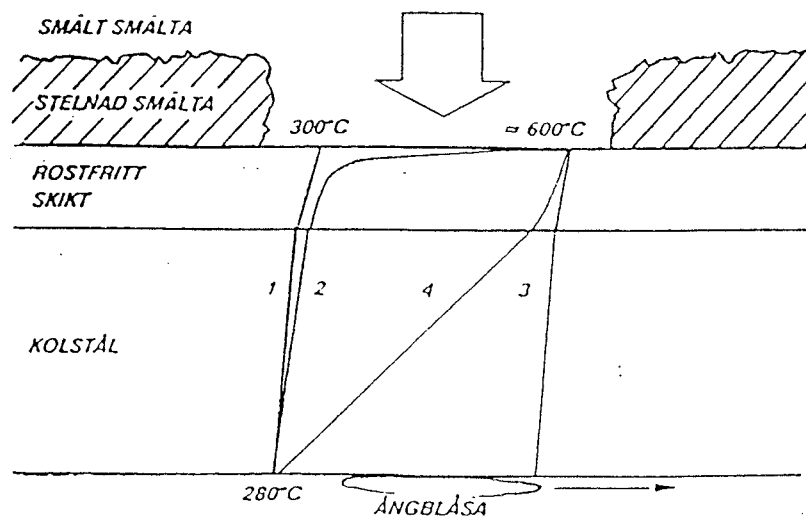
3.2.1 Lämpötila

Pohja-alueella compound-putken lämpötila tulipesän puoleisella seinämällä vaihtelee käyttöolosuhteissa putken sisäpinnan noin 300 °C:sta (putkistossa virtaavan veden lämpötila) mahdollisesti jopa 600 °C:een asti, mikäli säteily tai kuuma sula pääsee vaikuttamaan compound-putken ulkopinnalle /14/. Putken ulkopinnan lämpötila riippuu lämpösäteilyn voimakkuudesta ja kestosta. Mikäli lämpösäteilyn vaikutus putken ulkopinnalla on vaihtelevaa, voi paikallisesti esiintyä korroosioväsymistä ylös- ja alasajotilanteissa. Syötettävän palamisilman virtauksella on suuri vaikutus lämpösäteilyn intensiteettiin. Kuvassa 9 on esitetty lämpötilajakauma tulipesässä.



Kuva 9 Lämpötilajakauma tulipesässä /20/.

Kuvassa 10 on esitetty erilaisia lämpötilagradientteja, jolloin compound-putken seinämä paikallisesti voi joutua suuriinkin lämpötilavaihteluihin. Normaalitilanteessa putken ulkopinta on hieman ($20\ldots 50^\circ\text{C}$) sisäpintaa korkeammassa lämpötilassa, käyrä 1. Suojaavan sulakerroksen hävitessä compound-putken päältä, ja joko voimakkaan lämpösäteilyn tai erittäin kuumen ($800\ldots 1200^\circ\text{C}$) sulakeon "romahtamisen" seurauksena, tapahtuu putken lämpögradientin muutokset kuvan mukaan. Lämpötila muuttuu alun jyrkän pintakerroksen ylikuumenemisen, käyrä 2, jälkeen kohti koko putken seinämänpaksuuden ylikuumenemiseen, käyrä 3. Kun putken sisäpinnan lämpötila kohoaa yli veden höyrystymispisteen, muodostuu paikallisia höyrykuplia. Putkistossa virtaava vesi vie höyrykuplat pois ja jäähdyttää putkea, käyrä 4. Tällaisista nopeista lämpötilanmuutoksista syntyy paikallisia lämpöshokkeja, jotka voivat väsymisilmiön seurauksena aiheuttaa korroosioväsymistä. Riippuen lämpögradientista putken seinämällä, aiheutuu hiiliteräksen ja austeniittisen pintakerroksen välille korostuneita jännityksiä erilaisista pituuden lämpötilakertoimista johtuen. Tällaiset alueet ovat otollisia myös jännityskorroosiolle.

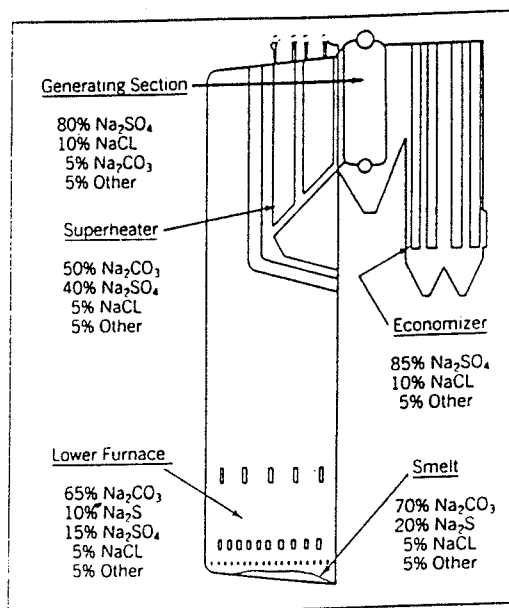


Kuva 10. Lämpötilagradienttien muutokset compound-putken seinämässä eri ajanhetkinä /14/.

Höyrykupla voi muodostua myös putkensisäpinnalle ennen ulkopuolelta tapahtuvaa ylikuumenemista, mikäli vedenkierto ei ole hyvä. Tällöin putki alkaa kuumentua paikallisesti ja pinnoitteeseen aiheutuu korostuneita lämpöjännityksiä, jotka tulevat näkyviin suurina puristusjännityshuippuina aina plastisoitumiseen asti. Näissä ylikuumenemistuneissa kohdissa puristusjännitys tulee nousemaan pintamateriaalissa paikallisesti yli myötörajan, jolloin alasajon jälkeen vetojännitys tulee ylittämään myötörajan ja pinnoitteessa tapahtuu jälleen plastisoitumista.

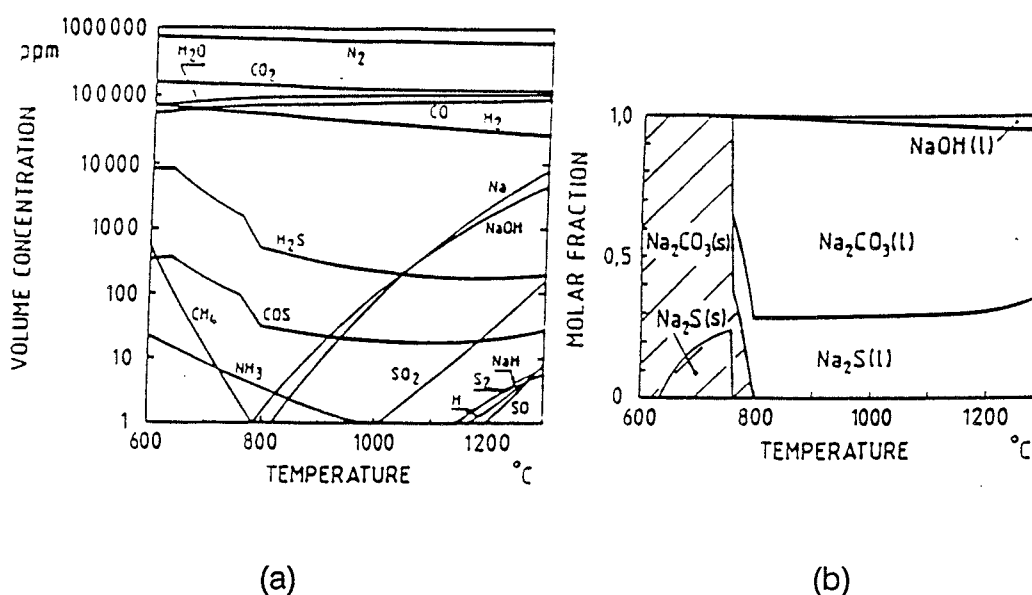
3.2.2 Kemikaalit

Soodakattilassa pääasiallinen kemikaalikoostumus (keossa, sulassa ja savukaasuissa) kattilan eri osissa on riippuvainen hyvin pitkälti lämpötilasta. Kuvassa 11 on esitetty eri kemikaaliyhdisteiden osuus eri osissa soodakattilaa /24/.



Kuva 11 Tyypilliset kemikaaliyhdisteet soodakattilan eri osissa /24/.

Tulipesän alaosan yhdisteistä saa käsityksen kuvasta 12, jossa on esitetty tulipesän alaosan kaasukehän ja keon koostumus lämpötilan funktiona. Alaosan kemialle on ominaista että rikki- ja natriumyhdisteiden siirtyminen savukaasuihin on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta. Rikki vapautuu kaasutilaan pääosin rikkivetynä, natrium höyrystyy sekä metallisena natriumina että natriumhydroksidina /2/.



Kuva 12 Tulipesän alaosan kaasukehän (a) ja keon (b) koostumus lämpötilan funktiona (ilmamäärä on 70% stökiometrisesta, $S/Na_2 = 0.3$) /2/.

Sula koostuu pääasiassa sellaisista epäorgaanisista, suolapitoisista aineista kuin natriumkarbonaatti (Na_2CO_3), natriumsulfaatti (Na_2SO_4) ja natriumsulfidi (Na_2S), jolloin sulan sulamispiste on noin 750°C. Sulassa on pienempiä määriä myös muita yhdisteitä. Nämä yhdisteet, jotka sisältävät esimerkiksi kloridi- ja kaliumpitoisia alkuaineita, voivat muodostaa eutektisia seoksia, joiden sulamispiste on niinkin alhainen kuin 580°C /21/.

Sulfaattiprosessin mänty- ja koivulipeän polton sulalle on esitetty seuraavat koostumukset taulukossa 4 /15/.

TAULUKKO 4 Sulan koostumus painoprosentteina /15/.

	<u>Mänty</u>	<u>Koivu</u>
Na_2CO_3	65.0	74.0
Na_2S	26.0	20.0
Na_2SO_4	3.0	2.3
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	0.3	0.2
Muut (erotus)	5.7	3.5

Muiden kuin päätuotteiden pitoisuuksia painoprosentteina sulasta kahdessa lämpötilassa on esitetty taulukossa 5 (ilmamäärä on 70% stökiometrisesta, $\text{S}/\text{Na}_2 = 0.3$).

TAULUKKO 5 Sulan sivuaineiden pitoisuuksia painoprosentteina /16/.

	<u>800°C</u>	<u>1000°C</u>
NaOH	1.0	2.5
Na_2S_2	0.063	0.063
NaCl	2.5	2.0
KCl	2.0	1.3
KOH	0.063	0.20
K_2S	0.79	0.79
K_2CO_3	0.50	0.20

3.2.3 Palamisilma

Primääritasolta tapahtuva palamisilman syöttö voi aiheuttaa paikallisesti suojaavan sulakerroksen ohentumisen, mikäli ilmamäärä on liian kovapaineista ja suuntautuu liian paljon pohjaputkiin. Tällöin lähes paljas compound-putki on altis esimerkiksi 1000 °C:n sulan säteilylämmön aiheuttamalle lämpötilan kohoamiselle putken pinnalla sekä myös lämpövaihteluille.

Sekundääri- ja tertiääritasoilla tapahtuu ilmansyöttö erilaisilla malleilla, joita ovat tasamalli, pyörremalli, limitysmalli ja kirjekuorimalli. Palamisilman syötöllä pyritään mahdollisimman hyvään reduktioasteeseen. Tulipesässä palamisprosessi on vaihtelevien olosuhteiden alaisena, jolloin palamisilman ja polttoliipeän syöttö tulipesään aiheuttaa sen, että keon muoto tulipesän alaosassa vaihtelee jatkuvasti. Siten myös palavan keon "romahtaminen" on mahdollista.

3.2.4 Vedenkierto

Vedenkiertohäiriöt voivat johtua kattilan tulipesässä vallitsevista häiriötilanteista, huonosta pohjakonstruktioista yms., jolloin pohjaputkissa voi esiintyä hetkellistä ylikuumenemista veden höyrystymisen seurauksena. Myös lämpösäteilystä ja palamisilmavirtauksista sekä palavan keon romahtamisesta voi kohdistua suuria lämpövaihteluita pohjaputkille. Nämä paikalliset, suuret lämpövuot putken ulkopinnalla voivat aiheuttaa paikallisesta putken ylikuumenemisen ja siten höyrystää veden siinä kohdassa putkea.

3.3 Kattilan ylös- ja alasajot

Normaalisti kattiloilla on vuodessa vähintään 2 -3 alasajoa, jolloin suoritetaan jonkinasteista korjaustoimintaa. Lisäksi ylikuormilla ajettaessa kattilan "tukkeutuminen" aiheuttaa ylimääräistä pesuntarvetta. Mikäli alasajot/ylösajot ovat tapahtumiltaan hallittuja, ei pohjaputkissa pitäisi esiintyä mitään vedenkiertohäiriöistä johtuvaa ylikuumenemista.

Kattilan ylös- ja alasajoissa sekä tulipesän häiriötilanteissa käytetään kuorma- ja käynnistyspolttimia, jolloin pohjaputkiin saattaa kohdistua huomattavaa lämpösäteilyä mikäli pohjalla ei ole suojaavaa sulakerrosta ja polttimet sijaitsevat lähellä pohjaa. Tämä lämpösäteily saattaa nostaa hetkellisesti putken ulkopinnan lämpötilaa useita kymmeniä asteita, jolloin putkeen saattaa kohdistua jännitysvaihtelusta johtuvaa korroosioväsymistä. Etenkin öljyn toimiessa tukipolttona, on pohjaputkiin kohdistuva lämpösäteilyn intensiteetti huomattava. Kuormapolttimien etäisyys pohjasta sekä ilmavirtaukset vaikuttavat suuresti lämpösäteilyn intensiteettiin.

3.4 Kattilan vesipesu

Kattilan pesutapahtuman aikana lämpötila ja kemialliset koostumukset muuttuvat, mikä saattaa edesauttaa säröjen syntyä ja kasvua. Pesussa tulipesä on jo saanut jäähtyä 6 -8 tuntia ennen kuin pesu kattilan yläosassa, tulistinalueella, alkaa. Pohjaputkien jäähtyminen riippuu pohjalle jäävästä keosta, jota ei ole kyetty polttamaan pois. Pesun aikana korrodoiva ympäristö saattaa muuttua oleellisesti ankarampaan suuntaan.

VTT:n raportissa on suoritettu Veitsiluoto Oy, Kemin soodakattilan pesuveden ja pesuveden sakan analysointi, joista käy selville alkuainejakaumat. Taulukossa 6 on esitetty pesuveden sakan alkuaineanalyysi ja taulukossa 7 on pesuveden analyysi /25/.

TAULUKKO 6 Pesuveden sakan ja pesuveden sakan tuhkan analyysi.

	Pesuveden sakka suoraan [%]	Pesuveden sakan tuhka [%]
Al ₂ O ₃	7.5	8.4
MgO	17.5	20.2
SiO ₂	12.5	14.7
SO ₄	36.1	26.3
K ₂ O	0.9	1.0
CaO	12.2	13.5
MnO	5.5	6.7
Fe ₂ O ₃	7.8	9.1

TAULUKKO 7

Pesuveden analyysi tulistimien vesipesun aikana.

	HCO ₃ [g/l]	Cl [g/l]	SO ₄ [g/l]
vesipesun alussa	53.8	4.1	111
1½ h jälkeen	53.8	3.4	115
6 h jälkeen	27.0	1.5	91.4
vesipesun jälkeen	13.6	0.4	13.4

Riippuen sijainnista pohja-alueella alenee pohjaputkien lämpötila vesipesun alun n. 200 °C:sta muutaman tunnin aikana 50...80 °C:een , ja vesipesun loputtua on lämpötila pohjaputkistossa 30...50 °C.

Pesun jälkeinen kuivatus tapahtuu joko kuivatustulilla tai syöttämällä kattilaan lämmintä ilmaa. Huolimatta kattilan kuivatuksesta jää keon ja pohjaputkien välille aina vettä, joka aiheuttaa korrodoivan ympäristön muuttumisen.

3.5 Tulipesän pohjakonstruktio

Tulipesän pohjan säröilyyn voi seuraavilla seikoilla olla vaikutusta: pohjan kaltevuus, evien leveys membran-rakenteessa, putki- ja evämateriaali, ilma-aukkojen sijoittelu sekä kuorma- ja käynnistyspolttimien sijainti ja kapasiteetti.

4 COMPOUND-PUTKIIN KOHDISTUVAT RASITUKSET

4.1 Hitsausjännitykset

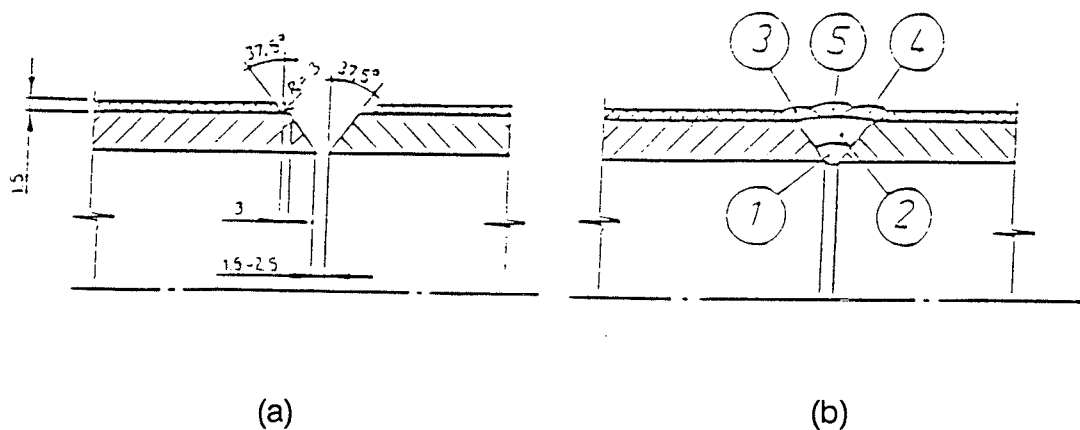
Koska hitsauksessa syntyy väistämättä lämpötilaeroja hitsausliitoksen eri kohdissa, muodostuu metalliin hitsaustapahtuman jälkeen jäännösjännityksiä. Päittäisliitokseen jää pitkittäinen vetojännitys ja ympäröivään levyyn pitkittäinen puristusjännitys. Lisäksi liitokseen syntyy myös poikittaaisia jännityksiä, jotka ovat levyn keskellä vetoa ja reunassa puristusta /11/. Lisäksi kun kyseessä on compound-putken hitsaus, aiheuttavat materiaalierot hitsauskohdan läheisyyteen suuria lämpöjännityksiä, jotka jäähtyessään synnyttävät jäännösjännityksiä. Pintamateriaaliin tulee vetojännitys ja hiiliteräksen puolelle tulee vastaavasti, compound-putken materiaalikerrosten paksuuksien suhteessa, puristusjännitys.

Hitsausliitoksiin kohdistuvaa säröilyä on kuvattu liitteessä 3 (alempi kuva).

Nykyisin konepajaolosuhteissa jauhekaarimenetelmällä tapahtuvassa compound-putkien evä- ja panelihitsauksessa, hitsaus suoritetaan yliseostetulla ruostumattomalla lisäaineella. Esimerkiksi, kun hitsataan compound-putkea ja evää yhteen tulipesän sisäpuolella, voidaan lisäaineena käyttää yliseostettua ruostumatonta ESAB OK Autrod 16.53, $\varnothing$ 1.6 mm lankaa. Tulipesän ulkopuolella hitsauslisäaineena on ESAB OK Autrod 16.75, $\varnothing$ 1.6 mm (liite 9). Molemmissa tapauksessa jauheena on esim. Oerlikon OP-33 (vastaa OK Flux 10.91 tai OK Flux 10.92). Hitsauksessa hitsi ei saa läpäistä putken ruostumatonta kerrosta, jotta sekoittumista ei tapahtuisi. Siten jännityskorroosiolle altista martensiittista rakennetta ei synny hitsiin.

Jauhekaarihitsausta käytettäessä hitsausenergiat ovat tyypillisesti suurempia kuin muilla menetelmillä. Näin ollen herkistymistaipumus on jauhekaarimenetelmällä suurempi, joten austeniittisen ruostumattoman teräksen pitäisi olla riittävän niukkahiilistä. Kun käytetään compound-putken pintamateriaalina austeniittista ruostumatonta terästä AISI 304L, hiilipitoisuus, $\leq 0.03\%$, on riittävän alhainen /17/.

Compound-putken päittäishitsauksessa käytetyt railon viisteet ja hitsausjärjestys on esitetty kuvassa 13. Compoundputki hitsataan viidellä palolla, joista juurien hitsauksessa käytetään Tig-menetelmää (esilämmitys n. 150°C). Samoin seuraava palko hitsataan Tig-hitsauksella ilman esilämmitystä siten, että palkokerros nousee kuorinnan tasolle kuvun ollessa mahdollisimman matala. Sula ei saa sekoittua ruostumattomaan pintakerrokseen. Pintakerros hitsataan puikkohitsauksena kuvan 13 b mukaisesti kolmella pintapalolla, jolloin esilämmitys on $\leq 100^{\circ}\text{C}$. Hitsauslisäaineet voivat olla esimerkiksi: Tig-hitsauksessa lisäaine DMO-IG $\varnothing 2.4\text{ mm}$, suojakaasuna Argon S, ja puikkohitsauksessa lisäaine OK 67.60 $\varnothing 2.5\text{ mm}$.

