

LIITE 1

Suojaussuositus 9.9.2015



SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS
FINNISH RECOVERY BOILER COMMITTEE

Suomen Soodakattilayhdistys ry.

**SOODAKATTILALAITOKSEN
SUOJAUSSUOSITUS**

26.5.1988

25.9.1997

XX.XX.2015

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

1	SOODAKATTILAN MATERIAALIT JA HITSAUKSET	6
1.1	Yleistä	6
1.2	Terästen jaottelu	6
1.2.1	Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräsputket	7
1.2.2	Runsasseosteiset teräsputket	7
1.2.3	Ruostumattomat teräsputket	8
1.2.4	Kompound-putket	11
1.3	Materiaalit käyttökohteen mukaan	12
1.3.1	Pohja	14
1.3.2	Seinät	14
1.3.3	Kammiot, aukot, läpiviennit, kourut, massaukset	15
1.3.4	Verho	15
1.3.5	Tulistin	16
1.3.6	Ekonomaiseri	18
1.3.7	Lieriö	19
1.4	Hitsaus	19
1.4.1	Erikoishitsaukset	21
1.4.1.1	Ferriittisten terästen (”Musta/musta”) –liitos	21
1.4.1.2	Austeniittisen ja ferriittisen teräksen (”Musta/ruostumaton”) liitos	22
1.4.2	Päällehitsaus	22
1.4.2.1	Pinnan puhdistus	23
1.4.2.2	Päällehitsauksen vaatimukset	23
1.4.2.3	Hitsausmenetelmät ja lisäaineet	24
1.4.2.4	Hitsauksen suorittaminen	25
1.4.2.5	Päällehitsauksen jälkikäsittely	26
1.4.2.6	Päällehitsauksen tarkastus	26
1.4.2.7	Hitsausvirheiden korjaus	27
1.5	Lähteet:	27
2	SOODAKATTILAPINNOITUKSET	28
2.1	Johdanto	28
2.2	Ruiskutusmenetelmät	29
2.3	Pinnoitemateriaalit	31
2.3.1	Rautavaltaiset pinnoitteet	31
2.3.2	Nikkelivaltaiset pinnoitteet	33
2.3.3	Kaupalliset pinnoitemateriaalit	34
2.3.4	Pinnoitemateriaalien valinta	35
2.4	Pinnoitteen valmistus	37
2.4.1	Termisellä ruiskutuksella pinnoitettavan pinnan esikäsittely	38
2.4.2	Pinnoitemateriaali	39
2.4.3	Terminen ruiskutus	39
2.4.4	Sulautuvien seosten ruiskutus	40
2.4.5	Vaaditut ominaisuudet ja pinnoitteen testausmenetelmät	40

2.4.6	Pinnoitteen ulkonäkö	40
2.4.7	Tartunta.....	41
2.4.8	Paksuuden mittaus.....	41
2.4.9	Vanhon pinnoitteiden tarkastus ja pintojen korjaus	42
2.4.10	Manipulaattorin käyttö pinnoituksessa.....	42
2.5	Yhteenveto	43
2.6	Lähdeluettelo.....	43
3	PAINEASTIAN KORJAUKSET.....	46
3.1	Yleistä	46
3.2	Oppaat.....	46
3.3	Lait ja asetukset.....	47
3.4	Hitsauksen laatu	47
3.5	Hitsaajan pätevyystodistukset	48
3.6	Hitsausohjeet.....	48
3.7	Asennus-, korjaus- ja muutostyöt.....	48
3.8	Painekoe.....	50
3.9	Korjauksen luonne.....	50
3.9.1	Ennakkoon valmisteltu korjaus	50
3.9.2	Ennalta arvaamattoman tapahtuman korjaus	51
3.9.3	Hitsauksen korjaus	51
4	SOODAKATTILATARKASTUKSET.....	53
4.1	Yleistä	53
4.2	Tarkastusmenetelmät.....	55
4.2.1	Silmämääräinen tarkastus/VT (visual testing)	55
4.2.2	Paksuusmittaus/ TM (thickness measurement).....	56
4.2.3	Magneettijauhetarkastus / MT (magnetic particle examination)	56
4.2.4	Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination).....	57
4.2.5	Radiografia/RT (radiographic examination).....	58
4.2.6	Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination).....	58
4.2.7	Pyörrevirtatarkastus/ET (eddy current testing)	59
4.2.8	Jäljennemenetelmä/REP (replica)	60
4.2.9	Endoskooppitarkastus/END (endoscopy).....	61
4.2.10	Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission)	61
4.2.11	Lämpökuvaus (thermography).....	61
4.2.12	Kovuusmittaus/HT (hardness test).....	61
4.2.13	T-Scan paksuusmittaus	62
4.2.14	IRIS-tekniikka	62
4.2.15	Sisäpuolisen kerrostuman / magnetiittikalvon paksuusmittaus	63
4.2.16	Guided Wave	65
4.2.17	RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique).....	66
4.2.18	Magneettinen vuotokenttätarkastus (MFL)	66
4.2.19	Jäännös jännitystilat	67
4.2.20	Ainetta rikkovat tarkastukset	67
4.3	Tarkastettavat kohteet.....	67
4.4	Vesipainekoe korjausten jälkeen.....	68
4.5	Dokumentointi	68



5	SOODAKATTILAN VAURIOT	70
5.1	TULIPESÄ.....	70
5.1.1	Pohja.....	70
5.1.1.1	Pohjan säröt	70
5.1.1.2	Kamparauta	72
5.1.1.3	Kouruvauriot ja niiden ympäristö.....	72
5.1.2	Seinät	72
5.1.3	Katto	73
5.2	VERHOPUTKISTO.....	73
5.3	TULISTIN	73
5.3.1	Ruiskujäähdyttimet.....	73
5.4	KONVEKTIO-OSA	73
5.5	LIERIÖ	73
5.6	EKONOMAISERI.....	73
5.6.1	A- ja B-putket.....	73
5.6.2	Evän päät/kavennukset	73
5.7	LIUOTTAJA.....	73
5.8	VESI- JA HÖYRYPUOLEN VAURIOT.....	74
5.9	ILMAN ESILÄMMITTIMET	74
5.10	MUUT	74
5.10.1	Kaasuräjähdys	74



JOHDANTO

Soodakattilalaitoksen Suojaussuositus 2013 pohjautuu vuonna 1997 julkaistuun suositukseen (raportti 6/1997). Suositus on päivitetty vastaamaan nykytilannetta ja -tarvetta.

Aikaisempi suojaussuositus vuodelta 1997 käsitteli suojauskäsitettä laajemmassa merkityksessä kuin tässä suosituksissa. Suosituksesta valittiin päivitettäväksi seuraavat kappaleet: Soodakattilan materiaalit ja hitsaukset, Soodakattilapinnoitukset, Paineastian korjaukset ja Soodakattilatarkastukset. Lisäksi uutena kappaleena on Soodakattilan vauriot, johon kerätty vaurioesimerkkejä yhdistyksen vauriotietokannasta.

Suojaussuositus on koottu laadintahetkellä saatavilla olleiden tietojen ja kokemusten perusteella.

1 SOODAKATTILAN MATERIAALIT JA HITSAUKSET

Alkuperäinen teksti: Lasse Koivisto, Ahlstrom Machinery Oy

Päivitetty teksti: Kestoisuustyöryhmä

1.1 Yleistä

Valmistajalla tulee olla laatujärjestelmä (esim. ISO 9001 mukainen), jossa kuvataan (soveltuvien osien) materiaalin valinta, tilaus, vastaanotto, aineodistusten käsittely, materiaalin tuotantoonotto ja materiaalin tunnistettavuuden säilyttäminen.

1.2 Terästen jaottelu

Soodakattiloissa yleisimmin käytetyt teräkset voidaan jaotella monella tavalla kuten mikrorakenteen tai kemiallisen koostumuksen perusteella, taulukko 1-1.

Taulukko 1-1. Terästen jaottelu kemiallisen koostumuksen mukaan

Kemiallinen koostumus	Teräsluokka
C, Mn	Seostamattomat teräkset
Cr, Mo, Ni, Cu, V, Nb (Cb) < 5 %	Niukkaseosteiset teräkset
Cr, Mo, Ni, Cu, V, Nb (Cb) > 5 %	Runsasseosteiset teräkset
Min 13% Cr	Ruostumattomat teräkset Ferriittiset & martensiittiset
Min 18% Cr + 4-6% Ni (lean duplex +N)	Ruostumattomat teräkset Austeniittiset-ferriittiset (duplex)
Min 18% Cr + min 7% Ni (myös Mn seostus)	Ruostumattomat teräkset Austeniittiset
Enemmän muita metalleja (esim. Ni) kuin Fe	Nikkelivaltaiset tms. seokset

Putket valitaan lujuuslaskujen perusteella paineestiamääräysten ja standardien mukaan. Terästuotteille on olemassa lukuisia standardeita, standardit koskevat mm. teräksen ominaisuuksia, valmistusmenetelmiä, aineenkoetusta, koostumusta ja nimikkeitä jne. Lisäksi standardit vaihtelevat alueellisesti: Yhdysvalloissa käytetään ASME (American Society of Mechanical Engineers)- standardeita, Euroopassa EN-standardeita, joihin Suomalaiset SFS-standardit on yhdenmukaistettu.

Vaikka standardit periaatteessa velvoittavat valmistajat käyttämään standardien mukaisia määriteltyjä nimikkeitä, käytetään usein kirjallisuudessa vakiintuneita vanhoja nimikkeitä. Esimerkiksi saksalainen DIN- standardi (lähinnä DIN 17175) on jäänyt elämään. Taulukoissa 2-2, 2-3, 2-4 on verrattu nykyisten ja vanhojen standardien mukaisia teräksiä, seostamattomien terästen kohdalla merkinnät ovat

muuttuneet oleellisesti, mutta seostettujen terästen merkinnät ovat hyvin lähellä toisiaan. ASME käyttää hyväksi ASTM:n (The American Society for Testing and Materials) merkintöjä, esimerkiksi ASTM A 213 = ASME SA213

Putkien koestusvaatimukset ja muut vaatimukset on esitetty edellä mainitussa standardissa. Vaadittava todistuslaji on yleensä standardin [EN 10204](#) mukainen.

1.2.1 Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräsputket

Terästä sanotaan seostamattomaksi teräkseksi jos rautaan ei ole seostettu mitään lisäainetta parantamaan sen ominaisuuksia. Kuitenkin kaikki hiiliteräkset sisältävät jonkin verran mangaania, piitä ym. Seostamattomat teräkset ovat erittäin hyvin muokattavia ja niillä on yleensä hyvä sitkeys ja lujuus. Toisaalta niiden virumiskestävyys on heikko ja käyttö rajoittuu alle 450 °C lämpötiloihin.

Kuumalujuutta ja hapettumisenkestävyyttä parannetaan lisäämällä teräkseen erilaisia seosaineita. Tavallisimmat seosaineet ovat molybdeeni (Mo), kromi (Cr), vanadiini (V) ja niobi (Nb), joista tehokkain seosaine kuumalujuuden suhteen on molybdeeni. Standardit määrittelevät seosainepitoisuuksille ylärajat, joiden ylittäminen merkitsee teräksen nimikkeen muuttumista seosteiseksi teräkseksi. Niukkaseosteisiin teräsiin luetaan teräkset joissa seosaineita on yhteensä vähemmän kuin 5 prosenttia, taulukko 1-2.

Taulukko 1-2. Yleisesti käytetyt EN 10216 mukaiset putkiteräkset

EN Nimike	EN numero	Vanha DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
P235GH	1.0345	St 35.8	SA-192	Hiiliteräs	< 400 °C
P265GH	1.0425	St 45.8	SA-210-A1	Hiiliteräs	< 400 °C
16 Mo 3	1.5415	15 Mo 3	SA-209 T1	≤ 0.3 % Mo	< 470 °C
13 CrMo 4-5	1.7335	13 CrMo 4 4	SA-213 T12	1% Cr - 0.5% Mo	< 500 °C
10 CrMo 9-10	1.7380	10CrMo 9 10	SA-213 T22	2.25% Cr - 1%Mo	< 540 °C
7 CrWVMoNb 9-6	1.8201		SA-213 T23	2.25% Cr -MoWV	
7 CrMoVTiB 10-10	1.7378		SA-213 T24	2.25% Cr -1%MoVTiB	

Taulukko 1-3. Yleisesti käytetyt EN 10028 mukaiset levyteräkset

EN Nimike	EN numero	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
P235GH	1.0345	H I	-	Hiiliteräs	< 450 °C
P265GH	1.0425	H II	-	Hiiliteräs	< 450 °C

1.2.2 Runsasseosteiset teräsputket

Runsasseosteisiin teräsiin päästään kun mm. kromin seostusta lisätään, esimerkiksi "X20"-teräs (X20CrMoV111), joka on melko runsashiilinen (0,2 %) ja sisältää kromia 12 %. Yleisesti käytössä olevia runsasseosteisiä putkimateriaaleja on lueteltu taulukossa 1-4.

Taulukko 1-4. Yleisesti käytetyt EN 10216 mukaiset runsasseosteiset putket

EN Nimike	EN tunnus	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
X10CrMoVNb9-1	1.4903	X10CrMoVNb91	SA-213 T91	9% Cr - 1%Mo mod.	
X20CrMoV11-1	1.4922	X20CrMoV12 1	-	12% Cr - 1%MoNiV	

1.2.3 Ruostumattomat teräsputket

Kromin ansiosta teräksen pintaan muodostuu ympäristön sisältämän ilman hapen vaikutuksesta erittäin ohut tiivis "oksidikalvo", joka suojelee terästä korroosiolta. Kalvon muodostumiseen ilmassa tarvitaan teräksessä vähintään noin 11 % kromia, joka on vähiten seostetun ruostumattoman teräksen kromipitoisuus. Kromin lisäksi teräsiin seostetaan yleensä tarpeen mukaan monia muitakin seosaineita, esim. nikkeliä tarvitaan vähintään noin 8 % ja kromia 18%, kun halutaan saada aikaan yleisin ruostumaton teräs, austeniittinen teräs.

Kemiallisen koostumuksen (lähinnä kromi, nikkeli, molybdeeni, mangaani, pii ja tyyppi) ja lämpökäsittelytilan mukaan saadaan teräsiin erilaisia mikrorakenteita, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Mikrorakenteensa perusteella ruostumattomat teräkset jaetaan: ferriittisiin, austeniittisiin, austeniittis-ferriittisiin (duplex) ja martensiittisiin teräsiin. Seosainepitoisuuksia muuttamalla kyetään vaikuttamaan teräksen korroosionkestävyyteen, hitsattavuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin, taulukko 1-5.

Taulukko 1-5. Seosaineiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin

Seosaine:	Vaikutus:
Kromi (Cr)	+ Parantaa sekä korroosion että jännityskorroosion kestävyyttä + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä estämällä rikin diffuusiota + Korkea Cr-pitoisuus pienentää lämpölaajenemiskerrointa - Korkea Cr-pitoisuus laskee lämmönjohtavuutta - Huonontaa sitkeyttä
Nikkeli (Ni)	+ Parantaa jännityskorroosionkestävyyttä korkeilla pitoisuuksilla (Ni > 30 %) + Korkea Ni-pitoisuus pienentää lämpölaajenemiskerrointa + Parantaa kestävyyttä kloorikorroosiota vastaan + Parantaa sitkeyttä - Puhtaalla nikkelillä on alkalisissa sulfidiympäristöissä huono jännityskorroosionkestävyys - Heikentää sulfidoitumiskestävyyttä - Korkea Ni-pitoisuus laskee lämmönjohtavuutta
Molybdeeni	+ Parantaa jännityskorroosionkestävyyttä väkevissä lipeäliuoksissa korkeilla



(Mo)	kloridipitoisuuksilla + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä + Nostaa lujuutta korkeissa lämpötiloissa - Heikentää jännityskorroosionkestävyyttä väkevissä lipeäliuoksissa matalilla kloridipitoisuuksilla.
Mangaani (Mn)	+ Parantaa kestävyyttä muodostamalla pysyviä rikkiyhdisteitä ja estää rikin ja nikkelin sekä kromin välisiä reaktioita
Titaani (Ti)	+ Parantaa korroosionkestävyyttä + vähentää raerajakorroosion (herkistymisen) riskiä hitsauksen jälkeen
Niobi (Nb)	+ Parantaa korroosionkestävyyttä + Parantaa sulfidoitumiskestävyyttä + Vähentää raerajakorroosion (herkistymisen) riskiä hitsauksen jälkeen
Typpi (N)	+ Parantaa pistekorroosionkestävyyttä + Parantaa lujuutta
Rauta (Fe)	+ Korkea Fe-pitoisuus lisää lämmönjohtavuutta - Heikentää korroosionkestävyyttä - Heikentää sulfidoitumiskestävyyttä.

Ruostumattomista teräksistä austeniittiset teräkset ovat ehdottomasti yleisimmin käytettyjä. Austeniittisiä teräksiä käytetään vaikeissa korroosio-olosuhteissatulistinputkena. Austeniittiset teräkset ovat kromi- nikkeli-teräksiä, joiden kromipitoisuus vaihtelee välillä 17–26 % ja nikkelipitoisuus välillä 7-22 %, pitoisuuksien summan ollessa vähintään 23 %. Hiiltä austeniittisissä teräksissä on hyvin vähän, yleensä alle 0,05 %. Austeniittisten terästen korroosionkestävyys, sitkeys, kylmämuovattavuus ja hitsattavuus ovat hyviä. Lujuus on melko vaatimaton lukuun ottamatta runsaasti seostettuja erikoisteräksiä. Niillä on kuitenkin erittäin hyvät kuumalujuusominaisuudet, mistä syystä niitä käytetään paljon virumiskestävinä teräksinä korkeissa lämpötiloissa. Austeniittista terästä ei voida karkaista lujuuden nostamiseksi, mutta sen lujuutta voidaan nostaa mm. tyypiseostuksella. Mikäli käytetään austeniittista materiaalia, on muistettava sen jännityskorroosioalttius.

Ferriittisten terästen pääseosaine on kromi. Toisena seosaineena voidaan käyttää muutamia prosentteja molybdeeniä. Hiilipitoisuus on alle 0,08 %. Lisäksi niissä voi olla hyvin pieniä määriä erilaisia stabilointiaineita, mm. titaania ja alumiinia. Ferriittisten terästen perustyyppit ovat 12% Cr- ja 17% Cr-teräkset. Ferriittisten terästen sitkeysominaisuudet eivät ole verrattavissa austeniittisten terästen erinomaiseen sitkeyteen ja ne kärsivät myös monista haurausilmiöistä. Samoin korroosionkestävyys monissa olosuhteissa on huonompi. Ferriittisten terästen hyvä ominaisuus on kuitenkin hyvä jännityskorroosionkestävyys, joka on puolestaan austeniittisten vakioterästen heikko kohta. Lujuudet ovat yleensä jonkin verran suurempia kuin austeniittisillä teräksillä. Niiden etuna on myös edullinen hinta.



Austeniittis-ferriittiset teräkset eli duplex-teräkset ovat CrNi- ja CrNiMo-teräksiä. Näiden pääseosaineiden pitoisuudet on tasapainotettu siten, että teräkseen saadaan kaksifaasinen mikrorakenne, jossa on austeniittia ja ferriittia suurin piirtein suhteessa 50:50. Duplex-terästen hyvät ominaisuudet ovat suuri lujuus ja hyvä korroosionkestävyys (erityisesti jännityskorroosionkestävyys ja pistekorroosionkestävyys) sekä vielä hyvä hitsattavuus. Terästen sallittu käyttölämpötila-alue on noin -50...+280 °C. Martensiittiset teräkset ovat pääkoostumukseltaan kromiteräksiä, minkä lisäksi joissakin laaduissa on muutamia prosentteja nikkeliä. Päätyypiltään ne ovat 13% Cr- ja 17% Cr -teräksiä, joiden hiilipitoisuus on välillä 0,10 – 1 %. Martensiittiset teräkset ovat ainoita karkaistavia ruostumattomia teräksiä, minkä ansiosta niiden lujuutta voidaan nostaa karkaisulla. Terästen lujuus on korkea ja kulumiskestävyys hyvä. Korroosionkestävyys on huonompi kuin muilla ruostumattomilla terästyypeillä. Sitkeysominaisuudet ovat myös melko huonot. Hitsattavuus on yleensä huono (haurastuu hitsattaessa), minkä takia hitsaus vaatii yleensä aina erilaisia erityis- toimenpiteitä onnistuakseen, mm. esikuumennus ja jälkilämpökäsittely.

Yleisesti käytössä olevia ruostumattomia putkimateriaaleja on lueteltu taulukossa 1-6.

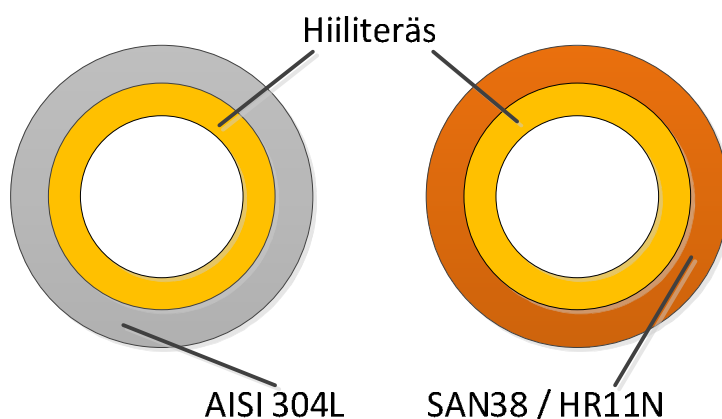
Taulukko 1-6. Yleisesti käytetyt EN 10088 ja EN 10216 mukaiset ruostumattomat putket

EN Nimike	EN Tunnus	DIN 17175	ASME	Tyyppi	Tyypillinen käyttöalue
X2CrNi19-11	1.4306	X5CrNi189	304L	19%Cr - 11%Ni	
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2CrNiMo18 14 3	316L	18%Cr - 3%Mo14%Ni	
X6CrNiNb18-10	1.4550	X6CrNiNb 18 10	347	18%Cr- 10%NiNb	
X8CrNi 25-21	1.4845	X12CrNi 25 20	310S	25%Cr- 21%Ni	
X6NiCrNbCe32-27	1.4877	-	A213	31%Ni - 27%Cr (AC-66)	
X6Cr13	1.4000	-	410S	13%Cr - 0.08%C	
X6Cr17	1.4016	-	430	17%Cr – 0.08%C	
X2CrMoTi18-2	1.4521	-	444	18%Cr – 2%MoTi	
X12Cr13	1.4006	-	410	13%Cr - 0.1%C	
X20Cr13	1.4021	-	420	13%Cr - 0.2%C	
X2CrNiN23-4	1.4362	-	S2304	23%Cr - 4%NiN	< 300 °C
X2CrNiN22-2	1.4062	-	S2202	22%Cr - 0.5%Mo2Ni	< 250 °C
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	-	S2205	22%Cr - 3%Mo5%NiN	< 280 °C
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	-	S2750	25%Cr - 4%Mo7%NiN	< 300 °C
X2CrNiN22-2	1.4062	-	S2202	22%Cr - 2%NiN	< 250 °C

Siinä vaiheessa kun muita metalleja, kuten nikkeliä on enemmän kuin rautaa, ei puhutakaan enää teräksistä. .

1.2.4 Compound-putket

Kompound-putki on yhdistelmä kahdesta materiaalista, jossa putken painetta kantava sisäkerros on seostamaton tai niukkaseosteinen terästä ja ulommainen korroosiota kestävä kerros ruostumatonta terästä tai nikkelseosta. Soodakattiloissa käytetään AISI 304L tai Sanicro38/Alloy 825/HR11N -tyyppisellä pinnoitteella valmistettua compound-putkea, putken rakenne on esitetty kuvassa 1-1. Compound-rakenne voidaan valmistaa sekä pursottamalla että päälle hitsaamalla.





Kuva 1-1. Tyypillinen compound-putken rakenne

Tulistinmateriaalina voidaan käyttää compoundputkea, jolloin pintakerros voi olla esim. AISI 310 -tyyppinen. Tulistinolosuhteissa sisemmän komponentin tulee tietysti olla lujuutensa puolesta ko. lämpötilaan ja paineeseen sopivaa terästä. Eri pintamateriaalien koostumuksia on esitetty taulukossa 1-7.

Taulukko 1-7. Compound-putkien pintamateriaaleja

Materiaali	Cr %	Ni %	Mo %	Fe %	Mn %	Muut %
AISI 304L	17 – 19	9 - 12	-	bal.	1.3	-
AISI 310	24 – 26	19 - 22	-	bal.	1.77	-
Alloy 825 (Sanicro38)	19 - 23.5	38 - 46	2.5 - 3.5	bal.	0.8	Cu: 1.7, Ti: 0.8
HR11N	27 – 31	38 - 46	0.5 – 1.5	bal.	≤ 2.0	N
Sanicro 28	27	31	3.5	bal.	≤ 2.0	1.0 Cu
Sanicro 63	21	bal.	8.5	3.0	0.5	Nb: 3.5
Sanicro 67	30	60	-	bal.	≤ 0.5	Co: <0.05
Super 625	20 – 23	bal.	-	≤ 5.0	≤ 0.5	W: 3.15 – 4.15, Al: 0.4, Co: ≤ 1.0

Compound-putket valitaan kuhunkin sovellutukseen lujuuslaskujen ja korroosio-näkökohtien perusteella. Lujuuslaskuissa painetta kantavaksi seinämäksi otetaan ainoastaan “musta” osuus. Compound-putkien koestus- ja muut vaatimukset on esitetty sisäosan osalta standardissa EN 10216-2, lisäksi on noudatettava kattilastandardia EN 12952-2 Annex C vaatimuksia sekä valmistajan spesifikaatiota. Compound-putkien käsittelyssä tulee huolehtia siitä, että pintakerrosta ei vahingoiteta ja että voimakas kontakti hiiliterästyökaluihin estetään.

1.3 Materiaalit käyttökohteen mukaan

Soodakattilan käyttöolosuhteet ovat rakennemateriaalien kannalta erittäin vaativat. Lämpötilat ovat korkeat, poltettavassa mustalipeässä on sekä klorideja että rikkiyhdisteitä ja tietyt aineet (Cl, K, S) rikastuvat käytön aikana putkien pintaan, vaikuttavia aineita on kattilassa niin kiinteässä, sulassa kuin kaasumaisessakin muodossa ja korkeita paikallisia jännityksiä esiintyy kattilan eri osissa putkirakenteesta ja paikallisista lämpötilan nousuista johtuen.

Soodakattilan lämpöpintojen materiaalivalinta onkin tasapainottelua käyttöominaisuuksien ja kustannusten välillä. Korkea tuorehöyryn lämpötila ja paine mahdollistavat rakennusasteen nostamisen, mutta vaativat samalla kestävämpiä materiaaleja. Soodakattilassa vallitsee useita lämpötilatasoja ja lämmönsiirtopinnoilla vauriomekanismit vaihtelevat, joten materiaalivalinnassa kullekin kattilan osalle on



huomioitava kohteen olosuhteet ja vauriomekanismien riskit. Muita valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. materiaalin kemiallinen koostumus, materiaalin lujuusominaisuudet, valmistettavuus, valmistusmenetelmien (kylmämuokkauksen, hitsauksen tai herkistymisen) vaikutukset korroosionkestävyyteen ja hinta. Koska soodakattilassa vallitsevat korrodoivat olosuhteet, valitaan usein suuri seinämänpaksuus niin, että saadaan suuri syöpymisvara.

Kompound-pohjaputkien yleisin vauriomekanismi on säröily. Compound-putkien säröilyä esiintyy soodakattilan alaosassa tyypillisesti kolmessa eri paikassa: pohjanputkissa sekä ilma- ja sula-aukoissa. Säröilyn syynä on pidetty sekä termistä väsymistä että jännityskorroosiota. Väsyttävää kuormitusta aiheuttavat lämpötilan vaihtelut käytön aikana ja jännityskorroosiolle välttämätön ympäristö voi olla pesunaikainen vesiliuos ja kostea suola

Käytönaikainen sulfidikorroosio on toinen tärkeä soodakattilan tulipesän korroosiomekanismi, sillä pelkistävässä olosuhteissa metallin ja rikkivedyn reagoidessa syntyvä sulfidikerros heikentää metallia suojaavia oksidikerroksia.

Tulistinalueella korroosio-olosuhteet ovat vaikeat. Syynä tähän on mustalipeän polton seurauksena syntyvät alkalikloridit- ja rikkiyhdisteet, jotka tulistinpinnoille kertyessään aiheuttavat tulistinputkien syöpymistä. Korroosion lisäksi kerrostumat aiheuttavat kattilan tukkeutumista, joka puolestaan johtaa kasvaneeseen nuohoustarpeeseen. Korroosioon vaikuttavat ennen kaikkea tulistinputkien pintaan syntyvien kerrostumien sulamisalue sekä materiaalin lämpötila. Kloridit ja kalium ovat oleellisia aineita erityisesti kerrostumissa (ja lipeässä), sillä kalium laskee voimakkaasti kerrostuman sulamislämpötilaa ja kloori aiheuttaa nopean korroosion. Rikkivety (H_2S) ja polysulfidit aiheuttavat sulfidikorroosiota.

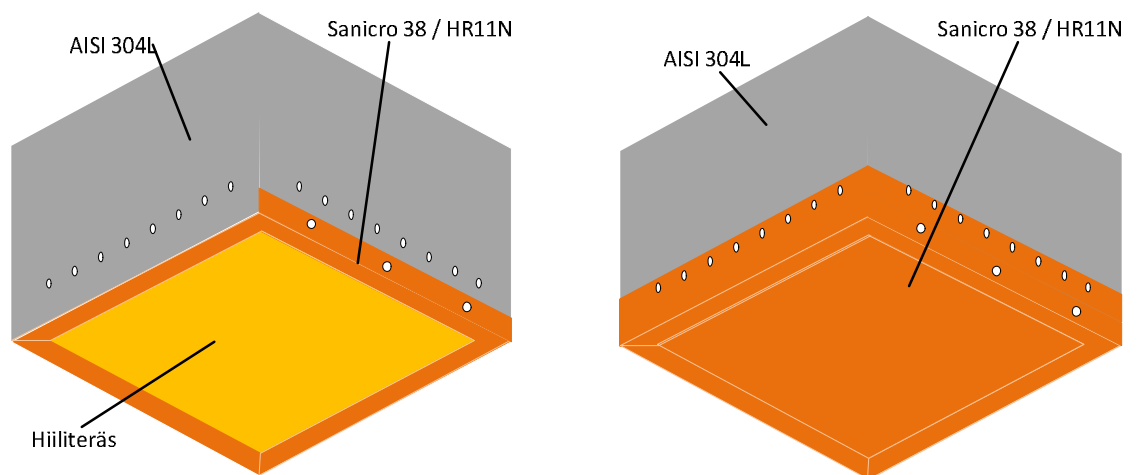
Edellä mainituissa olosuhteissa on kiinnitettävä erityistä huomiota materiaalin valintaan ja siihen, että materiaalin lämpötila pidetään mahdollisimman alhaisena.

Vesikiertojen sulkeminen aiheuttaa edellä mainittua haitallisten aineiden rikastumista mm. mustalipeään, mikä tulee ottaa huomioon materiaaleja valittaessa.

Seostamattomien ja matalaseosteisten terästen korroosiosuojana voidaan käyttää myös erilaisia pinnoitteita.