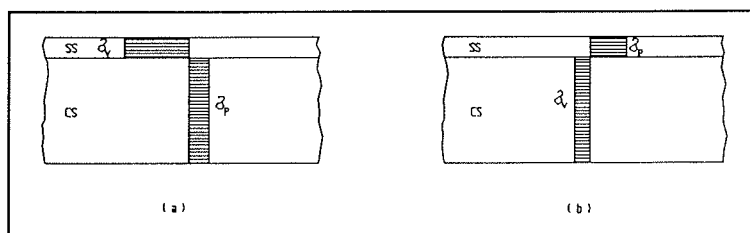


Kuva 13 Compound-putken päittäisiitoksessa käytetyt railon viisteet (a) ja hitsausjärjestys (b).

4.2 Lämpöjännitykset

Compound-putki koostuu kahdesta eri materiaalista, joilla pituuden lämpölaajenemiskertoimet poikkeavat toisistaan suuresti - austeniittisella ruostumattomalla teräksellä pituuden lämpölaajenemiskerroin on noin 1.5 kertaa hiiliterästä suurempi. Materiaalieroista aiheutuu compound-putkeen jo putken valmistuksessa lämpökäsittelyn jälkeen jäännösjännityksiä siten, että pinnoitteessa on suuri vetojännitys ja hiiliteräksessä puristusjännitys. Myös lämpötilan muutokset ylös- ja alasajoissa aiheuttavat putkeen jännitystilojen muutoksia, jotka pinnoitteessa helposti kohoavat myötörajan suuruisiksi (kuva 14). Lisäksi putkeen pyrkii kohdistumaan taivutusta, joka aiheutuu putken eristepuolen ja tulipesän puolen lämpötilaeroista. Tulipesän pohjalla oleva keon massan pitäisi pystyä estämään pohjaputkien, joiden tulisi olla kannatinpalkkien tukemana, irttoamisen kannatinpalkeista. Tästä johtuen putkeen tulee aksiaalista puristusjännitystä tulipesän puolelle. Mikäli plastisoitumista tapahtuu laajemmin pohjaputkissa, tulee koko tulipesän pohjassa tapahtumaan muodonmuutosta ja siten pohjaputkien irttoamista kannatinpalkeista.

Kun muista tekijöistä aiheutuvat jännitykset, kuten asennusvirheet ja pohjan taipuminen, yhdistetään puhtaasti lämpötilan muutoksista syntyviin jännityksiin, on plastisoituminen alasajon jälkeen hyvin todennäköistä.



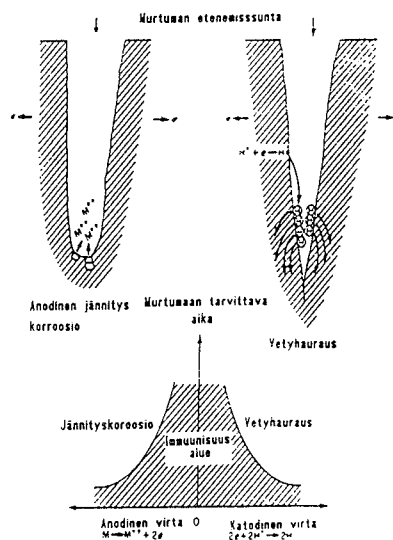
Kuva 14 Putken jännitykset alasajon jälkeen (a) ja käytön aikana (b).

4.3 Korroosio

4.3.1 Jännityskorroosio /18/

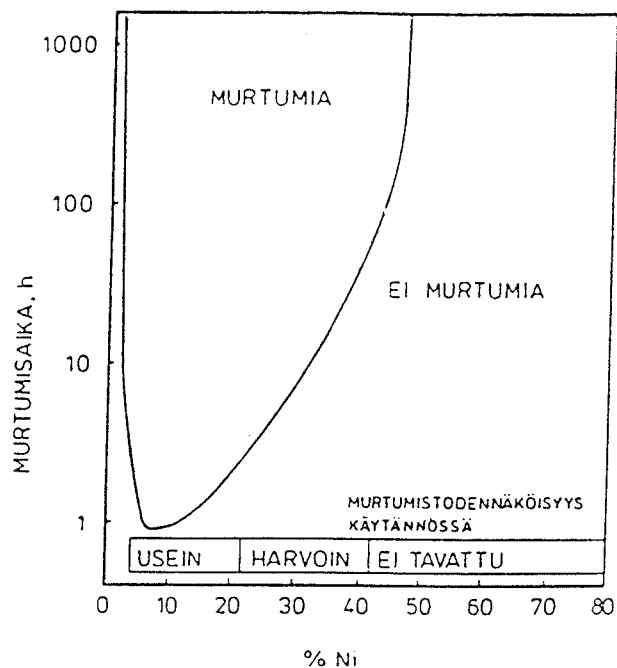
Jännityskorroosiolla ymmärretään rakenneaineen hauraan murtumisen kaltaista murtumista muuten sitkeässä rakenneaineessa staattisen vetojännityksen tai lievästi vaihtelevan vetojännitysrasituksen alaisena ilman huomattavaa rakenteen pinnan syöpymistä. Jännityskorroosiota pidetään sähkökemiallisena syöpymisenä vetojännitysympäristössä, minkä vuoksi sitä usein nimitetään anodiseksi jännityskorroosioksi erotukseksi vedyn aiheuttamasta jännitysmurtumasta, vetyhaurastumisesta (kuva 15). Jännityskorroosiota aiheuttavat tietyille rakenneaineelle vain tietyt kemikaalit ja rakenneaineen murtuminen (hiushalkeaminen) tapahtuu aineen murtolujuutta alhaisemmassa, usein huomattavasta myötölujuuttakin alhaisemmassa vetojännitystilassa. Liitteessä 10 on esitetty eri metalleille jännityskorroosiota aiheuttavia korroosioympäristöjä ja liitteessä 11 on NACE:n (NACE, Forms of Corrosion) mukainen jännityskorroosioalttius eräille metalleille.

Vetojännityksen aiheuttaa joko ulkopuolinen kuormitus, rakenteen sisäiset jännitykset, rakoon tai sulkeumaan syntyvän korroosiotuotteen suuremman tilavuuden aiheuttama, joskus hyvinkin suuri lisäjännitys tai niiden yhteisvaikutus. Usein lämpöjännitykset ovat vaarallisia. Jännityskorroosio nopeutuu lämpötilan noustessa. Murtuminen voi edetä joko raerajoja pitkin tai rakeiden lävitse. Murtumat etenevät halkeaman kärjessä voimakkaaksi muodostuvien vetojännitysten ja korroosion yhteisvaikutuksesta.



Kuva 15 Katodisen vetyhaurauden mekanismin ero verrattuna tavalliseen anodiseen jännityskorroosioon /18/.

Happi ja muut voimakkaat hapettajat lisäävät jännityskorroosioherkkyyttä. Esimerkiksi austeniittisella ruostumattomalla teräksellä esiintyy jännityskorroosiota vain hapettavissa kloridiliuoksissa ja murtumiseen riittää hyvinkin pienen vetojännitystilän olemassaolo. Kun lämpötila on alhaisempi kuin 50...60 °C, ei jännityskorroosiota yleensä esiinny. NaOH- ja KOH-vesiliuoksilla ei jännityskorroosiota esiinny alle 90 °C:n lämpötilassa, mutta murtumislämpötilaraja ja murtumisen nopeus riippuvat suuresti lipeän väkevyydestä. Nikkelipitoisuuden kasvaessa austeniittisten terästen jännityskorroosiotaipumus pienenee. Kuvassa 16 on esitetty nikkelpitoisuuden vaikutusta kloridin aiheuttamaan jännityskorroosioon. Huomioitavaa kuvassa on se, että Ni-pitoisuuden ollessa 8...10% on jännityskorroosiovaara pahimmillaan.



Kuva 16 Ni-pitoisuuden vaikutus noin 18% Cr sisältävän teräksen jännityskorroosionkestävyyteen kiehuvaassa 42% MgCl_2 -liuoksessa /18/.

4.3.2 Vetyhaurastuminen

Vetyhaurastumisella ymmärretään atomitilassa olevan vedyn tunkeutumista metalliin tai metallissa liuenneena olevan atomaarisen vedyn erkautumista ja kerääntymistä sekä yhtymistä metallin sisällä tai pinnassa olevista vikakohdissa, mikrohuokosissa ja kuonasulkeumissa H_2 -molekyyleiksi tai korkeammissa lämpötiloissa (yli 220°C) CH_4 -molekyyleiksi. Nämä molekyylit eivät voi liikkua metallissa kuten vetyatomi, vaan ne synnyttävät metallin vikakohdissa suuren, satojen, jopa tuhansien baarien kaasunpaineen. Sen seurauksena mikrohuokokset suurenevat, metallin lujuus alenee ja rakenne tulee haurasmurtuma-alttiiksi tai rakenne rikkoutuu jo pelkän kaasunpaineen aiheuttamien murtumisten tähden.

Vedyn imeytymistä kiihdyttävät metallin jännitystila ja vetyatomeja korroosiotapahtumassa aktivoivien aineiden mukanaolo. Etenkin rikkivety (H_2S) on vaarallinen vedyn aktivoija. Rikkivedyn aiheuttamaa jännitysmurtumaa kutsutaan sulfidijännityskorroosioksi.

Vetyhaurastuminen on pääasiassa suuren lujuuden omaavien ferriittisten ja martensiittisten rautapohjaisten metallien ongelma. Muokkaus ja vaihteleva jännitystila edistävät vetyä sisältävän metallin murtumista. Vaarallinen lämpötila-alue on $-20... + 70^\circ\text{C}$, missä vety jää metalliin ja voi aiheuttaa murtumia. Yli 150°C :n lämpötilassa vety pääsee herkkäliikkeenä poistumaan teräksestä ja teräksen lujuus palautuu, mikäli se ei sitä ennen ole vahingollisin seurauksin ennättänyt yhtyä H_2 -kaasuksi metallin sisällä.

Koska tiedetään, että lujuuden kasvaessa jännityskorroosiovaara kasvaa, pidetään lujuuden indikaattorina käytetyn kovuuden ylärajana HRC 22 (n. 245 HV) rikkivetytitoisessa ympäristössä. Kriittisimpiä kohtia ovat hitsausliitosten muutosvyöhykkeet, missä kovuus hyvin helposti paikallisesti ylittää 245 HV.

4.3.3 Korroosioväsyminen /18/

Korroosioväsymisellä tarkoitetaan murtumisvauriota, joka syntyy vaihtokuormituksen ja syövyttävän ympäristön yhteisvaikutuksesta. Korroosioympäristössä väsymiskestävyys useimmiten muodostuu huomattavasti pienemmäksi kuin ilman korroosioväliainetta. Korroosion vaikuttaessa väsymiseen väsymisrajaa ei esiinny, vaan hyvin pienetkin jännitysvaihtelut johtavat murtumaan kuormanvaihtokertojen lisääntyessä.

Vastaavalla tavalla kuin jännityskorroosiossa korroosioväsymisessä korroosion ja jännityksen osuus vaurion syntyyn vaihtelee. Korroosioväsyminen on esimerkiksi hyvin todennäköistä sellaisissa olosuhteissa, joissa materiaali on altis muille paikallisen korroosion muodoille, esim. pistekorroosiolle. Jännitystilän ansiosta voi tapahtua siten, että passiivikalvo murtuu ja alue tulee anodiseksi, jolloin syöpyminen keskittyy näihin kohtiin. Tällöin pinnan paikalliset korroosiovauriot toimivat jännityksen keskittäjinä. Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat erittäin alttiita korroosioväsymiselle kloridipitoisessa ympäristössä.

Korroosioväsymistä aiheuttavia jännitysmuutoksia voi syntyä painevaihteluista ja paineiskuista, lämpölaajenemiskäyttäytymisen eroista lämpötilan muuttuessa hetkellisesti, mitkä voivat aiheutua höyrykuplien aiheuttamasta epätasaisesta jäähdtyksestä tai tulipesän sulakeon lämpötilan vaihteluista, sekä ylös- ja alasajoista.

4.4 Viruminen

Materiaaliin, joka on kuormituksen (jännityksen) alaisena korkeassa lämpötilassa, syntyy ajasta riippuvaa plastista eli pysyvää muodonmuutosta, jota sanotaan virumiseksi. Virumisessa monien materiaalien rakenne muuttuu ympäristön vaikutuksesta, mikrorakenne muuttuu termisten prosessien kautta ja raerajoille muodostuu raerajakoloja ja säröjä, joiden määrä ja tiheys lisääntyy virumisvenymän kasvaessa. Näistä syistä tapahtuvaa heikkenemistä kutsutaan virumisvaurioksi. Teräksillä viruminen on merkittävää yleensä vasta yli 400 °C lämpötiloissa /22/.

Aluksi virumiskolot muodostuvat hajanaisina raerajoille, mutta virumisasteen kasvaessa niitä esiintyy yhä selvemmin suuntautuneina. Lopulta ne alkavat yhtyä muodostaen mikrosäröjä ja lopuksi makrosäröjä, jotka aiheuttavat kasvaessaan metallin murtumisen /22/.

4.5 Muut tekijät

Muita compound-putkeen ja sen jännitystiloihin vaikuttavia tekijöitä ovat tulipesän pohjalla olevan keon massa, joka pyrkii painamaan pohjaputkia alaspäin, sekä asennusvirheet, mikäli tulipesän pohjaa asennettaessa pohjalohkoja on jouduttu väkisin sovittamaan yhteen.

Asennusvirheistä aiheutuvat pienimmät jäännösjännitykset tulevat poistumaan kattilaa ylösajettaessa plastisoitumisen myötä, mutta pahimmat asennusvirheet, kuten jonkin isomman lohkon pakkosiirtymät ulkoisista voimista kattilaa ylös- ja alasajettaessa, aiheuttavat muiden jännitysten kanssa yhdistettyinä suuria jännitysvaihteluita.

KOKEELLINEN OSA

Compound-putkien säröilyyn johtavien syiden kartoittamiseksi tutkitaan compound-putkia (pintakerrosmateriaaleina AISI 304 ja AISI 304L), koko $\varnothing$ 63.5 x 6.53 mm (pinnoite 1.65 mm, hiiliteräs 4.88 mm), sekä metallurgisesti että FEM-mallintamisen avulla.

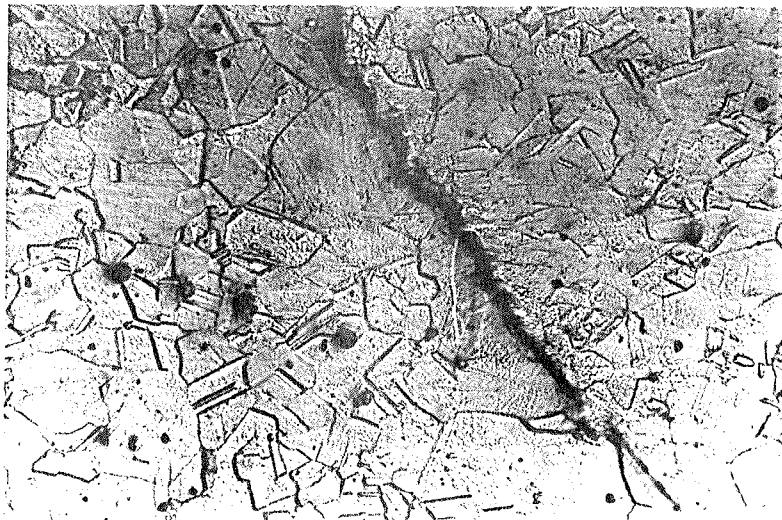
5 METALLURGINEN TUTKIMUS

Koepalat ovat Kaukaan SK-2:n pohjasta, jossa putkimateriaalina on ollut compound-putki Sandvik 5R10/4L7 vuodesta 1981. Pintakerrosmateriaali on AISI 304. Metallurgisessa tutkimuksessa on tarkoitus tutkia särönmuodostumismekanismeja metallinäytteille suoritettavilla valomikroskooppitutkimuksella poikkileikkaushieestä, kovuuskokein ja SEM-tutkimuksella.

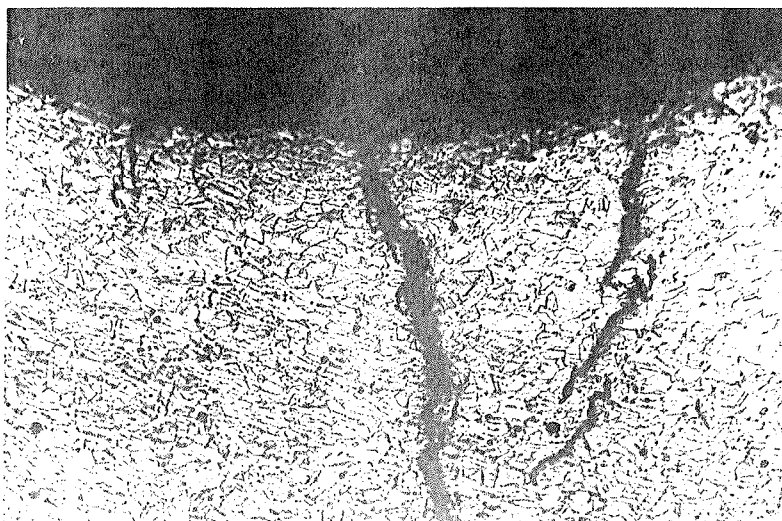
5.1 Metallihieiden mikroskooppitutkimus

Sekä soodakattilan pohjasta otetusta että uudesta compound-putkesta valmistettiin mikrohieet. Näitä mikrohieitä tutkittiin sekä metallimikroskooppilla (PME Olympus) että kameramikroskoopilla (Zeiss ICM 405). Lisäksi compound-putken pinnasta ja poikkileikkauksesta otettiin makrokuvat kameramakroskoopilla (WILD HEERBRUGG M 400), joista selviää säröjen muoto pinnalla ja poikkileikkauksessa. Käytössä oli elektrolyyttinen syövyte (alkoholi 25%, typpihappo 25%, suolahappo 50%).

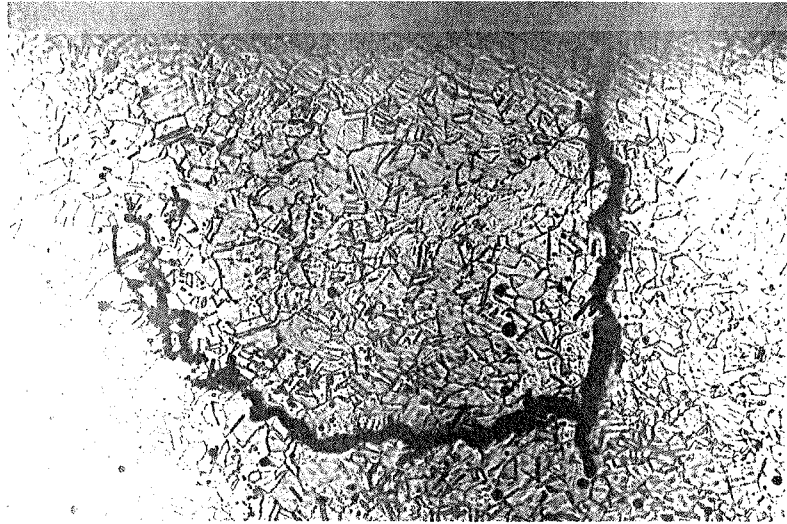
Kuvissa 17 ja 18 on havainnollistettu säröjen etenemistä pinnoitteessa makrokuvin. Mikrokuvin 19, 20, 21 ja 22 on esitetty säröjen kulkua austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä. Liitteissä 12, 13, 14, 15, 16, 17 ja 18 on lisää mikrokuvia compound-putken poikkileikkauksesta.



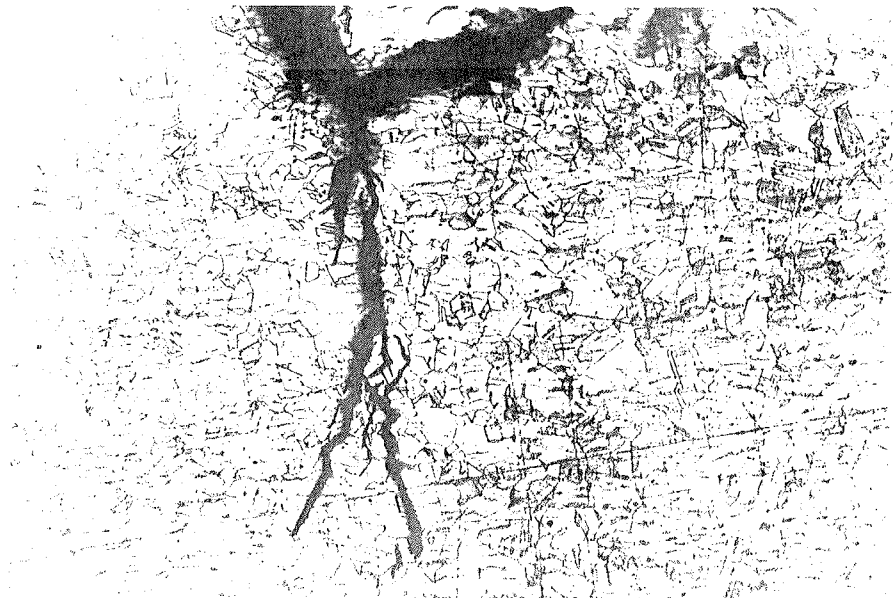
Kuva 21 Särön kärjen eteneminen rakeiden läpi. Suurennus 435-kertainen.