1.3.1 Pohja

Nykyisin soodakattilan tulipesän pohjan compound materiaalina käytetään tavallista ruostumaton terästä (AISI 304L) tai paremmin korroosiota kestävää nikkeliseosta kuten Sanicro38/ HR11N. Compound-putkien sijasta yleensä käytetään hiiliterästä, jota käytetään pohjan keskiosissa.. Compound-putkimateriaalit voidaan valmistaa joko perinteisesti pursottamalla ja valssaamalla tai pinnoitushitsaamalla. Esimerkki tulipesän alaosan materiaalivaihtoehtoista on esitetty kuvassa 1-2.



Kuva 1-2. Esimerkki tulipesän alaosan putkimateriaaleista

Japanissa soodakattilan tulipesän materiaalina käytetään ferriittistä ruostumatonta hitsauspinnoitetta 18% Cr tai 25% Cr. Ferriittisten ruostumattomien terästen ongelmana pidetään materiaalin taipumusta haurausilmiöihin. Soodakattilan käytön kannalta suurin pelko kohdistuu 475 °C-haurauteen ja sigma-haurauteen. Tällöin teräksen kromi rikastuu paikallisesti sigma-faasiksi, joka kohottaa voimakkaasti materiaalin lujuutta ja alentaa sitkeyttä. Stabiloivien seosaineiden (Nb, Ti, Al) käytön avulla on ollut mahdollista pienentää ferriittisten ruostumattomien terästen raekokoa merkittävästi ja eliminoida haurastumistaipumus.

Termisen väsymisen kannalta paras compound-materiaali on sellainen, jonka lämpölaajenemiskerroin on mahdollisimman lähellä hiiliterästä. Myös jännityskorroosioriski pienenee lämpölaajenemiskertoimien erojen pienentyessä. Lisäksi materiaalin lämmönsiirtokerroin tulee olla suuri, jotta lämpö johtuu pinnasta hiiliteräkseen ja sitä kautta kiertoveteen, eikä materiaaliin synny sisäisiä lämpötilagradientteja.

1.3.2 Seinät



Nykyisin soodakattiloiden tulipesän alaosan seinät ylimpään ilmatasoon asti ovat rakennettu joko compound-materiaalista (304L, Sanicro 38/HR11) tai päällehitsatusta materiaalista. Yläosissa käytetään seostamatonta hiiliterästä esim. P235GH, P265GH tai niukkaseosteisia teräksiä esim 16Mo3.

Hiiliteräksen ja compound-putken rajalla pohjalla ja seinällä on galvaanisen korroosion riski. Lisäksi yläosassa olosuhteet vaihtelevat pelkistävän ja hapettavan välillä.

1.3.3 Kammiot, aukot, läpiviennit, kourut, massaukset

Kammiot valitaan kuten putket. Voimakkaalle korroosiolle alttiissa osissa, kuten erilaisissa läpivienneissä tms. heikommin jäähdytetyissä osissa, tulee kiinnittää erityistä huomiota niiden korroosion-kestävyyteen, jäähdytykseen ja suojaukseen. Monesti korroosionopeutta ei voida kovinkaan paljon pienentää millään toimenpiteillä, jolloin osa joudutaan vaihtamaan tai korjaamaan huoltoseisokeissa määrä ajoin.

Primääri-ilma-aukkojen ohitusputkissa käytetään yleensä compoundia (304L, Sanicro 38/HR11N) tai päällehitsattua materiaalia. Joskus compoundista valmistetuissa ohitusputkissa on havaittu säröilyä. Säröily on lähes yksinomaan ollut termistä väsymistä, jotkut säröt ovat olleet tyypiltään jännityskorroosion aikaansaamia. Materiaalivalinnan lisäksi säröilyyn voidaan vaikuttaa lipeän ruiskutuksella sekä ilmasuihkun hallinnalla.

Primääri-ilmasuuttimina käytetään nykyään valusuuttimia, standardimateriaalina on GRP 400 (pallografiittirauta), jolla on hyvä sitkeys verrattuna suomugrafiittiin ja hyvä lämmönjohtavuus verrattuna seostettuihin materiaaleihin. Tarkka sovitusta ja tiivistys massalla ovat huomioitavia asioita suuttimia asennettaessa. Uusiminen on helppoa, ei tarvita hitsausta eikä hiontaa. Myös korkeaseosteisia materiaaleja voidaan käyttää mutta hinta on moninkertainen.

Hitsattujen levysuuttimien on todettu syöpyvän korkeiden lämpöpiikkien aikana.

1.3.4 Verho



1.3.5 Verhoputkia käytetään ensimmäisenä lämpöpintana tulipesän jälkeen suojamaan tulistimia säteilylämmöltä sekä vähentämään carryoverin määrää. Verhoputket valmistetaan yleensä hiiliteräksestä koska lämpötila on lähellä seinäputkien lämpötilaa. Korroosio on vähäistä johtuen materiaalin lämpötilasta. Tulistin

Tulistimien materiaalinvalinnassa joudutaan tasapainoilemaan yhtäältä materiaalien korroosionkestävyyden ja toisaalta niiden hinnan välillä. Perinteisesti tulistimien korroosio-ongelmat minimoidaan pitämällä tulistimien materiaalilämpötilat alle lämpötilan T_0 , jossa ensimmäiset sulapisararat syntyvät kerrostumiin. Kerrostumien ominaisuudet ja niiden korroosiovaikutus voidaan laskea kun tiedetään lipeäanalyyysin lisäksi mitä lipeälle tapahtuu tulipesässä ja millaista lentotuhkaa syntyy.

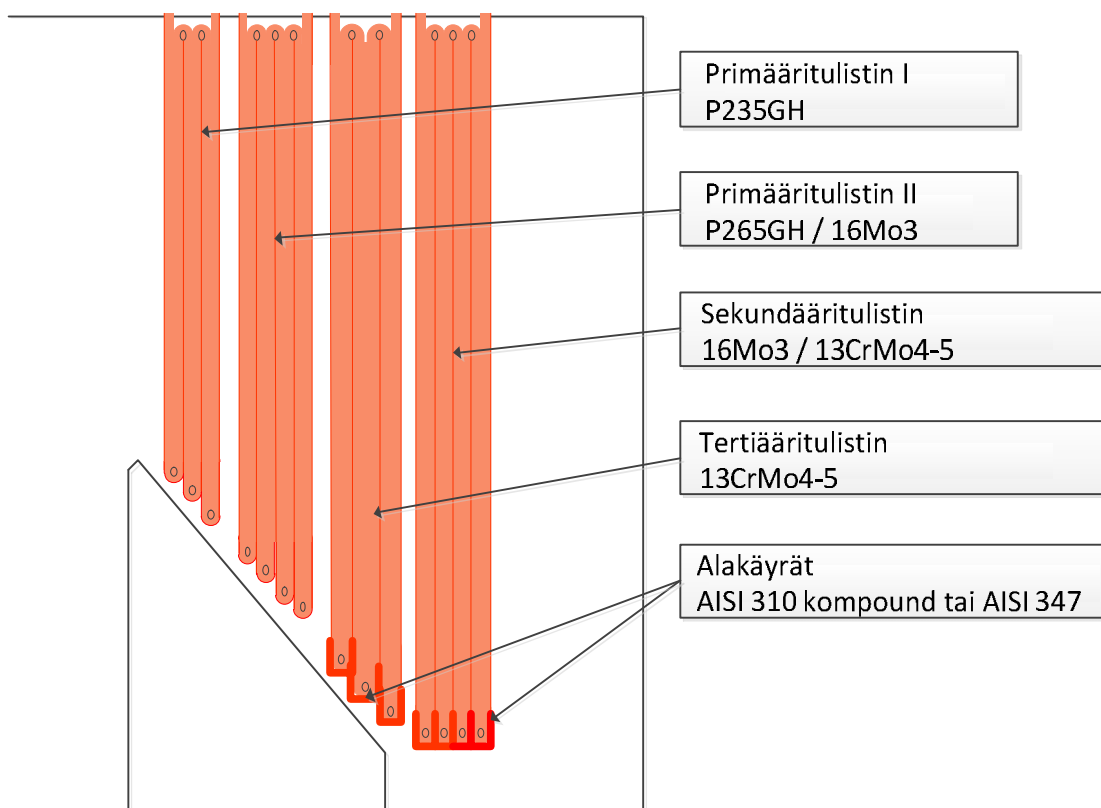
Pyrittäessä korkeampiin höyrynlämpötiloihin ja paineisiin täytyy käyttää paremmin korroosiota kestäviä materiaaleja sekä parantaa kloori- ja kaliumpitoisuuksien hallintaa. Korroosionopeus ei aina ole suoraan kääntäen verrannollinen käytettyyn rahamäärään. Parhaimmat tulistinmateriaalit voivat olla yli kymmenen kertaa kalliimpia kuin perinteiset materiaalit, mutta korroosionkesto saattaa joissakin tapauksissa olla vain 2-3 kertainen.

Tulistinkorroosiota voidaan tehokkaasti vähentää myös tulistimien sijoituksella. Yleensä säteilyn alla tulistimien korroosio on voimakkaampaa kuin konvektiopuolella. Tämä johtuu käytännössä siitä, että säteilypuolella materiaalilämpötilat ovat noin 15-20 °C korkeampia kuin konvektiopuolella. Sijoittamalla tulistimet joko nokan taakse tai käyttämällä tulistimien edessä verhoputkia, voidaan korroosiota vähentää oleellisesti. Verhoputket vähentävät myös merkittävästi tulistimille tulevaa carryoverin määrää pienentäen samalla tulistimien korroosioriskiä.

Tulistimissa käytetään yleensä useita eri terässeoksia jolloin tulistimien korroosiokestävyys ja hinta voidaan optimoida. Materiaaleina käytetään kuumalujia seostamattomia/niukkaseosteisia teräksiä tai ruostumattomia teräksiä monoputkena, compoundputkena tai päällehitsattuna. Eniten korroosiolle alttiita alueita ovat tulistimien kuumimmat osat sekä tulistimien putkikäyrien alaosat, jotka ovat tulipesän suoran säteilylämmön kohteena.

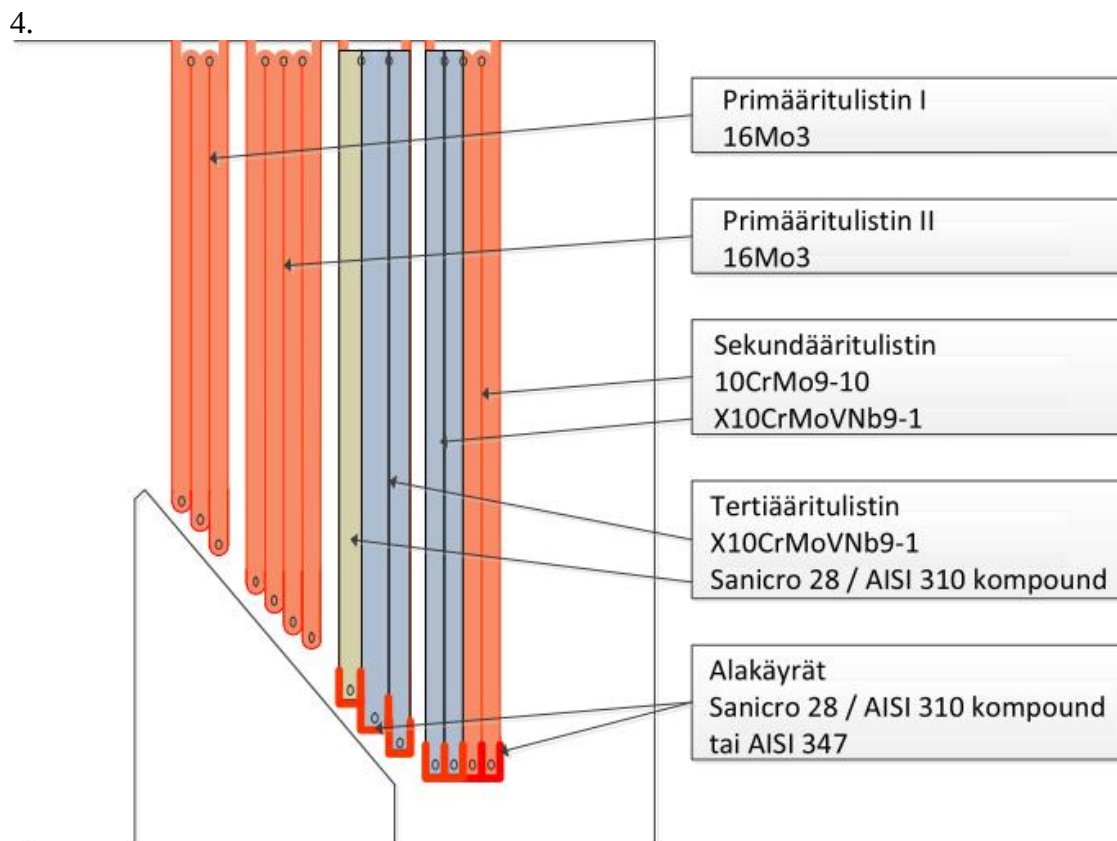
Perinteisesti soodakattiloiden primääritulistimissa on käytetty hiiliterästä (esim. P235GH, P265GH). Sekundääri- ja tertiääritulistimet on valmistettu Cr-Mo teräksistä (esim. 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10). Tulistinputkien alakäyrissä on käytetty

materiaalina austeniittista ruostumatonta terästä esim. AISI 347 tai kompondia esim. AISI 310. Esimerkki perinteisistä tulistinmateriaaleista on esitetty kuvassa 1-3.



Kuva 1-3. Esimerkki perinteisistä tulistinmateriaaleista

Paremmen lujuuden ja/tai suuremman korroosiovaran vuoksi hiiliteräspuutket voidaan korvata primääritulistimissa esim. 16Mo3-materiaalilla. Sekundääritulistimen kuumimmissa osissa niukkaseosteisten teräksien sijaan käytetään runsasseosteisia teräksiä esim. X10CrMoVNb9-1 ja tertiääritulistimissa kompond-materiaalia, jossa on pinnoitteena esim. AISI 310 tai Sanicro 28. Alakäyrissä käytetään esimerkiksi austeniittista AISI 347 umpiputkea tai AISI 310 sekä Sanicro 28 kompondia. Esimerkki paremmen lujuuden ja/tai suuremman korroosiovaran tulistinmateriaaleista on esitetty kuvassa 1-



Kuva 1-4. Esimerkki paremman lujuuden / suuremman korroosiovaran tulistinmateriaaleista

Kompound-materiaalien käyttöä puoltaa se, että sisämateriaalina voidaan käyttää kuumalujia teräksiä (esim. 10CrMo910), joiden höyrypuolen käyttäytyminen on tunnettua. Lisäksi compoundissa ulkopuolinen särö pysähtyy yleensä rajapintaan. Compound-materiaalin sisämateriaali valitaan maksimikäyttölämpötilan ja virumiskestävyyden perusteella. Pinnoite valitaan korroosionkeston perusteella. Pinnoitteen valinnassa ei viruminen näyttele merkittävää osaa.

Putkien lisäksi tulee kiinnittää huomiota tulistinsiteiden konstruktion ja materiaaliin. Siteiden kesto ja materiaalin valinta riippuu suuresti putkien välisestä etäisyydestä ja sidekonstruktiosta eli putken kyvystä jäähdyttää sidettä sekä kerrostuvan suolan koostumuksesta. Jos eri tulistimissa putkien välinen etäisyys on sama, voidaan käyttää samaa tulistinsidettä. Mitä alhaisemmassa lämpötilassa sulavia kerrostumia syntyy, sitä vaikeammat ovat korroosio-olosuhteet ja sitä paremmin on huolehdittava siteiden jäähdytyksestä ja sitä suurempi huomio on kiinnitettävä materiaalin valintaan.

1.3.6 Ekonomaiseri



Ekonomaisierissä lämmitetään höyrystimeen menevää vettä alle kylläisen lämpötilan(noin 250–300 °C), jolloin ekonomaiserin putkimateriaalin pintalämpötila pysyy melko alhaisena. Ekonomaiseri sijoitetaan kattilassa tulistimien jälkeen takavetoon, jossa savukaasujen lämpötila on noin 400-450- °C. Verrattain alhaisista lämpötiloista ja veden hyvästä jäähdytysvaikutuksesta johtuen ekonomaiserin materiaalina käytetään yleensä tavallista hiiliterästä.

1.3.7 Lieriö

Lieriön kohdalla menetellään kuten edellä eli lujuuslaskujen ja paineastiamääräysten perusteella valitaan sopiva materiaali. Lieriömateriaalille vaaditaan standardin vaatimien koestusten lisäksi kerrostumatarkastus. Lieriömateriaalia valittaessa on syytä punnita eri vaihtoehtojen lujuuksia ja säröilyalttiutta (ks. raportti VTT-MET C-206).

1.4 Hitsaus

Valmistajalla tulee olla laatujärjestelmä (esim. ISO 9001:n mukainen), jossa kuvataan menettelyt hitsausmenetelmien ja hitsaajien pätevämiseksi, hitsauslisäaineiden tilaaminen ja käsittely, lisäaineiden jakelu tuotantoon ja palautus varastoon sekä hitsin tarkastuksesta ja dokumentoinnista. Painetta kantavien ja niihin liitettävien osien hitsaukseen tulee olla käytettävissä pätevoidyt hitsausohjeet ja hitsaajat. Konepajalla sekä paikan päällä tehdyn hitsauksen dokumentointi on tärkeää jäljitettävyyden takia. Lisäaineiden käsittelyn tulee tapahtua em. järjestelmän mukaan. Lisäaineiden tulee olla viranomaisen hyväksymiä.

Lämpökäsittelyuunien tulee olla kalibroituja samoin kuin mahdolliseen esilämmitykseen käytettävien laitteiden. Tämä koskee myös hitsauskoneita.

Itse hitsaustyö tulee suorittaa tarkoin kyseisen hitsausohjeen mukaan. On erittäin tärkeää, että seuraavat asiat tehdään oikein:

- teräslaadun valinta käyttöolosuhteisiin (löytyy hitsauspiirustuksesta)
- lisäaineen valinta perusaineelle ja käyttöolosuhteisiin (löytyy hitsauspiirustuksesta)
- lisäaineiden varastointi ja käsittely
- hitsattavan alueen puhtaus (erityisesti runsaasti seostetuilla)
- railosovitus
- esilämmitys
- hitsaus-parametrit
- hitsausohjeet



- juurensuojaus
- hitsauksen jälkeiset käsittelyt

Esimerkkinä vaativasta hitsauksesta voidaan käyttää runsasseosteisen “X10”-teräksen (X10CrMoVNb9-1) hitsausta välijäähdytyksineen koska teräs on erittäin karkeneva ja hitsatussa tilassa hauras. Hitsaus edellyttää esikuumennuksen, välipalkolämpötilan eli palkojen välisen lämpötilan, välijäähdytyksen ja jälkihehkutuksen huolellista kontrollointia. Esikuumennus on yleensä vähintään noin 200 °C ja palkojen välinen enimmäislämpötila noin 300 °C. Hehkutusta ei saa tehdä kuitenkaan heti hitsauksen jälkeen, vaan hitsi on annettava jäähtyä lämpötilaan alle 100-150 °C eli reilusti alle Mf-lämpötilan, jotta metallurgiset mikrorakennemuutokset (jäännösausteniitin muodostuminen martensiitiksi) ehtivät tapahtua loppuun. Jos hehkutus tehdään suoraan hitsauksen jälkeen, muuttuu jäännösausteniitti martensiitiksi eli karkeneminen tapahtuu vasta hehkutuksen jälkeisen jäähtymisen aikana. Tällöin liitokseen jää päästämätöntä martensiittia, joka on melko haurasta ja halkeilualtista. Lisäaineen valinnassa on otettava huomioon rakenteen käyttöolosuhteet (korroosio-olosuhteet ja lämpötila) ja eheys (kuumahalkeiluerkkyys) sekä muut ominaisuudet, joita hitsiltä vaaditaan. Yleisohjeena on, että käytetään perusainetta koostumukseltaan vastaavaa lisäainetta. Käytännössä tällaisen lisäaineen seosainepitoisuudet ovat palohäviöiden ja suotautumisten kompensoimiseksi hiukan korkeampia kuin perusaineessa.

Hitsauksen ongelmakohtia voivat olla muun muassa:

- Materiaalien (esim. maalatut putket, hitsauslisäaineet) sekaantuminen keskenään
- Asennusolosuhteet:
 - lika ja ruoste hitsattavilla pinnoilla
 - kosteus hitsattavilla pinnoilla
 - kosteat hitsauspuikot
- Kokemattomat tekijät:
 - hitsauslisäaineen valinta
 - eripariliitosten hitsaus (erityisesti liitoksen lämpökäsittely ja lämpötilan seuranta)

Mikäli käytetään runsaasti seostettuja ferriittisiä teräksiä, ovat ne hitsauksen jälkeen (ennen lämpökäsittelyä) huoneenlämmössä hyvin hauraita, mikä on otettava huomioon niiden käsittelyssä.

Erityisesti ohutseinämäisten putkien evähitsauksessa on varottava läpipalamista, joka tehokkailla menetelmillä, kuten jauhekaarihitsauksella tapahtuu helposti



häiriötilanteessa. Käsien hitsattavilla eväosuuksilla tulee taata riittävä tunkeuma, mikä yleensä edellyttää viistettyä evää.

Hitsausstandardisarja EN 1011 (Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset) antaa yleiset ohjeet tuotannolle sekä hitsausten valvonnalle. Se käsittelee eri osissaan myös mahdollisia haitallisia ilmiöitä, joita eri materiaalien hitsauksessa voi esiintyä, ja antaa ohjeita niiden välttämiseksi:

- [SFS-EN 1011-1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle](#)
- [SFS-EN 1011-2: Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus](#)
- [SFS-EN 1011-3: Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus](#)
- [SFS-EN 1011-4: Osa 4: Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus](#)

Kuumalujien terästen hitsausta ja siihen liittyviä asioita käsitellään standardissa: [SFS-EN 12952-5 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot Osa 5 Paineellisten osien valmistus](#). Putkistostandardi SFS-EN 13480:

- [SFS-EN 13480-1 Osa 1: Yleistä](#)
- [SFS-EN 13480-2 Osa 2: Materiaalit](#)
- [SFS-EN 13480-3 Osa 3: Suunnittelu ja laskenta](#)
- [SFS-EN 13480-4 Osa 4: Valmistus ja asennus](#)
- [SFS-EN 13480-5 Osa 5: Tarkastus ja testaus](#)
- [SFS-EN 13480-6 Osa 6: Maahan asennettavien putkistojen lisävaatimukset](#)
- [SFS-EN 13480-7 Part 7: Guidance on the use of conformity assessment procedures](#)
- [SFS-EN 13480-7 Osa 8: Alumiini ja alumiiniseosteisten putkistojen lisävaatimukset](#)

1.4.1 Erikoishitsaukset

Eripariliitos, jota kutsutaan joskus myös sekaliitokseksi, on "hitsausliitos, jossa liitettävien perusaineiden mekaanisissa ominaisuuksissa ja/tai kemiallisissa koostumuksissa on merkittäviä eroja"

1.4.1.1 Ferriittisten terästen ("Musta/musta") -liitos

"Musta/musta" -eripariliitoksen ollessa kyseessä hitsataan erilaisia ferriittisiä (ml. myös martensiittiset) teräksiä toisiinsa. Yleissuositukset ovat seuraavat:

- lisäaine valitaan vähemmän seostetun teräksen mukaan
- esikuumennus ja välipalkolämpötila valitaan seostetumman (so. karkenevamman) teräksen mukaan
- jos tarvitaan jälkihehkutus, lämpötilan täytyy sopia molemmille teräksille



1.4.1.2 Austeniittisen ja ferriittisen teräksen (“Musta/ruostumaton”) liitos

Tällaisen ns. eripariliitoksen hitsauksessa on erityisesti huomioitava, että erilaisten terästen sekoittuessa toisiinsa syntyy helposti hauras rakenne. Tästä syystä on oltava erittäin huolellinen oikean lisäaineen ja hitsausmenettelyn valinnassa sekä itse hitsaustyössä. Seuraavia haitallisia ilmiöitä voi syntyä jos työ epäonnistuu:

- vetyhalkeilu
- kuumahalkeilu
- haurastuminen
- hiilen diffuusio
- terminen väsyminen

Koska eripariliitoksissa käytetyt lisäaineet ovat yleensä huomattavasti huonommin hitsattavia, on syytä tehdä tällaisista liitoksista mahdollisimman suuri osa konepajalla.

Kompound-putkien hitsauksessakin joudutaan tavallaan tekemään em. kaltainen eripariliitos, ja on luonnollista, että siihen on oltava omat erityisohjeet ja compound-materiaalilla pätevöitetyt hitsaajat.

Erityisesti on huomiotava, että pinnoitemateriaalia on kuorittava liitoksen läheltä niin, että se ei ”mustaa” osuutta hitsattaessa pääse sekoittumaan hitsisulaan. Pintapalot hitsataan ns. yliseostetulla lisäaineella käyttämällä sellaisia hitsausmenetelmiä ja -parametrejä, että ”mustan” hitsi- ja perusaineen sulaminen ja sekoittuminen pintakerrokseen on mahdollisimman vähäistä eikä luotettava liittymisen tämän vuoksi vaarannu. Yliseostetussa lisäaineessa on enemmän kromia ja nikkeliä, jotta sillä on varaa ”laimentua” sekoittuessaan seostamattomaan teräkseen ja sekoittunut osuus pysyy austeniittisena. Hitsausta on käsitelty mm. Sandvikin raportissa ”Welding of Sandvik Composite Tubes”.

Evähitsauksessa on compoundia hitsattaessa varottava tunkeumaa putken hiiliteräsosaan, koska hiiliteräksen seostuminen evähitsiin vaikuttaa haitallisesti laatuun ja lujuuslaskut perustuvat ainoastaan hiiliteräsosan paksuuteen.

1.4.2 Päällehitsaus

Soveltamisala

Tämä ohje koskee vanhojen päällehitsien korjaushitsausta austeniittisella ruostumattomalla teräksellä, mutta menetelmää voidaan käyttää myös uusissa



kattiloissa. Ohje soveltuu myös kattiloiden paljaiden hiiliteräsputkien ja tapituksella tai metalliruiskutuksella varustettujen putkien suojaamiseen.

Ohjetta voidaan soveltaa Painelaitedirektiivin (PED) sekä kattilastandardin EN 12952 mukaisessa valmistuksessa/työssä.

1.4.2.1 Pinnan puhdistus

Kattilaolosuhteissa on jähmettynyt sula, kulunut tapitus tai vanha käytössä lohkeillut metalliruiskutus poistettava putken pinnasta huolellisesti.

Hitsattavan materiaalin pinnan tulee olla puhdas liasta, rasvasta, ruosteesta, valssihilseestä tai muusta vastaavasta epäpuhtaudesta.

Puhdistus voidaan tehdä hiomalla, teräsharjaamalla, liuottimella tai hiekka-/raepuhalluksella.

1.4.2.2 Päällehitsauksen vaatimukset

Hitsauksen pätevyitys

Hitsausohjeet (WPS) pätevoiditetään standardien EN ISO 15614-1, EN ISO 15614-7 tai EN ISO 15613 mukaan.

Hitsaajat pätevoiditetään standardin EN 287-1 / EN ISO 9606-1 (käsinhitsaus) mukaan ja hitsausoperaattorit standardin EN 1418 / **EN ISO 14732** (operaattorit, mekanisoitu hitsaus) mukaan.

Mikrorakenne

Tulipesän valmiin päällehitsauskerroksen tulee olla mikrorakenteeltaan ferriittis-austeniittinen, jolloin sopiva ferriitin määrä tulisi olla 5...15%. Tämä ferriittimäärä on edullinen hitsausteknisistä syistä, koska ferriitti pienentää hitsin kuumahalkeamistaipumusta.

Kemiallinen koostumus

Valmiin päällehitsauskerroksen nimellisanalyysin tulisi olla esimerkiksi:

Cr	16...19 %
Ni	8...11 %



Mo 0...2 %
C noin 0,06 %

Kromi- ja nikkeli pitoisuudet voivat olla korkeammatkin edellyttäen, että mikrorakenteen koostumus säilyy kohdan 3.2 mukaisena.

Kerrospaksuus

Päällehitsauskerroksen paksuuden tulee olla riittävän ohut, jotta lämpösiirtyminen olisi hyvä ja seinämän kokonaisvahvuus ei kasvaisi liian suureksi.

Käytetty hitsausmenetelmä asettaa myös rajoituksia muodostuvan palon paksuudelle, ks. kohta 5.

1.4.2.3 Hitsausmenetelmät ja lisäaineet

Hitsausmenetelmät

Soveltuvat hitsausmenetelmät ovat puikkohitsaus (111), MAG umpilanka (135), MAG täytelanka (136,138) ja TIG hitsaus (141).

MAG umpilanka menetelmässä on suositeltavaa käyttää pulssitustekniikkaa.

Lisäaineet

Kohdassa 3.2 vaaditun analyysin saavuttaminen päällehitsauskerrokselle edellyttää yliseostetun lisäaineen käyttöä, jolla kompensoidaan perusaineen sekoittumisen ja seosaineiden palohäviöiden (hapettumisen) vaikutus. Suositeltavia lisäainetyyppejä ovat mieluiten niukkahiiliset seokset (C maks. $\leq 0,03$ %), AISI 309- tai 309-Mo vastaavat lisäaineet. Lisäaineen valinnassa voidaan hyödyntää esim. Schaefflerin kaaviota.

Koska kerrospaksuuden tulee olla mahdollisimman ohut, tulee käytännössä kysymykseen vain yksipalkohitsaus. Monipalkokerros on laadultaan parempi mutta kustannuksiltaan kallis. Huonontuneen lämmönsiirtymisen vuoksi voivat lämpötilaerot muodostua liian suuriksi suurten kerrospaksuuden yhteydessä, jolloin terminen väsyminen saattaa aiheuttaa putkivaurioita toistuvien ylös- ja alasajojen seurauksena.

Hitsausparametrit

Yliseostettuja lisäaineita käytettäessä ei voida olla varmoja päällehitsauskerrokselle vaadittavat nimellisanalyysin saavuttamisesta ellei ole



varmistuttu käytettävien hitsausparametrien (esim. lisääineen paksuus, virta, puikon kuljetusnopeus, levitystapa, työlämpötila, langan syöttönopeus ym.) soveltuvuudesta ko. hitsausmenetelmälle ja lisääineelle. Sopivien hitsausparametrien löytämiseksi suositellaan ennen työhön ryhtymistä työkokeen suorittamista, hitsaaja-, kone sekä menetelmäkohtaisesti.

Esikuumennus ja välipalkolämpötila (työlämpötila)

Esikuumennuksen käyttö päällehitsauksessa ei normaalisti ole tarpeen. Palkojen välistä lämpötilaa (työlämpötilaa) tulee rajoittaa soveltuvin osin, suositeltava enimmäis välipalkolämpötila on +150°C.