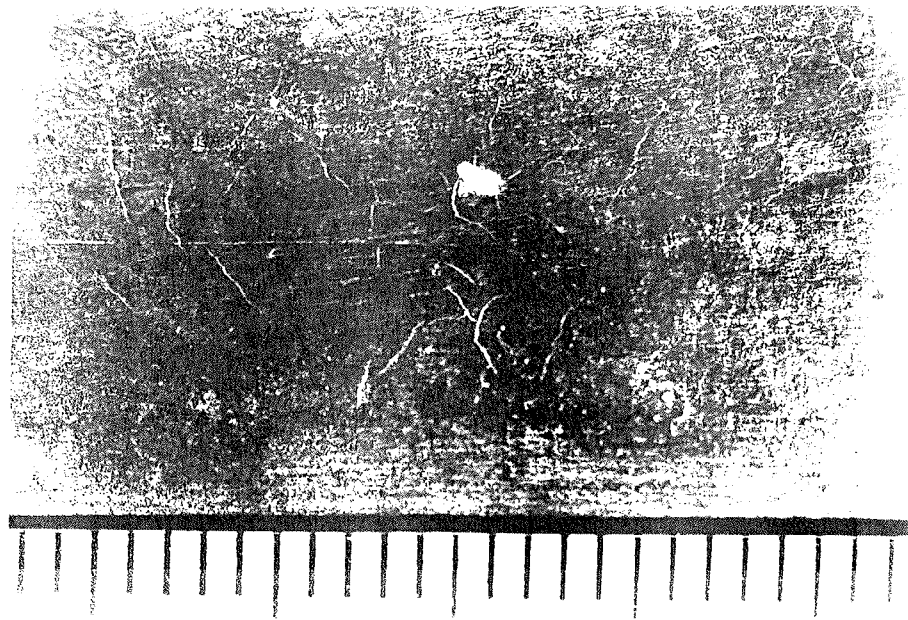
Kuva 22 Säröilyä pintamateriaalissa olevasta iskeymästä. Suurennus 175-kertainen.



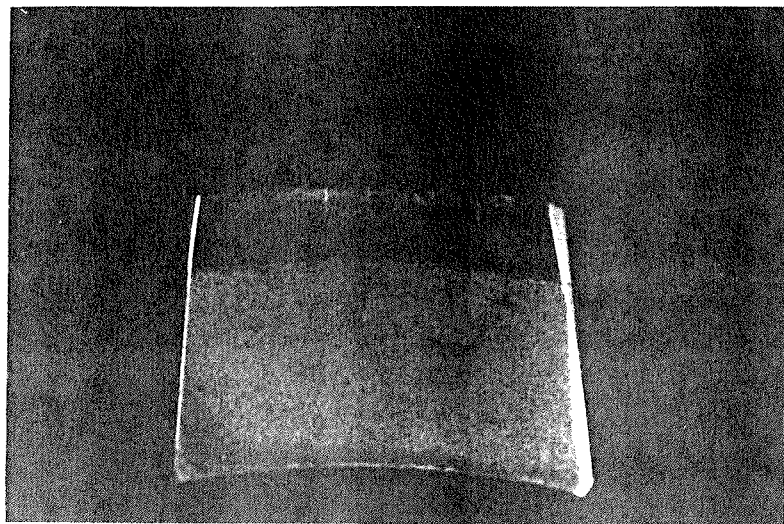
Kuva 19 Särön etenemistä pinnasta. Suurennus 175-kertainen.



Kuva 20 Säröjen etenemistä kohti rajapintaa samalla haaroittuen. Suurennus 250-kertainen.



Kuva 17 Säröilyä compound-putken pinnalla. Vaalea kohta kuvassa on iskeymäjälki. Suurennus 47-kertainen.

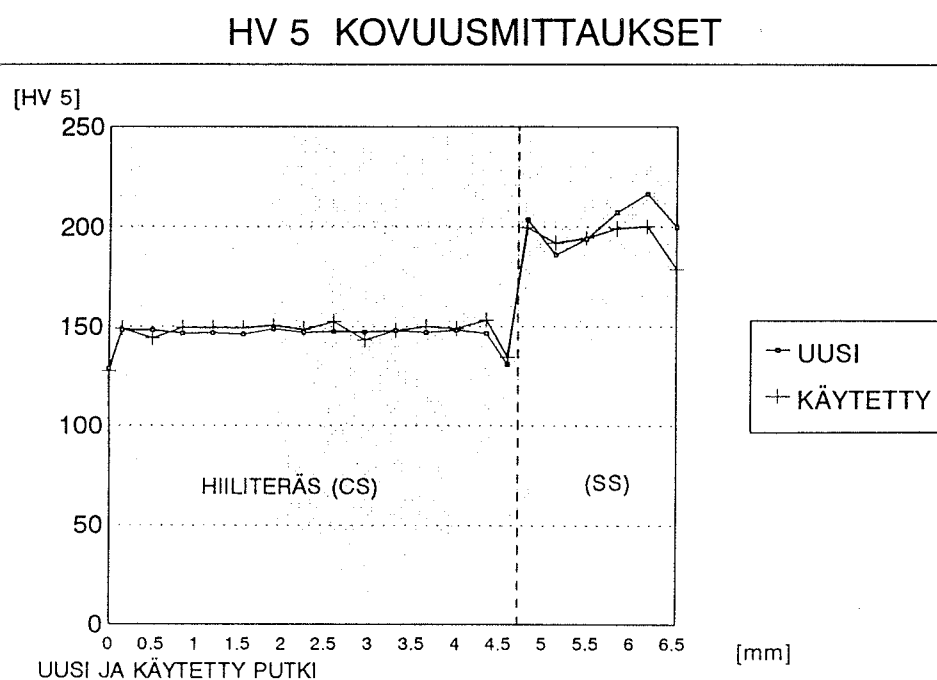


Kuva 18 Makrokuva compound-putken poikkileikkauksesta. Säröt etenevät austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä ja ulottuvat maksimissaan n. 0.8...0.9 mm pinnasta. Suurennus 5.5-kertainen

5.2 Kovuuskokeet

Mikrokovuusmittaukset suoritettiin Zwick-kovuusmittalaitteella standardin SFS 3214 mukaisesti Vickers-menetelmällä. Kovuudet mitattiin 5 kg painolla. Koepalat valettiin muoviin, jotta saataisiin mitattua mahdollisimman totuudenmukaisemmat kovuudet compound-putken sisä- ja ulkopinnan läheisyydessä.

Kovuusmittaukset suoritettiin sekä kattilassa olleelle compound-putkelle että uudelle, käyttämättömälle putkelle (molemmissa putkissa pintakerros AISI 304). Liitteessä 19 on esitetty kovuudet. Kuvassa 23 on havainnollistettu käytetyn ja käyttämättömän compound-putken kovuusjakaumat (käyrän pisteet laskettu keskiarvoina liitteen 19 kovuusjakaumista).



Kuva 23 Uuden ja käytetyn compound-putken kovuusjakaumat.

5.3 SEM-tutkimus

Compound-putkien näytteitä, sekä kattilassa otetusta putkesta että käyttämättömästä putkesta, tutkittiin Kymmene Oy:n tutkimuskeskuksen kemian laboratoriossa Lappeenrannassa. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) on JEOL JSM-6400, johon on liitetty analysointia varten Tracor:n röntgenspektrometri (EDS).

Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla voidaan määrittää natrium (Na) ja sitä raskaammat alkuaineet, ja alentamalla kiihdytysjännitettä saadaan selville myös hiilestä (C) neoniin (Ne) olevien alkuaineiden olemassaolo. Löydettyistä alkuaineista saadaan prosentuaalinen painojakauma, joka ilmoittaa prosenttimäärät ainoastaan löydettyistä alkuaineista (ei siis todellisia määriä).

Spektrinkeräysaikana käytettiin 300 s (+laskenta-aika n. 25%) ja kiihdytysjännitteenä 15 kV (määritetään natrium ja sitä raskaammat alkuaineet).

Käytössä olleesta compound-putkesta analysoitiin alkuainejakaumat austeniittisen ruostumattoman teräksen osalta pisteittäin putken ulkopinnasta kohti compoundin rajapintaa (säröjen läheisyydessä). Myös uutta compound-putkea analysoitiin siten, että otettiin n. 0.2 mm x 0.2 mm suuruinen pala pintamateriaalia keskimääräisen alkuainejakauman saamiseksi. Taulukossa 8 on esitetty alkuainejakaumat.

Röntgenspektrometrillä analysoitaessa jätetään aivan pienet (alle n. 0.1%) alkuainepitoisuudet huomioimatta. Mn-pitoisuutta mitattaessa sattuu kromin "toinen piikki" mangaanin kanssa päällekkäin, joten Mn-pitoisuudessa voi olla pientä vääristymistä.

TAULUKKO 8

Alkuainejakaumat käytetyn compound-putken austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä (AISI 304) verrattuna käyttämättömään.

Etäisyys compound-putken ulkopinnasta [mm]	Alkuainepitoisuudet (käytetty putki) [paino%]	Alkuainepitoisuudet (käyttämätön putki) [paino%]
0.05	Fe 68.82, Cr 19.53 Ni 9.65, Mn 1.44 Si 0.55	Fe 68.84, Cr 19.50, Ni 9.91, Mn 1.18, Si 0.57
0.50	Fe 68.00, Cr 19.67 Ni 10.21, Mn 1.43 Si 0.69	
1.00	Fe 69.31, Cr 19.19 Ni 9.34, Mn 1.56 Si 0.60	
1.50	Fe 68.09, Cr 19.78 Ni 10.11, Mn 1.47 Si 0.55	

Särön sisällä olevasta sakasta analysoitiin alkuainejakauma (taulukko 9). Myös sekä särön reunasta että särön kärjestä (metallin puolelta) analysoitiin alkuainejakaumat (taulukko 10).

TAULUKKO 9

Alkuainejakaumat painoprosentteina särön sisältä (sakasta).

Fe	S	Ni	Cr	K	Ca	Mn	Si
59.04	18.97	12.00	5.01	2.81	1.32	0.60	0.25

TAULUKKO 10

Alkuainejakaumat painoprosenteina särön reunasta (a) ja särön kärjestä (b).

Fe	Cr	Ni	Mn	S	Si	Ca	K
64.86	21.32	8.98	1.89	1.57	0.88	0.28	0.22

(a)

Fe	Cr	Ni	Mn	Si
68.09	19.47	10.52	1.42	0.49

(b)

VTT:n kokeissa säröjen pohjalta, sakasta tai korroosiotuotteista, on löydetty korkeita määriä rikkiä /10/. Rikkiä tunkeutuu raerajoja pitkin nikkeliin esim. hehkutuksen yhteydessä aiheuttaen raerajojen haurastumista (kuumahauraus) /11 s. 642/. Polttoliipeä ja raskas polttoöljy sisältävät rikkiä.

Taulukkoon 11 on laskettu taulukosta 10 (a) Fe-, Cr-, Ni-, Mn- ja Si-pitoisuudet, jolloin nähdään missä alkuaineissa tapahtuu syöpymistä.

TAULUKKO 11

Perusmetallin (AISI 304) alkuainepitoisuudet särön reunassa.

Fe	Cr	Ni	Mn	Si
66.23	21.77	9.17	1.93	0.90

6 FEM - TARKASTELU

Compound-putkeen syntyy ensisijaisesti rakenteen kahdesta eri materiaalista johtuvia lämpöjännityksiä ja höyrynpaineesta aiheutuvia jännityksiä. Syntyvistä jännityksistä suurimmat ovat kehä- ja aksiaali-jännitykset. Säteensuuntaiset jännitykset voidaan jättää huomioimatta, koska suurimmillaankin ne ovat n. 10%:n luokkaa kehä- ja aksiaali-jännityksistä.

Tarkastelu perustuu pelkkään compound-putkeen, jolloin ei huomioida esim. membran rakennetta hitsausliitoksineen. Tämä yksinkertaistus perustuu siihen, että säröilyä ilmenee myös puhtaasti compound-putken otsapinnoilla.

Laskennassa käytetään putkimateriaalina Sandvik 3R12/4L7 (pintakerros AISI 304L).

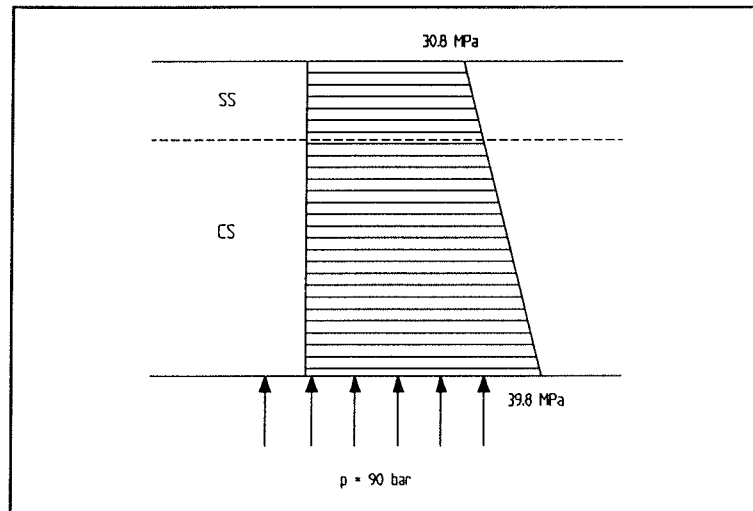
6.1 Käsin laskenta

Laskennassa tarkastellaan paineesta ja lämpötilasta aiheutuvia jännityksiä.

Sisäpuolinen paine aiheuttaa putken seinämälle kehäjännityksen, mikä on laskettavissa kaavalla 1 /15/. Aksiaali-jännityksiä ei oleteta syntyvän.

$$\sigma_{\varphi p} = P_s \frac{\left(\frac{d_u}{d}\right)^2 + 1}{\left(\frac{d_u}{d_s}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

Sisäpuolisesta paineesta (90 bar) aiheutuu kehäjännitysjaakauma seinämän yli kuvan 24 mukaisesti. Vetojännitys on suurimmillaan putken sisäpinnalla.



Kuva 24 Paineesta johtuva käsinlaskettu kehäjännitys.

Lämpötilan aiheuttama kehä- ja aksiaaliännitysten suuruus lasketaan kaavalla 2 /16/.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\alpha E\Delta T}{1-\nu} \quad (2)$$

Laskettaessa lämpöjännityksiä compound-putken pintakerroksessa (austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä), muokataan kaavaa 2 siten, että se ottaa huomioon compoundin eri kerrosten paksuudet.

$$\sigma \left(1 + \frac{t_o}{t_i}\right) = \frac{\Delta \alpha E \Delta T}{1 - \nu}$$

$$\sigma_{pinnoite} = \frac{\Delta \alpha E_{ss} \Delta T}{(1 - \nu) \left(1 + \frac{t_o}{t_i}\right)} \quad (3)$$

Kaavasta 3 voidaan laskea pinnoitteen (austeniittinen ruostumaton teräs) jännitys, kun tiedetään materiaalien pituuden lämpölaajenemiskertoimien erotus ja pinnoitteen kimmokerroin eri lämpötiloissa. Poissonin vakion arvojen ei oleteta muuttuvan lämpötilan kasvaessa.

Suurin sallittu lämpötilaväli, jolloin pinnoite toimii elastisella alueella, saadaan selville ratkaisemalla ΔT kaavasta 3.

$$\Delta T = \frac{\sigma_o \left(1 + \frac{t_o}{t_i}\right) (1 - \nu)}{\Delta \alpha E_{ss}} \quad (4)$$

Sijoitetaan

$$\Delta T = T - 20^\circ C$$

$$\sigma_o = R_{p0.2}(20^\circ C) + R_{p0.2}(T)$$

Mikäli halutaan saada selville korkein elastisella alueella oleva lämpötila, kun palautus on takaisin $20^\circ C$:een, sijoitetaan pinnoitteen myötöraja, materiaalivakiot sekä compound-putken seinämän paksuus hiilliteräksen ja austeniittisen ruostumattoman teräksen osalla. Saadaan kaava 5, josta voidaan iteroimalla laskea korkein lämpötila, johon putki voidaan lämmit-
tää ilman että pinnoite plastisoituu jäähtyessään.

$$R_{p0.2}(20^\circ C) = 180 MPa$$

$$\nu = 0.29 \quad t_o = 1.65 \text{ mm} \quad t_i = 4.88 \text{ mm}$$

$$T = \frac{R_{p0.2}(20^\circ C) + R_{p0.2}(T^\circ C) \left(1 + \frac{t_o}{t_i}\right) (1 - \nu)}{\Delta \alpha E} + 20^\circ C \quad (5)$$

Iteroimalla saadaan elastisesti käyttäytyvän pinnoitteen ylärajaksi n. $420^\circ C$.

6.2 ABAQUS-laskenta

FEM-tarkastelu suoritettiin Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa ABAQUS-ohjelmalla (versio 4.9.1) Vax 8550 ympäristössä. Laskennassa putki mallitettiin axisymmetrisenä solid-mallina, jossa käytettiin 15 CAX8RT elementtiä (10 hiiliteräksen ja 5 austeniittisen ruostumattoman teräksen kohdalla). Syöttötietoina sekä hiiliteräkselle että austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle annettiin materiaaliarvot: lämpölaajenemiskertoimet, kimmokertoimet ja myötörajat eri lämpötiloissa (liitteet 20 ja 21). Liitteessä 22 on esitetty syöttötiedosto.

Putkelle sallittiin pituussuuntainen lämpölaajeneminen siten, että hiiliteräs toimii määräävänä tekijänä ja austeniittinen ruostumaton teräs pakotettiin laajenemaan hiiliteräksen kanssa yhtä paljon.

Höyrynpaine synnyttää putkeen jännityksiä, joista merkittävin on kehäjännitys (aksiaalijännitys pinnoitteessa vain noin 13.8 kPa, kun paine 90 bar). Paineen (90 bar) aiheuttama kehäjännitys on likimäärin samanlainen kuin käsinlaskettuna. Maksimi kehäjännitys 39.9 MPa on ensimmäisessä elementissä (sisäpinnalla) ja pienin arvo 30.2 MPa löytyy pinnoitteen ulkopinnalta (elementti 15). Elementissä 11, joka on heti rajapinnasta seuraava ulospäin, löytyy kehäjännitys 31.6 MPa. Taulukossa 12 on vertailtu käsinlaskennan ja ABAQUS-ajon tuloksia.

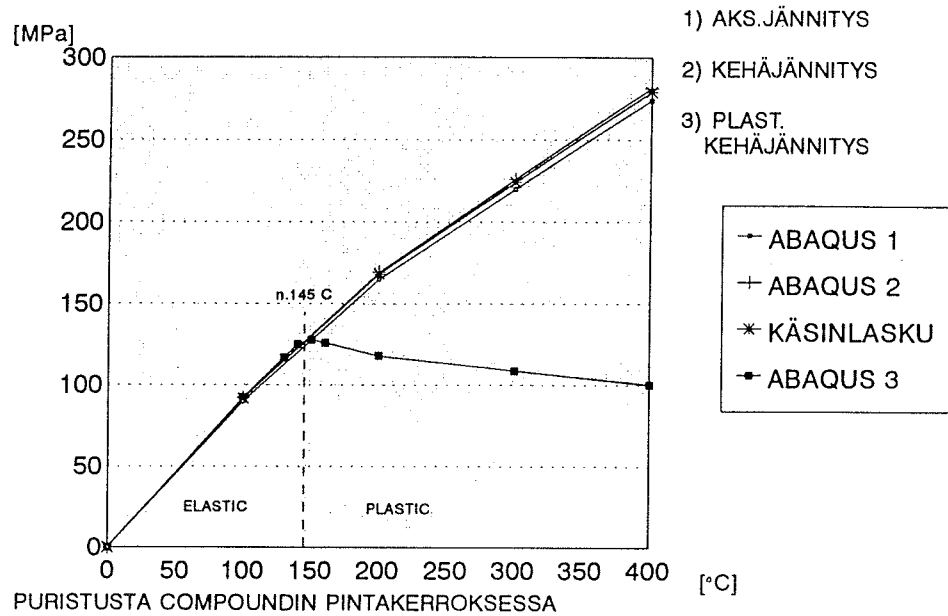
TAULUKKO 12

Paineesta aiheutuvan kehäjännityksen käsinlaskennan ja ABAQUS-tulosten arvot.

Etäisyys sisäpinnalta [mm] (elem. n:ro)	Käsinlaskenta [MPa]	ABAQUS [MPa]
0.00 (1) CS	39.8	39.9
1.71 (4) CS	36.7	37.1
2.68 (6) CS	35.3	35.5
3.66 (8) CS	34.0	34.2
5.05 (11) SS	32.3	31.6
6.53 (15) SS	30.8	30.2

FEM - mallin vastaavuutta lämpöjännitysten osalta käsinlaskentaan havainnollistaa kuva 25, jossa elastisesti suoritettujen ABAQUS-ajojen tuloksista saatuja kehäjännityksiä ja aksiaalisia jännityksiä (käyrät 1,2 ja 3) verrataan käsinlaskettuihin arvoihin. Lisäksi kun plastisoituminen otetaan huomioon ABAQUS-mallissa, saadaan käyrän 4 mukainen puristusjännitys eri lämpötiloissa. Kuvassa 25 on oletettu compound-putken olevan lähtötilanteessa jäännösjännityksetön, vaikka todellisuudessa compound-putkessa on kuvan 14 a mukainen jäännösjännitystila.

LÄMPÖJÄNNITYKSET



Kuva 25 Lämpöjäännitykset pinnoitteessa.

Compound-putkeen kohdistuvia rasituksia kattilan eri ajotilanteissa pyritään simuloimaan kuvan 26 mukaisella käyttösekvenssillä, jossa putkeen kohdistuvat paineen ja lämpötilan vaihtelut aikatasossa. Oletetaan, että tulipesän pohjaputkissa vallitseva paine on 90 bar ja lämpötila 295 °C. Paine koostuu sekä soodakattilan lieriöpaineesta että hydrostaattisesta paineesta pohjaputkien ja lieriön välillä.

Edellisen ABAQUS-ajon perusteella saadut tulokset, kuten jännitykset, siirtymät jne., otetaan huomioon seuraavassa ajossa siten, että saadut tulokset syötetään uuteen ABAQUS-ajoon .RES -tiedostona. Siten pystytään havainnollistamaan putkeen kohdistuvat rasitukset eri tilanteissa.

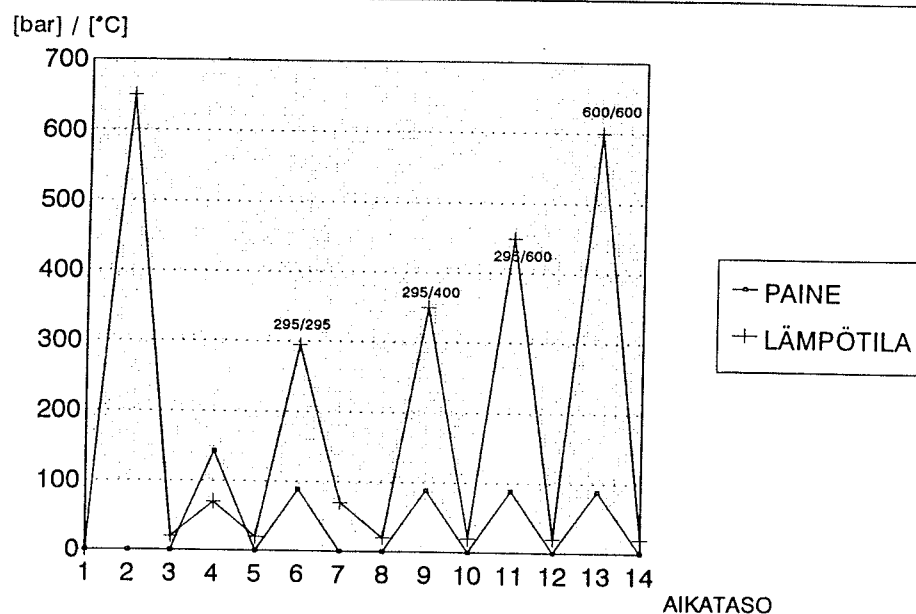
Kuvan 26 vaiheet ovat seuraavat:

- 1) Putki valmistuksen jälkeisessä tilassa. Jäännösjännityksiä putkessa (oletetaan kuitenkin, että jäännösjännityksiä ei ole). $p = 0 \text{ bar}$, $T = 0^\circ\text{C}$.
- 2) Päästöhehkutus. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 650^\circ\text{C}$.
- 3) Putki toimitus- ja asennustilassa.
 $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.
- 4) Koeponnistus. $p = 143 \text{ bar}$, $T = 70^\circ\text{C}$.
- 5) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.
- 6) Kattila normaalikäytössä.
 $p = 90 \text{ bar}$, $T = 295^\circ\text{C}$.
- 7) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 70^\circ\text{C}$.
- 8) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.
- 9) Kattila normaalikäytössä. Putken ulkopinnalla kohonnut lämpö. $p = 90 \text{ bar}$, $T = 295^\circ\text{C}/400^\circ\text{C}$.
- 10) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.
- 11) Kattila normaalikäytössä. Putken ulkopinnalla kohonnut lämpö. $p = 90 \text{ bar}$, $T = 295^\circ\text{C}/600^\circ\text{C}$.
- 12) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.
- 13) Kattila häiriötilassa. Putken ulko- ja sisäpinnalla kohonnut lämpö.
 $p = 90 \text{ bar}$, $T = 295^\circ\text{C}/600^\circ\text{C}$.
- 14) Kattila alasajettuna. $p = 0 \text{ bar}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

Kohdan 2 jälkeen putkeen tulee materiaalieroista johtuvia jäännösjännityksiä, jolloin pahimmat kylmävalssauksesta syntyneet jäännösjännityspiikit tasoittuvat.

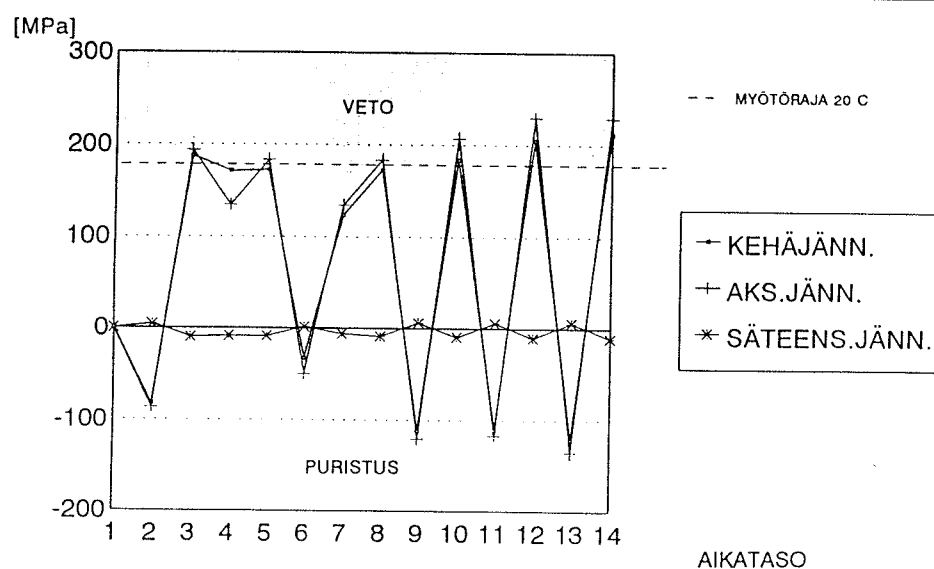
Kuvan 26 mukaisella käyttösekvenssillä aiheutuu compound-putken pintamateriaaliin aksiaalisia- kehä- ja säteensuuntaisia jännityksiä kuvan 27 mukaisesti.

LÄMPÖTILAN JA PAINEEN VAIHTELUT



Kuva 26 Soodakattilan käyttöjakson paineen ja lämpötilan vaihtelut aikatasossa.

JÄNNITYKSET ERI TILANTEISSA

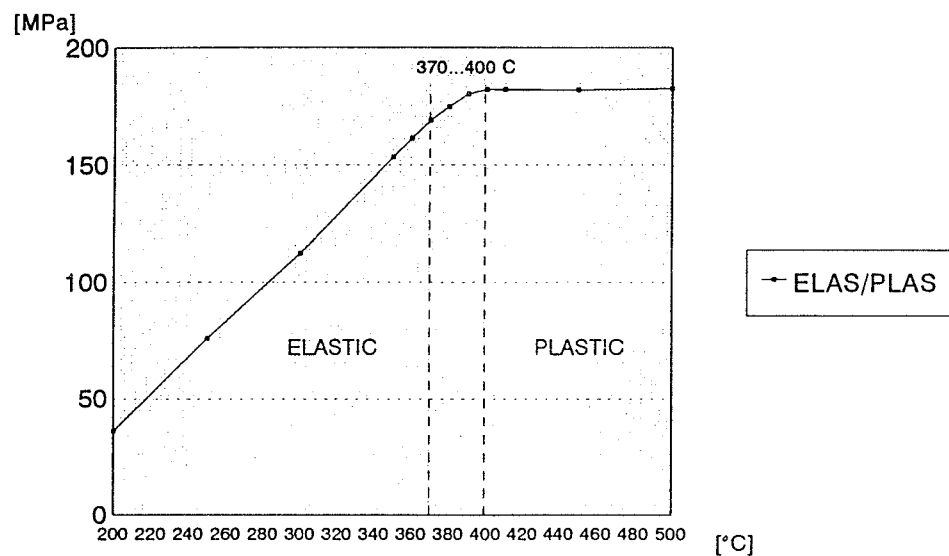


AUSTENIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS

Kuva 27 Jännitykset pintamateriaalissa kuvan 26 mukaisella käyttösekvenssillä.

Pinnoitteen käyttäytymistä ylös- ja alasajoissa havainnollistaa kuva 28, jossa putki ensin kuumennetaan kohti käyttölämpötilaa ja sen jälkeen jäähdytetään takaisin 20 °C:een. Pinnoite käyttäytyy elastisesti alasajossa mikäli vetojännitys ei ylitä myötörajaa (180 MPa 20 °C). ABAQUS-ajojen tuloksista piirretystä käyrästä havaitaan, että elastisen ja plastisen käyttäytymisen raja on n. 370...400 °C:ssa.

KUUMENNUS JA PALAUTUS 20 C:een



Aust. ruost. teräksen elastinen/plastinen käyttäytyminen

Kuva 28 Pinnoitteen elastinen ja plastinen käyttäytyminen.

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Metallurginen tutkimus

Makro- ja mikrokuvien perusteella säröjen syntyminen austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä on jännityskorroosion aiheuttamaa. Säröt kulkevat rakeiden läpi ja murtopinnoilla - mikäli sakkaa esiintyy särön sisällä - on havaittavissa syöpymistä. Myös raerajoilla on särön etenemistä. Mitään ylikuumentumisesta, virumisesta tai herkistymisestä aiheutuvia muutoksia kiderakenteessa tai raerajoilla ei ole havaittavissa (ei muutoksia kiderakenteessa, ei raerajakoloja jne.). Säröt haarottuvat pinnoitteessa ja etenevät etupäässä kohti hiiliteräksen ja pintamateriaalin rajapintaa. Koepaloissa säröt eivät vielä olleet saavuttaneet rajapintaa eikä siten myöskään pinnoitteen "irtoamista" ollut tapahtunut.

Kovuuskokeiden tuloksia analysoitaessa havaitaan kuvassa 23 (käytetyn ja käyttämättömän compound-putken vertailu) austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä kovuuden alenemista käytön seurauksena. Alunperin kylmämuovauksen seurauksena pintakovuus on noussut n. 220 HV kovuuteen, ja kun compound-putki on joutunut korkeaan lämpötilaan joko lämpökäsittelyssä tai kattilan käyttöolosuhteissa, pintakovuus on tasoittunut n. 200 HV kovuuteen. Hiiliteräksen ja austeniittisen ruostumattoman teräksen rajapinnalla on putken valmistuksesta johtuva hiilenkato aiheuttanut kovuuden alenemisen hiiliteräksen puolella. Käytön seurauksena ei, compound-putken ulkopinnassa tapahtunutta kovuuden muutosta lukuunottamatta, ole kovuuksissa tapahtunut mitään muutoksia.

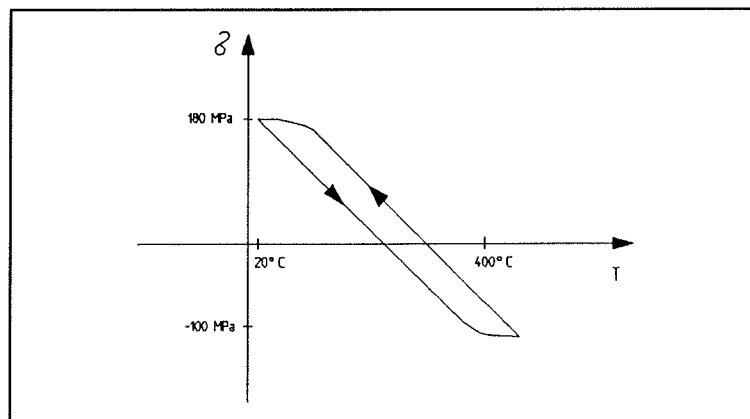
Koska kovuudet pintamateriaalissa eivät ylitä 245 HV kovuutta, pienenee sulfidien aiheuttaman jännityskorroosion vaara hieman.

Alkuainepitoisuuksia tarkasteltaessa säröjen läheisyydessä ei taulukon 8 mukaan alkuainejakaumassa ole tapahtunut oleellisia muutoksia. Mutta kun katsotaan taulukon 11 (särön reunasta) prosentuaalista koostumusta, havaitaan etenkin kromin kohdalla korkea pitoisuus sekä Fe- ja Ni-pitoisuuksissa pientä alenemista, mikä aiheutuu syöpymisestä. Tämä havaitaan myös taulukosta 9 (sakan alkuainejakauma), jossa raudan ja nikkelin osuus on korkea verrattuna esimerkiksi kromiin. Taulukossa 9 on myös erikoista se, että rikkipitoisuus on korkea ja natriumia ei ole löytynyt lainkaan (etsityllä tarkkuudella).

7.2 FEM - tarkastelu

Vertailtaessa jännityksiä austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä (kuva 25), havaitaan käsin laskennan ja ABAQUS-ajojen tulosten vastaavan hyvin toisiaan (käyrät 1,2 ja 3). Kuvasta havaitaan myös pintakerroksen puristusjännityksen ylittävän myötörajan ja siten plastisoitumisen alkavan jo 140...150 °C:ssa (mikäli compound-putki on lähtötilanteessa jännityksetön).

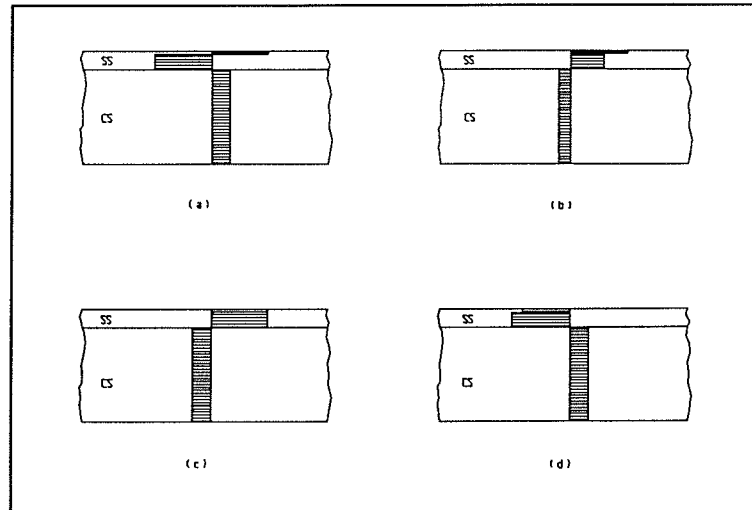
Todellisuudessa pinnoitteen jännitykset vaihtelevat lähtötilanteen vetojännityksen ja käyttölämpötilassa vallitsevan puristusjännityksen välillä. Mikäli käyttölämpötilassa ei ylitetä pinnoitteen myötörajaa, pinnoite käyttäytyy elastisesti. Kuvasta 28 nähdään, että vasta kun putki lämmitetään 370...400 °C:een (ennen palautusta takaisin 20 °C:een) tulee jäähtymisen jälkeen pinnoitteeseen niin suuri vetojännitys, että ylitetään myötöraja ja plastisoituminen alkaa. Siten lämpötila-aluetta 370...400 °C voidaan pitää kriittisenä ylärajana compound-putkelle (AISI 304L). Kuva 29 havainnollistaa pinnoitteen plastista käyttäytymistä.



Kuva 29 Pinnoitteen plastinen käyttäytyminen.

Tarkasteltaessa compound-putkeen syntyviä jännityksiä kuvan 26 mukaisella käyttösekvenssillä havaitaan kuvasta 27, että päästöhehkutuksen jälkeen pinnoitteessa on 20 °C:ssa aina vähintään myötörajan suuruinen vetojännitys. Vaikka putkeen saataisiin austeniittisen ruostumattoman teräksen pinnalle puristusjännitys esim. kuulapuhalluksella, saatu hyöty häviää heti kun pinnoite joutuu alttiiksi yli 370 °C:een kuumuuteen. Kun tiedetään, että compound-putken sisäpinnalla lämpötila on noin 300 °C:tta ja compound-putken ulkopinnalla normaali käytössä olevan noin 20...70 °C:tta korkeampi lämpötila, ei kuulapuhalluksesta ole juuri muuta hyötyä kuin, että mahdollisesti pinnassa olevat jännityskonsentraatiokohdat saadaan tasoitettua.

Kuvassa 30 on esitetty compound-putken jännitysvaihtelut, kun putken pintaan on saatu kuulapuhalluksella myötörajan suuruinen puristusjännitys. Mikäli käyttötilanteessa puristusjännitys pinnoitteessa ylittää pintamateriaalin myötörajan (kuva 30 c), kuulapuhalluksesta saatu hyöty menetetään. Mutta mikäli käyttötilanteessa puristusjännitys pinnoitteessa ei ylitä myötörajaa (kuva 30 b), jää alasajon jälkeen compound-putken pinnalle myötörajaa pienempi vetojännitys (kuva 30 d) ja siten jännityskorroosiovaara pienenee.



Kuva 30 Kuulapuhallutetun compound-putken jännitysvaihtelut. Lähtötilanteessa (a) putkenpintaan on kuulapuhalluksella aikaansaatu puristusjännitys. Jännitykset käyttötilanteessa (b) ja tilanteessa, jolloin kuulapuhallus menettää merkityksensä (c). Jännitykset alasajon jälkeen (d), kun käyttötilanteessa (b) ei ylitetty pintamateriaalin myötörajaa.

Sisäpuolisesta paineesta aiheutuva kehäjännitys (vetoa) pienentää lämmön aiheuttamaa kehäjännitystä (puristusta) pinnoitteessa, joten suurimmat jännitykset ovat aksiaali-jännityksiä. Tämä havaitaan kuvasta 27, jossa aksiaali-jännitykset, kattilan ollessa ajossa, ovat hiukan pienemmät kuin kehäjännitykset. Myös alasajon jälkeen aksiaali-jännitykset muodostuvat hiukan suuremmiksi. Säteensuuntaisilla jännityksillä ei ole merkitystä.

7.3 Johtopäätökset

Soodakattiloiden tulipesän pohjan compound-putkien säröilyn syntymekanismi on jännityskorroosio. Jännityskorroosion edellytyksenä on riittävä vetojännitystila korrodoivassa ympäristössä. Säröilyn syntyyn vaikuttavat lämpöjännitykset aiheuttavat myötörajan suuruusluokkaa olevat jännitykset compound-putken pinnoitemateriaalissa (AISI 304 ja AISI 304L), jolloin pintamateriaalissa tapahtuu aina plastisoitumista kattilan ylös- ja alasajotilanteissa. Mikäli plastisoitumista tapahtuu käyttölämpötilassa, tulee alasajovaiheessa pintamateriaaliin myötörajan suuruinen jännitystila jo ennen kuin compound-putki on jäähtynyt 20 °C:een. Siten pintamateriaali on jo myötörajan suuruisen jännityksen alaisena lämpötiloissa, joissa jännityskorroosio vielä ilmenee (60...100 °C).

Myös käytössä olevien pintamateriaalien (AISI 304 ja AISI 304L) nikkelpitoisuus (8...12%) on jännityskorroosionkestävyyden kannalta erittäin huono. Nikkelipitoisuutta nostamalla jännityskorroosionkestävyys paranee.

Compound-putken jäännösjännitykset 20 °C:ssa ovat siten, että austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä on myötörajan suuruinen vetojännitys (σ_v) ja hiiliteräksen puolella puristusjännitys ($\sigma_p = \sigma_v t_o/t_i$). Compound-putken pinta on mahdollista kuulapuhalttaa, jolloin aivan pintakerrokseen tulee puristusjännitys. Kuulapuhalluksen hyöty katoaa kuitenkin heti, kun lämpötila nousee riittävän korkealle käyttötilanteessa (AISI 304L $\approx$ 370...400 °C). Kuulapuhalluksesta tullaan saamaan hyötyä silloin, kun pintakerroksessa ei tapahdu plastisoitumista ylös- ja alasajojen välissä.

Compound-putken pintamateriaalin jännitysvaihteluita voidaan parantaa alentamalla pohjaputkistossa virtaavan veden lämpötila, esimerkiksi 300 °C:sta 200 °C:een, erillisellä pohjaputkiston vedenkierrolla. Siten pintamateriaalin jännitykset käyttötilanteessa jäävät reilusti alle myötörajan ja alasajon jälkeen pinnassa (kuulapuhallutetulla paksuudella) on vain 40...80 MPa:n vetojännitys.

Pintamateriaalin koostumusta muuttamalla siten, että materiaalin pituuden lämpölaajenemiskerroin olisi lähempänä hiiliteräksen pituuden lämpölaajenemiskerrointa saataisiin myös lämpöjännityksiä pienennettyä, jolloin kuulapuhalluksesta olisi hyötyä jännityskorroosion ehkäisemiseksi. Esimerkiksi Sandvik Sanicro 38:lla ja hiiliteräksellä (SS 1435) pituuden lämpölaajenemiskertoimien erotus on alle puolet pienempi kuin nykyisillä materiaaleilla. Myös korkeampi nikkelipitoisuus parantaa jännityskorroosionkestävyyttä. Taulukossa 13 on esitetty Sandvik Sanicro 38:n lisäainepitoisuudet

TAULUKKO 13 Pintamateriaalin Sandvik Sanicro 38:n lisäainepitoisuudet /26/.

Pintamateriaali	Cr	Ni	Mo
Sandvik Sanicro 38	20	38	2.6

Compound-putkien säröjä on korjattu sekä hiomalla että päällehitsaamalla. Molemmista korjaustoimenpiteistä on saatu hyviä kokemuksia. Tosin korjaushiottu alue ja korjauspäällehitsin viereinen alue ovat erittäin alttiita säröilylle.

8 YHTEENVETO

Soodakattilan tulipesän alaosan säröilyn syntymekanismi on jännityskorroosio. Käytetyillä pinnoitemateriaaleilla (AISI 304 ja AISI 304L) suuret jännitysvaihtelut soodakattilan ylös- ja alasajojen jälkeen aiheuttavat, ainakin paikallisesti, aina plastisoitumista. Alasajon jälkeen pintamateriaali on aina myötörajan suuruisen vetojännityksen alaisena, jolloin alasajovaiheessa jännityskorroosio aiheuttaa austeniittisen ruostumattoman teräksen säröilyn.