Työkoe

Ennen työn aloittamista suositellaan hitsattavan työkoekappale, samassa hitsausasennossa (pystyhitsi tai jalkohitsi) kuin mitä työssä tullaan käyttämään. Koehitsin tulee täyttää sille asetetut laatu-, koko- ja tunkeumavaatimukset. Koehitsin tutkimisessa tulee selvittää esim. seuraavat seikat:

- tunkeuman syvyys, kerrospaksuus ja palon muoto
- mikrorakennetarkastelu ja mahdolliset halkeamat
- ferriittipitoisuuden määrittäminen joko mikroskooppisesti tai ferriittimittarilla (esim. Permascope)
- hitsin ja muutosvyöhykkeen kovuusmittaus
- päällehitsauskerroksen analyysi

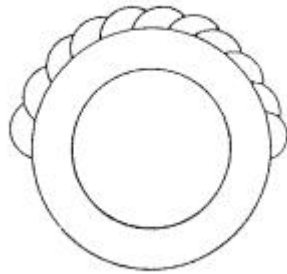
1.4.2.4 Hitsauksen suorittaminen

Päällehitsaus tulee suorittaa menetelmäkokeella / esituotannollisella kokeella (EN ISO 15614-1, EN ISO 15614-7 tai EN ISO 15613) pätevyitetyn hitsausohjeen (WPS) mukaisilla hitsausparametreilla. Erityisesti on huolehdittava, että menetelmäkokeella valittavaa työlämpötilaa (palkojen välinen lämpötila) ei ylitetä työskentelyn aikana, koska hitsin sekoittumisaste riippuu olennaisesti työlämpötilasta. Puikolla hitsattaessa on valokaari pidettävä lyhyenä ilmasta tulevan austeniittia kasvattavan typen määrän pienentämiseksi.

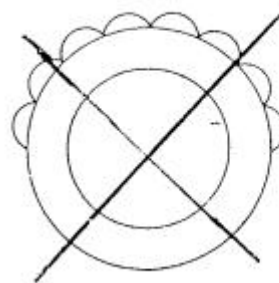
Työhön käytettävien hitsaajien tulee suorittaa ennen työn aloittamista hitsauskoe, jonka laatu arvostellaan visuaalisesti ja kerrospaksuusmittauksella.

Hitsille vaaditun analyysin saavuttamiseksi on lisäksi käytettävä sopivaa palon paksuutta, joka on yleisesti ϕ 3,25 mm ja ϕ 4 mm, puikolla hitsattaessa vähintään noin 3 mm ja kaasukaarihitsauksessa vähintään n. 2,5 mm.

Päällehitsaus tulee tehdä oheisen kuvan mukaan siten, että viereiset palot sulatetaan osittain limittäin, jolloin hitsin liiallinen, perusaineen sekoittumisesta johtuva laimeneminen saumakohdassa voidaan estää. Erityisesti tämä on huomioitava ensimmäisen palon hitsauksessa.



Oikea palkojen sijoittelu



Väärä palkojen sijoittelu

1.4.2.5 Päällehitsauksen jälkikäsittely

Päällehitsauskerroksen hiontaa ja jännityksenpoistohehkutusta ei suositella.

Jännityksenpoistohehkutus saattaa olla hitsauksen muodonmuutoksia ajatellen edullinen, mutta korroosiokestävyyteen sen vaikutus voi olla epäedullinen.

1.4.2.6 Päällehitsauksen tarkastus

Päällehitsauksen tarkastusmenetelmänä tulee kysymykseen lähinnä visuaalinen tarkastelu ja ferriitin mittaaminen ferriittimittarilla. Putken kokonaiseinämävahvuus voidaan mitata myös ultraäänimenetelmällä. Silmämääräistä tarkastusta voidaan täydentää tunkeumanestetarkastuksella säröjen ja huokoisuuden toteamiseksi.

Tarpeen vaatiessa voidaan työn laatu tarkistaa ainettarikkovilla menetelmillä pistokokein (esim. näyte otetaan päällehitsatun putken päästä).



1.4.2.7 Hitsausvirheiden korjaus

Päällehitsauksessa syntyneet virheet avataan hiomalla riittävän laajalta alueelta ja virheen poistuminen tarkastetaan visuaalisesti ja tarvittaessa tunkeumanestetarkastuksella.

Korjaushitsaus suoritetaan soveltuvan hitsausohjeen (WPS) mukaisesti ja tarkastetaan silmämääräisesti (tarvittaessa tunkeumanesteellä).

1.5 Lähteet:

Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilalaitoksen suojaussuositus 1997
60V00326-V070-001

Suomen Soodakattilayhdistys ry
Selvitys: SOTU - materiaalivaihtoehtojen valinta osaprojekti
Pekka Pohjanne, VTT, Hannu Hänninen, TKK, ja Timo Kiesi, TKK.
Raportti 2/2005 (16A0913-E066)

Soodakattilapäivä 2000
Soodakattiloiden tulistinkorroosio
Keijo Salmenoja, Kvaerner Pulping Oy

Soodakattilapäivä 2011
Tämän päivän materiaalivalinnat soodakattiloissa
Johanna Tuiremo, Metso Power Oy

Kunnossapito – lehti 5/99 erikoisliite
Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus

Kunnossapito – lehti 10/98 erikoisliite
Kuumalujat teräkset ja niiden hitsaus



2 SOODAKATTILAPINNOITUKSET

Alkuperäinen teksti: Kari Korpiola, VTT Valmistustekniikka

Päivitetty teksti: Tommi Varis, VTT

2.1 Johdanto

Soodakattiloiden pinnoitukset keskittyvät useimmiten kohteisiin, joissa esiintyy paikallisesti korroosio-ongelmia. Pinnoitteiden käyttö vaihtelee laitoksittain. Kompound-putken käyttö on saattanut jonkin verran vähentää pinnoitteiden tarvetta ja pinnoitteiden tarve on tyypillisesti painottunut korjauspinnoituksiin. Pinnoitettavia kohteita soodakattiloissa ovat yleensä a) ”mustan” ja kompond-putken raja, jossa pinnoitteella estetään galvaanista korroosiota b) tulistinputkien mutkat, joissa pyritään estämään hapettumisen ja korroosion kautta tapahtuvaa ohenemista ja c) paikalliset kompond-putkien säröytymien korjaus.

Pinnoitusmenetelmien ja laitteistojen kehittyessä pinnoitteilla olisi nykyisin edellytykset tarjota kompond-putkelle vaihtoehtoinen kustannustehokas ratkaisu, jolla suojata kriittisiä alueita soodakattiloissa. Pinnoitteet ovat parhaimmillaan tiiviitä korroosiolta suojaavia kerroksia. Lisäksi terminen ruiskutus on monipuolinen ja joustava menetelmä valmistuksen ja materiaalikoostumuksen suhteen. Sillä voidaan valmistaa myös gradientti- tai kerrosrakenteita ja suhteellisen kustannustehokkaasti runsasseosteisia pinnoitteita, joita ei kompond-putkiksi ole taloudellisesti tai teknisesti järkevää valmistaa. Pinnoitteet tarjoavat mahdollisuuden käyttää erilaisia strategioita materiaaliongelmiin ratkaisemiseksi. Jalompia ja kalliimpia materiaalivehtoehtoja voidaan suunnitella vain korroosiosuojausta silmälläpitäen putkimateriaalin pinnalle.

Termiseen ruiskutukseen liittyy monia prosesseja, joilla kaikilla on omat erityispiirteensä ja lisäksi materiaalivalikoima on runsasta ja kokemukset pinnoitteista saattavat olla hyvin vaihtelevia. Termisesti ruiskutetuilla pinnoitteilla on oma erityinen lamellimainen rakenteensa, eikä niiden vaurioituminen tapahdu yleensä samoin kuin putkimateriaalien tuhoutuminen; hapettumalla pinnasta ja oksidikerroksen irtoamisen kautta. Näin ollen pinnoitteiden elinikää saattaa olla hyvin vaikea ennustaa. Tämän johdosta pinnoitusten käyttö, pinnoitusprosessin ja pinnoitemateriaalin valinta ei ole yksiselitteistä ja vaatii runsaasti tietotaitoa ja



vuoropuhelua kattilan käyttäjän, valmistajan ja pinnoitteen toimittajan välillä erityisesti soodakattiloissa.

2.2 Ruiskutusmenetelmät

Termisesti ruiskutetut metalliset pinnoitteet tehdään ruiskuttamalla sulaan tilaan kuumennettu pinnoitemateriaali kaasuvirtauksen avulla pinnoitettavaan pintaan. Sula materiaali jähmettyy pinnoitettavan materiaalin pinnalla ja muodostaa suojaavan kalvon, joka on paksuudeltaan 0,1–1,5 mm. Terminen ruiskutus pitää sisällään monia ruiskutusprosesseja kuten kaariruiskutus, liekki-ruiskutus, plasma ruiskutus, suurnopeusliekkiruiskutus (High Velocity Oxy-Fuel, HVOF ja High Velocity Air-Fuel, HVOF) ja kylmäruiskutus. [1]

Valokaariruiskutuksessa tai lyhyesti *kaariruiskutuksessa* (Wire arc) pinnoittaminen tehdään kuumentamalla lankamainen metalli sähkövalokaaren avulla sulaan tilaan ja puhaltamalla se paineilmalla kohteen päälle.

Suurnopeusliekkiruiskutuksessa jauhemainen lisäaine (metallinen tai keraaminen pinnoitemateriaali) kuumennetaan hapen ja polttokaasun avulla sulaan tilaan rakettimootorin periaatteella toimivassa polttimessa. Menetelmää kutsutaan lyhyesti *HVOF-ruiskutukseksi* (High Velocity Oxy Fuel). Menetelmän etuna on pidetty sillä aikaansaattavia hienorakeisia erityisen tiiviitä pinnoitteita. *HVOF-ruiskutus* (High Velocity Air Fuel) on muunnelmä HVOF-ruiskutuksesta ja siinä käytetään hapen sijaan ilmaa, jolloin muodostuva liekki on kylmempi.

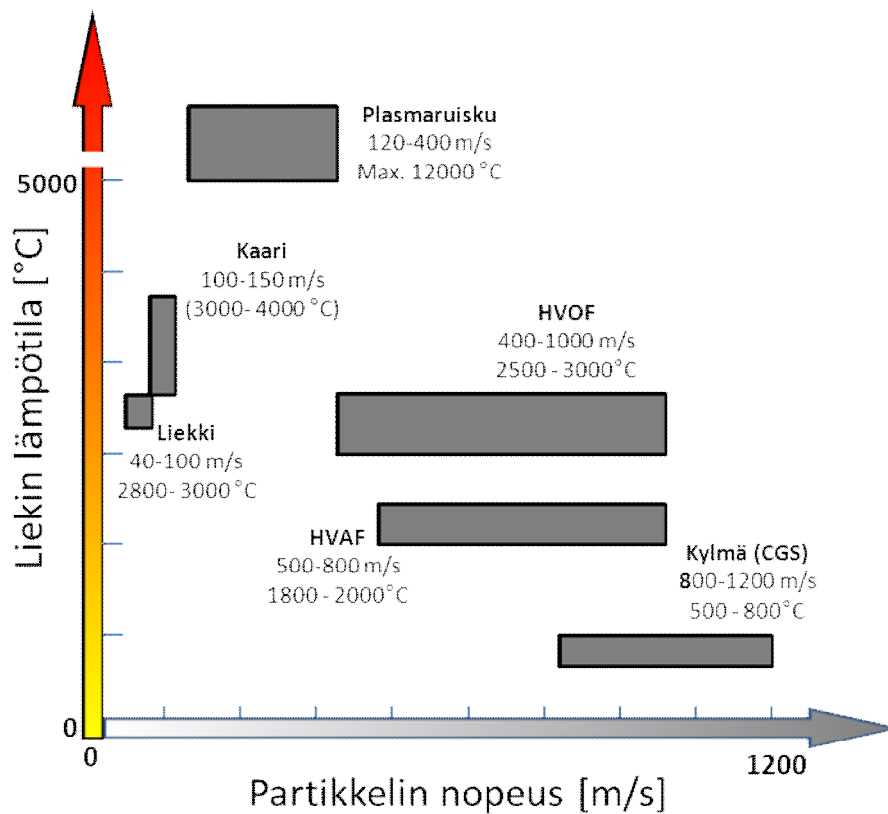
Plasmaruiskutuksessa sähkövalokaari kuumentaa kaasun noin 10 000 °C:ksi. Kuuma polttimesta suihkuava kaasu kuumentaa ja sinkoaa tällöin jauhemaisen pinnoitteen pinnoituskohteeseen, jonka päällä sulapisarot jähmettyvät.

Kylmäruiskutus on menetelmä, jossa jauhepartikkelit lämmitetään ja kiihdytetään suuttimessa. Kylmäruiskutuksessa ei ole liekkiä, vaan kaasu (ilma, typpi tai helium) kuumennetaan esilämmittimessä noin 500–800 °C lämpötilaan.

Edellä kuvattuja menetelmiä käytetään kattiloissa niiden ruiskutusnopeuden, laadun ja taloudellisuuden vuoksi. Markkinoilla on myös muita ruiskutusmenetelmiä, jotka eivät sovellu kattilaolosuhteisiin taloudellisista tai teknisistä syistä, kuten liekki-ruiskutus.



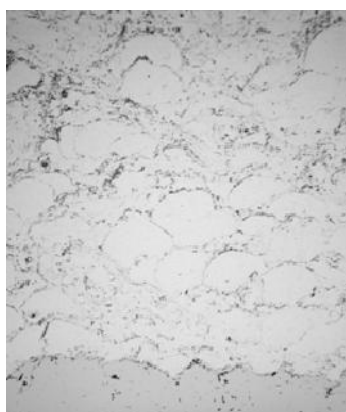
Ruiskutuslisäaineiden valikoima on suuri. Pinnoitteiden ominaisuudet ovat aina kombinaatio materiaalista ja valmistusprosessista. Samaa materiaalia voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, mutta sen ominaisuudet ovat riippuvaisia käytetystä prosessista. Ruiskutuspartikkelien lämpötila ja nopeus määrittävät suurelta osin pinnoitteen ominaisuudet. Kuvassa 3-1 on esitetty eri ruiskutusmenetelmien liekinlämpötila ja partikkelinopeus. Voidaan ajatella, että mitä nopeammaksi pinnoitettavat partikkelit kiihtyvät sitä tiiviimpi pinnoitteesta muodostuu. Ruiskutusprosessissa tulee olla riittävästi lämpöä materiaalin sulattamiseksi, mutta liiallinen lämpö lisää esimerkiksi metallisen materiaalin hapettumista ruiskutuksen aikana. Kuvassa 3-2 on esitetty eri ruiskutusmenetelmillä valmistettu NiCr-pinnoite, ja huomionarvoista on, että eri ruiskutusmenetelmillä saadaan aikaan varsin erilainen pinnoiterakenne. Viimeisimmät HVOF ruiskut kuten CJS (carbide jet spray) samoin kuin HVOF ruiskut tuottavat erittäin tiiviin ja lähes hapettoman pinnoiterakenteen. Hieman tätä vanhemmilla HVOF menetelmillä kuten DJ-Hybridillä saavutetaan myös erinomainen pinnoitelaatu, vaikka happipitoisuus on hieman korkeampi. Myös kaariruiskuttamalla aikaansaadaan suhteellisen korkeasta huokoisuudesta riippumatta melko hyvä suojaavuus, koska ruiskutusmateriaalin sulamisaste on korkea, jolloin muodostuu voimakkaasti lamellimainen rakenne, jossa lamellien välinen kiinnittyminen on hyvä. Yleisesti ottaen HVOF ja HVOF menetelmillä saavutetaan kuitenkin ylivoimainen pinnoitteen tiiveys.



Kuva 2-1. Eri prosessien tuottama ruiskutuspartikkelien nopeus ja liekin lämpötila-alue.



a)



b)



c)

Kuva 2-2. Ni50Cr-pinnoitteen mikrorakenne ruiskutettuna kolmella eri prosessilla a) kaariruiskutus-, b) DJ Hybrid HVOF- ja c) CJS HVOF-prosessilla.

2.3 Pinnoitemateriaalit

2.3.1 Rautavaltaiset pinnoitteet



Rautavaltaisia pinnoitteita pidetään yleensä kustannustehokkaina pinnoitevaihtoehtoina. Polttokattiloissa käytetyt materiaalit voivat olla korkealämpötilateräkset kuten FeCr, FeCrMo, FeCrNi and FeCrAl. Lähtökohtana kattilaoolosuhteisiin on, että rautavaltaiset pinnoitteeseen seostetaan joko kromia tai alumiinia tai molempia, jotta saadaan suojaava oksidikerros hapettumista ja korroosiosta vastaan. Fe-Cr -seokset ovat hyvin tunnettuja korroosionsuojausta vaativissa kohteissa korkeissa lämpötiloissa. Rikkikorroosiota vastaan suhteellisen korkeat kromipitoisuudet (yli 26 %:a) on havaittu olevan hyödyllisiä. Huomattavaa on, että yli 13 %:a Cr sisältävät seokset ovat tasapainon mukaisesti austeniittisia, mutta termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kohdalla, jäähtymisnopeuden ollessa suuri, kromipitoisuuden kasvattaminen lisää amorfisuustaipumusta. [2,3,4]

Käytettäessä alumiini-seostusta, riittävän suuri alumiinipitoisuus on tärkeää FeAl-materiaalien korroosionsuojaavuuden kannalta.[5] Jos alumiinioksidikerroksen suojaavuus on puutteellinen, pääsee rikki tunkeutumaan sen läpi ja johtaa erittäin suureen korroosionopeuteen. Jos käytetään alle 5 % alumiinipitoisuutta päädytään helposti yhtenäisen sulfidikerroksen kasvamiseen materiaalin pinnalle. FeAl-seoksien, jotka sisältävät 5–10 paino-% alumiinia, on raportoitu omaavan erittäin hyvän rikkikorroosion keston rikkipitoisessa ympäristössä (0.1% H_2S -3.0% H_2 -Ar 600°C, 50 h). Tarvittavan alumiinipitoisuuden, jolla voidaan merkittävästi pienentää FeAl-seoksen korroosiokestävyyttä 100 % H_2S :ssa on havaittu olevan noin 10 % 600 ja 700 °C:ssa ja hieman matalampi 400 °C:ssa [6]. Kuitenkin on havaittu, että noin 3–5% Al lisäys Fe–17Cr seoksen saa aikaan parantuneen rikkikorroosionkeston. Tästä suurempi alumiinipitoisuuden lisäys, lisää rikkikorroosionkestoja vielä enemmän 800 °C:ssa. Suuremmilla alumiinipitoisuuksilla (yli 11 %) alkaa muodostua rauta-alumiini yhdisteitä (Fe₃Al or FeAl), jotka menestyvät hyvin rikkipitoisissa ympäristöissä. Niillä on myös hyvä hapettumisen kesto korkeissa lämpötiloissa, hiilettymisen kesto ja suolasulankesto. Fe₃Al- tai FeAl-metallien väliset yhdisteet ovat kuitenkin suhteellisen hauraita, joten niiden soveltamiseen on suhtauduttava pienellä varauksella. [7].

Yleisesti ottaen Fe-Cr-Al – pinnoitteilla on suhteellisen hyvä hapettumiskestävyys, mutta ilman kovia partikkeleja niiden eroosiokestävyys jää huonoksi. Eroosiokestävyyden parantamiseksi voidaan lisätä karbidin tai boridien muodostajia. Suhteellisen pitkään on kattiloissa sovellettu kaariruiskutettuja rautavaltaisia



materiaaleja (esim. Armacor), joissa on Fe-15–25 % Cr matriisissa kovia Cr-, W- ja boridi-faaseja. Näiden pinnoitteiden suuri lujuus perustuu nanokokoisiin borideihin tai karbideihin. Pinnoitteet ovat usein myös osittain amorfisia. Nytemmin on kehitetty myös täysin amorfisia rautavaltaisia pinnoitteita, joissa mm. wolframi- ja booripitoisuutta on lisätty, mikä edesauttaa pinnoitteen muodostumista amorfiseksi. Amorfisen rakenteen etuna on, että siinä diffuusion oletetaan olevan nopeampaa kuin kiteisissä materiaaleissa. Lisäksi pinnoitteen kovuus on jo ruiskutettuna erittäin suuri, noin 1100 HV. Pinnoitteen kovuus lisääntyy edelleen karbidien ja boridien erkautuessa (kiteytyessä) 600–650 °C:n lämpötilassa, mutta tämä ei välttämättä ole suotuisaa korroosiokestävyyden kannalta ”matriisiin” köyhtyessä kromista. [8,9,10,11]

2.3.2 Nikkelivaltaiset pinnoitteet

Nikkelivaltaisia materiaaleja kuten NiCr, NiAl, NiCrAl ja NiCrSi käytetään yleensä komponenteissa, joissa tarvitaan hyvää kulumiskestävyyttä yhdistettynä hapettumis- ja korroosionkestoon. [2,3,4]. Näidenkin materiaalien suojaavuus perustuu suojaavan oksidikerroksen syntymiseen. Nikkelivaltaiset materiaalit seostettuna noin 20 %:a kromia kestävä hapettumista tyypillisesti 800 °C:een saakka. Lisäksi Ni-Cr –seosten lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin lähellä teräksiä. Tunnettuja seoksia ovat esim. Inconel 625 ja Ni20%Cr. Kirjallisuudesta voidaan löytää muutamia erilaisia lähestymistapoja, joilla parannetaan nikkelivaltaisten seosten korroosio- ja eroosiokestävyyttä kattilasovelluksiin, joista erityisesti suuren kromipitoisuuden omaavat Ni-seokset ja nikkelivaltaiset sulautuspinnoitteet ovat potentiaalisimpia. [8,12,13,14]

Korkean kromipitoisuuden materiaalit (aina 50 %:iin saakka) on todettu olevan yksi parhaista materiaaleista kloori- ja rikkikorroosiota vastaan. Kromioksidikerros on suojaava ja uudistuskykyinen, eikä rikkikorroosio pääse etenemään oksidikerroksen läpi. Matalakromisilla seoksilla, kuten Inconel 625, on kromioksidin suojaavuuden kanssa ongelmia erityisesti lämpötiloissa, joissa suolasulia pääsee muodostumaan [15]. NiCr-pohjaisten materiaalien suolasulan kestävyttä voidaan parantaa seostamalla niihin oksidia stabiloivaan seosainetta, esim. alumiinia tai piitä (NiCrAl, NiCrBSi, NiCr-MoBSi), jolloin oksidikalvon liukeneminen sulaan vaikeutuu. Korkeampikromisilla nikkeliseoksilla on havaittu, että yli 550 °C:n lämpötiloissa ja suurilla klooripitoisuuksilla pinnoitteeseen syntyvä kromioksidi ei ole suojaava ja

lisäksi kromin on todettu olevan suhteellisen herkkä aktiiviselle korroosiolle esim. rautaan ja nikkeliin verrattuna, jolloin kloori pääsee hyökkäämään pinnoitteiden lamellirajoja pitkin syvemmälle pinnoitteeseen. Vastaavasti voidaan olettaa olevan rikin tapauksessa [8,12]

Pinnoitteiden tiiveyttä voidaan parantaa sulautuskäsittelyllä, jossa tyypillisesti NiCrBSi-seos lämpökäsitellään tiiviiksi. Pii- ja booriseostuksen vaikutuksesta pinnoitteen sulamisalue voidaan laskea merkittävästi alle putkiteräksen, jolloin pinnoite voidaan lämpökäsitellä noin 1100 °C puuroalueella täysin tiiviiksi rakenteeksi. Sulautuspinnoitteiden kovuutta voidaan lisätä esimerkiksi W, Cr ja hiili seostuksella, jolloin seokseen erkautuu sulautuskäsittelyn yhteydessä karbideja. [16]

2.3.3 Kaupalliset pinnoitemateriaalit

Ruiskutusmateriaalien valmistajien kattilamateriaaleiksi tarjoamat vaihtoehdot sekä muut mahdollisesti potentiaaliset materiaalit on koottu taulukkoon 2-1, jossa kattilamateriaalit on luokiteltu karkeasti eroosiosuojamateriaaleihin tai korroosiosuojamateriaaleihin. Taulukkoon on haettu jauhevalmistajien esitteistä sellaisia materiaaleja, joiden sovelluskohteiksi on mainittu joko kattilasovellukset tai hapettumisen kesto.

Taulukko 2-1. Joitain esimerkkejä termisen ruiskutuksen materiaalitoimittajien tarjoamista kattilamateriaaleista.

Materiaali-ryhmä	Koostumus	Valmistaja	Nimike	Pinnoitus-prosessi	Olosuhde
Fe-valtaisia					
Fe-Cr-Al	Fe-20-25Cr-4-6Al	Kanthal	SW 010	Kaariruisku	Korroosio
Fe-Cr	Fe 29Cr 3.7B 1.7Mn 1.4Si	Praxair	95 MXC	Kaari	Eroosio-korroosio
Fe-Cr (amorphous)	Fe-25Cr-15Mo-5B-5W-2C-2Si	Nanosteel	SHS 7150	Kaari	Eroosio-korroosio (Biomassa kattila)
Fe-Cr (amorphous)	Fe-30Cr-10Mo-5B-4W-2C-2Mn-2Si	Nanosteel	SHS 7174	Kaari	Eroosio (SFBC kattila)
Fe-Cr (amorphous)	Fe-22Cr-5B-5Mo-5Nb-2C-1Mn-1Si	Nanosteel	SHS8000	Kaari	Eroosio-korroosio
Fe-Cr (amorphous)	Fe-25Cr-20Mo-10W-5B-5Mn-3C-2Si	Nanosteel	SHS7574	HVOF	Korroosio Cl-ympäristö
Ni-valtaisia					
Ni-20Cr	Ni20Cr	Höganäs	1616-02	HVOF	Korroosio
Ni-50Cr	50Ni49Cr1Fe, Ni50%Cr	Praxair Sulzer Metco	1260F, Amdry 350C	HVOF	Korroosio
Ni-Cr (Inconel 625)	Ni 21.5Cr 8.5Mo 3Fe 0.5Co	Sulzer Metco	Diamalloy 1005, Metco 8625	HVOF, Kaari	Korroosio
NiCrBSi	Ni 16Cr 4Fe 4B 4Si	Sulzer Metco	Metco 19E	Spray and	Eroosio korroosio

	2.4Fe 2.4Mo 2.4W 0.5C			fuse	
Cr-Ni	Cr-34Ni-7C	Sulzer Metco	SM5241	HVOF	Eroosio-korroosio

2.3.4 Pinnoitemateriaalien valinta

Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden vaurioituminen soodakattilaolosuhteissa tapahtuu usein eri mekanismilla kuin vastaavan koostumuksen omaavan putkimateriaalin. Tämä johtuu pinnoitteen erityisestä rakenteesta, joka on tyypillisesti jähmettyneistä sulapisaroista muodostunut lamellimainen rakenne. Lisäksi ruiskutuksen aikana metallinen lähtöaine hapettuu pinnaltaan ja happi jää rakenteeseen sulkeumina. Pinnoitteen lamellit eivät ole täydellisesti kiinnittyneitä toisiinsa. Lamellirajat ovat näin ollen pinnoitteiden heikkoja kohtia, jotka vaikuttavat pinnoitteen korroosiokäyttäytymiseen. Pinnoitemateriaalin ja ruiskutusmenetelmän valinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa pinnoitteen sisäiseen vaurioitumisnopeuteen ja korroosiokestävyyteen. Ruiskutettu pinnoitteen vaurioituminen voi tapahtua seuraavasti [17]:

- Pinnoitteen hapettumisesta, rikkikorroosiosta ym. ympäristöaltistuksesta aiheutuu pinnoitteen sisäinen vaurioituminen. Korroosio keskittyy tyypillisesti lamellirajoille ja voi avata reitin pinnoitteen läpi.
- Korrodoiva ympäristö pääsee ajan kuluessa kulkeutumaan pinnoitteen läpi pinnoitteen ja alustan rajapinnalle, jolloin alustamateriaali alkaa tuhoutua nopeasti. Tämä johtaa pinnoitteen nopeaan irtoamiseen alustalta.
- Pinnoite säröilee lämpötilan muutoksien aiheuttamien jännitystilojen seurauksena.

Edellä mainittujen vaurioiden minimoimiseksi pinnoitemateriaalin valinnan sekä pinnoitusprosessin valinnan merkitys korostuu. Pinnoitemateriaali voidaan esim. helposti valita sellaiseksi, että pinnoite ei vaurioidu pinnastaan hapettumalla ja sisäinen korroosio on pieni. Pinnoitemateriaalin ja alustan välinen lämpölaajenemiskertoimien välinen ero on minimoitava, jotta säröilyltä vältytään. Lisäksi pinnoitusprosesseilla on saavutettava riittävä tiiveys.

On tärkeää huomioida, että pinnoitteen korroosionsuojaavuus on aina kombinaatio valitusta materiaalista ja valmistusprosessista. Tämän vuoksi pinnoitteita ei voida valita pelkästään materiaaliperusteisesti vaan suunnittelussa on huomioitava pinnoiterakenteen erityispiirteiden tuomat muutokset pinnoitemateriaaliin. Pinnoiterakenteiden erityispiirteet, tiiveys ja happipitoisuus, riippuvat suuresti käytetystä pinnoitusprosessista.



Kriittiset tekijät, jotka määrittelevät pinnoitteen korroosiosuojaavuuden ovat:

- Itse pinnoitemateriaalin korroosiokestävyys, johon vaikuttaa valitun pinnoitemateriaalin korroosiokestävyys ko. ympäristössä (koostumus ja oksidikerroksen suojaavuus)
- Pinnoitteen korrodoivien aineiden läpäisevyys, johon voidaan vaikuttaa valitulla prosessilla ja prosessiparametreilla (lamellirajat ja huokoisuus) ja
- Mekaaninen yhteensopivuus (säröily)
- Tärkeimpiä määriteltäviä ominaisuuksia pinnoitteelle ovat adheesio (= tartuntalujuus), huokoisuus, koheesio, lämpölaajenemiskerroin ja paksuus.

Pinnoitusmateriaalien valikoima termisesti ruiskuttamalla on suuri. Korkealämpötilakorroosiota kestävät materiaalit muodostavat suojaavan ja helposti uudistuvan oksidikerroksen materiaalin pinnalle. Oksidikerroksen tulisi olla tiivis ja hyvin kiinnittynyt, jotta se voisi estää korrodoivien elementtien kuten rikin ja kloorin kulkeutumisen läpi vahingoittamaan perusmateriaalia. Tyypillisesti käytetään nikkeli- tai rautavaltaisia seoksia, joissa on korkea kromi- ja/tai alumiinipitoisuus. Termisesti ruiskutettavilla rautavaltaisilla seoksilla kromipitoisuus on tyypillisesti aina 30 %:iin saakka ja nikkeliseoksilla 50 %:iin saakka. Kromi on tärkeä ja kaikkein käytetyin suojaavan oksidin muodostavista alkuainesta. Kromioksidin muodostavia seoksia voidaan käyttää yleisesti ottaen lämpötilavälillä 500–900 °C:ta. Korkeakromisten terästen (yli 25 %) on raportoitu antavan hyvän suojan hapettavissa ympäristöissä ja suojaavan myös sulfaatteja ja sulfideja vastaan. [4, 18].

Pelkistävissä olosuhteissa korkeakromiset materiaalit pystyvät muodostamaan suojaavan kerroksen, joka koostuu kromista, rikistä ja natriumista. Pelkistävissä olosuhteissa tämän kerroksen korroosiokestävyys kasvaa kromipitoisuuden lisääntyessä. [5]

Alumiini on toinen tärkeä oksidin muodostaja. Alumiinioksidia muodostavat FeCrAl-materiaalit ovat myös tyypillisiä hapettumiskestäviä materiaaleja. Niitä käytetään lämpötilavälillä noin 800–1200 °C:ta, jolloin suojaavan oksidikerroksen muodostumiselle on parhaat edellytykset. [19, 20]. Lämpötiloissa alle 600 °C:ta alumiinioksidin muodostajien ongelmana on, että alumiini ei muodosta suojaava corundi-tyyppistä oksidikerrosta [19]. Metastabiileilla alumiinioksidoilla on puutteelliset suojausominaisuudet. Matalissa lämpötiloissa alumiinin diffuusio on erittäin hidas eikä suojaava oksidikerrosta pääse muodostumaan. Sen sijaan tyypillistä on tällöin rauta-alumiini-kromi sekaoksidin muodostuminen. [20].



Soodakattiloissa mahdollisia pinnoituskohteita ovat kattilan pohja, seinämäputket ja tulistimet. Kattilan pohjan osalta pinnoitteilla pyritään ehkäisemään säröily- ja pistekorroosio-ongelmia. Pinnoitemateriaaleista on hyviä kokemuksia saavutettu esim. Ni50%Cr seoksella.

Kattilan keski-osan korroosio-olosuhteita ei yleensä pidetä kovin aggressiivisena ja tyypillinen oheneminen on materiaalin hapettumista. Kuitenkin, jos voidaan havaita paikallisia ja pistemäisiä syöpymistä/ohenemista, on esitetty tämän johtuvan tyypillisesti pelkistävien olosuhteiden syntymisestä tai suuren kiintoainepitoisuuden omaavan lipeän poltosta. Pinnoitteita voidaan tällöin soveltaa paikallisesti. Pelkistävät olosuhteet ovat haaste myös korkeakromisille pinnoitteille, joiden suojaavuus perustuu oksidikerroksen muodostumiseen. Pelkistävissä olosuhteissa ei oksidikerroksen muodostumiselle ole luontaisia edellytyksiä, jolloin pinnoitteen tiiveyteen on kiinnitettävä erityisesti huomiota. [5]

Tulistinputkien alueella korroosio-olosuhteet ovat syntyvistä kerrostumista johtuen vaikeita, koska muodostuvat kerrokset saattavat olla sulatilassa. Tulistinalueella erityisesti matalaseosteisia teräksiä voidaan suojata pinnoitteilla. Pinnoitteiden suojaavuus alkalisulfidisulia vastaan on voimakkaasti riippuvainen pinnan lämpötiloista. Vielä alle 500 °C:n alapuolella saavutetaan useillakin pinnoitemateriaaleilla hyvä suojaavuus. Vaihtoehtoisia materiaaleja voivat olla esim. rautavaltaiset runsaskromiset teräkset tai NiCr-seokset.

2.4 Pinnoitteen valmistus

Tämä osio käsittelee ruiskuttamalla tehtyjen soodakattilapinnoitteiden valmistusta paikan päällä (on site) ja verstaalla. Lisäksi se antaa soveltuvia testaustapoja, joiden avulla suoritettu pinnoitustyö voidaan hyväksyä.

Se käsittelee pinnan esikäsittelyä, pinnoituksen suoritusta ja pinnoitteiden luonteenomaisia ominaisuuksia: paksuutta, ulkonäköä ja tarttuvuutta. Lopuksi ohje antaa testausmenetelmiä näiden ominaisuuksien toteamiseksi ja käsittelee vanhan pinnan tarkastusta ja korjausta.

Hankintasopimuksessa tulee määritellä pinnoitettava alue, pinnan paksuus, pinnoitettava materiaali, pinnoitusmenetelmä, pinnoitteen tartuntalujuus



alustamateriaaliin ja pinnoitemateriaali. Lisäksi on määriteltävä mahdolliset pinnoitettavan kohteen esikäsittelyprosessit sekä ennen pinnoitusta että sen jälkeen (pesut) ja mahdollinen ulkopuolinen työn valvoja, jolla on tarpeellinen asiantuntemus termisen ruiskutuksen pinnoitteiden ja työn suorituksesta.

2.4.1 Termisellä ruiskutuksella pinnoitettavan pinnan esikäsittely

Termisesti ruiskutettavalla pinnoitteella ei ole perusainetta vastaavaa mekaanista lujuutta, joten putken seinämänpaksuudelle asetetut vaatimukset on varmistettava ennen pinnoituksen suorittamista. Pinnan esikäsittelystä on määritelty standardissa SFS-EN 13507, ”Terminen ruiskutus. Metalliosien ja -komponenttien pintojen esikäsittely ennen termistä ruiskutusta” [21]. Pinta tulee puhdistaa kauttaaltaan ja karhentaa sopivalla kuluttavalla rakeella puhaltaen. Puhallusta jatketaan, kunnes pinta on metallinpuhdas ja rakenteeltaan yhtenäinen. Juuri ennen ruiskutusta on pinnan oltava kuiva, eikä siinä saa olla pölyä, rasvaa, NDT-nesteitä ja geelejä, hilsettä, ruostetta tai muita epäpuhtauksia, joihin kuuluvat myös liukoiset suolat. Liukoiset suolat voivat erityisesti vaikeuttaa pinnoitteen tarttuvuutta kattilan pintaan. Vanhoissa kattiloissa on syytä selvittää tarvittava pesuprosessi ennen pinnoitusta, jolla poistetaan aiemmat putkistojen pinnoille kertyneet suolat. Ennen työhön ryhtymistä on myös selvitettävä poistetaanko vanhan pinnoite kokonaan vai vain osittain. Kullakin pinnoittajalla on omat menetelmänsä suolojen ja kemikaalien poistoon, ja ne on syytä yksilöidä ennen työhön ryhtymistä. Kaikissa tapauksissa on puhdistetun pinnan karheus yksilöitävä vertailukappaleilla, joilla on samanlaiset ominaisuudet kuin työkappaleilla ja jotka on valmistettu osapuolten määrittelemällä tavalla. Ellei muuta ole sovittu, voidaan pinnan puhdistukseen käyttää seuraavia raemateriaaleja:

- Valurautarae, josta hematiitti on erotettu
- Alumiinioksidirae
- Piikarbidirae

Raemateriaalin raekoko on yleensä 0,5–1,5 mm. Olipa puhdistusmateriaali minkä tyyppistä tahansa, sen tulee olla puhdasta ja kuivaa. Varsinkaan se ei saa sisältää liukenevia suoloja. Kun suihkupuhdistuksessa käytetään paineilmaa, on ilman oltava riittävän puhdasta ja kuivaa, jotta raemateriaali tai metallilla ruiskutettava pinta ei likaantuisi. Ilmamäärän tulee olla riittävä siten, että suihkupuhalluksessa suositeltu minimipaine on 6,5 bar käyttöletkun päässä. Edelleen on tarkistettava suihkupuhdistetun pinnan puhdistusaste, niin että se vastaa astetta Sa 3 standardin



SFS-EN ISO 8501-1 mukaisesti [22]. Pinnoitettavasta kohteesta on ennen pinnoitusta tarkistettava mahdolliset viat, säröt, kulumat ja perusaineen vahvuus ym., ja ne on ilmoitettava kirjallisesti pinnoituksen tilaajalle. Jos pinnoitettavalla alueella esiintyy säröilyä, on perusohjeena, että kaikki havaittavat on säröt poistettava, ennen kuin pinnoitus voidaan suorittaa. Pinnoituskohteeseen on varattava riittävä määrä valoa, jotta pinnoitettavan kohteen pinnoitus ja silmämääräinen tarkistus voidaan suorittaa vaivatta. Pinnoitettavan kohteen tarkistus tulee suorittaa myös 15° viistolla valolla, jolloin havaitaan mahdolliset poikkeamat pinnan puhdistuksessa. Lisäpuhallusta vaativat kohdat merkitään liidulla. Pinnoitettavan kohteen ilmanvaihto pitää olla riittävä, jotta pinnan puhdistuksessa ja pinnoituksessa syntyneet pölyt voidaan imeä pois.

2.4.2 Pinnoitemateriaali

Pinnoitemetallin tulee täyttää seuraavat vaatimukset: 1) pinnoitemateriaalin koostumuksen pitää olla selvillä kaupanimen lisäksi, 2) samoin tulee olla selvillä pinnoitteen keskeisimmät alkuaineet ja muoto (lanka tai jauhe), 3) kuten myös pinnoitustapa, valokaari- tai HVOF-menetelmä yms. Pinnoitemateriaalien määrittelyssä voidaan käyttää apuna myös standardia SFS-EN 1274, ”Terminen ruiskutus. Ruiskutusjauheiden kemiallinen koostumus ja tekniset toimitusehdot” [23] sekä standardia SFS-EN ISO 14919, ”Terminen ruiskutus. Langat, puikot, ja täytelangat liekki ja kaariruiskutukseen. Tekniset toimitusehdot.” [24].

2.4.3 Terminen ruiskutus

Terminen ruiskutus voidaan aloittaa puhdistetussa osassa, kun tilaaja on hyväksynyt edellä mainitun pinnan esikäsittelyn. Terminen ruiskutus tulee tehdä pian sen jälkeen, kun pinta on esikäsitelty suihkupuhdistamalla niin, että metalli ruiskutetaan valmisteltuun pintaan, joka on vielä puhdas ja kuiva eikä näkyvästi hapettunut. Käytettävissä oleva aika tulee pitää mahdollisimman lyhyenä, kuitenkin enintään 4 tuntia paikallisten olosuhteiden mukaan. Ruiskutusta ei saa tehdä olosuhteissa, joissa tapahtuisi kondensoitumista ruiskutettavalle pinnalle, ja pinta tulee pitää kastepistettä korkeammassa lämpötilassa. Termistä ruiskutusta suoritettaessa tulee teräksen lämpötilan olla ainakin 3 °C kastepisteen yläpuolella, jotta välttyttäisiin tartunnan heikkenemiseltä perusmateriaaliin. Pinnoitettavan alueen esilämmitys ennen



pinnoitusta on suositeltavaa tehdä 70–80 °C lämpötilaan. Tällä estetään ruiskun palotuoitteiden kondensoituminen pinnalle sekä pienennetään pinnoitteeseen syntyvää vetojännitystilaa. Mikäli pinnoitettava pinta on hapettunut tai likaantunut, tulee sen esikäsitellyksi uusia. Ruiskutuksen pyyhkäisyjen tulee tapahtua pääsääntöisesti kohtisuorassa putkistojen pintaan nähden. Lisäksi ruiskutuspyyhkäisyjen tulee olla putkistojen pituusakselin suuntaisia. Tällöin vältetään mahdollisimman paljon viiston ruiskutuksen aiheuttamaa varjostusvaikutusta.

2.4.4 Sulautuvien seosten ruiskutus

Niin kutsutut sulautuspinnoitteet ovat yksi termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden erikoismenetelmä. Siinä ruiskutus tehdään liekkiruiskulla ja jälkikäsitellään kuumentamalla materiaali noin 1100 °C:een joko liekillä tai uunissa. Sulautusmateriaalien seosaineina on käytetty piitä ja booria, joka laskee materiaalin sulamislämpötilaa alle perusmateriaalin sulamispisteen. Muodostuva pinnoite tiivistyy lämpökäsittelyn seurauksena täysin tiiviiksi ja poistaa termisesti ruiskutetulle pinnoitteelle tyypillisen lamellirakenteen. Tästä on usein etua korroosiota vastaan. Menetelmä soveltuu parhaiten suoritettavaksi ruiskutuspajalla. Pinnoitusohjeena voidaan käyttää Standardia SFS-EN ISO 14920, ”Terminen ruiskutus. Sulautuvien seosten ruiskutus ja sulautus” [25].

2.4.5 Vaaditut ominaisuudet ja pinnoitteen testausmenetelmät

Termisesti ruiskutetuille pinnoitteille voidaan tehdä hyvin vähän yksikäsitteisiä laadun mittauksia. Tällaisia ovat pinnoitteen tartunta alustaan, vetotestit, kemiallinen analyysi sekä abraasio- ja eroosiokulumistestit sekä pinnoitteen paksuus ja pinnoitettu pinta-ala. Mikrorakenteeseen liittyvät seikat, kuten oksidit, huokoiset sulamattomat partikkelit ja karbidien määrä, ovat laboratoriotutkimuksissa vielä kiistanalaisia asioita. Samoin pinnoitteiden kemiallinen kestävyys soodakattilaolosuhteissa voi olla vaikeasti selvitettävissä. Käytännössä pinnoitteiden ominaisuuksia voidaan testata soodakattilassa.

2.4.6 Pinnoitteen ulkonäkö

Pinnoitteen tulee olla tasalaatuinen ilman kuplia tai paljaita alueita, eikä siinä saa olla tarttumaton metallia tai vikoja, jotka voivat olla haitallisia pinnoitteen kestävyydelle



tai suoja-pinnoitteen tarkoituksenmukaiselle käytölle. Epäonnistuneessa kaariruiskutuksessa vikoina voidaan pitää pinnoitelangan pätkiä, pinnan epätasaisuutta ja ylipaksuuteen pinnoitettuja kattilan osia. Ulkonäköä voidaan verrata pinnoittajan toimittamaan vertailupalaan, joka on riittävän suuri, (300*300*10 mm).

2.4.7 Tartunta

Pinnoitteen ja perusaineen tartunta voidaan mitata ennen tilaamista koekappaleella standardin SFS-EN 582: ”Terminen ruiskutus. Vetotartuntalujuuden määrittäminen” [26] mukaisesti. Standardin mukainen testi tehdään erillisille Ø 25 tai 40 mm oleville kiekkoille. Kiekko liimataan tartuntasauvojen väliin ja vedetään vetokoneessa irti. Tällöin voidaan määritellä pinnoitteen tartunta alustamateriaaliin. Pinnoittaja saa tehdä koekappaleen vapaasti kattilassa käytettävillä aineilla ja pinnoitusmenetelmillä. Levyyn tehdyt vetonäytteet antavat yleensä paremmat tartuntalujuudet kuin putkistoon tehdyt pinnoitteet. Suositeltavan pinnoitteen tartuntalujuuden tulisi olla vähintään $> 25 \text{ N/mm}^2$. Hyvä tartunta-alusta materiaaliin kertoo usein onnistuneesta pinnoituksesta. Parhaiden liimojen vetolujuus on tyypillisesti 80–100 MPa, jonka parhaimpien pinnoitteiden tartuntalujuudet saattavat ylittää. Mikäli vetokokeen lopussa ei ilmene pinnoitteen irtoamista perusmateriaalista ennen sovittua murtolujuutta, katsotaan pinnoitteen läpäisseen tyydyttävästi tarttuvuuskokeen. Pinnoitteen tartunnalle voidaan tehdä myös tarkistusmittauksia pinnoituksen aikana, mistä on syytä sopia testaajan kanssa erikseen.

2.4.8 Paksuuden mittaus

Pinnoitteen paksuuden mittaukseen voidaan käyttää kaarimikrometriä tai sähköisiä mittamenetelmiä. Putkimaisia kappaleita mitattaessa on edellä mainitulla haastavaa saavuttaa luotettava tulosta. Paksuuden mittaukset onkin suositeltavaa tehdä magneettisella tai pyörrevirtamenetelmällä. Magneettisten mittausten etuna on, että ne ovat ainetta rikkomattomia, nopeita ja ne voidaan tehdä suoraan mistä tahansa tarkastettavan pinnan kohdasta. Paksuuden mittauksia voidaan tehdä useita satoja kertoja pinnoituskohteesta ja jopa pinnoituksen aikana. Pinnoitteen paksuutta mitattaessa tulee sopia ennen pinnoitusta, millä asteikolla pinnoitteen paksuudet tarkistetaan, koska paksuus voidaan mitata mikrometreinä tai tuhannesosatuumin. Tuumamittaus voi aiheuttaa metriseen järjestelmään tottuneella sekaannusta. Mittalaite kalibroidaan koepalaan, joka on pinnoitettu samalla materiaalilla, jota



kattilan pinnoituksessa käytetään. Paksuuden tarkistuksesta on laadittava pinnoitteen paksuuskartta, jonka pinnoitteen ostaja saa.

Mikroskooppinen tarkastus poikkileikkauksesta tehdään kontrollipinnoitteille. Tällöin pinnoitteista katsotaan yleinen rakenne, pisarakoko, sulamattomat partikkelit, huokoset, oksidit sekä pinnoitteen ja perusmateriaalin rajapinta. Menetelmä on tuloksiltaan subjektiivinen, ja ne ovat riippuvaisia käytetystä materiaalista, ruiskutusparametreista ja -menetelmästä. Mikroskooppitarkastelun ei voi katsoa soveltuvan ensisijaisesti määrittämään pinnoitteen laatua. Mikroskooppisia näytteitä otetaan ensisijaisesti koekappaleista. Mikroskooppinen tarkastusmenetelmä on ainetta rikkova testi, jolloin se soveltuu hankalasti jo pinnoitetun kappaleen ominaisuuksien tutkimiseen. Mahdollisissa vauriotapauksissa voidaan kuitenkin ottaa ruiskutetun kattilan pohjasta 10 -senttisen kokoisia näytteitä ja tehdä niistä rakennetutkimus.

2.4.9 Vanhojen pinnoitteiden tarkastus ja pintojen korjaus

Kattilan seisokkien aikana on syytä tarkastaa pinnoitteiden kunto, jolloin tarkastetaan ensisijaisesti mahdolliset pinnoitteiden vauriot. Silmämääräisesti havaittavia vauriota ovat pinnoitteen irtoaminen sekä mahdolliset korroosio- ja painepesuvauriot. Mikäli havaitaan pinnoitteen irtoamista, voidaan alustavasti tutkia pinnoitteen kiinnipysyvyyttä piikkaamalla pinnoitetta pois vauriokohdan ympäristöstä. Piikkaus tehdään pienellä taltalla ja vasaralla vaurioittamatta putkistoa. Jos pinnoite lähtee helposti putkiston päältä ja sen alla on korroosiotuotetta, on syytä ryhtyä laajempiin jatkotarkastuksiin. Samoin jos pinnoite irtoaa painepesussa, on syytä olettaa, ettei se ole hyvin kiinni alustassaan. Jos vanha pinnoite irtoaa helposti alustasta, on siinä usein jokin piilevä vika, josta on syytä raportoida pinnoittajalle. Mahdollisten vikojen korjausprosessi on selvitettävä ennen työn aloitusta pinnoittajan kanssa. Käytännössä pinnoitteen korjaaminen on hyvin hankalaa koska korjaus pidentää seisokkiaikaa (korjauksen aiheutuu melua/pölyä/myrkyllisiä kaasuja jolloin muiden töiden tekeminen kattilassa on vaikeaa).

2.4.10 Manipulaattorin käyttö pinnoituksessa

Tilaajien kireät pinnoiteruiskutuksen aikatauluvaatimukset aiheuttavat usein kiirettä itse työssä. Tämän vuoksi vaikeissa työskentely olosuhteissa pinnoituksen tasalaatuisuus voi olla vaikea aikaansaada. Pinnoitteen tasaisen laadun kannalta on



tärkeää, että laajoilla pinnoilla käytetään manipulaattorilevitystä (kauko-ohjauksella tai yksinkertaisella ohjauksella varustettu automaattinen käsittelylaite), joka takaa tasaisemman pinnoitteen laadun.

Käsiruiskutuksen voi jättää tällöin vaikeammin suoritettaviin kohteisiin, kuten nurkkiin, seinämille tai yksittäisiin putkiin.

2.5 Yhteenveto

Termisesti ruiskutettavilla pinnoitteilla voidaan suojata soodakattilaputkimateriaaleja korroosiolta. Pinnoitettavia kohteita soodakattiloissa ovat yleensä a) ”mustan” ja compound-putken raja, jossa pinnoitteella estetään galvaanista korroosiota b) tulistinputkien mutkat, joissa pyritään estämään hapettumisen ja korroosion kautta tapahtuvaa ohenemista ja c) paikalliset compound-putkien säröytymien korjaus. Tyypillisesti käytettyjä materiaaliveikkoja ovat erilaiset NiCr-seokset tai rautavaltaiset runsaskromiset seokset. Tilattaessa kattilan pinnoitusta on hyödyllistä ensin määrittellä seuraavat asiat: pinnoitettava alue, pinnan esikäsittelyt, pinnoitteen paksuus, pinnoitemateriaali, pinnoitusmenetelmä, ja pinnoitteen tartunta. Lisäksi on määriteltävä ja dokumentoitava, kuka suorittaa pinnoituksen aikana työn valvonnan ja hyväksymisen.

2.6 Lähdeluettelo

Kirjalliset lähteet:

1. Davis, J.R. (Ed.). Handbook of Thermal Spray Technology. Thermal Spray Society, ASM International, Materials Park, OH, USA (2004). 338 p.
2. Mohanty, P.S., Roche, A.D., Guduru, R.K. and Varadaraajan, V. Ultrafine Particulate Dispersed High-Temperature Coatings by Hybrid Spray Process. Journal of Thermal Spray Technology, 19(2010)1–2, pp. 484–494
3. Sidhu, T., S. Prakash, S. and Agrawal, R.D. Hot corrosion and performance of nickel-based coatings. Current science, 90(2006)1, pp.41–47
4. Crimmann, P., Bendix, D. and Faulstich, M. Investigations on corrosion protective layers in waste incineration plants. Sulzbach-Rosenberg \ D. (2005). http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/investigations_incineration_plants_Basel_2005.pdf.
5. Banovic, S.W., DuPont, J.N. and Marder, A.R. High temperature sulfidation behavior of low Al iron-aluminum compositions. Scripta Materialia 38(1998)12, pp. 1763–1767.

6. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. High temperature corrosion of coatings and boiler steels below chlorine-containing salt deposits. *Corrosion Science* 46 (2004), pp. 1311–1331
7. Tortorelli, P.F., DeVan, J.H., Pint, B.A., Wright, I.G. and Saunders, S.R.J. High-temperature corrosion behaviour of iron-aluminide alloys and coatings. *Proc. Fossil Energy Materials Conf.*, May 1995.
8. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. Elevated temperature erosion/corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments. *Wear* 9069(2002), pp. 19.
9. Totemeier, T.C., Wright, R.N. and Swank, W.D. Microstructure and Stresses in HVOF Sprayed Iron Aluminide Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* 11(3), September 2002, pp. 400–408.
10. Wang, B.Q. and Seitz, M.W. Comparison in erosion behavior of ironbase coatings sprayed by three different arcspray process. *Wear* 250 (2001), pp. 755–761.
11. Branagan, D.J., Breitsameter, M., Meacham, B.E. and Belashchenko, V. High-performance nanoscale composite coatings for boiler applications. *Journal of Thermal Spray Technology* 06/2005, Vol. 14, No. 2, pp. 196–204.
12. Hidalgo, V. Higuera, Varela, J. Belzunce, Menéndez, A. Carriles, Martinez, S. Poveda, High temperature erosion wear of flame and plasmasprayed nickelchromium coatings under simulated coalfired boiler atmospheres. *Wear* 247 (2001), pp. 214–222.
13. Uusitalo, M.A., Vuoristo, P.M.J. and Mäntylä, T.A. High temperature corrosion of coatings and boiler steels in oxidizing chlorinecontaining atmosphere. *Materials Science and Engineering A346*(2003), pp. 168–177.
14. Zanchuk, W. The use of tafaloy 45CT, an Ni-Cr-Ti alloy, as an arc sprayed corrosion barrier in high temperature sulfurous environments. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 39–40, Part 1, 1 December 1989, pp. 65–69, 16th International Conference on Metallurgical Coatings.
15. Zahrani, E.M. and Alfantazi, A.M. Molten Salt Induced Corrosion of Inconel625 Superalloy in PbSO₄-Pb₃O₄-PbCl₂-Fe₂O₃-ZnO Environment. To be published in *Corrosion Science* (2012).
16. Heath, G.R., Polak, R., Tsujita, T. and Gustafsson, S. Roel of Thermal Spray Coatings in Boilers; development of Reliable Spray and Fuse Coatings for Boiler Protection. NTSC, 7-11 October, 1996, Cincinnati, Ohio.
17. Heath, G.R., Heimgartner, P., Irons, G., Miller, R. and Gustafsson, S. An Assessment of Thermal Spray Coating Technology for High Temperature Corrosion Protection.
http://web.castolin.com/wCastolin_com/pdf/publications/essai7.pdf
18. Mayoral, M.C., Andres, J.M., Belzunce, J. and Higuera, V. Study of sulphidation and chlorination on oxidized SS310 and plasma-sprayed Ni-Cr coatings as



simulation of hot corrosion in fouling and slagging in combustion. Corrosion Science 48(2006)6, pp. 1319–1336

19. Lai, G. High Temperature Corrosion and Materials Applications. ASM International, Ohio, USA 2007. P. 461.
20. Grabke, H.J. Surface and interface segregation in the oxidation of metals. Surface and Interface Analysis 30(2000)1, pp. 112–119
21. SFS-EN 13507. Terminen ruiskutus. Metalliosien ja – komponenttien pintojen esikäsittely ennen termistä ruiskutusta. Suomen standardisoimisliitto (2001).
22. SFS-EN ISO 8501-1. Teräspintojen esikäsittely ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa 1: Teräspintojen ruostumisasteet ja esikäsittelyvasteet. Maalaamattomat teräspinnat ja aiemmista maaleista kauttaaltaan puhdistetut teräspinnat (2007).
23. SFS-EN 1274, Terminen ruiskutus. Ruiskutusjauheiden kemiallinen koostumus ja tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto (2005)
24. SFS-EN ISO 14919. Terminen ruiskutus. Langat, puikot, ja täytelangat liekki ja kaariruiskutukseen. Tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto (2002).
25. SFS-EN ISO 14920. Terminen ruiskutus. Sulautuvien seosten ruiskutus ja sulautus. Suomen standardisoimisliitto (1999).
26. SFS-EN 582. Terminen ruiskutus. Vetotartuntalujuuden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto (1994).

Suulliset lähteet:

Henkilökohtainen tiedonanto, Tapio Huuska, Metsä Fibre Oy, Kemin tehdas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Martti Hirttiö, Metsä Fibre Oy Äänekosken tehdas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Lauri Mattila, UPM-Kymmene, Oyj, Pietarsaaren tehtaas, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Juha Rintala, Telatek Oy, 2012.

Henkilökohtainen tiedonanto, Rauno Karvinen, UPM Kymmene Oy, 1997.

Henkilökohtainen tiedonanto, J. Tenkula, Telatek Oy, 1997.



3 PAINEASTIAN KORJAUKSET

Alkuperäinen teksti: Kalle Salmi, Kvaerner-Pulping Oy

Päivitetty teksti: Kestoisuustyöryhmä

3.1 Yleistä

Soodakattilan käyttövarmuuden ja käyttöturvallisuuden ylläpitämiseksi on tehtävä korjauksia, joiden sisältö ja laajuus ovat etukäteen tiedossa. Tämän lisäksi tulee sellaisia yllättäviä tilanteita, joissa paineastiaa joudutaan korjaamaan ilman ennakoivaa tarkempaa suunnittelua. Esimerkiksi paineastian vuotovauriotapaukset ovat tällaisia. Tähän kappaleeseen on kerätty laeista, asetuksista ja muista määräyksistä paineastian korjausta käsitteleviä ohjeita sekä käytännössä esiin tulleita asioita.

Asiakirjat, joihin tässä kappaleessa viitataan, ja muut paineastioita käsittelevät ohjeet ja standardit, muuttuvat edelleen kehityksen seurauksena kohtuullisen nopealla aikataululla. Tekstiin on pyritty lisäämään linkkejä internetsivuille joilta voi ladata viimeisimmät versiot ohjeista/standardeista.

3.2 Oppaat

TUKES on julkaissut seuraavia oppaita liittyen painelaitteisiin:

Painelaiteopas:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/painelaiteopas.pdf

Painelaitteiden kunnossapito:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/painelaite-kunnossapito-opas.pdf

Painelaitteiden määräaikaistestaukset:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/Painelait.mraikaist.pdf

Painelaiterekisteri P1-2002

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P1-02-Painelaiterekisteri/>

Painelaitteiden kunnonvalvonta P1-2000

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P2-00-Painelaitteiden-kunnonvalvonta/>

Painelaitteiden seuranta P2-2000

<http://tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/3Painelaitteet/P1-00-Painelaitteiden-seuranta/>

Painelaitedirektiivin soveltamisohjeita:



http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/3_2009.pdf

3.3 Lait ja asetukset

[Painelaitedirektiivin \(97/23/EY\)](#) velvoitteet on julkaistu Suomessa [painelaitelaissa \(869/1999\)](#) ja [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaitteista \(KTMp 938/1999\)](#). Päätös (938/1999) sisältää painelaitedirektiivin menettelyt painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnittelulle, valmistukselle ja vaatimustenmukaisuuden arvioinnille. Painelaitedirektiivin soveltamisalueen ulkopuolelle jäävät painelaitteita koskevat määräykset, kuten painelaitteen käyttö, korjaukset, muutostyöt ja asennus, on julkaistu [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä painelaiteturvallisuudesta \(KTMp 953/1999\)](#).

Painelaite tarkoittaa säiliöitä, putkistoja, varolaitteita ja paineenalaisia lisälaitteita. Painelaitteiden osiksi luetaan tarvittaessa myös paineenalaisiin osiin kiinnitetyt osat kuten laipat, yhteen, liittimet, nostokorvakkeet jne. Laitekokonaisuus tarkoittaa valmistajan yhtenäiseksi ja toiminnalliseksi kokonaisuudeksi kokoamia useita painelaitteita. Säädöksiä sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine (PS) on yli 0,5 bar.

Painelaitelain mukaan painelaite on rakennettava ja sijoitettava ja sitä on hoidettava, käytettävä ja tarkastettava niin, ettei se vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Painelaitteen markkinoille saattajan, esimerkiksi valmistajan tai maahantuojaan, on voitava osoittaa, että painelaite sekä sen suunnittelu ja valmistus täyttävät säädetyt vaatimukset. Vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt perustuvat moduuleihin (A, ...H1, G), jotka on esitetty [KTM:n painelaitepäätöksen \(938/1999\) liitteessä III](#).

Useimmissa painelaitedirektiivin mukaisissa painelaitteissa vaaditaan CE-merkintä osoituksena vaatimusten täytymisestä. Vaarattomimpiin painelaitteisiin ei tule CE-merkintää.

Painelaitesäädösten vaatimuksia on tarkemmin kuvattu TUKESin julkaisemassa [painelaitteoppaassa](#).

3.4 Hitsauksen laatu



Standardit [SFS-EN ISO 3834-2](#), “Hitsauksen laatuvaatimukset. Metallisten materiaalien sulahitsaus. Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset” ja [SFS-EN ISO 17663](#), “Hitsaus. Hitsauksen ja sen lähiprosessien yhteydessä suoritettavan lämpökäsittelyn laatuvaatimukset” ovat hyviä apuvälineitä sekä valmistavassa että korjaavassa hitsauksessa laatutoimintojen hallintaan. Standardi täydentää hitsaavan yrityksen mahdollisesti olemassa olevaa laatujärjestelmää.

3.5 Hitsaajan pätevyydistukset

Korjaustyötä tekevällä hitsaajalla on oltava voimassa oleva pätevyyskoe, joka on teräksille standardin [SFS-EN 287-1](#) mukainen.

3.6 Hitsausohjeet

"Hitsausohjeita tarvitaan hitsauksen aikana hitsaustöiden suunnittelun perustaksi sekä laadun valvontaan. Hitsaus katsotaan erikoisprosessiksi laatujärjestelmästandardien terminologiassa. Laatujärjestelmästandardit edellyttävät yleensä, että erikoisprosessien suorituksessa noudatetaan kirjallisia menettelyohjeita. Hitsausohje (WPS) on asiakirja, joka on hyväksytty jollain seuraavista hyväksymistavoista:

- aikaisempi hitsauskokemus
- hyväksytty/testattu hitsausaine
- menetelmäkoe
- standardihitsausohje
- esituotannollinen koe

ja jossa esitetään vaadittavat hitsausmenetelmän muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi tuotantohitsauksessa (otteet standardista [SFS-EN ISO 15607](#)).