Särön kasvu kriittiseen pisteeseen, jolloin pinnoitekerroksen irtoamista tapahtuu, vaatii useita ylös- ja alasajoja. Soodakattilan tulipesän pohjan tarkastusta ei pitäisi suorittaa useammin kuin 2...3 vuoden välein tai 10...15 ylös- ja alasajon jälkeen, koska tarkastotoiminnan ohessa suoritettavalla puhdistustyöllä ja tarkastuksen jälkeisessä ylösajossa voidaan saada enemmän vahinkoa aikaan kuin pitkän käyttöjakson aikana.

Soodakattiloiden tulipesän pohjan compound-putkien korjauspäällehitsauksista saadut kokemukset ovat osoittautuneet erittäin hyviksi. Ennen päällehitsausta compound-putken pinnalta pois hiottavat säröt on tarkastettava kuitenkin huolella, jottei pintamateriaaliin jää hitsauspalkojen alle säröjä.

Käytettäessä nykyisiä materiaaleja ei kuulapuhalluksesta, jolloin pinnoitemateriaalin pintaan saadaan aikaan puristusjännitys, ole muuta hyötyä kuin jännityskonsentraatioita tasoittava vaikutus, koska saatu hyöty häviää kun koko pinnoitekerros plastisoituu. Kuulapuhalluksesta tullaan saamaan hyötyä käytettäessä uusia pinnoitemateriaaleja (esimerkiksi Sanicro 38), joilla sisä- ja ulkomateriaalien pituuden lämpölaajenemiskertoimien erotus pienenee huomattavasti, tai suunnittelemalla soodakattilan pohjakonstruktio siten, että erillisellä vedenkierrolla pidetään pohjaputkissa virtaavan veden lämpötila n. 200 °C:ssa. Näillä toimenpiteillä pinnoitteen pintakerroksen vetojännitys jää huomattavasti alle myötörajan ja siten jännityskorroosiovaara pienenee. Myös runsaammalla nikkeli- ja kuparipitoisuudella (Sanicro 38) on jännityskorroosiota ehkäisevä vaikutus. Tosin käytettäessä uusia pinnoitemateriaaleja voi korrodoiva ympäristö aiheuttaa uusia, odottamattomia ongelmia.

9 LÄHDEKIRJALLISUUS

/1/ Reeve, Douglas W., Kraft recovery operations. Teoksessa: TAPPI Seminar Notes: 1989 Kraft Recovery Operations Seminar, Orlando, FL, January 22-27, 1989. Atlanta, GA, USA, 1989. TAPPI Press. s. 1-4.

/2/ Hupa, Mikko, Sellutehtaan kemikaalikierron nykytila ja tulevaisuuden näkymät, 1990, INSKO 10-90, s. 1-7.

/3/ Puusta paperiin M-411. Opetusmoniste voimalaitoskäyttäjille. Moniste 11. Lipeäosastot, regenerointi. Ammattikasvatushallitus 1979. s. 1-20.

/4/ Puusta paperiin M-412. Opetusmoniste voimalaitoskäyttäjille. Moniste 12. Lipeäosastot, Soodakattila. Ammattikasvatushallitus 1979.

/5/ Törönen, Marjo. Sulfaattisellutehtaan rikki-taseen säätö bipolaaritekniikalla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Kemiantekniikan osasto. 1990. s. 2-5.

/6/ Moskal, Max D., Corrosion of high pressure kraft recovery boilers. Teoksessa: TAPPI Seminar Notes: 1988 Kraft Recovery Operations Seminar. Atlanta, GA, USA, 1988. TAPPI Press. s. 285-286.

/7/ McGurn, Jack F., Composite tubes in black liquor recovery boilers - an update. Teoksessa: Canadian Pulp and Paper Association, Annual meeting, Preprints 74B, Montreal, Quebec. January 28-29, Le Palais des Congrès de Montréal, 1988. s. 147-151.

/8/ Ruostumattomia erikoisteräksiä selluloosateollisuuden vaikeisiin korroosio-olosuhteisiin. Sandvik, Teknillinen tiedote. s. 13.

/9/ Composite tubes for black liquor recovery boilers, Sandvik 3R12/4L7. January 1989. Sandvik Steel. s. 1-4.

/10/ VTT:n tutkimusselostus nro MRG1486/91. Tutkimuksen tilaaja Kaukas Oy / Särmölä Ossi.

/11/ Lindroos, Veikko, Sulonen, Matti, Veistinen, Mauri. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. Keuruu, Kustannusosakeyhtiö Otava, 1986.

/12/ A. Ahlström. Recovery boiler, Kymmene Oy, Kaukas Oy SK3. Esite.

/13/ Blackwell, Brian, King, Tracy. Chemical reactions in kraft recovery boilers. Vancouver, B.C., Canada. Sandwell and Company Limited, 1985.

/14/ Ingevald, Sture , Flemström, Bo. Skador på bottnar i sodapannor. Seminaari marraskuu 1991, Tukholma.

/15/ Virkola, Nils-Erik. Puumassan valmistus. Suomen Paperi-insinööri-en Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. 2. täysin uudistettu painos. Turku: Oy Turun Sanomat/Serioffset, 1983.

/16/ Pejryd, L., Hupa, M. Bed and furnace gas composition in recovery boilers - advanced equilibrium calculations. In: Proceeding of Pulping conference. San Francisco, 1984. TAPPI.

/17/ Lukkari, J. Austeniittisen ruostumattoman teräksen puikko- ja jauhe-kaarihitsaus. Hitsaustekniikka 2/1983.

/18/ Suomen Korroosioyhdistys SKY. Korroosio käsikirja. Hanko, Hangon Kirjapaino Oy, 1988.

/19/ Launo, Timo. Akustisen lämpötilamittauksen soveltaminen soodakattilalla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 1990.

/20/ Alajärvi, J., Varpe, R. Optimizing regovery boiler operations. Teoksessa: TAPPI Seminar Notes: 1989 Kraft Recovery Operations Seminar, Orlando, FL, January 22-27, 1989. Atlanta, GA, USA, 1989. TAPPI Press. s. 249-259.

/21/ Singbeil, D., Garner, A. Lower furnace corrosion in kraft regovery boilers. Tappi Journal, 1989, Vol. 72, No. 6, s. 136-141.

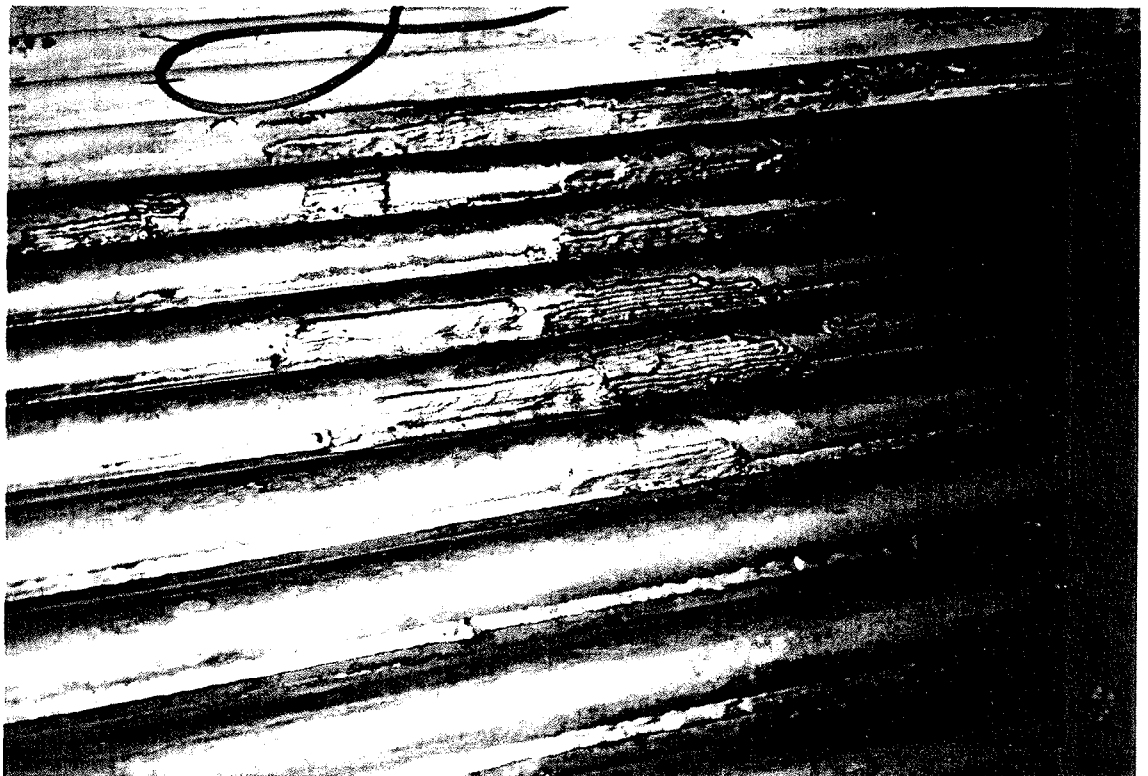
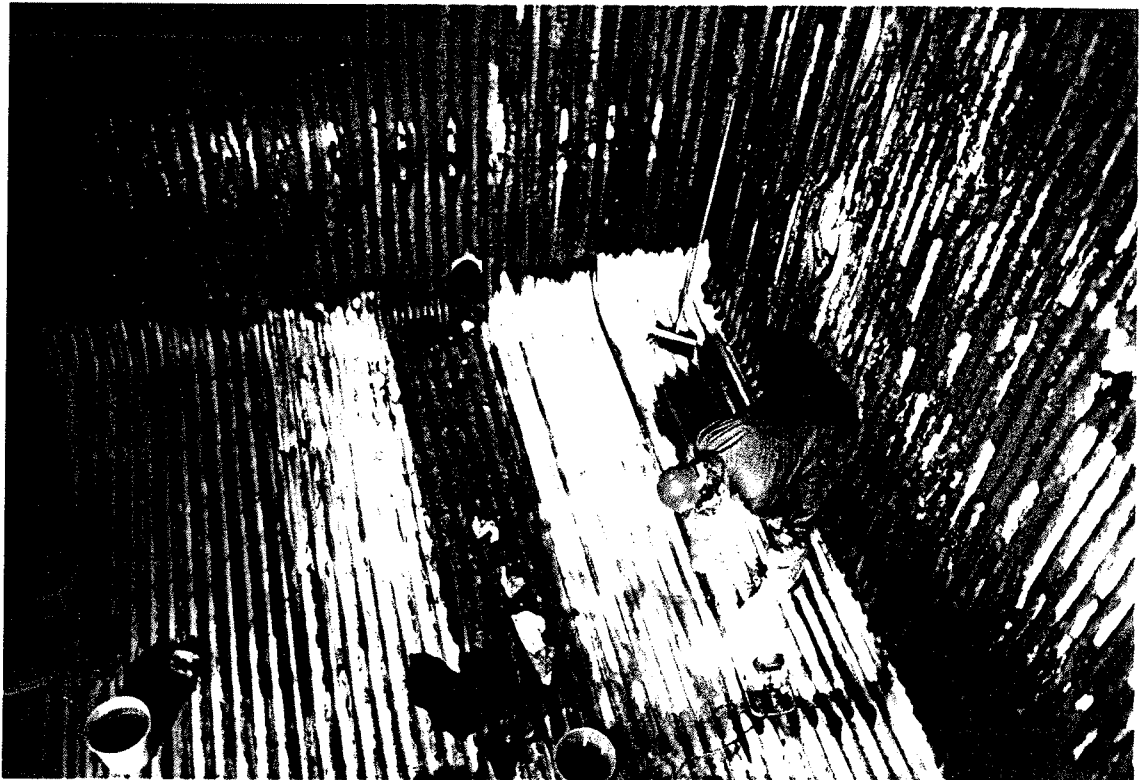
/22/ Jokinen, J. Paksuseinäisen voimalaitosputken virumisen ja virumisvaurion simuloiminen. Diplomityö. Oulun Yliopisto, Konetekniikan osasto. 1989.

/23/ Metals Handbook. Ninth Edition, Volume 13, Corrosion. 1987.

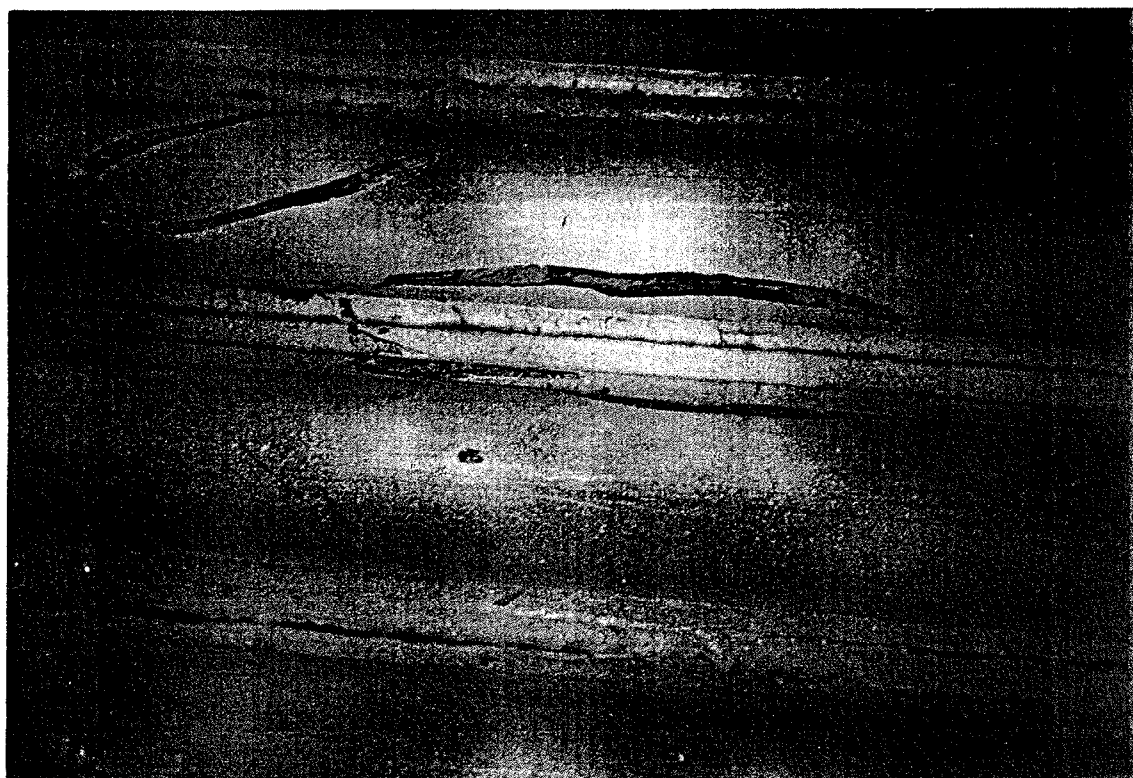
/24/ Barna, J.L., Mattie, R.J., Rogan, J.B., Allison, S.F. Corrosion experience in black liquor regovery boilers. Teoksessa: TAPPI Notes: 1992 Kraft Regovery Operations Short Course. TAPPI Press. s. 305-320.

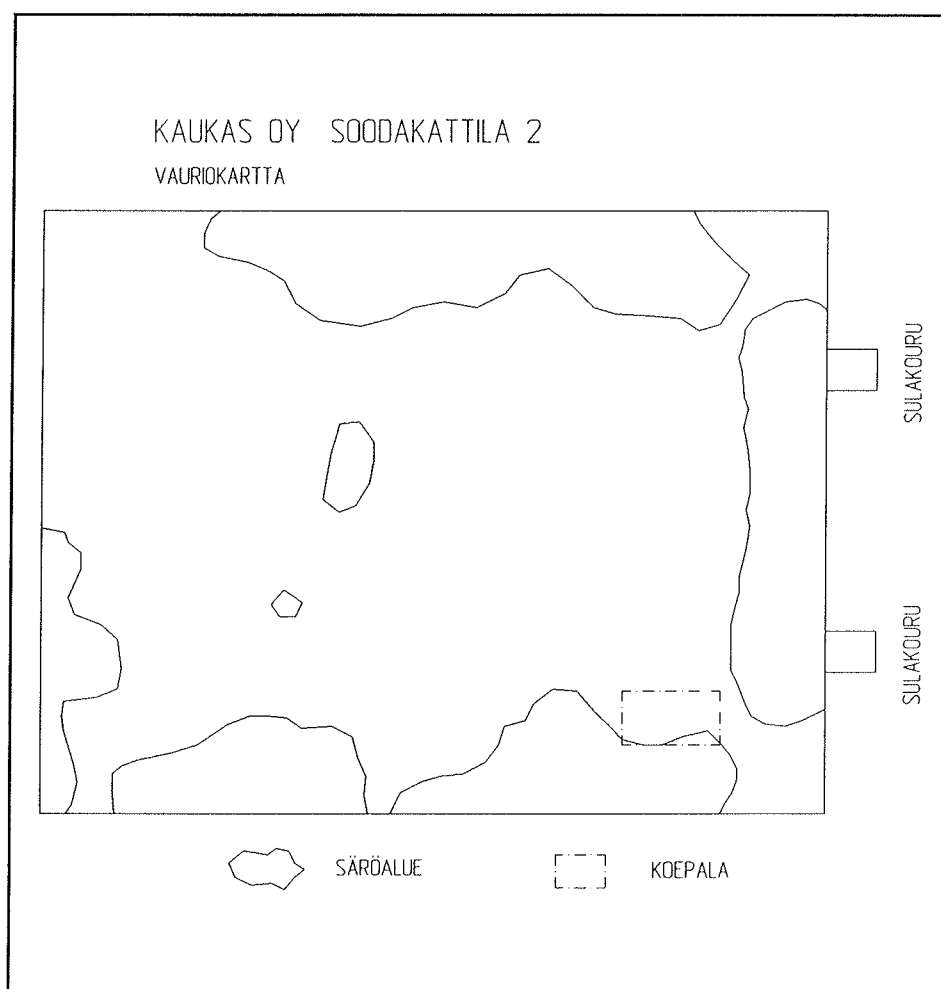
/25/ VTT:n tutkimusraportti 15.02.1991. Tutkimuksen tilaaja Veitsiluoto Oy / Poikela Teuvo.

/26/ Kompoundrör för sodahuspannans botten, Sandvik Sanicro 38/4L7. November 1991. Sandvik Steel.