Hitsausohjeen käyttäminen luo perustan sille, että hitsi on vaatimusten mukainen, mutta ei sinänsä vielä takaa sitä. Sen käyttö vähentää oleellisesti kuitenkin hitsausvirheitä. Myös lämpökäsittelyä voidaan pitää tällaisena erikoisprosessina, josta pitää olla kirjalliset ohjeet.

Muutamia hitsausstandardeja:

- [SFS-EN 1011](#) osat 1-8 Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksukset
- [SFS-EN 12952-5 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 5: Paineellisten osien valmistus](#)

3.7 Asennus-, korjaus- ja muutostyöt



Käytössä olevien painelaitteiden asennus-, korjaus- ja muutostöissä sovelletaan [kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaiteturvallisuudesta \(953/1999\)](#).

Asennus-, korjaus- ja muutostyön tekevä toiminnanharjoittaja voi käyttää:

- painelaitteen valmistuksessa aikoinaan hyväksyttyä suunnitelmaa ja hitsausohjetta, jos tarkastuslaitos pitää niitä turvallisina ja ne kattavat työn
- tarkastuslaitoksen riittäväksi katsomallaan menettelyllä hyväksymää hitsausohjetta, jos kyse on yksittäistapauksesta
- uusien painelaitteiden valmistuksessa soveltamaansa vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä
- päätöksessä (953/1999) annettua vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä.

Hyväksytty laitos ja omatarkastuslaitos tekevät asennus-, korjaus- ja muutostöihin liittyvät tarkastustehtävät. Pysyvien liitosten menetelmien, niitä tekevien henkilöiden ja rikkomatonta aineenkoetusta tekevien henkilöiden vaatimukset ovat samat kuin uusien painelaitteiden valmistuksessa. Toiminnanharjoittaja antaa tilaajalle asennus-, korjaus- ja muutostyön vaatimustenmukaisuusvakuutuksen. CE-merkinnän vaatimusta ei sovelleta.

Painelaitteen vaihtamiseen kokonaisuudessaan, sen erityisen merkittävään muutostyöhön ja kokonaan uuden putkiston asennukseen sovelletaan yleensä kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaitteista (938/1999). Tällöin painelaitteeseen tulee yleensä myös CE-merkintä.

Korjaustyöhön ja asennukseen liittyy seuraavanlaisia asiapapereita:

- korjaussuunnitelma mahdollisine piirustuksineen, hitsaussuunnitelmineen ja lujuuslaskuineen
- tarkastuslaitoksen päätös korjaussuunnitelman tarkastuksesta ja hyväksynnästä
- materiaaliluettelo käytetyistä aineista
- rakenneainetodistukset
- lämpökäsittelytodistukset
- korjausselostus
- valmistuksen valvojan vakuutus
- hitsaajaluettelo ja heidän pätevyytensä
- NDT-tarkastuspöytäkirjat ja röntgenfilmit
- tarkastuslaitoksen hyväksyntä korjaukselle
- vaatimustenmukaisuusvakuutus

Edellä mainituista asiapapereista jää yleensä yksi kappale paineastian omistajalle ja yksi valmistajalle.



Luontevin toimintatapa on se, että korjauksen toimittaja hoitaa hyväksynnit ja kyseiseen tapaukseen liittyvän dokumentoinnin.

3.8 Paineekoe

[Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös \(953/1999\)](#) toteaa paineastian painekokeen suorittamisesta:

”Painelaitteen painekokeessa on todettava, ovatko painelaitteen paineenalaiset seinämät koepaineessa tiiviit ja esiintyykö rakenteessa turvallisuutta vaarantavia muodonmuutoksia. Kokeen tekemisessä on otettava huomioon painelaitteen valmistajan mahdollinen ohje.

Paineekoe on tehtävä nesteellä. Koe voidaan kuitenkin tehdä kaasulla, jos nesteellä tehty painekoe ei rakenteellisista syistä ole kohtuudella mahdollinen tai painelaitteessa ei voida sallia pieniäkään nestemääriä. Koe on tehtävä noudattaen tarpeellista varovaisuutta.

Nestepaineekoe on tehtävä vähintään paineella, joka on 1,3 kertaa suurin sallittu käyttöpain ja kaasupaineekoe paineella, joka on 1,1 kertaa suurin sallittu käyttöpain. Jos erityiset syyt vaativat, tarkastuslaitos voi hyväksyä käytettäväksi muun koepaineen.

Paineekoe on tehtävä joka toisen sisäpuolisen tarkastuksen yhteydessä. Koetta ei tarvitse kuitenkaan tehdä painesäiliölle ja putkistolle, joiden sisäpuolisessa tarkastuksessa on voitu riittävästi varmistua rakenteen eheydestä ja lujuudesta. Kokeen poisjättämisen perustelut on esitettävä tarkastuspöytäkirjassa ja kokeen poisjättäminen on arvioitava uudestaan jokaisessa seuraavassa sisäpuolisessa tarkastuksessa.”

3.9 Korjauksen luonne

3.9.1 Ennakkoon valmisteltu korjaus

Normaaleihin huoltoseisokkeihin ajoittuviin paineastian korjauksiin valmistaudutaan yleensä riittävän ajoissa ja riittävän suunnitelmallisesti. Hyvällä etukäteisvalmistelulla ja asiantuntemuksella (toimittajavalinta) saadaan aikaan hyvä lopputulos.



Jos korjauskohde tai -tapa on erityisen vaativa tai poikkeuksellinen (esimerkiksi huono luoksepäästävyys tai harvinainen työtapa), voidaan toimittaja velvoittaa tekemään sellainen työkoe, joka vastaa mahdollisimman hyvin korjausolosuhteita joko konepajaolosuhteissa tai tulevalla työmaalla.

3.9.2 Ennalta arvaamattoman tapahtuman korjaus

Tilanne muuttuu oleellisesti, kun joudutaan korjaustilanteeseen yllättäen joko vaurion tai huoltoseisokitarkastuksen seurauksena. Tällöin lähes kaikki ennakkovalmistelut ovat tekemättä. Tällöinkin pitää muistaa lait ja asetukset sekä työturvallisuus. Laitoksilla tulisi olla kattilan jokaiseen eri lämpöpintaan kohtuullinen määrä sellaista varaosaputkea, jolla voidaan korvata vanhaa ja mahdollisesti vaurioitunutta putkea. Yleensä lämpöpintaputki voidaan vaihtaa parempaan (lujempaan) samoilla ulkohalkaisijadimensiolla ja/tai paksummalla seinämällä olevaan putkeen. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että hitsaustyö vaikeutuu ja lämpökäsittely on mahdollisesti tarpeellinen, kun mennään lujempiin ja/tai runsaasti seostettuihin teräksiin. Kattilan käyttäjillä tulisi olla yhteystiedot kattilan toimittajaan, jolloin on mahdollista saada asiantuntevaa teknistä apua ja mahdollisesti materiaaleja kussakin tapauksessa.

Vauriotapauksissa, korjausseisokin aikana, tulisi kiinnittää huomiota niihin tekijöihin, jotka ovat mahdollisesti vaikuttaneet vaurioon. Dokumentointi, esimerkiksi valokuvat, tarkastusraportit ja silmämääräiset havainnot tapahtumapaikalta antavat usein selvyyttä vaurion syistä. Syiden selvitys on tärkeää siksi, että voidaan mahdollisesti poistaa vaurion aiheuttaja tai oleellisin syy, joka on johtanut vaurioon.

3.9.3 Hitsauksen korjaus

Yleisperiaatteena voidaan pitää sitä, että hitsiä voidaan korjata hitsaamalla kaksi kertaa, jos kyseessä on pienehkö hiomalla avattavissa oleva hitsausvirhe. Poikkeuksena valmiiksi hitsatun compound-putken päittäisliitoshitsi, jota ei voi korjata luotettavasti materiaalien sekoittumisen takia.

Korjaushitsauksessa pitää käyttää samaa alkuperäisen hitsin aikaansaamiseksi käytettyä hitsausohjetta. Mikäli ajaudutaan sellaiseen tilanteeseen, jossa lämpöpintaputken hitsi ei täytä laatukriteereitä kahdella korjauskerralla, on perusteltua katkaista alue pois ja asentaa tilalle uusi putki. Tällainen tilanne saattaa helposti



syntyä esimerkiksi silloin, kun hitsisulaan tipahtaa kattilassa olevia suoloja. Myös silloin, kun särö on edennyt hitsialueella lämpöpintaputken seinämän läpi, on hyvän lopputuloksen kannalta varmempaa katkaista kyseinen putki vaurion kohdalta, jotta tarkastuksessa on helpompi löytää kaikki mahdolliset särön haarat.

Pintatarkastuksissa esiin tulleet näyttämät hitsin ja perusaineen liittymässä voidaan useasti poistaa pyöreällä viilalla, kunhan varmistetaan, että kyseessä on pienehkö reunahaava tai jyrkkä palon liittymä. Hiontaa/viilausta pitää jatkaa niin pitkälle, että näyttämät poistuvat. Pyöristämisellä saadaan aikaan myös jouhea jännitysjakautuma, jolloin väsymissärön liikkeelle lähtö ei tapahdu niin helposti kuin teräväpohjaisesta urasta.

Jos hionta- tai viilaussyvyys hitsin liittymässä perusaineeseen on niin suuri, että sen perusteella voidaan päätellä näyttämän olevan muuta kuin pelkkä hitsausvirhe, on se merkki jostakin merkittävämmästä ilmiöstä. Kyseessä saattaa tällöin olla materiaalin väsyminen ja väsymissärö. Jotta syy väsymiseen pystytään selvittämään, tulisi tehdä vähintään silmämääräisiä tarkistuksia ympäristöstä, jotta nähdään esimerkiksi sidontojen kunto ja niiden osuus vauriossa.



4 SOODAKATTILATARKASTUKSET

Alkuperäinen teksti: Esa Ilves, Keskeytysvakuutusosakeyhtiö Otso

Päivitetty teksti: Inspecta Oy

4.1 Yleistä

Tämä suositus on tarkoitettu käynnissä oleville laitoksille. Valmistuksessa ja korjauksissa toimitaan tuotestandardien mukaisesti ([Vesiputkikattila SFS-EN 12952, jne.](#)).

Määräaikaisvaatimukset tulevat kauppa- ja teollisuusministeriön [päätöksestä painelaiteturvallisuudesta 953/1999](#). Päätöksen mukaan vähimmäisvaatimus on joka toinen vuosi käyttötarkastus, neljän vuoden välein sisäpuolinen tarkastus ja kahdeksan vuoden välein painekoe. Osa määräaikaistarkastuksista voidaan korvata hyväksytyn laitoksen tarkastuskohdetta varten vahvistamalla kunnonvalvontajärjestelmällä, jos se vaikutukseltaan vastaa määräaikaistarkastusta. Kunnonvalvontajärjestelmästä on [TUKES julkaissut ohjeen P2-2000](#).

Tämä suosituksen lähtökohtana on, että soodakattilalle tehdään tarkastuksia jokaisessa huoltoseisokissa. Soodakattilatarkastuksien onnistumisen perusedellytykset ovat:

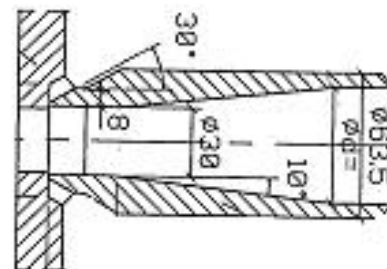
- Pitkántähtäimen tarkastussuunnitelmat ja tarkastusohjeet
- Pätevöitetyt tarkastajat: EN-pätevyys
- Kunnolliset tarkastusolosuhteet: työturvallisuus, telineet, valaistus ja puhdistus
- Realistinen aikataulu

Edes 100 %:lla tarkastuslaajuudellakin kohde tulee vain harvoin täysin luotettavasti tarkastettua. NDT-menetelmät ovatkin toisiaan täydentäviä ja vain harvoin toisiaan täysin korvaavia. Esimerkiksi ultraäänitarkastus paljastaa huonosti kolmiulotteiset viat, kuten esim. huokokset. Röntgen on herkkä säteilykeilan suuntaisille tasomaisille vioille, mutta epäherkkä säteilysuunnasta poikkeaville vioille.

NDT-menetelmien avulla voidaan ohjata hitsauksen laatua. On myös järkevää panostaa hitsausvalvontaan, johon tärkeänä osana kuuluvat menetelmä- ja hitsaajakohtaiset työkokeet. Kun tarkastuslaajuus on vähemmän kuin 100 % tulee, vaaditun tarkastuslaajuuden täyttyä hitsaajakohtaisesti.

Valmistuksen aikana tarkastusmenetelmiä ja -laajuutta arvioitaessa on huomioitava viranomaismääräykset sekä kohteen sijainti sulavesiräjähdyssä, korjattavuutta ja käytönaikaisia tarkastuksia ajatellen. Suunnitteluvaiheessa tulee jo arvioida

mahdolliset vikaantumismekanismit ja käyttää NDT-asiantuntijoita arvioimaan rakenteiden tarkastettavuus.



Kuva 4-1. Ekonomaiserin jakotukin yhde.

Kuvassa 5-1 on hitsiliitos, jonka luotettava volymetrinen tarkastus NDT-menetelmillä on käytännössä mahdotonta. Valokuvan perusteella vuoto on yhteen perusaineen epäjatkuvuuskohdassa, joka paikantuu hyvin lähellä muutosvyöhykettä (HAZ-alue Heat Affected Zone). Tämän alueen lujuus on muuta rakennetta heikompi ja liikkeestä aiheutuva väsyttävä kuormitus kohdistuu ko. kohtaan. Putken ulkopinnalta alkava putken väsymissärö voidaan todeta magneettijauhetarkastuksella. Jos rakennetta ei muuteta, niin ko. kohteelle on suoritettava pintatarkastus lähes vuosittain.

Laajoissa revisioissa NDT-tarkastuksille pitää olla selkeästi nimetty vetäjä, joka tuntee kattilarakenteet, niiden tarkastettavuuden ja niihin liittyvät vikaantumismekanismit.

Sen lisäksi että tarkastuksista tehdään asianmukaiset tarkastuspöytäkirjat, tarkastuksessa havaitut merkittävät viat/poikkeamat tulee merkitä rasvaliidulla tai vastaavalla kohteeseen, jotta korjaavat toimenpiteet tehdään oikeaan kohtaan ja ajallaan.

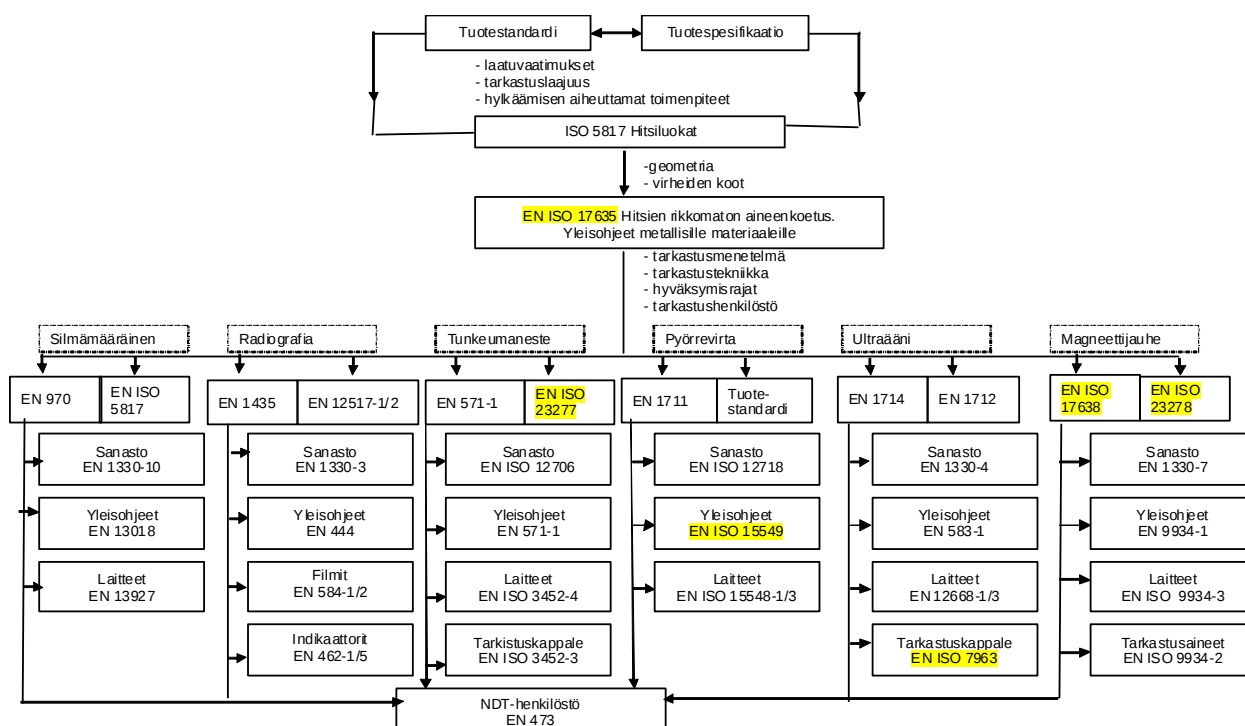
Huoltoseisokin aikaisissa tarkastuksissa menetelmä valitaan sen mukaan, mitä vauriomekanismia ollaan etsimässä. Tarkastuksissa haetaan seuraavia ilmiöitä tai vauriomekanismeja: eroosio, korroosio, väsyminen, viruminen, ylikuumentuminen, jännityskorroosio, korroosioväsyminen, terminen väsyminen, puutteellisen tuennan aiheuttamat rasitukset, väärä vesikemia jne.

NDT-tarkastusmenetelmät ovat vertaavia, eli tarvitaan kalibrointikappale tai vastaava. Tästä syystä vauriotapauksessa on aina syytä ottaa näytekappale ja säilyttää se tulevia NDT-tarkastuksia ja opetusta silmällä pitäen.

4.2 Tarkastusmenetelmät

Yleisesti NDT-menetelmät voidaan jakaa pintatarkastuksiin ja volymetrisiin tarkastuksiin. Tärkeimmät ja yleisimmin käytettävät tarkastusmenetelmät ovat visuaalinen tarkastus, röntgenkuvaus, ultraääni-, magneettijauhe- ja tunkeumaneste- ja pyörrevirtatarkastus.

Yleisellä tasolla NDT-menetelmien käytöstä saa hyvän kuvan standardista [SFS-EN-ISO 17635](#), jossa on annettu suositukset hitsien tarkastamiselle eri materiaaleille ja menetelmille.



Kuva 4-2. Kaaviossa on esitetty vuoden 2010 lopussa voimassa ja työn alla olevat hitsien tarkastukseen liittyvät standardit. Tarkemmin standardit löytyvät linkin (http://www.metsta.fi/standardisointialueet/Kansalliset_komiteat/K89.php) kohdasta NDT standardisoinnin tilannekatsaus. Standardien päivityksestä löytyy myös tietoa MetSta:n nettisivuilta kohdasta [standardisointialueet](#)

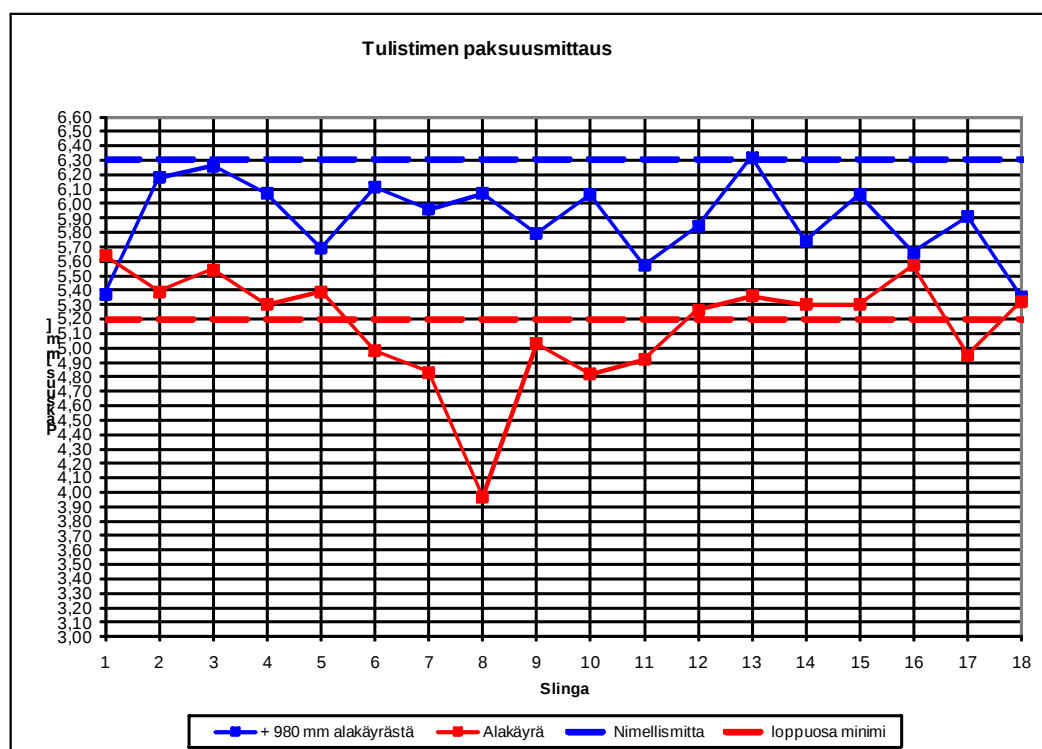
4.2.1 Silmämääräinen tarkastus/VT (visual testing)

- Menetelmistä kaikkein tärkein, jolla havaitaan parhaiten kattilassa tapahtuneet muutokset.
- Hitsien silmämääräinen tarkastus [SFS-EN 17637](#)
- Nykyisin testaajilta vaaditaan EN-pätevyys

- Tekijän on tunnettava kattilan rakenne ja mahdolliset vauriomekanismit
- Vaatii hyvän valaistuksen
- Suurennuslasi ja peili ovat usein välttämättömiä apuvälineitä
- Käytä valokuvausta ja videointia!
- Endoskooppi hyvä apuväline

4.2.2 Paksuusmittaus/ TM (thickness measurement)

- Paksuusmittauksesta on oma standardi [SFS-EN 14127-2 ”Paksuusmittaus ultraäänellä”](#)
- Mittauksissa suositellaan käytettäväksi a-kuvallista mittalaitetta. A-kuvassa x-akseli kertoo näyttämän paikan (aika / mm) ja y-akseli näyttämän amplitudin.
- A-kuva mahdollistaa taustakaiun ja kerrannaiskaikujen vaimenemisen seuraamisen, mikä antaa viitteitä sisäpuolisesta likaantumisen tai korroosiosta.
- Vaativissa mittauskohteissa suositellaan tarkastajalle UT:n EN-pätevyyttä.
- Ohentuminen voi olla epäsymmetristä: esim. seinäputken mittauksessa mittausikkuna on evästä evään.
- Kohdassa erikoismenetelmät käsitellään muita paksuusmääritys menetelmiä mm. EMAT ja RFET.



Kuva 4-3. Tulistimen paksuusmittaustulokset kaaviona.

Kuvassa 5-3 punainen suoraviiva kuvaa kohteen laskennallista minimiä. Ennen paksuusmittauksien suorittamista on kyseisen kohteen kriittiset rajat selvitettävä tarkastuksien vetäjille ja ennen kaikkea mittauksia suorittaville henkilöille, jotta alimittaisuudesta saadaan välittömästi tieto kattilanomistajalle.

4.2.3 Magneettijauh tarkastus / MT (magnetic particle examination)

- Hitsausliitosten magneettijauhetarkastuksen standardit ([SFS-EN ISO 17638](#) ”[Hitsien rikkomaton aineenkoetus, Magneettijauhetarkastus](#)”. vahvistettu 23.8.2010, vanha SFS-EN 1290).
- Testaajalta vaaditaan EN-pätevyys.
- Pintamenetelmä, jossa kohteen on oltava magnetoituva ferriittinen teräs (hiiliteräs), jolloin lähes aina on suositeltavaa käyttää magneettijauhetarkastusta haettaessa särötyyppejä vikoja.
- Fluoresoiva menetelmä parantaa tarkastuksen herkkyyttä, mutta vaatii hämärän ympäristön ja ultraviolettivalon.
- Magneettijauhetarkastuksessa on myös sovellettu vieruskaapelimenetelmää, joka mahdollistaa ahtaiden kohteiden tarkastamisen ("putkirykelmät").
- Päähöyryputkiston MT tarkastukset on suositeltavaa tehdä fluoresoivalla menetelmällä hiottulle (n 120 Grit) pinnalle, kun etsitään virumisen aiheuttamia säröjä.

4.2.4 Tunkeumanestetarkastus / PT (liquid penetrant examination)

- Hitsausliitosten tunkeumanestetarkastuksen standardit: [SFS-EN ISO 23277](#) ”[Hitsien rikkomaton aineenkoetus, Hitsien tunkeumanestetarkastus, Hyväksymisraajat](#)”. vahvistettu 23.8.2010. Vanha SFS-EN 1289, SFS-EN571-1 ”Rikkomaton aineenkoetus. Tukeumanestetarkastus. Osa 1. Yleisperiaatteet”
- Testaajalta vaaditaan EN-pätevyys.
- Pintamenetelmä, joka soveltuu kaikille muille paitsi huokoisille materiaaleille.
- Paljastaa pintaan asti ulottuvat viat (myös pintahuokokset ja kuonan, jotka eivät näy luotettavasti magneettijauhetarkastuksessa)
- Vaatii pinnan puhdistamisen metallipinnalle.

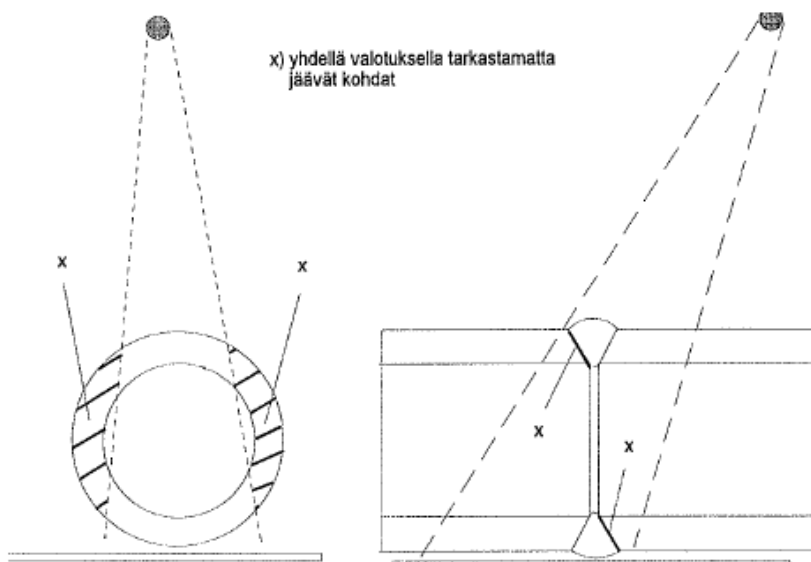
Kattilaolosuhteissa on suositeltavaa käyttää fluoresoivaa menetelmää, joka helpottaa tunkeumanesteen poistoa/puhdistusta erityisesti silloin, kun käytetään vedellä poistettavaa tunkeumanestettä. Riittävä puhtausaste nähdään heti uv-valossa eikä kohdetta tarvitse puhdistaa varmuuden vuoksi, kuten värillisellä menetelmällä joudutaan tekemään. Jos puhtausaste ei ole riittävä, lian aiheuttamat indikaatiot peittävät todelliset viat. Mikäli epäillään esim. kattilapesun aiheuttamaa kosteutta säröissä, niin rakenne on kuivattava. Apuna voidaan käyttää lämmittämistä (vältettävä suoraa liekkiä) tai kehitettä, jolla imetään kosteus ennen tunkeumanesteen levitystä.



Kuva 4-4. Fluoresoivalla tunkeumanesteellä tarkastetun pohjan särönäyttämiä

4.2.5 Radiografia/RT (radiographic examination)

- Standardit:
 - [SFS EN ISO 17636 -1 "Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 1: X- and gamma-ray techniques with film"](#) vahvistettu 4.3.2013
 - [SFS EN ISO 17636 -2 "Non-destructive testing of welds. Radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors"](#) vahvistettu 4.3.2013
 - [SFS-EN 12517-1 "Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Osa 1: Teräksestä, nikkelistä, titaanista ja niiden seoksista hitsattujen hitsausliitosten arviointi radiografisella kuvauksella. Hyväksymisrajat"](#).
- Tarkastajalta vaaditaan EN-pätevyys
- Volymetrinen tarkastus, joka soveltuu erityisesti kolmiulotteisten vikojen, kuten huokosten ja kuonan toteamiseen.
- Lineaaristen vikojen, kuten liitosvikojen ja halkeamien suhteen valotus on tehtävä vian suuntaisesti. Kuvassa 5-5 on esitetty ellipsikuvauksessa yhdellä valotuksella tarkastamatta jäävät alueet. Hitsin täysin kattava röntgenkuvaus vaatii 4 valotusta, mikä jo kustannussyistä jää toteutumatta.
- Säteilylähteinä voidaan käyttää isotooppeja, puoli- ja tasavirta röntgen koneita sekä pulssikoneita (digitaalinen)
- Röntgen kuvauksen kohteet kunnonseurannassa ovat mm. korroosiokuvaus myös eristeiden läpi, ruiskujen kunto rakennetta purkamatta, jne.
- Digitaalinen radiografia tulee yleistymään kunnonseurannassa, koska se on reaaliaikaista, nopeampaa verrattuna filmitekniikkaan, rajalliset säteilymäärät ja säteilykeilan suuntaaminen mahdollista.



Kuva 4-5. Ellipsikuvauksessa yhdellä valotuksella tarkastamatta jäävät alueet.

Soodakattilaympäristöön soveltuvana sovelluksena on isotoopilla suoritettu korroosiokuvaus.

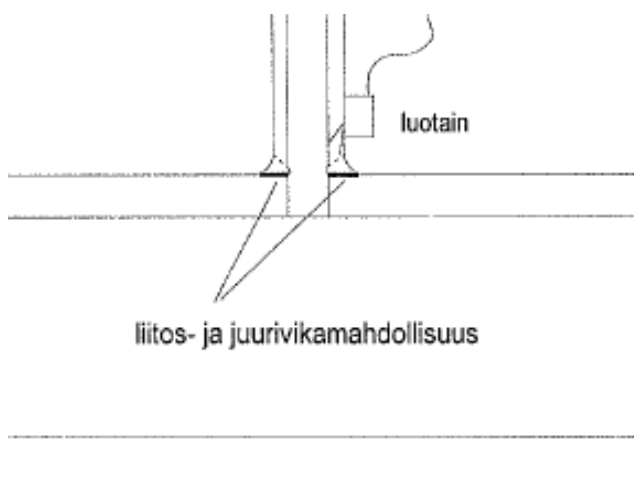
4.2.6 Ultraäänitarkastus / UT (ultrasonic examination)

Standardit:

- [SFS-EN 11666 ”Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten ultraäänitarkastus Hyväksymisrajat”](#) (vanha SFS-EN-1712 sekä 1714)
- ”
- [SFS-EN ISO 23279 ” Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien ultraäänitarkastus. Hitsausvirheiden tyypin määrittäminen”](#) (päivitetty 24.2.2010, vanha SFS-EN 1713)

Ultraäänitarkastus on volymetrinen menetelmä, joka paljastaa kaksidimensionaaliset viat, kuten liitosvian ja halkeaman. Lineaarisen vian on kuitenkin oltava lähes kohtisuoraan äänikeilaan nähden, mikä paksummassa aineessa edellyttää useamman luotauskulman käyttämistä. Nykyaikaisella vaiheistetulla UT-tarkastuslaitteistolla mahdollistaa useamman luotauskulman samanaikaisen käytön yhdellä scannauksella. Hitsiin nähden poikittaiset viat vaativat hitsin suuntaisen luotauksen. Hitsien tarkastuksessa UT-menetelmää on syytä täydentää pintamenetelmillä, jotta kaiken suuntaiset pintaviat todetaan.

Ultraäänitarkastusta käytetään nykyisin menestyksekkäästi standardin vastaisesti ohuiden materiaalien (seinämä < 8 mm) tarkastuksessa. Esim. jakotukin ja putken välistä pienaliitosta (kuva 5-6), jossa liitosvian mahdollisuus on suurempi kuin päittäisliitoksessa, ei voida tarkastaa röntgenkuvauksella. Ultraäänitestauksen herkkyys vikojen suhteen (ei herkkä kolmeulotteisille vioille) ei ole sama kuin optimikulmassa tehdyllä röntgenkuvauksella, mutta se on nopeampi suorittaa eikä vaadi kattilan tyhjentämistä muista työntekijöistä. Tarkastuksen luotettavuutta voidaan parantaa magneettijauhe- tai tunkeumanestetarkastuksella ja/tai pistokoeluontoisella röntgenkuvauksella (kuona ja huokoset).



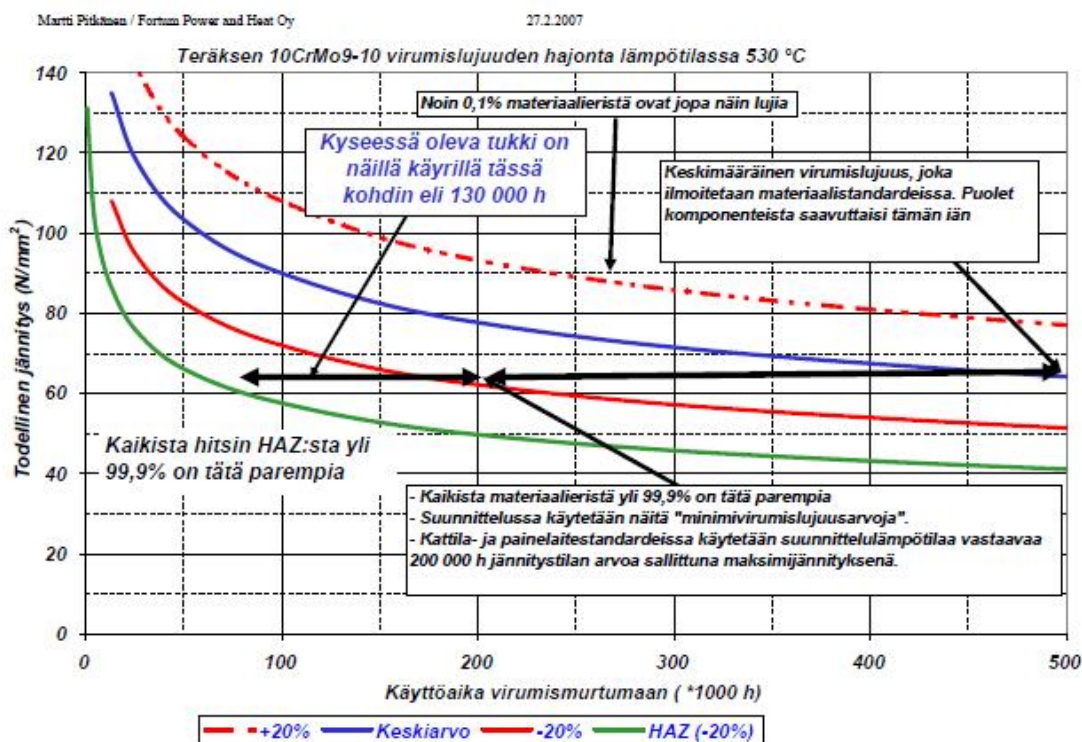
Kuva 4-6. Jakotukin ja putken välinen pienaliitos.

4.2.7 Pyörrevirtatarkastus/ET (eddy current testing)

- [SFS-EN 1711 “Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien pyörrevirtatarkastus kompleksitasoanalyysillä”](#)
- Ei reagoi veteen
- Maalikalvo mahdollinen
- Soodakattilan pohjan pyörrevirtatarkastus
- Pohjan compound-tarkastus
- Särön syvyyden määrittäminen, kalvonpaksuuden määrittäminen
- Suurin käyttö on lämmönvaihtimien putkien sisäpuolisessa tarkastuksessa, kun kyseessä on sähköä johtava metalli
- Käytetään myös pintatarkastusmenetelmänä (myös ferriittinen teräs)
- Erikoissovellutuksina ferriittisen materiaalin tarkastukset kaukokenttä- (RFET) ja magneettinen vuotokenttä (MFL) menetelmillä.

4.2.8 Jäljennemenetelmä/REP (replica)

- Paineastiat ja putkistot
- Virumisasteen arviointi [SFS 3280](#) / [ISO 3057](#) / Nordtest ohjeen mukaisesti.
- Menetelmällä määritetään metallin virumis- ja hajaantumisasia mikrorakenteesta jäljenteen avulla. Viruminen alkaa tyypillisesti yli 450 °C lämpötiloista ja on materiaalista riippuvainen.
- Ennen hitsien jäljennetarkastusta suoritetaan aina magneettijauhetarkastus fluoresoivalla menetelmällä, jolla saadaan lisäarvoa tarkastukseen.
- Jäljennemenetelmällä voidaan paljastaa virumisasteen lisäksi ylikuumeneminen ja selvittää säröilyn syytä ainetta rikkomatta.



Kuva 4-7. 10CrMo9-10 KP-tukin perusaineen ja hitsin virumislujuuden hajonta ja käyttäminen käyttötuntien mukaan. Perusmateriaalille suunniteltu käyttöikä 200 000 h (-20%) saattaa HAZ-alueella pudota jopa alle 100 000 käyttötunnin n 60 N/mm²



jännitystasolla. Syynä tähän HAZ:n heikompi virumislujuus /Fortum Service, Martti Pitkänen/.

Virumisen mukaan mitoitettujen komponenttien hitsien kuntoon pitää kiinnittää erityistä huomiota ja aloittaa tarkastukset kriittisten komponenttien osalta selvästi ennen suunnittelussa käytettyä elinikää. Kriittiset komponentit päähöyryputkistossa ovat mm. T-haarat ja jakotukit, joissa yhdeputken halkaisija on hyvin lähellä itse pääputkea.

4.2.9 Endoskooppitarkastus/END (endoscopy)

- Endoskoopilla tai putkistokameralla päästää tarkastamaan rakenteita ahtaissa kohteissa, kuten putkissa, onkaloissa ja raoissa.
- Menetelmällä täydennetään sisäpuolista tarkastusta
- Nykyisillä endoskoopeilla on mahdollista mitoittaa vikoja ja näyttämiä käyttämällä varjostavia tai stereolinssejä. Samalla ne mahdollistavat videoinnin ja valokuvauksen.

4.2.10 Akustinen emissioseuranta / AE (acoustic emission)

- Painekekeiden ja rakenteiden käytönaikainen valvonta
- Voidaan käyttää rakenteen kuunteluun säröilyn ja rasituksen toteamiseksi sekä atmosfääriin kuunteluun vuotojen ilmaisemiseksi. Putkirikko kasvaa vuodon seurauksena ja pienikin vuoto voi aiheuttaa viereisen putken vaurioitumisen, mikä lisää esim. sulavesiräjähdyriskiä.
- Rakenteen kuuntelu tehdään aaltotankojen (hitsattu putkeen) välityksellä. Ne mahdollistavat antureiden asennuksen eristeen ulkopuolelle ja samalla pudottavat antureiden lämpötilaa.
- AE-seuranta auttaa ohjaamaan muiden tarkastusmenetelmien käyttöä.
- Antaa tietoa ajokäyttäytymisen vaikutuksista ja siitä, missä vaiheessa käyttöä vioittuminen mahdollisesti tapahtuu.

4.2.11 Lämpökuvaus (thermography)

- Lämpökamera mittaa kohteiden lähettämää lämpösäteilyä (infrapuna-aallonpituus), joka voidaan muuttaa lämpötiloiksi kalibroinnin avulla.
- Voidaan käyttää laajasti kunnonseurannassa laitoksen käynninaikana.
- Lämpökuvaus on nopea menetelmä tarkastella laajoja alueita ja useita kohteita samanaikaisesti.
- Lämpökameran käyttö edellyttää menetelmän syvällistä osaamisesta (emissiivisyys, lämmönsiirtyminen...)
- On käytetty mm. kattilan täytön seurannassa.

4.2.12 Kovuusmittaus/HT (hardness test)

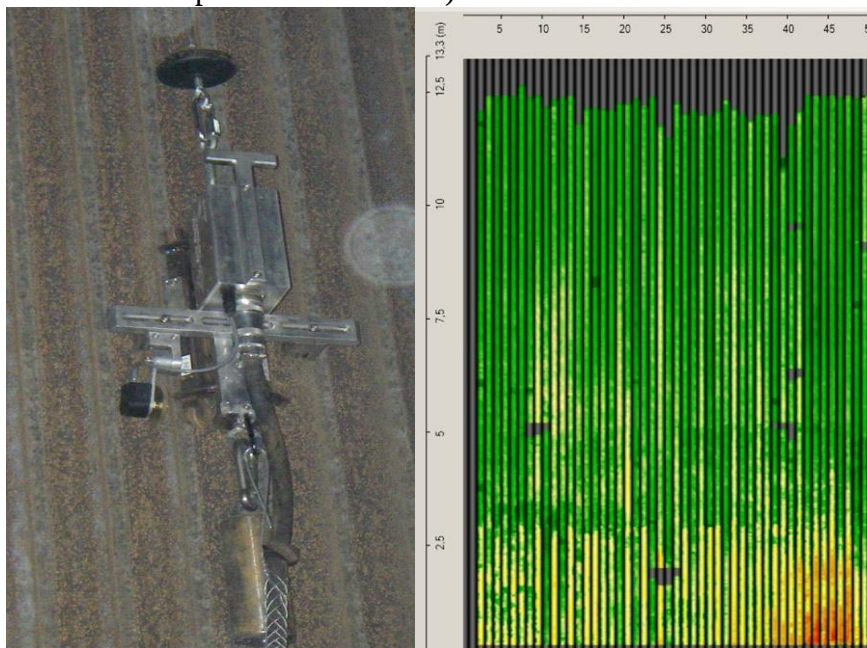
- Kovuusmittaus korreloi hyvin mittauskohteen lujuusominaisuuksien kanssa.
- Kovuusmittaustulokset kertovat materiaaliteknisistä muutoksista esim. vauriotilanteissa.
- Hitsauksen laadunhallinta (HAZ kovuus piikit) päähöyryputkistossa.

- Kovuus mittaamenetelmä pitää valita kohteen mukaan (materiaali, ainevahvuudet jne..)
- Pinnanlaatu vaikuttaa oleellisesti mittaustulosten hajontaa, minkä tähden pitää pyrkiä vähintään 220 karheuteen.
- Tarkempia tietoja ja sovellusohjeita eri menetelmistä löytyy laitevalmistajan sivuilta.

4.2.13 T-Scan paksuusmittaus

Kattilan seinämät ja tulistimet ovat mahdollista paksuus mitata suurella laajuudella (lähes 100 %:sti) käyttämällä T-Scan tekniikkaa.

- Tekniikka perustuu EMAT-antureihin (Electro Magnetic Acoustic Transducer), joissa ei tarvita erillistä kytkentäainetta.
- Tarkkuus sama kun perinteisellä UT:llä
- Kattilan seinämäputkien paksuudet voidaan mitata kolmella mittalinjalla, joista jokainen mittaa 15 mm leveää kaistaa
- Mittaustiheys jopa 1 mm välein.
- Menetelmä on erittäin herkkä asteittaiselle kulumiselle.
- Voidaan tarkastaa putkia jotka ovat pinnanlaadultaan huonoja – ilman hiontaa.
- Menetelmällä on mahdollista tarkastaa pinnoitettuja ja compound putkia (ferriittistä materiaalia pitää olla kohteessa)



Kuva 4-8. T-scan laitteisto kattilan seinällä ja Client ohjelmiston tuottamaa visuaalista paksuusmittaustulosta tarkastuksista.

4.2.14 IRIS-tekniikka

- Ultraäänitekniikkaan perustuva menetelmä, joka soveltuu ferriittisten tuubien sisäpuoliseen tarkastukseen
- Putken suunnassa lähetetty ääni käännetään peilin avulla putken seinämän suuntaan putken ollessa vesitäytössä ja peiliä pyöritetään vesiturpiinilla tai sähköisesti.



- Menetelmä on tarkempi kuin pyörrevirtamenetelmällä tehty tarkastus, mutta huomattavasti hitaampi ja työläämpi.
- Iris-anturi tulee olla kohtuullisesti, mitattavan putken kokoinen

4.2.15 Sisäpuolisen kerrostuman / magnetiittikalvon paksuusmittaus

Kattilaputken sisäpintaa suojaa normaalisti magnetiittikerros, jonka paksuus vaihtelee 10 µm:stä 200 µm:iin. Vedenkäsittelyongelmat voivat kasvattaa magnetiittikalvon paksuutta tai aiheuttaa erilaisista epäpuhtauksista koostuvan kerrostuman, jonka alle saattaa syntyä korroosioaurio, mikä pahimmillaan on aiheuttanut ns. vetyhyökkäyksen.

Vetyhyökkäysriski on pahin siellä, missä lämpökuorma on suurin. Kuvassa 5-9 on lämpövuon jakautuminen etuseinän keskellä primääritason alapuolelta nokan tasolle kattilassa, jossa perinteisesti laskettuna keskimääräinen lämpövuoto 90 kW/m². Kuvan mukaan primaari-ilma-aukkojen alueella lämpövuoto ylittää 230 kW/m².

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

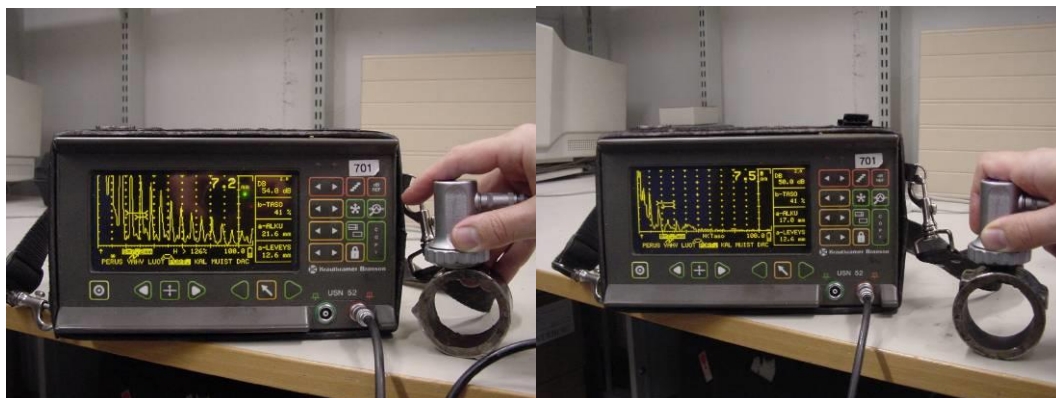
Kuva 4-9. Lämpövuon jakaantuminen kattilan etuseinällä.

Korroosioaurioita on todettu kohdissa, jossa virtaus häiriintyy. Tällaisia paikkoja ovat aukkojen ohitusputket (käyrät) ja hitsien vierusalueet, jonka syynä ovat ylisuuret juurikuvut. Vaurioriskiä lisää ylileveät evärakenteet, jotka kasvattavat paikallista lämpövuotoa.

Vetyhyökkäys aiheuttaa aina sulavesiräjähdyksriskin ja mittavat korjaustoimenpiteet.

Ilmiötä voi tutkia ultraäänimenetelmillä seuraavasti:

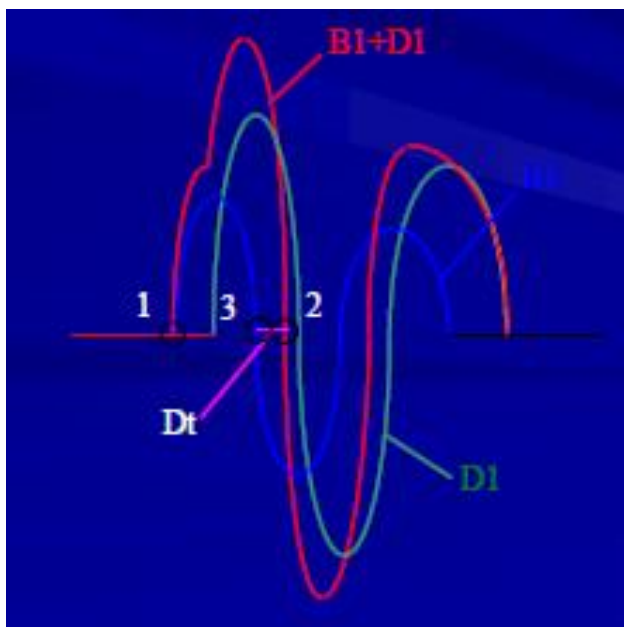
Alkava sisäpinnan korroosio tai paksu epäpuhtauksista koostuva kerros vaimentaa ultraääntä voimakkaasti. Normaalisti ultraäänilaitteen a-näytössä näkyy useampi taustakaiku kuten kuvan 5-10 vasemman puoleisessa a-näytössä. Jos korroosiovaihe on alkanut tai sisäpinnalla on paksu epäpuhtauksista koostuva kerros, niin taustakaiut vaimenevat voimakkaasti kuten kuvan oikean puoleisessa näytössä. Vaimennuksen arviointi vaatii kuitenkin tarkastajalta kokemusta, sillä vaimennukseen vaikuttaa ulkopinnan kunto/puhtaus ja käyrissä geometria.



Kuva 4-10. A-näytöt ehjästä putkesta ja vetyhyökkäyskohdalta.

Kerrostuman tarkempi määrittys perustuu kahteen ultratekniikkaan. Sisäpuolisen magnetiitin paksuuden määrittämisen mittaustekniikka perustuu korkeaan taajuuteen ja poikittaiseen aaltomuotoon. Poikittainen aaltomuoto mahdollistaa ohuemman kalvonpaksuuden mittaamisen. Tällä menetelmällä on voitu mitata magnetiittipaksuuksia 80 μm :stä ylöspäin.

Toinen kerrostuman paksuuden mittaaminen perustuu siihen, että kerrostuma-ilman/veden rajapinnasta heijastuva aalto levantää signaalia verrattuna puhtaasta metalli-ilma/vesi signaaliin, katso kuva 5-11. Tässä mittauksessa käytetään pitkittäistä aaltomuotoa ja menetelmällä luvataan päästävän jopa 20–40 μm minipaksuuteen.



Kuva 4-11. Ultraäänikaikujen käyttäytyminen saostuma/putki rajapinnassa

Molemmat tarkemmat mittaustavat vaativat erillisen kalibrointipalan, jolla varmennetaan äänennopeus kerrostumassa.

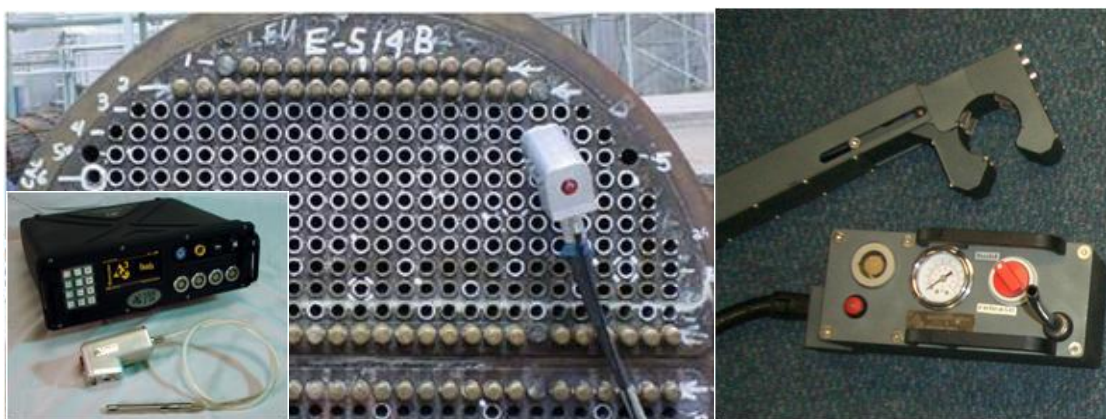
Sisäpuolisen kerrostuman mittauksissa on muistettava, että ongelmakohdat saattavat olla hyvin paikallisia. Jos kattilassa todetaan epäpuhtauksia ja edellä olevat mittaustavat antavat viitteitä sisäpuolisista kerrostumista, niin varmin tapa on ottaa kattilasta näytepalat, joista mitataan laboratoriossa kerrostumien paksuus ja koostumus. NDT-menetelmät kohdistavat näytepalojen oton ongelma-kohtiin.

4.2.16 Guided Wave

Guided Wave tekniikka perustuu ultraääneen, joka on matalataajuisia ja etenee materiaalin pinnansuuntaisesti. Guided Wave on suuntaa-antava menetelmä, jota on hyödyllistä käyttää putkistojen ei luoksepäästävässä osissa. Guided Wavella saadut mittatulokset on hyvä tarkastaa lähemmin esimerkiksi käsivaraisilla laitteistoilla. Guided Waven vahvuus onkin saada suuntaa-antavaa tietoa, mistä kohdin esim. maanalaiset putkistot on syytä kaivaa esiin ja tarkastaa lähemmin.

- Menetelmä havaitsee muutoksia putkien poikkipinta-alassa.
- Tekniikan herkkyys on 5 % poikkipinta-alasta.
- Tekniikalla on mahdollista luodata jopa satoja metrejä anturipannasta molempiin suuntiin.
- Testaus tehdään normaalisti asentamalla kiinteä tai ilmatäytteinen lähetinrenas putken ulkopinnalta.

Tekniikan uusia sovelluskohteita on mm. lämmönsiirtimien tarkastaminen synnyttämällä ultraääni putken sisäpinnan kautta. Guided Wavesta on olemassa samantyyppisiä sovelluksia, kuten Iris-tarkastuksessakin, mutta GW on enemmänkin suuntaa-antava sovellus ja Iris on näistä kahdesta menetelmästä se tarkempi.



Kuva 4-12. Guided wave laitteiston sovelluksia lämmönvaihtimelle sekä tuubiputkistolle /Guided ultrasonics ltd/.

4.2.17 RFET (kaukokenttämenetelmä pyörrevirtatekniikalla, Remote Field Electromagnetic Technique)

Sisäpuolinen pyörrevirtatarkastus ferriittisille putkille, jolla voidaan todeta laaja-alaiset ohentumat (esim. nuohoimen aiheuttama kuluma). Esimerkiksi keittopintaputkien ohenemien mittaus.



Kuva 4-13. RFET laitteisto putkiston tarkastukseen /Testex Incorporation/

4.2.18 Magneettinen vuotokenttätarkastus (MFL)

Tarkastettava kohde magnetoidaan kestopagneetilla ja ylä- tai alapinnalla olevien vikojen synnyttämä magneettinen vuotokenttä havaitaan Hall-anturilla. Erityisen käyttökelpoinen menetelmä on pistesyöpymien ja paikallisten korroosiovaurioiden paikantamiseen silloin, kun kohde on ferromagneettista materiaalia 6-20 mm paksuusalueella. Menetelmällä paikannetaan vikakohdat, joiden tarkempi analysointi suoritetaan esim. ultraäänimenetelmällä. MFL:n tarkastusherkyys on riippuvainen kohteen paksuudesta. Menetelmä ei ole herkkä havaitsemaan tasaisesti ohentunutta laaja-alaista syöpymää. Tänä päivänä löytyy laitteita, joissa on yhdistetty ET- ja MF-tekniikka.

4.2.19 Jäännös jännitystilat

Materiaalin jäännösjännitystiloja voidaan mitata ainetta rikkomatta. Mittausmenetelmät perustuvat barkhausenin-kohinaan ja röntgendiffraktioon.

Barkhausen-kohina on materiaalista mitattava magneettinen parametri. Se on riippuvainen jäännösjännityksistä. Menetelmä vaatii kalibrointipalat, joihin tarkastuskohdetta verrataan.



Röntgendiffraktio menetelmässä mitataan jännitysten kiteisessä metallissa synnyttämien siirtymien aiheuttamia muutoksia hilavakioissa. Tutkittavaan näytteeseen kohdistetaan röntgensäde kahdessa kulmassa. Intensiteetihuippukohdan ja muodon perusteella voidaan laskea vastaava jännitystila. Mittausherkkyyys on noin 50 N/mm^2 .

4.2.20 Ainetta rikkovat tarkastukset

Vauriotapauksessa ja materiaaliselvityksissä on aina syytä ottaa kunnolliset näytepalat, joita voidaan myöhemmin laboratoriossa tutkia. **Näytepalojen turhaa puhdistusta ja käsittelyä on vältettävä. Jos mahdollista on näyte irrotettava sahaamalla, jotta materiaaliominaisuudet eivät muutu.** Riittävän taustatiedon kerääminen on erittäin tärkeää, joka korostuu vauriotapauksissa.

4.3 Tarkastettavat kohteet

Liitteessä I on esitetty luettelomaisesti seisokinaikaiset tarkastuskohteen, vikaantumismekanismin ja soveltuvan tarkastusmenetelmän mukaan.

Listaus on suuntaa antava, eikä voi olla täydellinen, kun otetaan huomioon kattiloiden ikäjakauma sekä erilaiset rakenteet ja ajotavat.

4.4 Vesipainekoe korjausten jälkeen

Kattilan korjauksen jälkeen yleensä suoritetaan painekoe, jolla varmistetaan kattilan tiiveys ja käytettävyys ennen starttia. Painekokeen suorituksessa voidaan soveltaa standardin [SFS-EN 12952-6](#) kohtaa 10.2 kuitenkin siten, että painekokeen koepaine on enintään 1,3 X suurin sallittu käyttöpaine. Koepainetta määritettäessä voidaan huomioida korjauksen laajuus ja kohta (tulipesä, tulistin tai ekonomaiseri), seuraavaan määräaikaistarkastukseen liittyvän painekokeen ajankohta jne. Vähintään koepaineen pitäisi olla 1.1 X suurin sallittu käyttöpaine.

Painekokeessa käytettävän veden lämpötilaa määritettäessä tulee ottaa huomioon kattilan materiaalien haurasmurtumavaara ja vanhempien kattiloiden osalta voidaan joutua ylittämään em. standardin yläraja $+50 \text{ °C}$.

Painekokeessa koepaineen tasaannuttua tarkastetaan silmämääräisesti paitsi korjauskohdat myös kattilan painerunko mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi, joita



ei NDT-menetelmillä ole havaittu tai jotka ovat syntyneet painekokeen yhteydessä. Kattilan sisäosien tarkastuksessa tulee huomioida työturvallisuus ja laskea koepaine arvoon, jossa tarkastus on turvallista tehdä.

Painekokeessa käytettävän veden lämpötila, koepaine ja mihin arvoon paine sisäpuolen tarkastuksessa lasketaan sovitaan tapauskohtaisesti painelaitetarkastajan kanssa.

4.5 Dokumentointi

Kaikista tarkastuksista, mukaan lukien silmämääräiset ja toteamisluontoiset tarkastukset, on tehtävä selkeät pöytäkirjat ja raportit, joista selviää erityisesti korjaustarpeet. Korjauskohdat on myös merkittävä selvästi itse kohteisiin, jotta korjaukset kohdentuvat varmasti oikeisiin paikkoihin.

Pöytäkirjat on syytä tehdä heti tarkastuksen jälkeen, jolloin asiat ovat vielä tuoreessa muistissa. Tarkastuksista ja korjauksista tulee tehdä yhteenveto, joka auttaa myöhemmissä tarkasteluissa.

Dokumentointiin on saatavissa ATK-ohjelmia, joihin voidaan liittää mm hitsausohjeita, pitkäntähtäimensuunnitelmia jne.

LIITTEET

Liite 1 Komponenttikohtaiset suositukset NDT-tarkastuksille



5 SOODAKATTILAN VAURIOT

Kappaleessa käsitellään soodakattilan tyypillisiä vaurioita ja syitä niiden syntymiseen. Tiedot on kerätty Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannasta.

5.1 TULIPESÄ

Kompound-putkien säröilyä esiintyy soodakattilan alaosassa tyypillisesti kolmessa eri paikassa: pohjanputkissa sekä ilma- ja sula-aukoissa. Tarkastuksissa ja vauriotutkimuksissa on todettu, että säröillä on esiintymispaikasta riippumatta samoja luonteenomaisia piirteitä. Säröjä on todettu putkien ylä- ja sivupinnoilla sekä putkia yhdistävissä evissä että evä-putkihitseissä.

5.1.1 Pohja

5.1.1.1 Pohjan säröt

Havaituista pohjan putkien ja evien säröistä suurimman osan on todettu johtuvan jännityskorroosiosta.