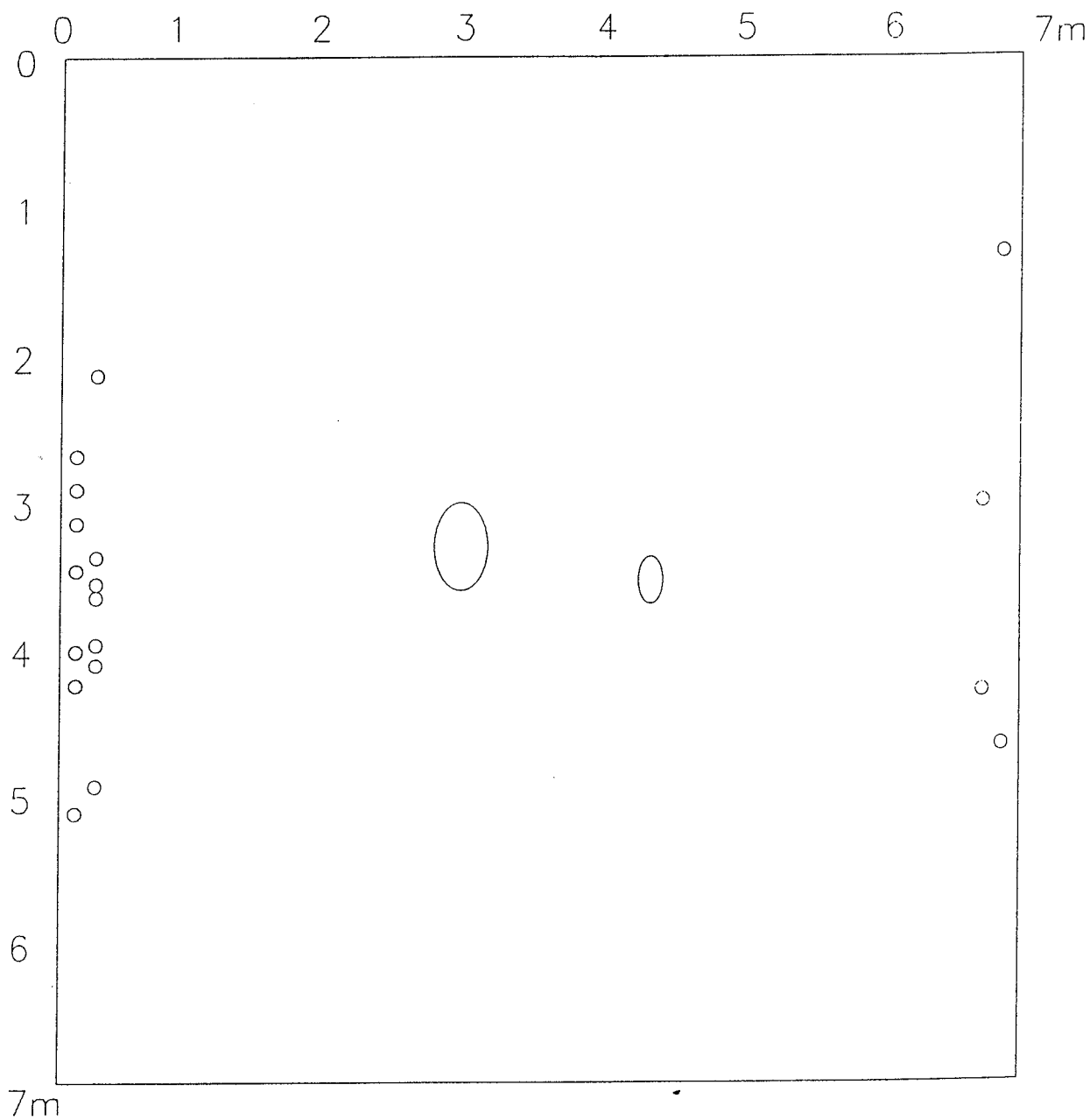
Laminating Papers Oy

Kofkan tehtaat

Soodakattila CE II

Pohjan indikaatioiden sijainti 1989

Takaseinä

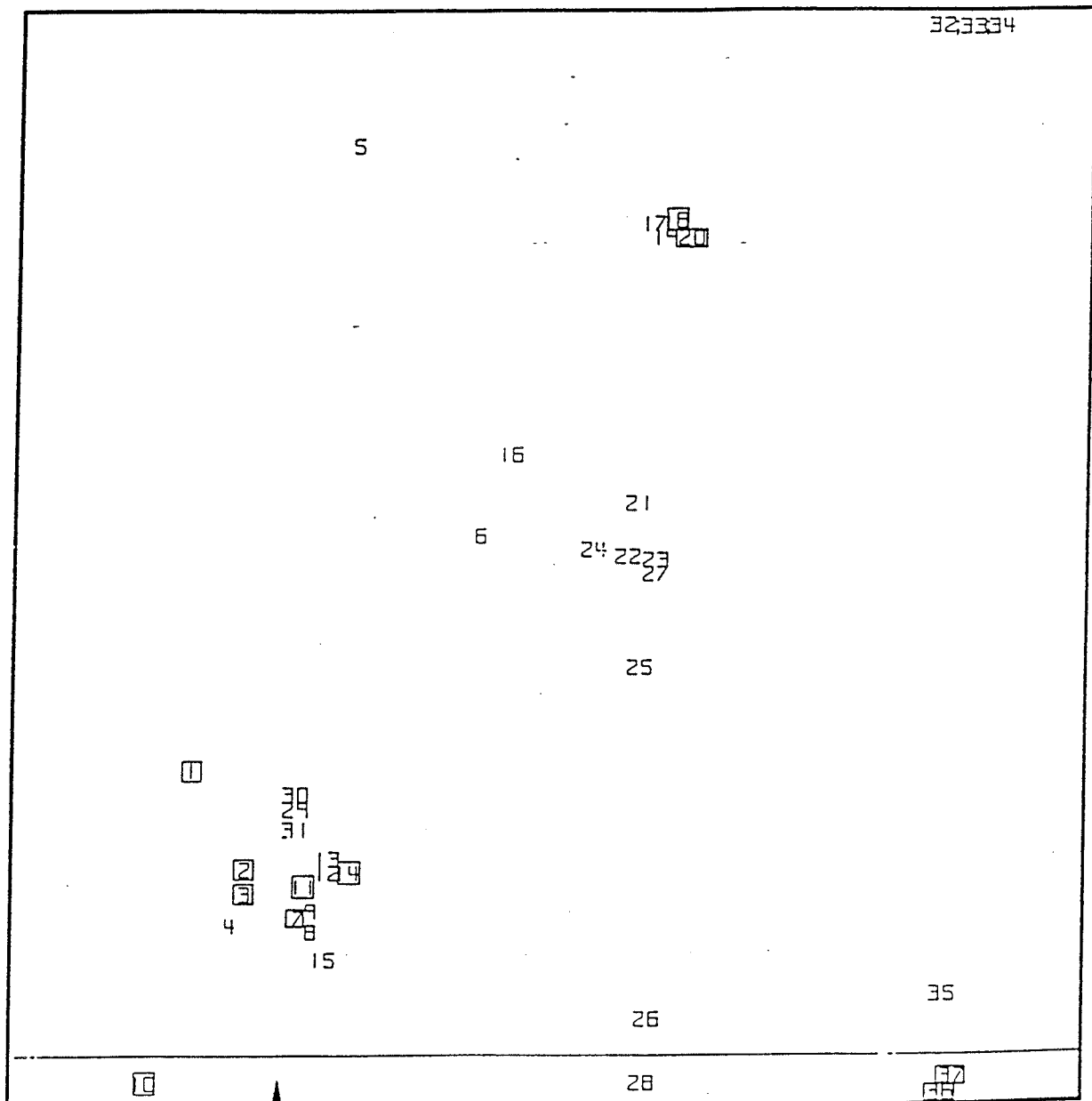


○ Indikaatio alue

1910

LIITE 6

SÄRÖINDIKAATIOIDEN SIJOITTUMINEN POHJASSA TAKASEINÄ



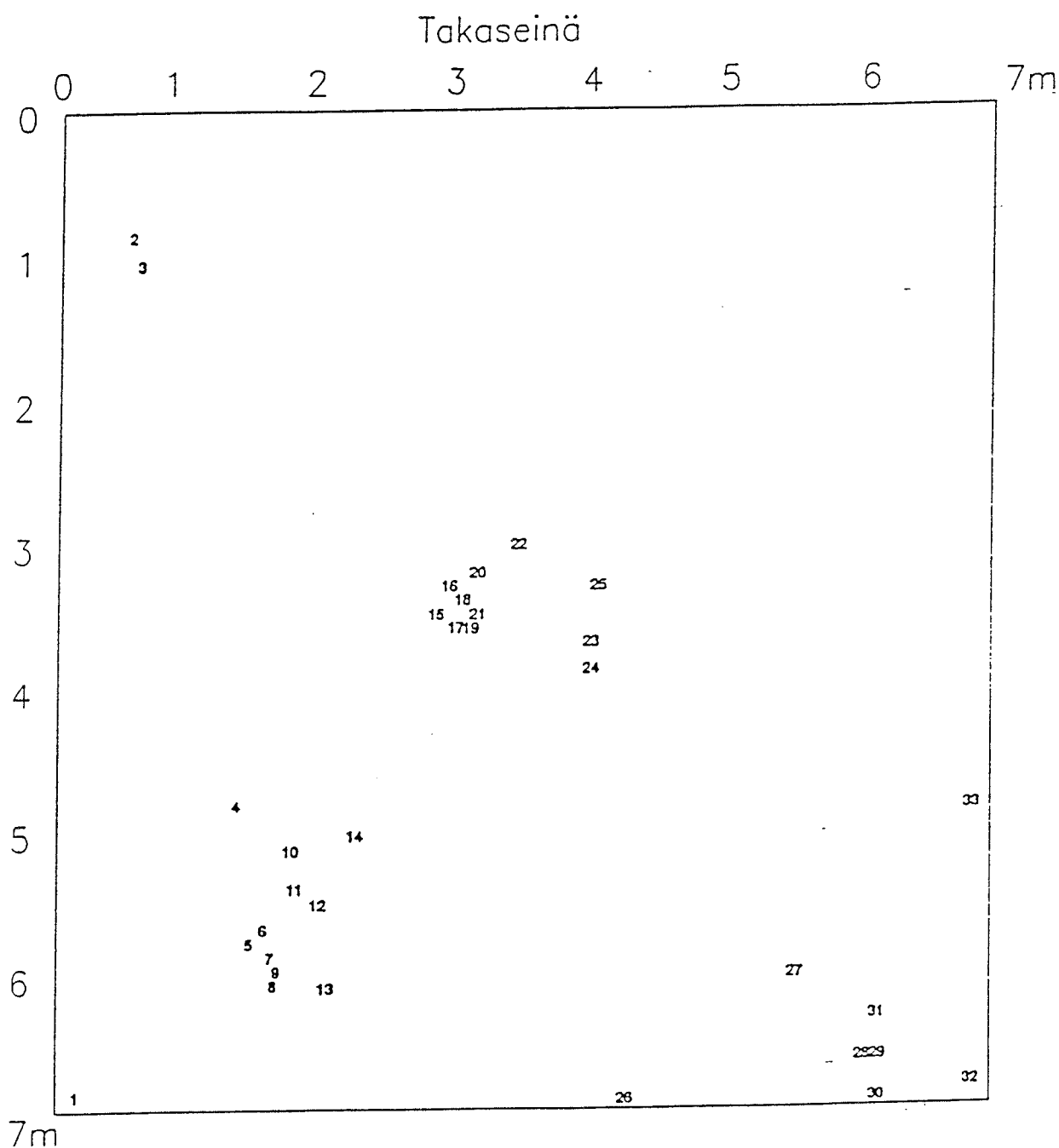
ETUSEINÄ
TAMUTETTU ALUE

Laminating Papers Oy

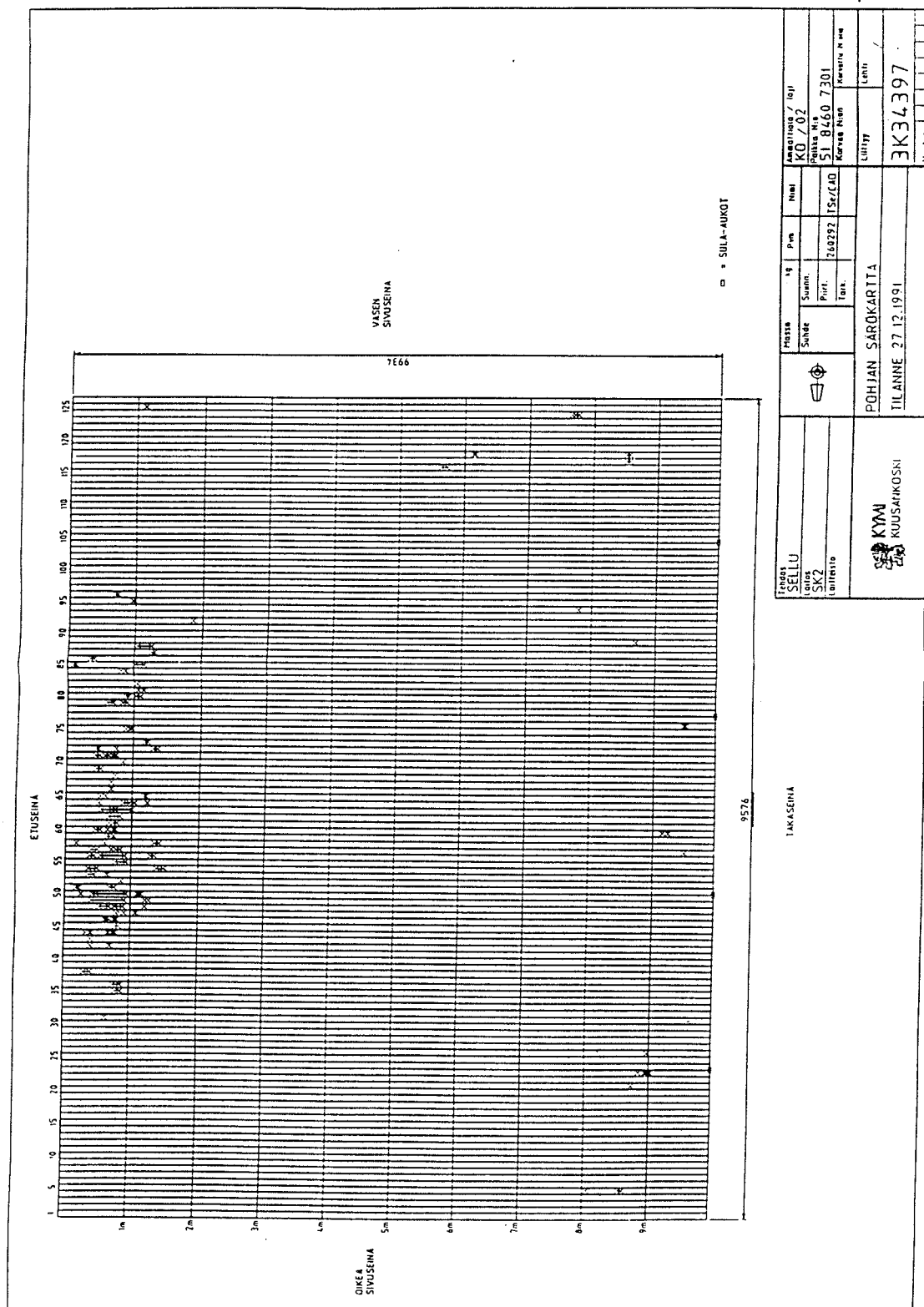
Kotkan tehtaat

Soodakattila CE II

Pohjan indikaatioiden sijainti. 1991



Tarkastukset suoritettiin pääasiassa vuoden 1990 indikaatioalueille.



Hitsauslisäaineiden OK Autrod 16.53, OK Autrod 16.75, DMO-IG ja OK 67.60 koostumus (%).

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
OK Autrod 16.53	0.025	0.4	1.8	24	13	-
OK Autrod 16.75	0.10	0.4	1.8	30	9	-
DMO-IG	0.1	0.6	1.2	-	-	0.5
OK 67.60	0.030	0.8	0.8	24	13	-

Suojakaasun Argon S argon-pitoisuus ja epäpuhtaudet.

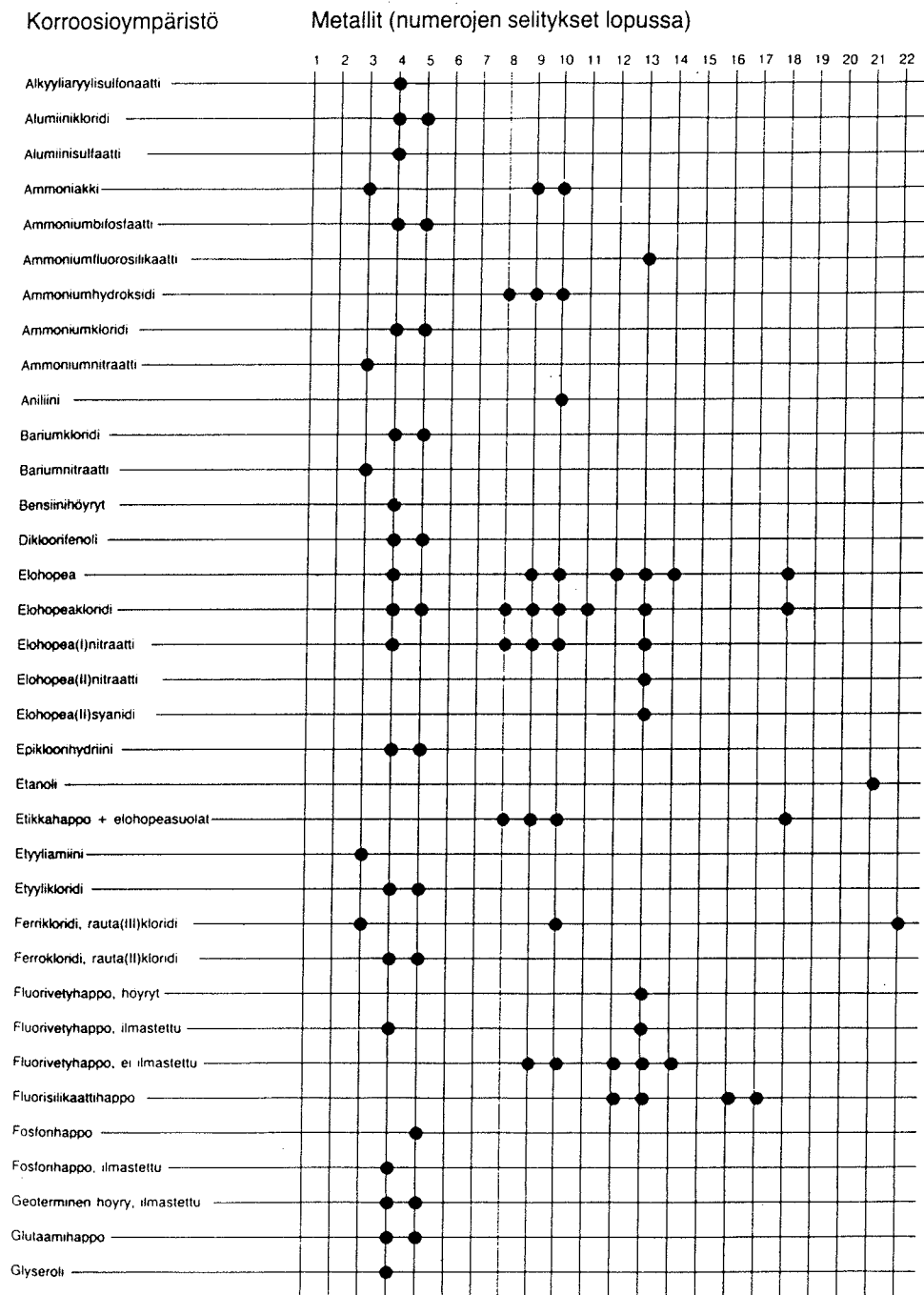
Ar min 99.998%

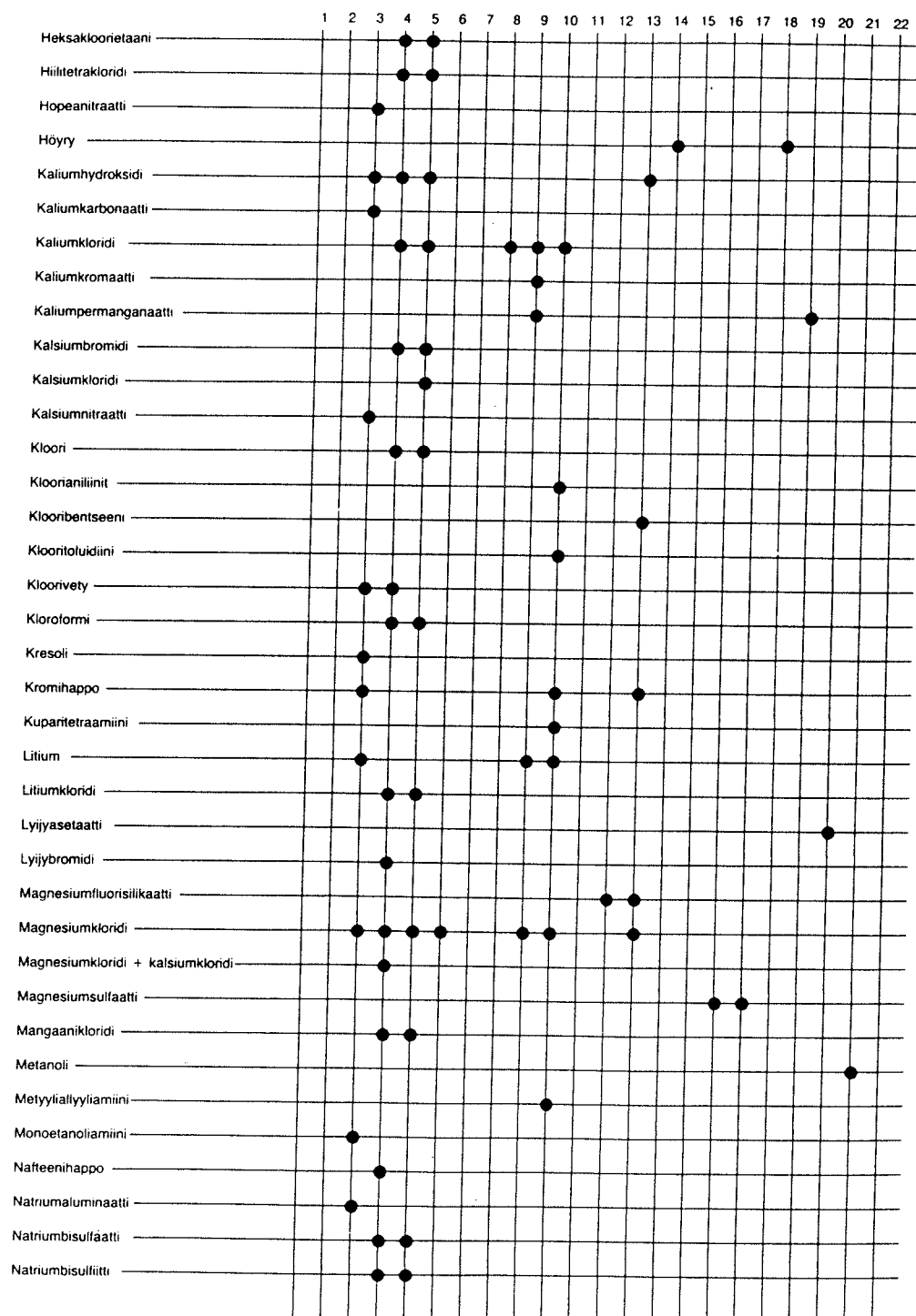
H₂O max 55 ppm

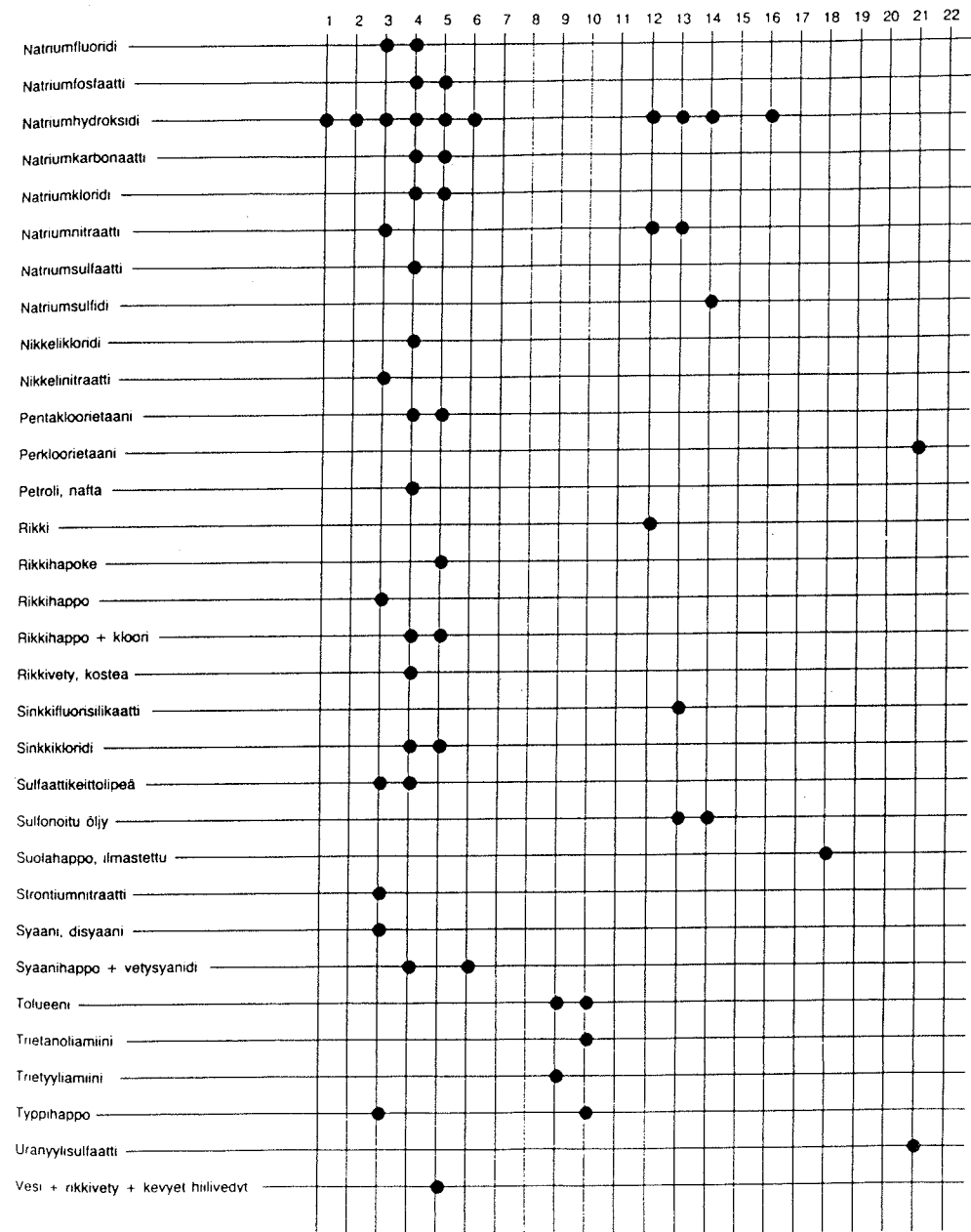
O₂ max 55 ppm

N₂ max 10 ppm

Eri metalleille jännityskorroosiota aiheuttavia korroosioympäristöjä







Rautaseokset

1. Harmaa valurauta (1,1–2,8 Si)
2. Valurauta (14–32 Ni)
3. Niukkahiilinen teräs
4. Ruostumaton teräs (AISI 302;304&304L (0,03 C maks.); 321;347)
5. Ruostumaton teräs (AISI 316/316L (0,03 C maks.); 317/317L (0,03 C maks.))
6. ACI alloy 20 (19–20 Cr, 28–30 Ni, <0,75 Mn,>2 Mo, 4–4,5 Cu); Cn–20 (19–20 Cr, 28–30 Ni, 3 Mo, 1,75 Cu)
7. Ruostumaton teräs (AISI 405;410)