Mahdollisia syitä säröilyyn:

- Jos pohjan säröt ovat kannatuspalkin reunan kohdalla, kannatusten aikaansaamalla vetojännityksellä on merkitystä jännityskorroosion syntyyn.
- Jos säröjä esiintyy reunoilla sularajalla ja käynnistyspolttimilla voi olla merkitystä säröilyyn.
- Jos kattilan pohja on ollut pitempiä aikoja kuivaamatta, vesipesun mahdollisuus säröjen aiheuttajana kasvaa.
- Reunaputket ovat alttiimpia kiertohäiriöille. Kiertohäiriön havaitsemiseksi putkistoon on asennettu virtausmittauksia.
- Pällehitsauksen aikana esiintulleet uudet säröt eivät välttämättä johdu siitä että hitsaus aikaansaanut uusia säröjä vaan jännitykset avasivat jo aiemmin syntyneitä säröjä jolloin ne voitiin löytää

HR11 materiaalin säröily ([vaurioilmoitus 4/2007](#))

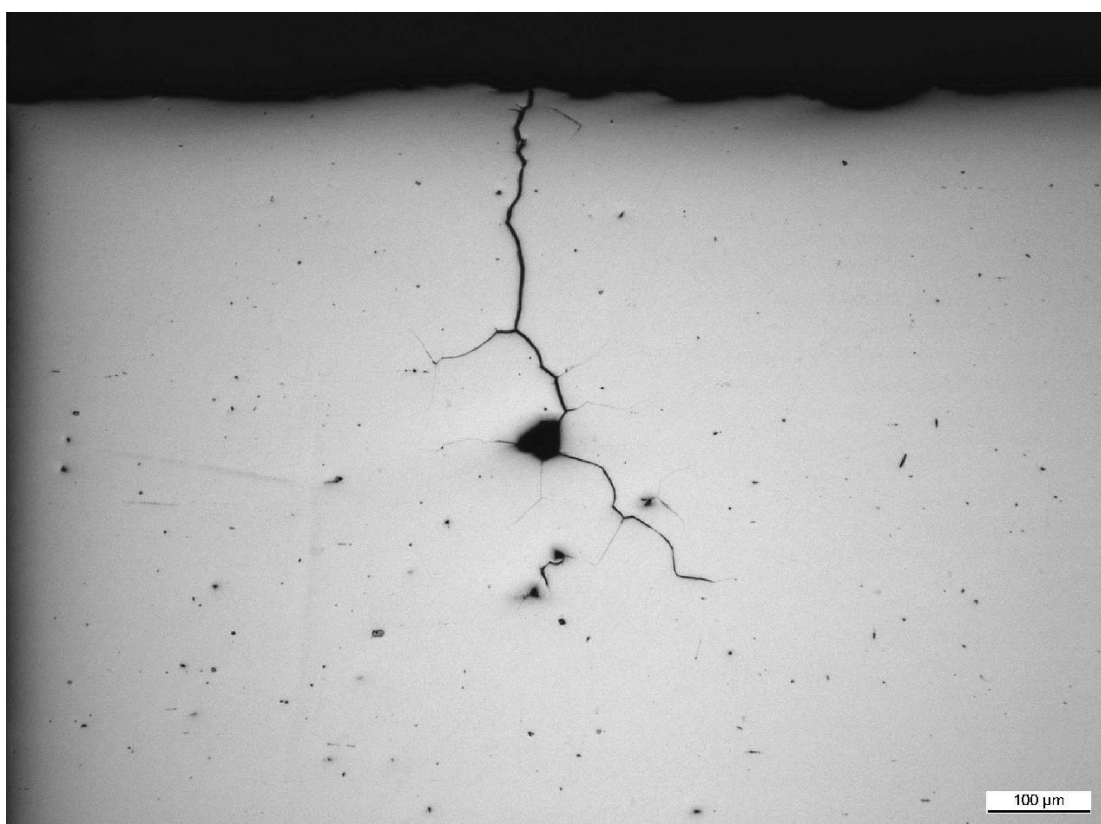
- Rutiinitarkastuksessa havaittiin HR11 pohjaputkien evämateriaalina käytetyssä Alloy 825 säröjä, Kuva 6-1.
- Tutkimusten mukaan evämateriaalin säröilyn syy on raerajajännityskorroosio (IGSCC, intergranular stress corrosion cracking), mutta sen aiheuttajasta ei ole varmuutta.
- Metallogristen tutkimusten mukaan evämateriaali ei ole herkistynyt pohjapaneelien hitsauksen yhteydessä tai käytönaikana.
- Vajaaksi jääneellä liuotushehkutuksella ei ilmeisesti ole ollut vaikutusta säröilyyn, sillä kaikki todetut säröt etenevät nykyisen rakenteen raerajoja pitkin.
- Käyttökokemukset Alloy 825 tyyppisistä compoundputkista soodakattiloissa ovat hyviä. Tähän mennessä Alloy 825 compound pohjaputkissa tai evissä ei ole

havaittu säröjä. Hyvin pieniä säröjä on havaittu muutamien kattiloiden sula-aukkojen putkissa, mutta ei evissä.

- Säröjä on myös havaittu kahdessa kattilassa primääri-ilma-aukkojen alaosissa.
- Tyypillistä kaikille tähän mennessä havaitulle säröille on ollut se, että ne ovat edenneet rakeiden läpi, eikä raerajoja pitkin. Soodakattiloissa käytössä olevista kompondputkimateriaaleista raerajoja pitkin eteneviä säröjä on tähän mennessä todettu vain voimakkaasti kylmämuokatussa Alloy 625 materiaalissa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Pohja-alueet tulee tarkastaa, vaikka pohjamateriaali olisi Sanicro 38 tai vastaava materiaali.
- Vaurioon voi olla vaikutusta evän leveydellä, joka on suurempi kuin uudemmissa kattiloissa.



Kuva 5-1. Esimerkki poikkileikkaushieessä todetuista tyypillisistä haarautuneista suurista säröistä.

Kattilan katosta pudonnut kami vaurioitti pohjaputkia ([Vaurio-ilmoitus 2/2001](#))

- Kattilan ollessa pulloitetuna n 13 tuntia pohjalle putosi tulipesän katosta kami joka taivutti pohjaputkiston ja kannatuspalkit.
- Pohjan osittainen uusiminen, kannatusten vahvistaminen ja nuohointen lisääminen harkinnassa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Kamin todettiin muodostuvan useimmissa tapauksissa tulipesän katon läpimenokohtaan tulistimen tai verhon läpimeno), ei etuseinän ja katon kulmaan kuten joskus on oletettu.

- Tehtaiden on kiinnitettävä huomiota tulipesän yläosan kamin muodostumiseen ja sen poistamiseen.
- Kamin muodostumista tulisi seurata siirtymällä aika ajoin, mahdollisuuksien mukaan, öljytulille ja tekemällä silmämääräistarkastus



Kuva 5-2. Taipuneet pohjaputket ja kannatuspalkki

5.1.1.2 Kamparauta

Vielä 1990-luvulla sattui sulavuotoja seinän ja pohjan välisen tiivistelevyn (kamparauta) takia. Tyypillisesti kamparaudan todettiin palaneen puhki konstruktiosta johtuen. Lisäksi havaittiin muutamia hitsausvirheitä, missä kamparauta oli hitsattu heikosti evään kiinni ja kamparaudan ja pohjan väli oli liian suuri sekä massaus massakotelon sisällä oli irronnut pohjasta aiheuttaen raon.

Soodakattilan vesipesut aiheuttavat myös sen, että massakotelojen rakojen kautta vesi syövyttää ja heikentää massauksia, jos ko. rakoja on kotelossa. Sularännin massauksissa on tärkeää tehdä työvaiheet massauksien kannalta oikein sekä käyttää sellaista massaa, joka ei kutistu eli ei tee rakoja.

5.1.1.3 Kouruvauriot ja niiden ympäristö

5.1.2 Seinät

- Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen rajapinta
- Primääriaukon ohitusputket



5.1.3 Katto

5.2 VERHOPUTKISTO

5.3 TULISTIN

5.3.1 Ruiskujäähdyttimet

Ruiskujäähdytin hajonnut ([Vaurioilmoitus 11/2008](#))

- Soodakattilan tertiäritulistinelementin vaihdon yhteydessä suoritettiin tertiäritulistimen jakokammion endoskooppitarkastus.
- Tarkastuksessa havaittiin rikkoutuneen ruiskun osia kammion pohjalla.
- Ruiskujen kuvauksissa todettiin kahden ruiskun rikkoutuneen.
- Irronneet osat poistettiin jakokammioista ja ruiskut korvattiin väliaikaisilla ruiskuilla. Kaikki ruiskut vaihdetaan seuraavassa seisokissa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

- Tyypillinen vaurio ruiskujäähdyttimellä, jossa ruiskutuskartio ruostumatonta terästä.
- Rakenne on tarkastettava säännöllisesti ja mahdollisuuksien mukaan korvattava muulla lämmönkestävällä materiaalilla.

5.4 KONVEKTIO-OSA

5.5 LIERIÖ

5.6 EKONOMAISERI

5.6.1 A- ja B-putket

5.6.2 Evän päät/kavennukset

5.7 LIUOTTAJA

Sulavesiräjähdyksen liuottajalla ([Vaurioilmoitus 13/1997](#))

- Kattilalla ollut sulakourujen tukkeutumisongelmia. Kourut saatiin välillä auki. Kattilassa ei ollut isoa kekoa, pikemminkin tulipesän pohja oli sulan peittämä.
- Sulakourut tukkeutuivat niin, että ajoittain oli vain 2/4 kourua osittain auki. Lopulta saatiin tukkeessa olleet 2 keskimmäistä sulakourua auki, jolloin sulantulo kattilasta ryöstäytyi valloilleen. Sulantulo oli niin voimakasta, että liuottaja täyttyi ja sulavesiräjähdyksiä tapahtui sulakouruilla ja liuottajalla.
- Räjähdyksen seurauksena sulaa roiskui ympäriinsä liuottajan ja sulakourujen alueella. Roisku sula sytytti kaapeleita yläpuoliselta n. 3,5 metrin korkeudella olleelta kaapelihyllyltä ja vaurioitti laitteita liuottajan alueella.
- Kattilaa ei pikapysäytetty eikä pikatyhjennetty.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:



- Seisokissa pesty, pesuvedet puskuri altaaseen.
- Suolavesi ajettiin haihduttamolle. Orgaaninen aine loppui. Ajotapa virhe.

5.8 VESI- JA HÖYRYPUOLEN VAURIOT

5.9 ILMAN ESILÄMMITTIMET

5.10 MUUT

5.10.1 Kaasuräjähdytys

Kaasuräjähdytys ([Vaurioilmoitus 14/1992](#))

- Tapahtuman alkuunpanijaksi osoittautui höyrystinosan putki, jossa hitsausaumaan oli tullut vuoto ja vuodon aiheuttama vesisuihku kulutti viereisen putken niin ohueksi, että se lopulta repeytyi. Repeytynyt aukko oli kooltaan n. 10 * 25 mm
- Kuivakiehuntau toiminta esti kattilan ilmapuhaltimien käytön kattilan tuulettamiseksi.
- Kuivakiehuntau suojan toiminta tulee kytkeä siten, että toimenpiteet ovat samat kuin pikapysäytyksessä, jolloin kattilaa voidaan huuhdella sekundääri-ilmasuuttimien kautta ja primääritason ilmansyöttö on suljettu keon palamisen ehkäisemiseksi.



LIITE 1

Komponenttikohtaiset suositukset NDT-tarkastuksille

SEISOKINAIKAISET TARKASTUSKOHTEET JA MENETELMÄT

Visuaalinen tarkastus oletetaan tehtävän kaikille komponenteille aina, eikä mainita alla olevassa menetelmä kohdassa ilman erityistä tarvetta.

Kohde	Menetelmä	Kommentit
Syöttövesisäiliö	MT, TM	Saumat. Kaasunpoistimien visuaalinen tarkastus. Erityishuomio hienorakenneteräksissä säiliöissä ”Raex”.
Syöttövesilinja	TM, RT, VT	Eroosio/korroosio mm venttiilien ja mittauslaippojen jälkeen sekä käyrissä.
Päähöyrylinja	MT, REP, HT	Viruminen. Erityisesti isot yhteen ja liitokset sekä venttiilit. MT tarkastus suoritetaan hiotetulta pinnalta fluoresoivalla menetelmällä.
Tulistimet	MT, REP, HT TM MT VT, TM VT, (TM) VT, REP, HT, OK Digi RT	Viruminen, kammiot Eroosio/korroosio, tulistinputkien alakäyrät mukaan lukien paketista ulos tulleet käyrät. Sidehitsien päät. Suolavuodot kattokaappien läpivientikohdissa voivat olla putkivaurioiden esiaste. Nuohoimien kohdat joka seisokissa (eroosio/korroosio paketista irti päässeissä putkissa). Putkien värin ja muodon muutokset voivat johtua ylikuumenemisesta. Roikkutulistimien pohjakäyrien kerrostuma / vierasesineet
Höyryn jäähdyttimet	END, RT	Sisäkartion ja ruiskutussuuttimen kunto. Huomioi suuttimen eheys yhdekappaleen sisällä
Verhot/nokat	TM VT	Korroosio/eroosio. Kolhut ja muotovirheet (kamat)
Tulipesän seinät	TM VT, PT RT tai UT, PT VT, TM	Paksuusmittaus linjoittain (huomioi epäsymmetrinen oheneminen). Säröt/syöpymä compound/hiiliteräs-hitseissä. Jatkohitsit: kriittisimmät sularännien ympäristön hitsit (terminen rasitus). Evien eroosio / korroosio (jos silmämääräisesti havaitaan ”kulumaa” -> TM)
Seinät (eristepuoli)	VT, TM	Hiiliteräksen syöpyminen (onko ulkopuolelta pinnoittamattomia compound-hitsejä?).
Aukot	VT, PT TM	Säröt ilma-aukkojen ja sularännien ohitusputkissa ja evä rakenteissa. Katso Kuva L3 Aukkojen reunaputket. Huomioi kaikukäyttäytyminen (huono vesikemia)
Pohja/compound	VT PT, ET TM	Syöpymät ja kolhut. Katso Kuva L4 ja L5 Koko pohjan alue. Fluoresoiva menetelmä ja pohjan kuivaus (katso ETY:n ohje). Sivuseinien tiivistelevyissä on tavattu alapuolista korroosiota (hiiliteräksen puoli). Katso Kuva L4
Pohja/hiiliteräs	VT, TM	Korroosio on usein hyvin tasaista, jonka johdosta oheneminen selviää vain paksuusmittauksella. Hitsien, compound-alueen ja tiivisterautojen tarkastus tehdään kuten edellä.
Pohjakaappi	VT	Sulavuodot ja muodonmuutokset
Lieriöt	VT MT UT	Sisäpuolinen tarkastus ennen puhdistustoimia, sillä pahimmat säröt/halkeamat näkyvät ruostejätkinä Sisäpinnan tarkastus vaipan ja päätyjen hitseille (myös juoksuputket, miesluukut, miesluukkujen saranat ja muiden varusteiden pienasaumat) sekä reikäkenttäalueet ja alalieriön pohja-alue pistokoeluonteisesti. Vaipan ja päätyjen hitsit. Onko esim. pääty/miesluukku-hitsissä rakenteellinen juurivirhe?
Keittopintaputkisto	VT	Keittopintaputkien päät lieriön sisäpuolelta ja putkien syöpyminen ulkopuolelta.

	TM UT VT, TM	Keittopintaputken korroosio lieriön vaipan kohdalla mankelointikohdan vieressä: tarkastus suoritetaan luotainpidikkeen avulla tai ultraääneen perustavalla IRIS-laitteella, joka vaatii kuitenkin putken vesitäytön. Huonon tuennan aiheuttama säröytyminen mankelointikohdan vieressä. Tarkastus tehdään pidikkeellä kuten edellä, mutta kulmaluotaimella. Nuohoimien kohdat.
Veden esilämmitin (ekonomaiserit)	TM TM, UT VT, TM PT, MT	Eroosio vesipuolella maksimivirtauskohdissa, kammiot ja yhdysputket. Jos syöttöveden lämpötila on alle 120°C, saattaa ilmetä kastepistesyöpymää aivan alakammion vieressä putkessa ja putki/alakammio-hitsissä Nuohoimien kohdat sekä paikat joihin kerääntyy suolaa (esim. seinän ja reunimmaisen elementin väli). Evien päät ja tukki/putki-hitsit.
Tukit	END, (TM)	Epäpuhtaudet, syöpymät, hitsit
Tuenta	VT	Pohjaputkien lepääminen palkkien päällä, ripustintankojen kireys, kattilan asema ja päähöyryputki sekä käynnissä että seisokissa
Vesikemia	VT END OKS, UT	Yleensä lieriön sisäpinnan punerrus kertoo huonosta vesikemiasta. Toisena selvänä indikaationa on epäpuhtaudet alajakotukeissa ja vesityslinjoissa. Oksidi- ja kerrostumakalvon paksuusmittaukset. Kohteina höyrystimien ja tulistimien putket
Nuohoimet	VT, TM	Ensimmäisessä elementissä seinästä katsottuna saattaa olla nuohoimen vuodon aiheuttamaa eroosiota/korroosiota. Tarkista nuohoimien venttiilit sekä höyrykierto (lauhteenpoisto)

LYHENTEET:

VT	=	silämääräinen tarkastus
TM	=	paksuusmittaus
PT	=	tunkeumanestetarkastus
MT	=	magneettijauhetarkastus
UT	=	ultraäänitarkastus
RT	=	radiografia
ET	=	pyörrevirtatarkastus
REP	=	jäljennetarkastus
HT	=	kovuusmittaus
AE	=	akustinen emissio
OKS	=	oksidikalvon paksuusmittaus
END	=	endoskoopitarkastus

VALOKUVIA SOODAKATTILAN ERI OSISTA JA VAURIOISTA



Kuva L1. Värimuutoksia seinällä

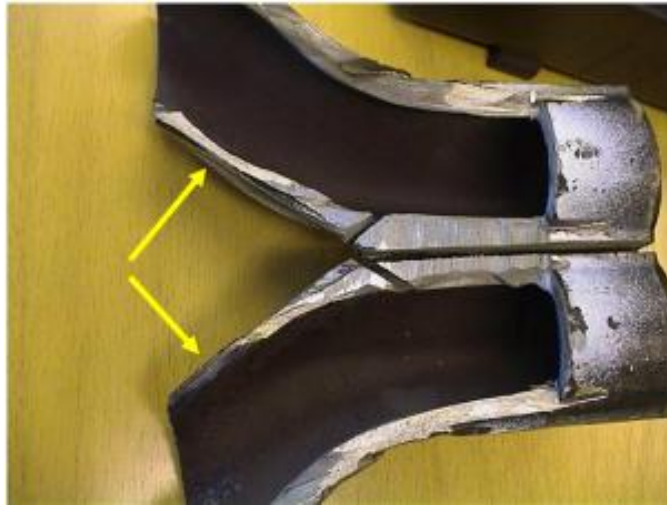
Kuva L1 on vauriokattilan seinältä. Osa vikakohdista oli mustunut. Kattilatarkastus pitää aina aloittaa silmämääräisellä tarkastuksella, jossa selvitetään väripoikkeamat normaalista. Erityisiä riskipaikkoja ovat mm. poltinaukkojen yläpuolet (virtauksen vaikutus liekkiin). Värimuutokset aiheuttavat aina lisätutkimuksia.



Kuva L2. Lieriössä epäpuhtauksia ja värimuutoksia

Kuva L2. Epäpuhtaudet ja harmaasta poikkeavat värimuutokset johtavat lisätutkimuksiin. Sen lisäksi että tehdään höyrystimensisäpinnan NDT-tarkastuksia

tulipesässä, tarkistetaan jakotukkien puhtausasteet. Oikean kuvan tapauksessa on riskinä höyrystinputkien sisäpuolen kerrostumat ja jopa tukkeumat vesityslinjoissa.



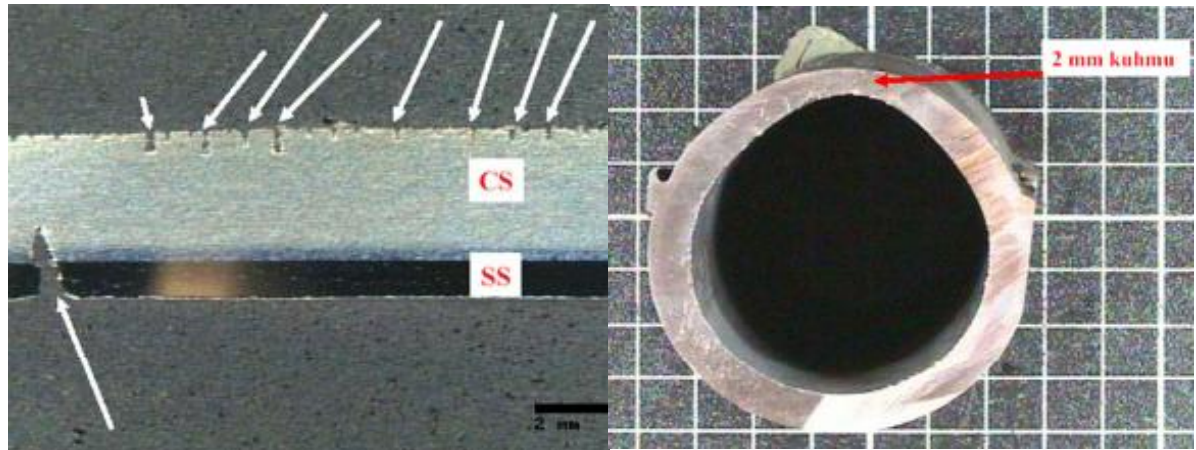
Kuva L3. Korroosioaurio ilma-aukon ohitusputkissa. Vikakohdat merkitty nuolilla

Kuvassa L3 on soodakattilan ilma-aukon ohitusputket, joissa vetyhyökkäys on aiheuttanut korroosioaurion. Kuvasta L3 selviää todennäköisin vikaantumiskohta.



Kuva L4. Korjauskohta pohja-seinä-kamparaudassa

Kuva L4. Pohjan ja seinien väliset kamparaudat on tarkastettava tunkeumanestemenetelmällä, kun pohja tyhjennetty. Jos pohjaa ei ole tyhjennetty, varmennetaan pohjakaapista, että kamparaudan rikkoutuminen ei ole aiheuttanut sulavuotoa.



Kuva L5. Kuvassa kiertohäiriön aiheuttama ylikuumeneminen pohjaputkessa, joka on aiheuttanut jopa muodonmuutoksen putkeen

Kuvissa L5 pohjaputken säröytyminen on edennyt compound-pinnoitteen läpi ferriittiseen materiaaliin. Vikaantumista voidaan todeta myös vesipuolella ja putkessa on selvä muodonmuutos. Ylikuumenemisen syynä voi olla kiertohäiriö aiheuttama korkean lämpövuon, jonka voi aiheuttaa ylileveä seinä-pohja-kamparauta tai pudonneen ”kamin” aiheuttama muodonmuutos tai saostumat vesipuolella.

LIITE 2

Suojaussuosituksen päällehitsauskappale 9.9.2015

1 KOMPOUNDPUTKIEN KORJAUSHITSAUS

Contents

1	KOMPOUNDPUTKIEN KORJAUSHITSAUS	1
1.1		1
1.2	Soveltamisala.....	1
1.3	Korjaushitsauksen vaateet.....	1
1.4	Pinnan puhdistus.....	3
1.5	Päällehitsauksen vaatimukset	4
1.6	Hitsausmenetelmät ja lisäaineet	4
1.7	Hitsauksen suorittaminen	5
1.8	Päällehitsauksen jälkikäsittely.....	6
1.9	Päällehitsauksen tarkastus.....	6
1.10	Hitsausvirheiden korjaus.....	6

1.1 Soveltamisala

Tämä ohje koskee komppoundputkien korjaushitsausta.

Ohjetta voidaan soveltaa Painelaitedirektiivin (PED) sekä kattilastandardin EN 12952 mukaisessa valmistuksessa/työssä.

1.2 Korjaushitsauksen edellytykset

Vaikka korjaushitsausta käytetään melko yleisesti soodakattiloissa, toimintatavoissa voi olla suuriakin eroja, riippuen tehtaasta, tarkastajasta tai korjauksen suorittajasta. Yhdistyksen jäsenistö on kaivannut ohjetta korjaushitsauksen edellytyksistä korjauksissa.

Edellytykset koskevat yleisesti kaikkia komppound-putkia, mutta kunkin komppoundin kohdalla on huomioitava erilaiset hitsausvaatimukset esimerkiksi runsaasti nikkeliä sisältävillä lisäaineilla on suurempi riski kuumahalkeiluun.

Seuraavia asioita tulisi ainakin huomioida korjaushitsausta harkittaessa:

1. Toimenpiteet ennen hitsauksen aloittamista
2. Työkoe ennen hitsausta
3. Minkälaisia vaurioita ei saa korjaushitsata
4. Kuinka monta kertaa samaa vauriota voi korjaushitsata
5. Kuinka suuren pinta-alan voi korjaushitsata
6. Etäisyys kahden korjaushitsin välillä
7. Vauriomekanismin huomioon ottaminen erot (särö/korroosio, särön syvyys)
8. Toimenpiteet korjaushitsauksen jälkeen
9. Dokumentointi

1. Toimenpiteet ennen hitsauksen aloittamista

Korjaushitsaus on aina tarkan harkinnan/selvityksen tulos. Ennen kuin putken korjauksesta hitsaamalla päätetään, tulisi vauriomekanismista olla käsitys sekä miten korjaushitsauksesta syntyvät lisäjännitykset vaikuttavat vaurioon.

Erityistä harkintaa tulee käyttää primääri-ilma-aukkojen ja sula-aukkojen korjauksissa. Taivutetuissa kappaleissa on jo valmiiksi jännityksiä.

Lisäksi tulisi määrittää:

- putken pinnoitepaksuus (kuinka paljon kirkasta on jäljellä)
- putken laskennallinen minimi (jos särö ulottuu mustaan putkeen)
- hitsaajien pätevyys

2. Työkoe ennen hitsausta

Ennen korjaushitsauksen aloitusta jokainen hitsari tekee hyväksytyyn työkokeen. Työkoe tehdään vastaavalla compoundputkella, samanlaisella geometrialla, samassa hitsausasennossa ja vastaavissa olosuhteissa (esim. riittävillä haittaputkilla). Jäljelle jäänyt perusaineen ja pinnoitteen paksuus hionnan jälkeen ennen päällehitsausta tulee dokumentoida.

Hitsauksen jälkeen hie leikataan poikittain hitsauspalkoon nähden ja tutkitaan visuaalisesti ja mahdollisesti kuparisulfaatilla kiinnittäen huomiota tunkeuman syvyyteen ja geometriaan. Tunkeumasyyvyys tulee olla aina mahdollisimman vähäinen.

Hyväksytty työnäyte dokumentoidaan ja jos mahdollista säästetään seuraavaan seisakkiin.

3. Minkälaisia vaurioita ei saa korjaushitsata

Jos tarkastuksessa havaitaan että putkessa on muodonmuutoksia esimerkiksi lommoja, kolhuja tai soikeutta, putki tulee vaihtaa uuteen. Lisäksi jos putkessa on vesipesun jälkeen ruostumattoman pinnan värimuutoksia (tumma pinta), putki tulee vaihtaa uuteen. Tällöin putki on mahdollisesti ylikuumentunut esimerkiksi vesi/höyrypuolen kerrostumasta johtuen tai pinnoituksen irtoamisen takia.

4. Kuinka monta kertaa samaa vauriota voi päällehitsata

Samaa vauriota suositellaan korjattavaksi päällehitsauksessa maksimissaan kolme kertaa. Rajoitus koskee myös korjaushitsauksessa syntyneitä säröjä.

5. Kuinka suuren pinta-alan voi päällehitsata

Maksimi pinta-alaksi pohja- sekä seinäputkissa suositellaan XX mm x XX mm. Myös evien ja evähitsien korjaushitsaaminen lasketaan ylläolevaan pinta-ala rajoitukseen

6. Etäisyys kahden päällehitsin välillä

Etäisyys pituussuunnassa kahden erillisen korjaushitsin välillä tulee ylittää isomman korjaushitsin koko.

7. Vauriotyyppien erot

Jos särö ulottuu mustaan putkeen, putken laskennallinen minimi tulee selvittää ja varmistaa että päällehitsauksen tunkeuma ei mene sen alle. Jos mustan osuuden paksuus on alle minimin putki on vaihdettava. Mustan putken päällehitsausta minimin saavuttamiseksi ei suositella.

8. Toimenpiteet korjaushitsauksen jälkeen

Hitsauksen jälkeen korjaushitsattu alue tulee hioa/viimeistellä jouhevaan muotoon (epäjatkuvuuskohdat pois). Kohdissa joissa kova lämpövuoto (esim. aukkoputket) tulisi hioa muotoon.

Tunkeumanestetarkastus (fluoresoivalla menetelmällä) tulee tehdä koko korjaushitsatun ja hiotun alueen lisäksi lähialueelle. (Lähialueen pinta-ala vastaa vähintään korjaushitsattua aluetta). Lisäksi korjaushitsatulle ja hiotulle alueelle tehdään alueelle paksuusmittaus ultraäänellä.

9. Dokumentointi

Dokumentointi on tärkeä osa korjausprosessia. Koko prosessi tulee dokumentoida yhdeksi dokumentiksi, joka sisältää:

- Korjaus- ja tarkastussuunnitelmat
- Korjaustyön
- Tarkastusraportoinnin

Vaurion paikka tulee dokumentoida jotta se löytyy seuraavissa tarkastuksissa esimerkiksi valokuvalla, skitsillä tai muulla vastaavalla tavalla. Lisäksi paksuusmittauksen tulos ruostumaton vs. musta syvimmästä kohdasta otettuna tulee dokumentoida samaan paikkaan.

Kokouksessa 23.10.2014 kerättyjä ehdotuksia suosituksen sisällöksi:

- Soveltuvat / varovaisuutta vaativat kohteet, huomioitava esim. primääri-ilmaaukot / pohja / sula-aukot
- Suorat putket
- Taivutetut putket
- Jos kohde soveltuu päällehitsaukseen, huomioitava putken laskennallinen minimi ja hitsin tunkeuma (jos särö ulottuu mustaan putkeen, putki vaihdettava?)
- Vauriomekanismi selvitettävä
- Väliaikainen korjaus (jos kattila saatava ylös) -> seuranta & dokumentointi
- Muut materiaalit, ainakin yleisimmät esim. 304 ja Sanicro 38 erityisvaatimukset (esim. kuumahalkeilu, hitsauksen lisäaineet)
- Päällehitsattavan alueen koko / laajuus. Rajoituksia?
- **Mustan putken vahvistus täytehitsauksella**
- Ei saa hioa liikaa
- **Eripariliitosten päällehitsaus**
- Esim. 304 ja Sanicro 38

1.3

Pinnan puhdistus

Kattilaolosuhteissa on jähmettynyt sula, kulunut tapitus tai vanha käytössä lohkeillut metalliruisikutus poistettava putken pinnasta huolellisesti.

Hitsattavan materiaalin pinnan tulee olla puhdas liasta, rasvasta, ruosteesta, valssihilseestä tai muusta vastaavasta epäpuhtaudesta.

Puhdistus voidaan tehdä hiomalla, teräsharjaamalla, liuottimella tai hiekka-/raepuhalluksella.

1.4 Päällehitsauksen vaatimukset

Hitsauksen pätevyitys

Hitsausohjeet (WPS) pätevyitetään standardien EN ISO 15614-1, EN ISO 15614-7 tai EN ISO 15613 mukaan.

Hitsaajat pätevyitetään standardin EN 287-1 / EN ISO 9606-1 (käsinhitsaus) mukaan ja hitsausoperaattorit standardin EN 1418 / EN ISO 14732 (operaattorit, mekanisoitu hitsaus) mukaan.

Mikrorakenne

Tulipesän valmiin päällehitsauskerroksen tulee olla mikrorakenteeltaan ferriittis-austeniittinen, jolloin sopiva ferriitin määrä tulisi olla 5...15%. Tämä ferriittimäärä on edullinen hitsausteknisistä syistä, koska ferriitti pienentää hitsin kuumahalkeamistaipumusta.

Kemiallinen koostumus

Valmiin päällehitsauskerroksen nimellisanalyysin tulisi olla esimerkiksi:

Cr	16...19 %
Ni	8...11 %
Mo	0...2 %
C noin	0,06 %

Kromi- ja nikkelpitoisuudet voivat olla korkeammatkin edellyttäen, että mikrorakenteen koostumus säilyy kohdan 3.2 mukaisena.

Kerrospaksuus

Päällehitsauskerroksen paksuuden tulee olla riittävän ohut, jotta lämpösiirtyminen olisi hyvä ja seinämän kokonaisvahvuus ei kasvaisi liian suureksi.

Käytetty hitsausmenetelmä asettaa myös rajoituksia muodostuvan palon paksuudelle, ks. kohta 5.

1.5 Hitsausmenetelmät ja lisäaineet

Hitsausmenetelmät

Soveltuvat hitsausmenetelmät ovat puikkohitsaus (111), MAG umpilanka (135), MAG täytelanka (136,138) ja TIG hitsaus (141).

MAG umpilanka menetelmässä on suositeltavaa käyttää pulssitustekniikkaa.