Kupariseokset

8. Kuparit (ASTM No. 100–150; Kupariseokset No. 210; No. 220 (SFS 2915); No. 230 (SFS 2916); No. 502–546.
9. Kupariseokset ASTM No. 240 (SFS 2917); No. 260 (SFS 2918); No. 442–445
10. Kupariseokset ASTM No. 268; No. 270; No. 280; No 464–467; No 612; No. 687 (SFS 2928)
11. Kupariseokset ASTM No. 706 (SFS 2938); No. 710; No. 715 (SFS 2938)

Nikkeliseokset

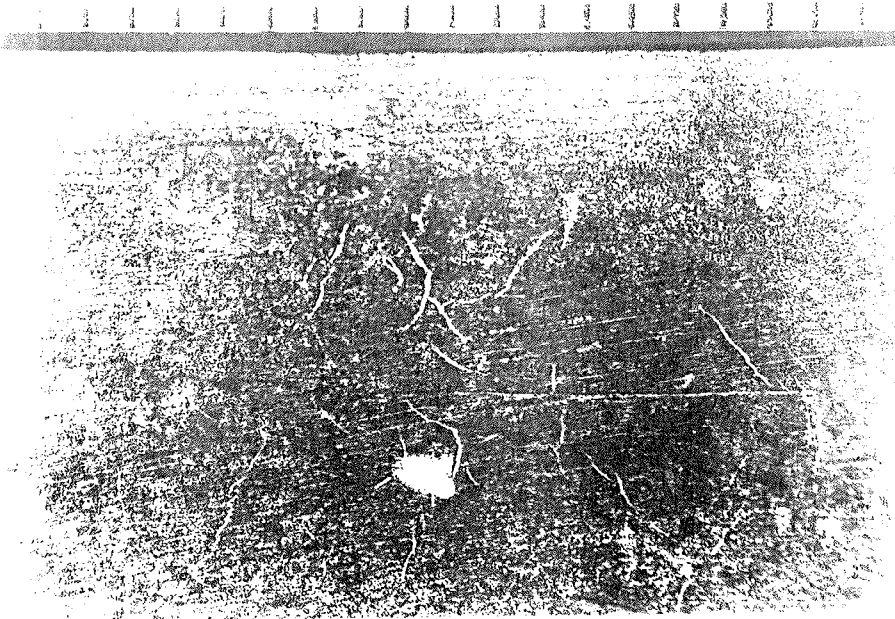
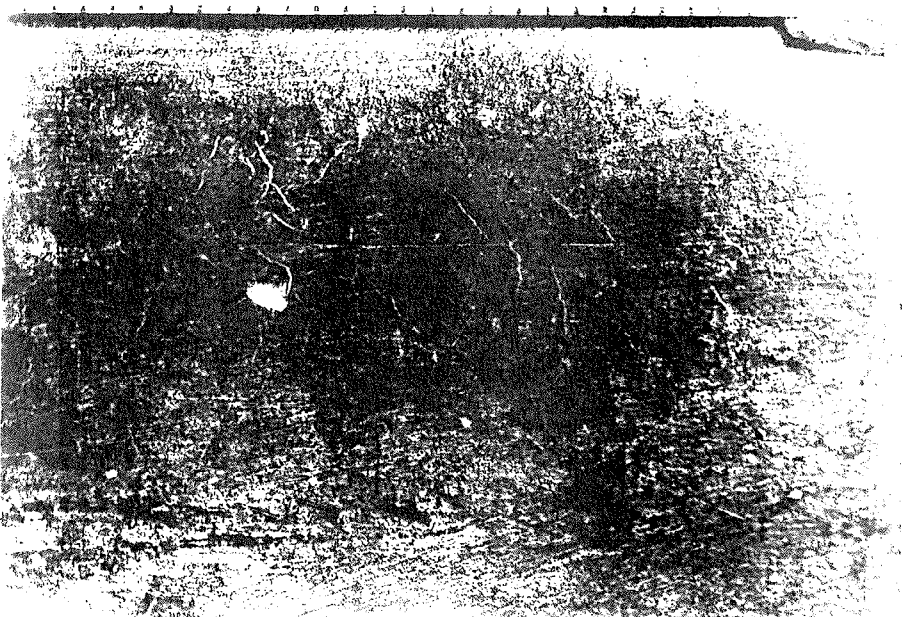
12. Nikkeli 200/200L
13. Monel 400
14. Inconel 600
15. Incoloy 800
16. Hastelloy alloy B
17. Hastelloy alloy C

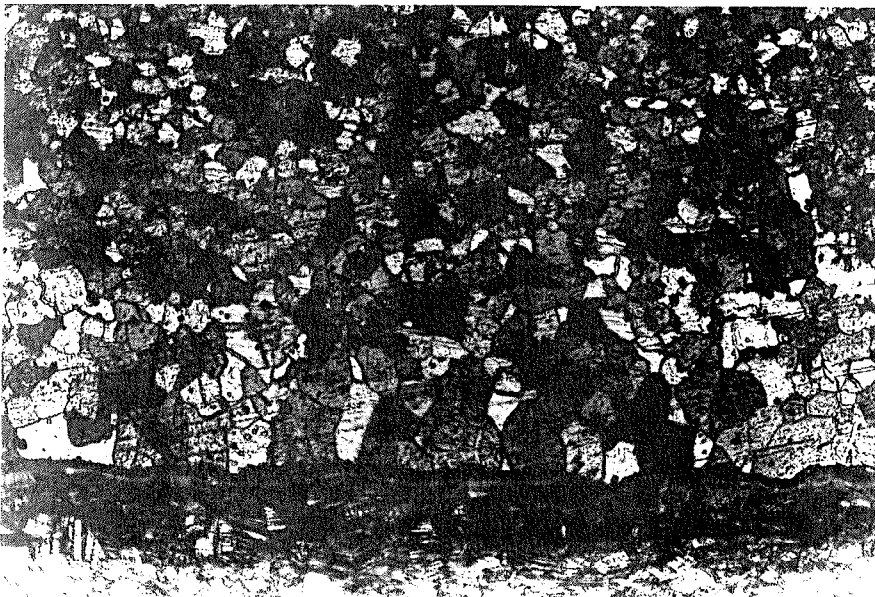
Muut metallit

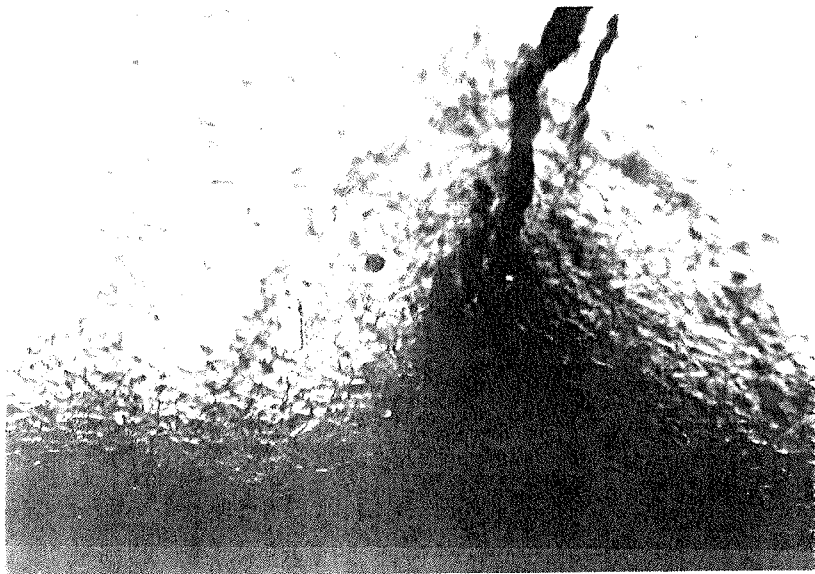
18. Alumiini
19. Kulta
20. Lyijy
21. Titaani
22. Zirkoni

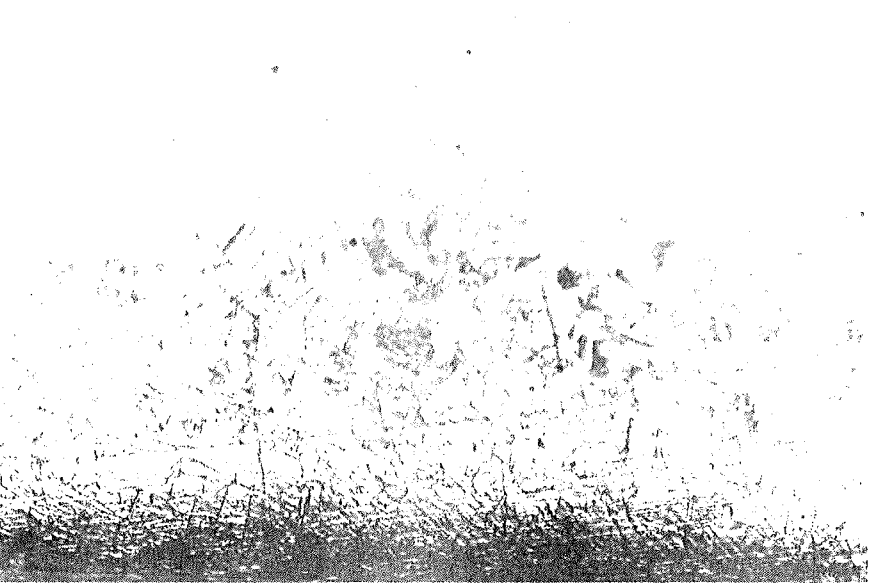
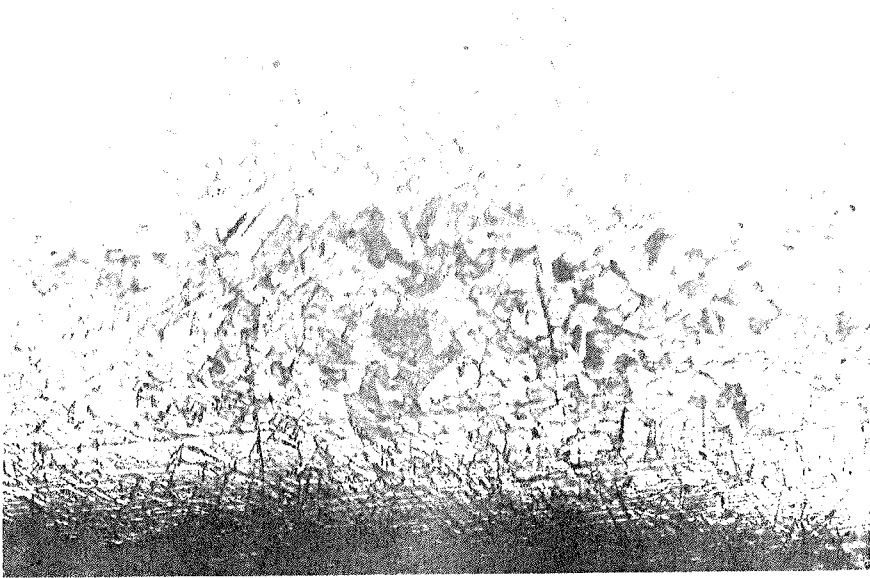
Eräiden seosten ja metallien jännityskorroosioalttius NACE:n mukaan.

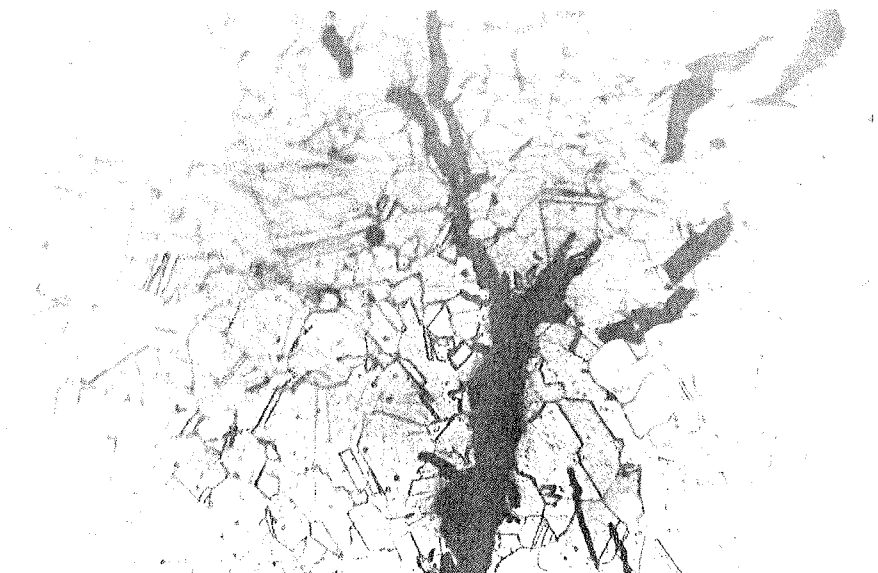
Ryhmä	Seos/metalli	Jännityskorroosio	Vetyhauraus	Sulan metallin hauraus
1	Magnesium Alumiini	Kloridit, Cl^- + hapettimet Kloridit, Cl^- + hapettimet	Na (125 °C), Zn (450 °C) Ei tietoja	Ei tietoja Hg (30 °C), Ga (50 °C), In (180 °C), Na (125 °C), Sn (260 °C), Zn (450 °C)
2	Hiiliteräkset Erikoislujat teräkset 18 % Marging teräs	NaOH, NH_3 , NO_3^- , CN^- , HCO_3^- , $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2$ Kuten hiiliteräksillä (yllä) Ei tietoja	Karkaistuna tai kylmämuokattuna Kyllä Ei tietoja	Cu, Zn (450 °C), In (180 °C), Li (210 °C), Cd (350 °C) Cu, Cd 50:50 Pb–Bi
3	Martens. ruost. teräs Ferriittinen ruost. teräs Austeniittinen ruost. teräs Karkaistuva ruost. teräs Superausteniitt.	NaOH, NaCl NaOH, trooppinen meri-ilmastot Cl^- , $\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{S}$, NaOH, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$, happipitoinen superkriitt. vesi Cl^- , NaOH NaOH	Karkaistuna Katodinen suojaus alle – 850 mV Cu/SuSO ₄ -llä Voimakk. kylmämuokattuna Karkaistuna Voimakk. kylmämuokk.	Ei tietoja Ei tietoja Zn, Cd, Al, Cu Zn, Cd, Al, (Cu?) Zn, Cd, Al, (Cu?)
4	Lyijy, tina, sinkki	Ei tietoja	Ei tietoja	Ei tietoja
5	Kupariseokset	NH_3 , HNO_3 , SO_2 , höyry Si-pronssille	Katodinen suojaus ulkoisella virralla	Hg
6	Nikkeli N02200 Monel N04400 Alloy B. N10001	$\text{HF} + \text{O}_2$, H_2SiF_6 $\text{HF} + \text{O}_2$, H_2SiF_6 Atso-väriaineet, superkriitt. vesi + O_2	Ei tietoja Galv. kytkennät alkalisisä sulfideissa Ei tietoja	S, Hg, Bi, Li, Pb, Sn S, Hg, Bi, Li, Pb, Sn Al, Cd, Li
7	Inconel No6600 Alloy CN10002 Alloy C276N10276	NaOH(300 °C), AlCl_3 , superkriitt. vesi + O_2 FeCl_3 , superkriitt. vesi + O_2 Superkriitt. vesi + O_2	Kylmämuokkaus + $\text{H}_2\text{S}/\text{Cl}^-$ Kylmämuokkaus + $\text{H}_2\text{S}/\text{Cl}^-$ galv. kytk. yhteydessä Kylmämuokkaus + $\text{H}_2\text{S}/\text{Cl}^-$ galv. kytk. yhteydessä	S, Zn, Cd, Al S, Zn, Cd, Al S, Zn, Cd, Al
8	Vitallium (koboltti)	Mg-kloridi, NaOH	Kylmämuokattuna	Ei tietoja
9	Titaani Zirkoni	NaCl (> 275 °C), 10 % HCl, klooratut tai fluoratut liuottimet, metanoli FeCl_3 , I_2 , HCl + Fe^{3+}	Ei esiinny Ei esiinny	Hg (30 °C), Cd (350 °C), Ag Ei tietoja
10	Hopea, kulta, platina	Ei tunnettuja aineita	Ei tietoja	Ei tietoja

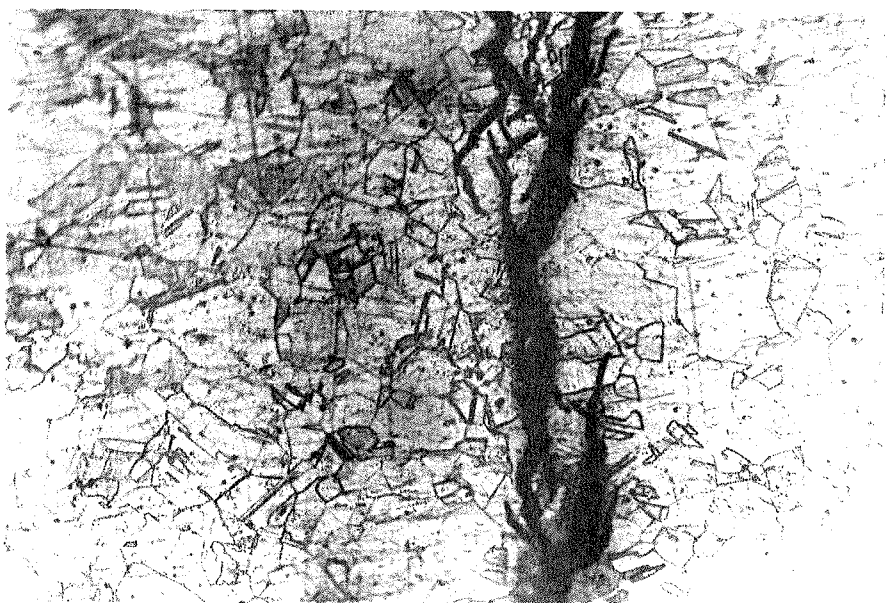


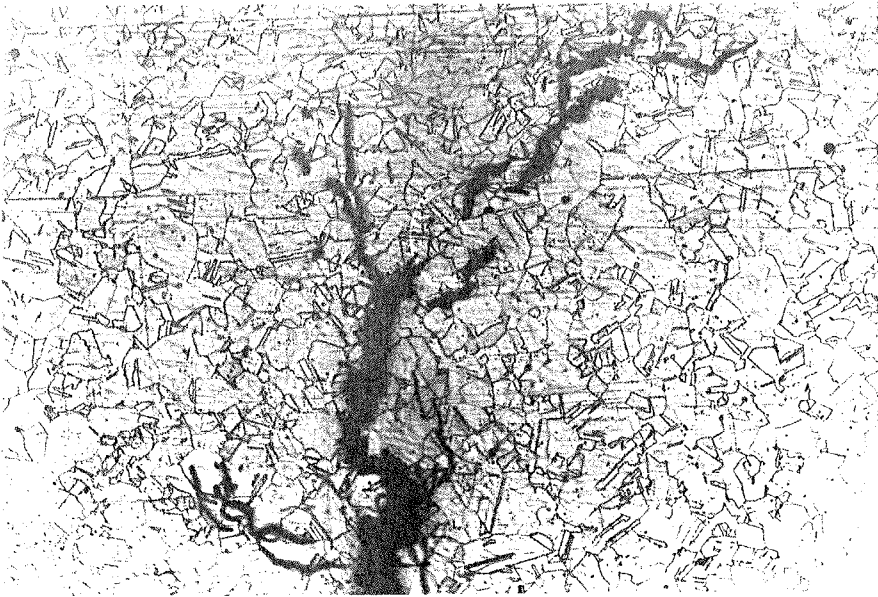


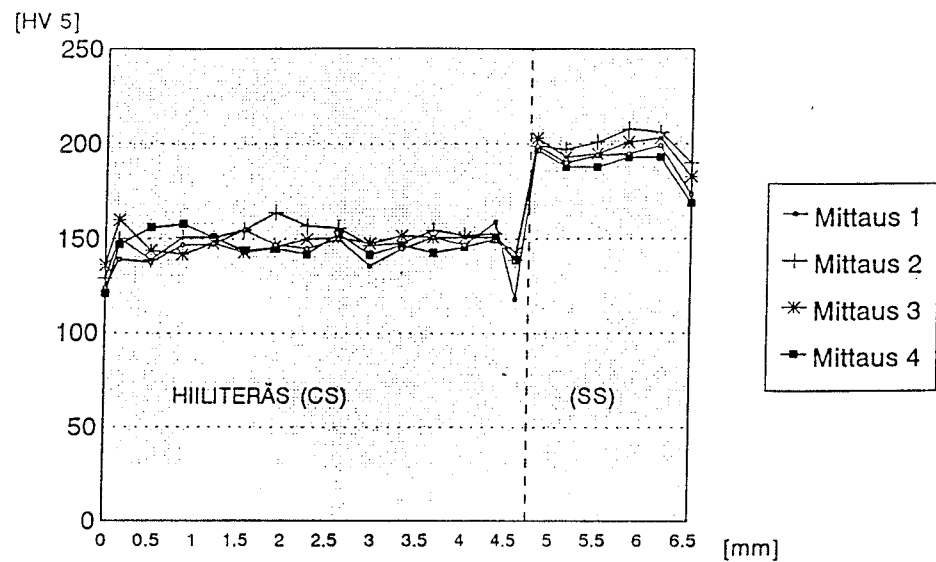






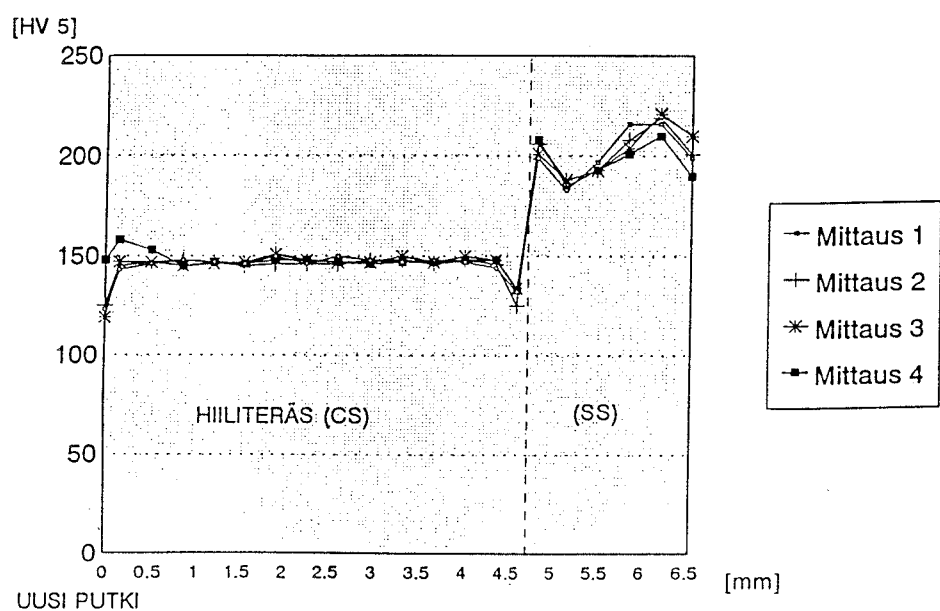






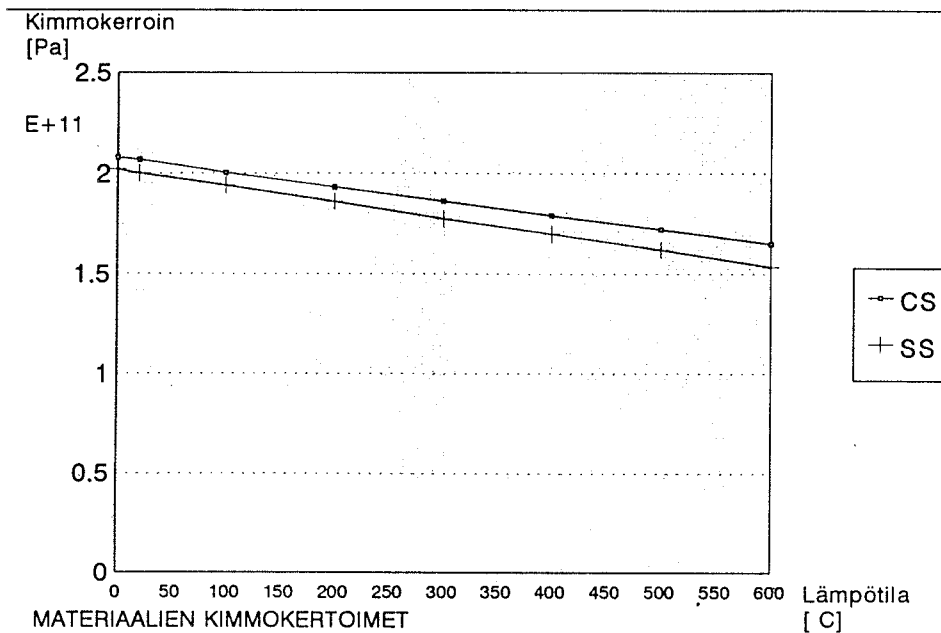
KÄYTÖSSÄ OLLUT PUTKI

HV 5 KOVUUSMITTAUKSET

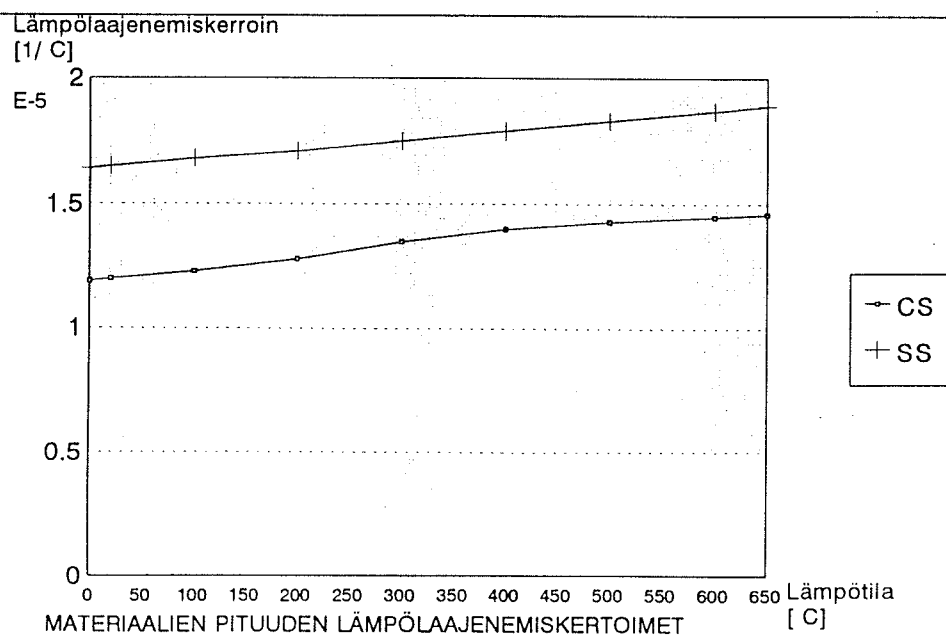


UUSI PUTKI

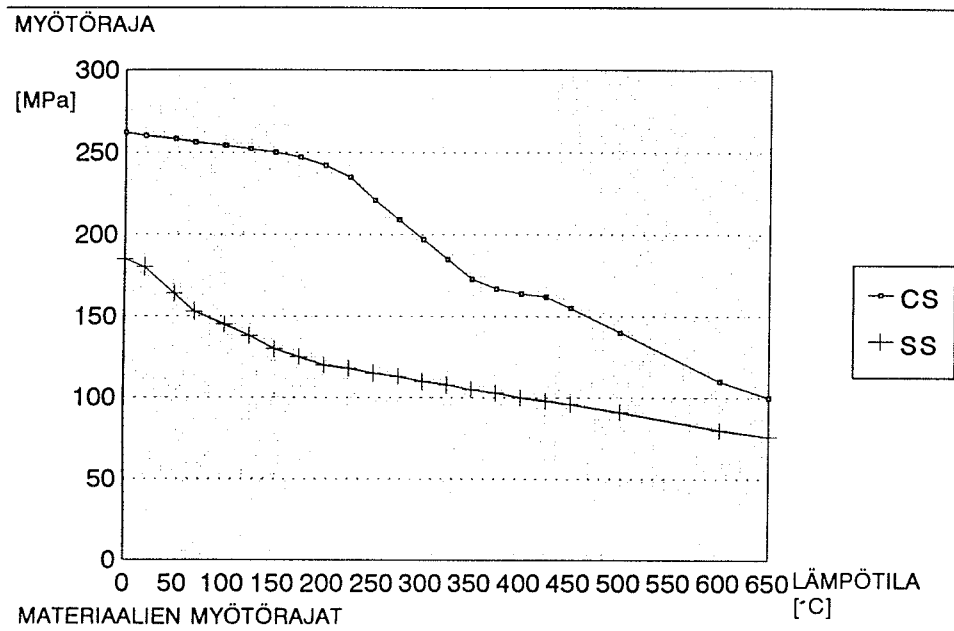
KIMMOKERROIN E



LÄMPÖLAAJENEMISKERROIN



MYÖTÖRAJAT



*HEADING

PLASTIC-TIEDOSTO TUHOTUN KOVALEVYN JALKEEN

*NODE, SYSTEM-R

1,	2.5220E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
2,	2.5464E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
3,	2.5708E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
4,	2.5952E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
5,	2.6196E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
6,	2.6440E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
7,	2.6684E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
8,	2.6928E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
9,	2.7172E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
10,	2.7416E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
11,	2.7660E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
12,	2.7904E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
13,	2.8148E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
14,	2.8392E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
15,	2.8636E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
16,	2.8880E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
17,	2.9124E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
18,	2.9368E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
19,	2.9612E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
20,	2.9856E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
21,	3.0100E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
22,	3.0344E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
23,	3.0588E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
24,	3.0832E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
25,	3.1076E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
26,	3.1320E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
27,	3.1564E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
28,	3.1808E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
29,	3.2052E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
30,	3.2296E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
31,	3.2540E-02,	0.0000E+00,	0.0000E+00,
101,	2.5220E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
103,	2.5708E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
105,	2.6196E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
107,	2.6684E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
109,	2.7172E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
111,	2.7660E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
113,	2.8148E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
115,	2.8636E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
117,	2.9124E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
119,	2.9612E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
121,	3.0100E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
123,	3.0588E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
125,	3.1076E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
127,	3.1564E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
129,	3.2052E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
131,	3.2540E-02,	5.0000E-04,	0.0000E+00,
201,	2.5220E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
202,	2.5464E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
203,	2.5708E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
204,	2.5952E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
205,	2.6196E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
206,	2.6440E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
207,	2.6684E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
208,	2.6928E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
209,	2.7172E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
210,	2.7416E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
211,	2.7660E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
212,	2.7904E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
213,	2.8148E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
214,	2.8392E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
215,	2.8636E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
216,	2.8880E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,

417,	1.9124E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
218,	2.9368E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
219,	2.9612E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
220,	2.9856E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
221,	3.0100E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
222,	3.0344E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
223,	3.0588E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
224,	3.0832E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
225,	3.1076E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
226,	3.1320E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
227,	3.1564E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
228,	3.1808E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
229,	3.2052E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
230,	3.2296E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,
231,	3.2540E-02,	1.0000E-03,	0.0000E+00,

*ELEMENT, TYPE=CA8RT, ELSET=SIAP,
1 1 3 203 201 2 103 202 101
2 3 5 205 203 4 105 204 103
3 5 7 207 205 6 107 206 105
4 7 9 209 207 8 109 208 107
5 9 11 211 209 10 111 210 109
6 11 13 213 211 12 113 212 111
7 13 15 215 213 14 115 214 113
8 15 17 217 215 16 117 216 115
9 17 19 219 217 18 119 218 117
10 19 21 221 219 20 121 220 119

*ELEMENT, TYPE=CA8RT, ELSET=ULROP,
11 21 23 223 221 22 123 222 121
12 23 25 225 223 24 125 224 123
13 25 27 227 225 26 127 226 125
14 27 29 229 227 28 129 228 127
15 29 31 231 229 30 131 230 129

*SOLID SECTION, ELSET=SIAP, MATERIAL=CS

*MATERIAL, NAME=CS

*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC

2.079E+11,	2.900E-01,	0.
2.068E+11,	2.900E-01,	20.
2.003E+11,	2.900E-01,	100.
1.932E+11,	2.900E-01,	200.
1.862E+11,	2.900E-01,	300.
1.791E+11,	2.900E-01,	400.
1.722E+11,	2.900E-01,	500.
1.650E+11,	2.900E-01,	600.
1.614E+11,	2.900E-01,	650.

*PLASTIC

262.E6,	0.	0.
500.E6,	0.15,	0.
260.E6,	0.	20.
500.E6,	0.15,	20.
258.E6,	0.	50.
500.E6,	0.15,	50.
256.E6,	0.	70.
500.E6,	0.15,	70.
254.E6,	0.	100.
500.E6,	0.15,	100.
252.E6,	0.	125.
500.E6,	0.15,	125.
250.E6,	0.	150.
500.E6,	0.15,	150.
247.E6,	0.	175.
500.E6,	0.15,	175.
242.E6,	0.	200.
500.E6,	0.15,	200.
235.E6,	0.	225.
500.E6,	0.15,	225.
221.E6,	0.	250.

500.E6, 0.15, 275.	164.E6, 0.25, 50.
197.E6, 0., 300.	153.E6, 0., 70.
500.E6, 0.15, 300.	600.E6, 0.25, 70.
185.E6, 0., 325.	145.E6, 0., 100.
500.E6, 0.15, 325.	600.E6, 0.25, 100.
173.E6, 0., 350.	138.E6, 0., 125.
500.E6, 0.15, 350.	600.E6, 0.25, 125.
167.E6, 0., 375.	130.E6, 0., 150.
500.E6, 0.15, 375.	600.E6, 0.25, 150.
164.E6, 0.15, 400.	125.E6, 0., 175.
500.E6, 0.15, 400.	600.E6, 0.25, 175.
162.E6, 0., 425.	120.E6, 0., 200.
500.E6, 0.15, 425.	600.E6, 0.25, 200.
155.E6, 0., 450.	118.E6, 0., 225.
500.E6, 0.15, 450.	600.E6, 0.25, 225.
140.E6, 0., 500.	115.E6, 0., 250.
500.E6, 0.15, 500.	600.E6, 0.25, 250.
110.E6, 0., 600.	113.E6, 0., 275.
500.E6, 0.15, 600.	600.E6, 0.25, 275.
100.E6, 0.15, 650.	110.E6, 0., 300.
500.E6, 0.15, 650.	600.E6, 0.25, 300.
*EXPANSION	
1.19E-5, 0.	108.E6, 0., 325.
1.20E-5, 20.	600.E6, 0.25, 325.
1.23E-5, 100.	105.E6, 0., 350.
1.28E-5, 200.	600.E6, 0.25, 350.
1.35E-5, 300.	103.E6, 0., 375.
1.40E-5, 400.	600.E6, 0.25, 375.
1.43E-5, 500.	100.E6, 0., 400.
1.45E-5, 600.	600.E6, 0.25, 400.
1.48E-5, 650.	98.E6, 0., 425.
*SPECIFIC HEAT	600.E6, 0.25, 425.
500., 100.	96.E6, 0., 450.
540., 300.	600.E6, 0.25, 450.
590., 500.	91.E6, 0., 500.
*DENSITY	600.E6, 0.25, 500.
7850.	80.E6, 0., 600.
*CONDUCTIVITY	600.E6, 0.25, 600.
38.5, 0.	76.E6, 0., 650.
36., 100.	600.E6, 0.25, 650.
34.5, 200.	*EXPANSION
33., 300.	1.64E-5, 0.
32., 400.	1.65E-5, 20.
31., 500.	1.68E-5, 100.
30., 600.	1.71E-5, 200.
29.5, 650.	1.75E-5, 300.
*SOLID SECTION, ELSET-ULKOP, MATERIAL-SS	1.79E-5, 400.
*MATERIAL NAME-SS	1.83E-5, 500.
*ELASTIC TYPE-ISOTROPIC	1.87E-5, 600.
2.020E+11, 2.900E-01, 0.	1.89E-5, 650.
2.000E+11, 2.900E-01, 20.	*SPECIFIC HEAT
1.940E+11, 2.900E-01, 100.	500., 100.
1.860E+11, 2.900E-01, 200.	540., 300.
1.775E+11, 2.900E-01, 300.	590., 500.
1.700E+11, 2.900E-01, 400.	*DENSITY
1.620E+11, 2.900E-01, 500.	7900.
1.535E+11, 2.900E-01, 600.	*CONDUCTIVITY
1.494E+11, 2.900E-01, 650.	14.5, 0.
*PLASTIC	15.0, 20.
185.E6, 0., 0.	16.0, 100.
600.E6, 0.25, 0.	17.5, 200.
180.E6, 0., 20.	19.0, 300.
600.E6, 0.25, 20.	20.0, 400.
	21.0, 500.
	22.0, 600.
	22.5, 650.

*4 CASE SET 1
 *4 RESTRAINT SET 1
 *4 BOUNDARY

I, 2	EQUATION
2	2,2,1., 1,2,-1.
2	3,2,1., 1,2,-1.
2	4,2,1., 1,2,-1.
2	5,2,1., 1,2,-1.
2	6,2,1., 1,2,-1.
2	7,2,1., 1,2,-1.
2	8,2,1., 1,2,-1.
2	9,2,1., 1,2,-1.
2	10,2,1., 1,2,-1.
2	11,2,1., 1,2,-1.
2	12,2,1., 1,2,-1.
2	13,2,1., 1,2,-1.
2	14,2,1., 1,2,-1.
2	15,2,1., 1,2,-1.
2	16,2,1., 1,2,-1.
2	17,2,1., 1,2,-1.
2	18,2,1., 1,2,-1.
2	19,2,1., 1,2,-1.
2	20,2,1., 1,2,-1.
2	21,2,1., 1,2,-1.
2	22,2,1., 1,2,-1.
2	23,2,1., 1,2,-1.
2	24,2,1., 1,2,-1.
2	25,2,1., 1,2,-1.
2	26,2,1., 1,2,-1.
2	27,2,1., 1,2,-1.
2	28,2,1., 1,2,-1.
2	29,2,1., 1,2,-1.
2	30,2,1., 1,2,-1.
2	31,2,1., 1,2,-1.

I, 2	EQUATION
2	204,2,1., 201,2,-1.
2	205,2,1., 201,2,-1.
2	206,2,1., 201,2,-1.
2	207,2,1., 201,2,-1.
2	208,2,1., 201,2,-1.
2	209,2,1., 201,2,-1.
2	210,2,1., 201,2,-1.
2	211,2,1., 201,2,-1.
2	212,2,1., 201,2,-1.
2	213,2,1., 201,2,-1.
2	214,2,1., 201,2,-1.
2	215,2,1., 201,2,-1.
2	216,2,1., 201,2,-1.
2	217,2,1., 201,2,-1.
2	218,2,1., 201,2,-1.
2	219,2,1., 201,2,-1.
2	220,2,1., 201,2,-1.
2	221,2,1., 201,2,-1.
2	222,2,1., 201,2,-1.
2	223,2,1., 201,2,-1.
2	224,2,1., 201,2,-1.
2	225,2,1., 201,2,-1.
2	226,2,1., 201,2,-1.
2	227,2,1., 201,2,-1.
2	228,2,1., 201,2,-1.
2	229,2,1., 201,2,-1.
2	230,2,1., 201,2,-1.
2	231,2,1., 201,2,-1.

** LOAD SET 1
 *RESTART,WRITE,FREQUENCY=1
 *STEP,NLGEOM,INC=50
 *COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT, PTOL=1., TEMTOL=1., STEADY STATE
 1., 1.
 *BOUNDARY
 1,11,11,300.

202,2,1., 201,2,-1.
 203,2,1., 201,2,-1.

```

201,11,11,300
31,11,11,300
231,11,11,300
*NODE PRINT
U,RF,NT,CF
*EL PRINT
S,MISES,E
*NODE FILE,GLOBAL=YES
U,RF
*EL FILE,POSITION-NODES
S,E
*END STEP

```