Lisäaineet

Kohdassa 3.2 vaaditun analyysin saavuttaminen päällehitsauskerrokselle edellyttää yliseostetun lisäaineen käyttöä, jolla kompensoidaan perusaineen sekoittumisen ja

seosaineiden palohäviöiden (hapettumisen) vaikutus. Suositeltavia lisäainetyyppejä ovat mieluiten niukkahiiliset seokset (C maks. $\leq 0,03$ %), AISI 309- tai 309-Mo vastaavat lisäaineet. Lisäaineen valinnassa voidaan hyödyntää esim. Schaefflerin kaaviota.

Koska kerrospaksuuden tulee olla mahdollisimman ohut, tulee käytännössä kysymykseen vain yksipalkohitsaus. Monipalkokerros on laadultaan parempi mutta kustannuksiltaan kallis. Huonontuneen lämmönsiirtymisen vuoksi voivat lämpötilaerot muodostua liian suuriksi suurten kerrospaksuuden yhteydessä, jolloin terminen väsyminen saattaa aiheuttaa putkivaurioita toistuvien ylös- ja alasajojen seurauksena.

Hitsausparametrit

Yliseostettuja lisäaineita käytettäessäkään ei voida olla varmoja päällehitsauskerrokselle vaadittavat nimellisanalyysin saavuttamisesta ellei ole varmistettu käytettävien hitsausparametrien (esim. lisäaineen paksuus, virta, puikon kuljetusnopeus, levitystapa, työlämpötila, langan syöttönopeus ym.) soveltuvuudesta ko. hitsausmenetelmälle ja lisäaineelle. Sopivien hitsausparametrien löytämiseksi suositellaan ennen työhön ryhtymistä työkokeen suorittamista, hitsaaja-, kone sekä menetelmäkohtaisesti.

Esikuumennus ja välipalkolämpötila (työlämpötila)

Esikuumennuksen käyttö päällehitsauksessa ei normaalisti ole tarpeen. Palkojen välistä lämpötilaa (työlämpötilaa) tulee rajoittaa soveltuvien osien, suositeltava enimmäis välipalkolämpötila on $+150^{\circ}\text{C}$.

Työkoe

Ennen työn aloittamista suositellaan hitsattavan työkoekappale, samassa hitsausasennossa (pystyhitsi tai jalkohitsi) kuin mitä työssä tullaan käyttämään. Koehitsin tulee täyttää sille asetetut laatu-, koko- ja tunkeumavaatimukset. Koehitsin tutkimisessa tulee selvittää esim. seuraavat seikat:

- tunkeuman syvyys, kerrospaksuus ja palon muoto
- mikrorakennetarkastelu ja mahdolliset halkeamat
- ferriittipitoisuuden määrittäminen joko mikroskooppisesti tai ferriittimittarilla (esim. Permascope)
- hitsin ja muutosvyöhykkeen kovuusmittaus
- päällehitsauskerroksen analyysi

1.6

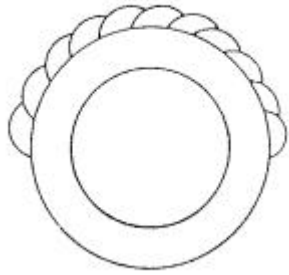
Hitsauksen suorittaminen

Päällehitsaus tulee suorittaa menetelmäkokeella / esituotannollisella kokeella (EN ISO 15614-1, EN ISO 15614-7 tai EN ISO 15613) pätevoitetyn hitsausohjeen (WPS) mukaisilla hitsausparametreilla. Erityisesti on huolehdittava, että menetelmäkokeella valittavaa työlämpötilaa (palkojen välinen lämpötila) ei ylitetä työskentelyn aikana, koska hitsin sekoittumisaste riippuu olennaisesti työlämpötilasta. Puikolla hitsattaessa on valokaari pidettävä lyhyenä ilmasta tulevan austeniittia kasvattavan typen määrän pienentämiseksi.

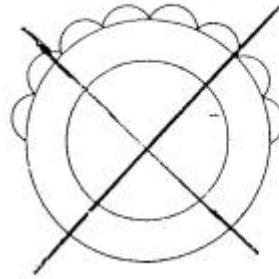
Työhön käytettävien hitsaajien tulee suorittaa ennen työn aloittamista hitsauskoe, jonka laatu arvostellaan visuaalisesti ja kerrospaksuusmittauksella.

Hitsille vaaditun analyysin saavuttamiseksi on lisäksi käytettävä sopivaa palon paksuutta, joka on yleisesti ϕ 3,25 mm ja ϕ 4 mm, puikolla hitsattaessa vähintään noin 3 mm ja kaasukaarihitsauksessa vähintään n. 2,5 mm.

Päällehitsaus tulee tehdä oheisen kuvan mukaan siten, että viereiset palot sulatetaan osittain limittäin, jolloin hitsin liiallinen, perusaineen sekoittumisesta johtuva laimeneminen saumakohtassa voidaan estää. Erityisesti tämä on huomioitava ensimmäisen palon hitsauksessa.



Oikea palkojen sijoittelu



Väärä palkojen sijoittelu

1.7 Päällehitsauksen jälkikäsittely

Päällehitsauskerroksen hiontaa ja jännityksenpoistohehkutusta ei suositella.

Jännityksenpoistohehkutus saattaa olla hitsauksen muodonmuutoksia ajatellen edullinen, mutta korroosiokestävyyteen sen vaikutus voi olla epäedullinen.

1.8 Päällehitsauksen tarkastus

Päällehitsauksen tarkastusmenetelmänä tulee kysymykseen lähinnä visuaalinen tarkastelu ja ferriitin mittaaminen ferriittimittarilla. Putken kokonaiseinämävahvuus voidaan mitata myös ultraäänimenetelmällä. Silmämääräistä tarkastusta voidaan täydentää tunkeumanestetarkastuksella säröjen ja huokoisuuden toteamiseksi.

Tarpeen vaatiessa voidaan työn laatu tarkistaa ainettarikkovilla menetelmillä pistokokein (esim. näyte otetaan päällehitsatun putken päästä).

1.9 Hitsausvirheiden korjaus

Päällehitsauksessa syntyneet virheet avataan hiomalla riittävän laajalta alueelta ja virheen poistuminen tarkastetaan visuaalisesti ja tarvittaessa tunkeumanestetarkastuksella.

Korjaushitsaus suoritetaan soveltuvan hitsausohjeen (WPS) mukaisesti ja tarkastetaan silmämääräisesti (tarvittaessa tunkeumanesteellä).

LIITE 3

**Kandidaatintyö: Soodakattilan ääninuohous
Santeri Peltola, Tampereen teknillinen yliopisto19.4.2015**



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SANTERI PELTOLA
SOODAKATTILAN ÄÄNINUOHOUS

Kandidaatintyö

Tarkastaja: TkT Aino Leppänen
Kemian ja biotekniikan laitos

TIIVISTELMÄ

Santeri Peltola: Soodakattilan ääninuohous

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 44 sivua, 6 liitesivua

Huhtikuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan tekniikan kandidatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: TkT Aino Leppänen

Avainsanat: ääninuohous, soodakattila, tuhka, likaantuminen, lämmönsiirto

Tämän työn tavoitteena oli koota yhteen laitevalmistajien ja loppukäyttäjien ääninuohouksesta kerryttämää kokemusta soodakattilaprosessin yhteydessä. Soodakattilaa käytetään selluteollisuudessa energiantuotantoon ja sellunvalmistusprosessissa käytettävien kemikaalien talteenottoon. Ääninuohous puolestaan on menetelmä, jossa voimakattilan lämmönvaihtimiin ja rakenteisiin kiinnittyneitä tuhkakerrostomia pyritään poistamaan voimakasta ääntä tuottavien nuohouslaitteiden avulla. Ääninuohous ei ole vakiintunut menetelmä soodakattilaprosessin yhteydessä. Soodakattilan nuohoaminen on haastavaa, koska soodakattilassa polttoaineena käytettävä mustalipeä sisältää runsaasti kattilan lämmönvaihtimia likaavaa tuhkaa.

Työssä on esitelty tutkimuskäyttöön saatuja käyttökokemuksia ääninuohouksesta. Lisäksi työssä on käsitelty kirjallisuudessa esitettyjä tutkimustuloksia soodakattiloiden tuhkakero-rostumien fysikaalisiin ominaisuuksiin liittyen. Työssä on myös tarkasteltu ääniaallon fysikaalisia ominaisuuksia ja äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen tulokseen. Äänen käyttäytymisestä kattilaympäristössä ei ole julkista tutkimusaineistoa saatavilla.

Ääninuohouksen toimivuudesta ei ole tehty suurta määrää julkista tutkimusta. Tähän työhön koottu ääninuohouksen käyttökokemus perustuu suomalaisen laitevalmistajan jakamiin kokemuksiin ja mittauksiloksiin sekä useiden laitevalmistajien julkaisemiin käyttöraportteihin. Kerätyn aineiston perusteella ääninuohous vaikuttaisi toimivan useissa tapauksissa hyvin savukanavan alueilla, jossa savukaasun lämpötila on riittävän matala, jotta tuhka on kiinteässä olomuodossa. Ääninuohouksen käyttöönoton myötä useissa tapauksissa nuohoushöyryn kulutus ja likaantumisongelmat ovat vähentyneet.

Tutkimuksia soodakattilan tuhkan fysikaalisista ominaisuuksista on tehty, mutta ääninuohouksen vaikutusta tuhkakerrostumiin ei ole tutkittu. Tämän työn perusteella äänentaajuudella vaikuttaisi olevan selkeä yhteys äänen vaimentumiseen kattilassa. Äänen vaimentuminen rajoittaa ääninuohouksen tehokasta toiminta-aluetta. Taajuuden vaikutusta kattilarakenteisiin kohdistuvaan mekaaniseen rasitukseen tai tuhkan irtoamismekanismeihin ei kuitenkaan ole tutkittu tässä työssä. Tämän vuoksi työn perusteella ei voida yksiselitteisesti todeta, mikä äänentaajuusalue on soveltuvien soodakattilan ääninuohoukseen. Tulevaisuudessa tutkimus voisi keskittyä edellä mainittuihin aiheisiin.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MUSTALIFEÄN SYNTY JA POLTTO	2
2.1	Mustalifeän muodostuminen sellunkeitossa	3
2.2	Mustalifeän palaminen soodakattilassa	4
3.	SOODAKATTILAN LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN LIKAANTUMINEN	7
3.1	Soodakattilan savukaasujen koostumus	7
3.1.1	Natrium- ja rikkiyhdisteet	7
3.1.2	Kalium- ja klooriyhdisteet	9
3.1.3	Fume-hiukkaset soodakattilassa.....	10
3.1.4	Carry over -hiukkaset soodakattilassa.....	10
3.2	Tuhkakerrostumat.....	11
3.2.1	Carry over -tuhkan kerrostuminen	12
3.2.2	Fume-tuhkan aiheuttama kerrostuminen.....	13
3.2.3	Tulistimien likaantuminen	14
3.2.4	Keittoputkien likaantuminen.....	16
3.2.5	Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet	17
3.3	Likaantumisen vaikutus soodakattilan toimintaan	18
4.	PERINTEISET LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN PUHDISTUSMENETELMÄT ..	20
5.	ÄÄNINUOHOUS	21
5.1	Ääniaalto	21
5.2	Resonointi.....	24
5.3	Äänen vaimentuminen lämmönvaihtimessa.....	25
5.3.1	Äänen absorboituminen savukaasussa	26
5.3.2	Äänen absorboituminen tuhkakerrostumaan.....	27
5.4	Ääninuohouksen periaate	29
5.5	Soodakattilan ääninuohoamisen edellytykset	31
6.	ÄÄNINUOHOUKSEN KÄYTTÖKOKEMUKSIA.....	34
6.1	Ääninuohous soodakattiloissa	34
6.2	Ääninuohous Suomenojan voimalaitoksella	35
6.3	Ääninuohous muissa voimakattiloissa	37
7.	YHTEENVETO JA POHDINTA	38
	LÄHTEET.....	41

LIITE A: KESKUSTELU ÄÄNINUOHAINVALMISTAJAN EDUSTAJIEN KANSSA

LIITE B: MITTAUSDATAA SUOMENOJAN VOIMALAITOKSELTA ÄÄNI-
NUOHOUKSEN YHTEYDESSÄ

1. JOHDANTO

Soodakattilan ääninuohousta on kokeiltu 30 vuoden aikana paikallisten tukkeentumisongelmiin ratkaisemiseen. Pysyviä ratkaisuja soodakattilan ääninuohouksessa ei kuitenkaan ole saavutettu. Soodakattilan ääninuohoaminen on erityisen vaativaa, koska soodakattilan polttoaineena käytettävä mustalipeä sisältää runsaasti epäorgaanista, tuhkaa muodostavaa ainesta.

Mustalipeän koostumus poikkeaa monista yleisistä polttoaineista. Lipeän kuiva-aineen tuhkapitoisuus on tyypillisesti noin 30 % ja suurimmillaan jopa 40–50 % [1][2][3][4], kun esimerkiksi kivihiilen tuhkapitoisuus on noin 10–15% [5]. Lisäksi mustalipeän tuhkan koostumus on tukkeentumisongelmien kannalta haastava. Mustalipeän tuhka sisältää runsaasti alkalisulfaatteja ja -klorideja, joiden sulamislämpötilat ovat matalia.

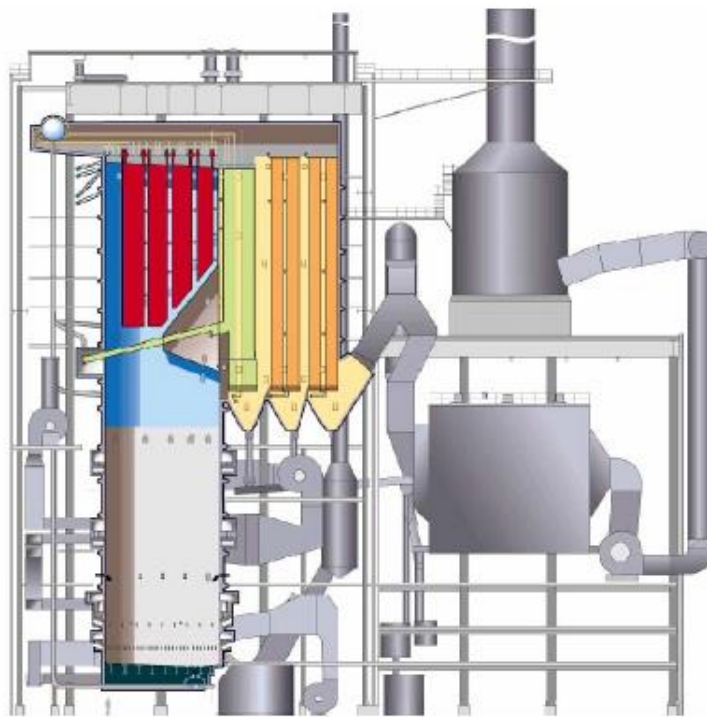
Työn tavoitteena on kartoittaa aiheesta jo tehtyä tutkimusta. Työhön on koottu ääninuohoinvalmistajien käyttökokemuksia ja tutkimustuloksia soodakattilan tuhkan koostumuksesta ja ominaisuuksista. Lisäksi työssä on käsitelty ääniaaltoja fysikaalisena ilmiönä ja pohdittu äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen lopputulokseen.

Luvussa 2 on esitelty soodakattilan toimintaperiaate ja sellunvalmistuksen kemikaalikierto, johon mustalipeän polttaminen soodakattilassa kuuluu. Luvussa 3 on käsitelty tarkemmin mustalipeän tuhkan koostumusta, tulipesästä karkaavien lämmönsiirtopintoja liikaavien yhdisteiden ominaisuuksia ja niiden kerrostumismekanismia savukanavan eri alueilla. Luvussa 4 on esitelty perinteinen lämmönsiirtopintojen puhdistamismenetelmä, höyrynuohous.

Luvussa 5 on pohdittu ääniaallon fysikaalisia ominaisuuksia, äänentaajuuden ja äänen vaimentumisen välistä yhteyttä sekä pohdittu ääninuohouksen toimivuuden edellytyksiä savukanavan eri osissa. Lukuun 6 on koottu laitevalmistajien ja loppukäyttäjien ääninuohoukseen liittyvää käyttökokemusta. Luvussa 7 on tehty yhteenveto tutkimuksen tärkeimmistä havainnoista ja ehdotettu tulevaisuuden tutkimuskohteita.

2. MUSTALIPEÄN SYNTY JA POLTTO

Kemiallisessa metsäteollisuudessa sellua valmistetaan kemiallisen kuidutuksen menetelmillä. Tässä luvussa esitettyä sellunvalmistusmenetelmää kutsutaan sulfaattisellumenetelmäksi. Sellun valmistuksen raaka-aineena käytetään puuta, joka sisältää pääosin selluloosaa ja selluloosakuituja yhdistävää ligniiniä. Sellunvalmistuksessa puun selluloosa pyritään erottamaan muusta aineksesta liuottamalla puun ligniiniä lämpöenergian ja kemikaalien avulla. Sellunvalmistuksen sivutuotteena syntyy mustalipeää, joka sisältää liuenutta puuainesta ja prosessoinnissa käytettyjä kemikaaleja. Talteenotto tapahtuu polttamalla mustalipeää soodakattilassa, jolloin mustalipeän orgaanisen aineksen palaessa vapautuva lämpöenergia hyödynnetään laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannossa. Epäorgaaninen, keittokemikaaleja sisältävä sula tuhka puolestaan voidaan kerätä talteen uusiokäyttöä varten. Soodakattilan tehtävä onkin mustalipeän poltossa vapautuvan energian hyödyntäminen sekä natrium- ja rikkiyhdisteiden talteenotto. Kuvassa 2.1 on esitetty soodakattilan tyypillinen rakenne ja lämmönvaihtimet.



Kuva 2.1. Soodakattilan tyypillinen rakenne [2].

Tulipesäksi kutsutaan kattilan avointa aluetta, jossa varsinainen mustalipeän palaminen ja keittokemikaalien talteenotto tapahtuu. Tulipesän seinämät on päällystetty höyrystinputkilla. Soodakattilalle ominainen lämmönvaihdin on kuvassa 2.1 vihreällä merkitty tulipesän yläpuolella poikittain oleva lämmönvaihdin, joka vähentää säteilylämmönsiirtoa

tulistinalueelle. Näin rajoitetaan tulistinalueen lämpötilaa ja siten sulan tuhkan aiheuttamia likaantumisongelmia tulistinalueella. Lisäksi keittoputkien avulla voidaan vaikuttaa savukaasujen virtausnopeuteen ja -jakaumaan. [3]

Tulistimet on merkitty kuvaan 2.1 punaisella. Savukaasun virtaussuunnassa ensimmäisiä tulistimia kutsutaan säteilytulistimiksi, koska säteilyllä on suuri merkitys lämmönsiirrossa savukaasusta säteilytulistimissa virtaavaan höyryyn. Virtaussuunnassa seuraavia tulistimia kutsutaan konvektiotulistimiksi, koska pääasiallinen lämmönsiirtomekanismi on konvektiivinen lämmönsiirto. Keittoputkisto, jossa vettä höyrystyy, on merkitty kuvassa 2.1 vihreällä. Oranssilla merkityt lämmönvaihtimet ovat veden esilämmittimiä eli ekonomaisereita. Lisäksi soodakattilan savukanavassa on tyypillisesti ilman esilämmitin ja sähkösuodin, jotka ovat jäljempänä savukanavassa. Tuhkan aiheuttamia likaantumisia ja tukkeentumisongelmia esiintyy erityisesti lämmönvaihtimissa. Tuhkaa kerääntyy myös muille kattilapinnoille, mikä voi ahtauttaa savukanavaa ja aiheuttaa siten häiriöitä savukaasun virtaukseen.

2.1 Mustalipeän muodostuminen sellunkeitossa

Sellun valmistuksen tärkein raaka-aine on puu. Havupuut ovat Suomessa tärkein puutyyppi pitkien kuitujensa vuoksi, mutta myös lehtipuita voidaan käyttää raaka-aineena. Raaka-aineena käytettävän puun kuitujen pituus vaikuttaa paperin lujuuteen. [6]

Raaka-aineen koostumus vaikuttaa mustalipeän ominaisuuksiin ja siten myös soodakattilan tulipesän olosuhteisiin ja savukaasun koostumukseen. Koska prosessiketju puusta savukaasuksi on pitkä ja monivaiheinen, soodakattilan lämmönsiirtopintojen ohi virtaavien tuhkapartikkeleiden määrä ja laatu vaihtelevat jatkuvasti.

Ennen puuaineksen keittämistä puu kuoritaan, haketetaan ja seulotaan. Kuori ja huonosti sulava aines poistetaan, mikä parantaa sellun laatua. Hakettamalla keittoon saavutetaan hyvät olosuhteet niin kutsutuille keittokemikaaleille, eli natriumhydroksidille ($NaOH$) ja natriumsulfidille (Na_2S). Sellunkeitossa keittokemikaalit liuottavat puun ligniiniä, joka on puun selluloosakuituja yhdistävä sidosaie.

Keittovaiheessa hakkeen joukkoon lisätään valkolipeää, joka sisältää varsinaisten keittokemikaalien lisäksi natriumkarbonaattia, natriumsulfaattia ja pieniä määriä muita natriumyhdisteitä. Tuotettu valkolipeä on hyvin vahvaa. Sitä laimennetaan selluloosamassan pesuvaiheessa erotetulla laihalla mustalipeällä, jotta nestemäärä keitossa olisi riittävä. Kemikaalit muodostavat keittoon alkaliset olosuhteet. Liukenemista nopeuttaa keitossa käytettävä korkea lämpötila ja paine. [6]

Keittolipeässä puun ligniini ja osa hemiselluloosta liukenevat natrium- ja rikkiyhdisteiden kanssa muodostuvien moninaisten reaktioiden kautta erilaisiksi orgaanisiksi ligniinin yhdisteiksi ja karboksyylihapojen natriumsuoloiksi. Puuaineksen liukenemisen jälkeen

selluloosa erotetaan muusta aineksesta ja pestään. Keitossa syntyvää jätelientä kutsutaan mustalipeäksi. Mustalipeä sisältää edellä mainittuja orgaanisia puusta liuenneita yhdisteitä ja epäorgaanisia keittokemikaalien muodostamia yhdisteitä. Mustalipeä sisältää myös runsaasti vettä, ja keiton jälkeinen kuiva-ainepitoisuus on 15–20 %. [6] Taulukossa 1 on esitetty tyypillinen mustalipeän kuiva-ainekoostumus.

Taulukko 1.1. Mustalipeän kuiva-ainekoostumus [7].

Aine	massa-% kuiva-aineesta
C	35.0 %
H	3.3 %
O	35.7 %
Na	19.7 %
K	1.6 %
S	4.0 %
Cl	0.6 %
Inertit, Si, Al, Fe Ca, jne.	0.1 %

Taulukosta 1 nähdään, että epäorgaanisen, tuhkaa muodostavan aineksen määrä mustalipeän kuiva-aineesta on huomattava. Epäorgaanisia aineita ovat natrium, rikki, kalium, kloori ja inertit aineet. Orgaanisesta aineksesta noin viidesosa on tulipesän pohjalle kekoa muodostavaa jäännöshiiltä [3]. Loppuosa on haihtuvaa, palavaa ainesta. Massaosuudeltaan merkittävimmät epäorgaaniset yhdisteet ovat natriumkarbonaatti (Na_2CO_3) ja natriumsulfaatti (Na_2SO_4) [8].

2.2 Mustalipeän palaminen soodakattilassa

Keittovaiheen jälkeen mustalipeän kuiva-aineosuus on matala. Siksi lipeä viedään haihduttamolle ennen polttoa. Haihdutus tapahtuu soodakattilasta johdettavalla prosessihöyryllä. Mustalipeä väkevöidään 60–85 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Vesipitoisuuden laskeminen nostaa tulipesän lämpötilaa, tehostaa koksikeon pelkistysprosessia ja laskee savukaasun rikkidioksidipitoisuutta. Toisaalta mustalipeän viskositeetti kasvaa samalla, mikä aiheuttaa ongelmia lipeän käsittelyyn ja ruiskutukseen. Siksi kuiva-ainepitoisuutta ei voida nostaa rajatta. Lämpötilan nostaminen laskee mustalipeän viskositeettiä, minkä vuoksi mustalipeää esilämmitetään käsittely- ja ruiskutusvaiheessa.

Mustalipeä ruiskutetaan tulipesään keskimäärin 2–3 mm:n kokoisina pisaroina, esilämityksestä riippuen noin 150 °C:n lämpötilassa [8]. Pisarakoko voi vaihdella puolesta millimetristä viiteen millimetriin [7]. Palamisen ensimmäisessä vaiheessa mustalipeän si-

sältämä vesi haihtuu. Kuivuneen mustalipeäpisan pyrolysoitumisvaiheessa pisan sisältämä haihtuva orgaaninen kaasuaaines palaa näkyvällä liekillä, ja samalla osa pisan sisältämistä epäorgaanisista yhdisteistä vapautuu savukaasuvirtaan. Pyrolysoitumisvaiheessa pisan halkaisija kasvaa, ja pisara jää leijumaan nousevassa kaasuvirtauksessa. Pyrolysoitumisen aikana pisan lämpötila kohoaa ruiskutuksen lämpötilasta tulipesän lämpötilaan, joka on nykyaikaisessa soodakattilassa tyypillisesti yli 1000 °C [8][3].

Kun haihtuvat kaasut ovat palaneet, jäljelle jäävä kiinteä koksijäännös jatkaa palamista, ja pisan lämpötila nousee edelleen [3]. Samalla pisan halkaisija pienenee ja pisara painuu alaspäin kohti koksikekoa. Koksijäännös sisältää kiinteää, palavaa hiiltä ja sulassa olomuodossa olevia epäorgaanisia suoloja.

Tulipesän alaosissa vallitsevat pelkistävät olosuhteet [3]. Koksijäännöksen palamisessa tapahtuu pelkistysreaktioita, mikä on energiantuotannon ohella toinen soodakattilan päätehtävä. Hiili pelkistää natriumsulfaattia natriumsulfidiksi reaktioyhtälöiden (2.1) ja (2.2) mukaisesti. Rikin pelkistymistä tapahtuu putoamisvaiheessa kaasumaisen hiilen pelkistämänä sekä keossa kiinteän hiilen pelkistämänä. [8]



Pelkistysreaktion nopeus kasvaa, kun hiilen osuus keossa kasvaa [8]. Reduktioaste, eli sulfidin ja rikin kokonaismäärän välinen suhdeluku ($\frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4}$), kasvaa, kun tulipesän lämpötila nousee ja paikallinen ilmakerroin laskee. Palamisen loppuvaiheessa pelkistysreaktioiden jälkeen rikki on sitoutunut lähes kokonaan natriumsulfidiksi. Yli jäävä natrium on natriumkarbonaattina. [3]

Natriumsulfidi hapettuu helposti natriumsulfaatiksi, mikäli lipeäpisara palaa loppuun asti ennen kekoon laskeutumista. Siksi optimaalisessa tilanteessa pisara laskeutuu koksikeon pinnalle palavana [8]. Tällöin sulassa olomuodossa olevat natriumsulfidi ja natriumkarbonaatti valuvat tulipesän pohjalle ja kiinteä palava koksijäännös jää kekoon. Tulipesän pohjalta sula aine juoksetetaan kattilan ulkopuolelle liuotussäiliöön.

Todellisuudessa pisarakoko ja savukaasun virtausnopeus vaihtelevat paljon, ja osa mustalipeästä tempautuu virtauksen mukana tulipesän yläosiin. Toisaalta painavimmat lipeäpysarat voivat pudota kekoon vielä märkinä viilentäen kekoa.

Natriumsulfidin uudelleenhapettumisen välttämiseksi keon pinnalla on jatkuvasti oltava riittävästi palavaa hiiltä, jonka kanssa happi voi reagoida. Käytännössä osa natriumsulfidista kuitenkin pääsee hapettumaan ilmassa tai keossa. [3]

Soodakattilasta sula tuhka johdetaan liuotussäiliöön, jossa kemikaalit liuotetaan veteen tai heikkoon valkolipeään [8]. Syntynyttä liuosta kutsutaan soodalipeäksi tai viherlipeäksi. Suurin osa sulasta aineksesta on natriumkarbonaattia ja noin kolmasosa on natriumsulfidia [6]. Soodalipeässä natriumsulfidi on jo sellaisenaan valmis uudelleenkäytettäväksi keitossa. Natriumkarbonaatti täytyy kuitenkin muuttaa natriumhydroksidiksi kaustisoimalla. Kaustisoinnin lopputuote on valkolipeä. Kaustisointia ei esitellä tässä työssä.

Osa keittokemikaaleista karkaa kierrosta regeneroinnin aikana. Hävikkiä tapahtuu jonkin verran soodakattilassa palamisen yhteydessä, kun osa natrium- ja rikkiyhdisteistä höyrystyy ja kulkeutuu savukaasun mukana ulos piipusta. Myös carry over -ilmiö aiheuttaa natriumin ja rikin karkaamista tulipesästä. Carry over -ilmiö esitellään luvussa 3.1.4.

3. SOODAKATTILAN LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN LIKAANTUMINEN

Mustalipeä sisältää runsaasti epäorgaanista ainesta, jota tulipesän korkeassa lämpötilassa höyrystyy ja kulkeutuu savukaasun mukana ulos tulipesästä. Likaantumisongelmat soodakattiloissa ovatkin huomattava ongelma. Merkittävimpiä tuhkan komponentteja ovat rikki ja kloori sekä alkalit natrium ja kalium. Savukaasujen mukana virratessaan höyrystynyt tuhka jäähtyy ja tiivistyy, jolloin tuhka hiukkasina takertuu lämmönsiirtopinnoille ja kattilarakenteisiin.

3.1 Soodakattilan savukaasujen koostumus

Savukaasuvirtaus koostuu polttoilmasta, carry over -hiukkasista sekä mustalipeästä vapautuneista vesihöyrystä ja palamistuotteista. Palamisessa vapautuu sekä orgaanisia mustalipeän palavia kaasuja että epäorgaanista, tuhkaa muodostavaa ainesta. Tuhka voidaan jakaa syntymekanisminsa perusteella kahteen osaan: suuriin carry over -hiukkasiin ja hienojakoiseen fume-tuhkaan. Niitä on käsitelty tarkemmin alaluvuissa 3.1.3 ja 3.1.4.

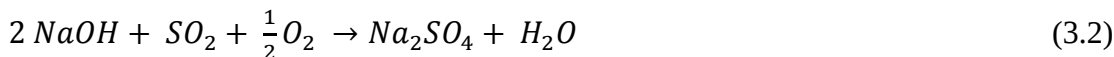
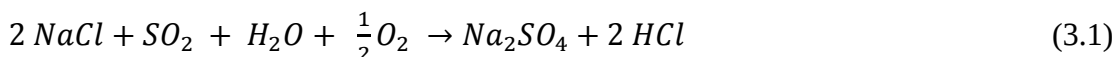
Soodakattilan savukaasun tuhka koostuu pääosin epäorgaanisista natriumyhdisteistä, joille tyypillistä on matala sulamislämpötila. Ennen sulamislämpötilaa on noin sadan asteen lämpötila-alue, jossa tuhka on tarttuvaa [3]. Osittain sula tuhka aiheuttaa ongelmia lämmönsiirtopinnoille kiinnittyessään. Savukaasun koostumukseen vaikuttavat pääasiassa tulipesän lämpötila, polttoilmansyöttö ja mustalipeän koostumus. Tyypillinen savukaasun kosteuspitoisuus on noin 10–15 % [8, s. 91–94].

Natrium ja kalium ovat alkalimetalleja, jotka reagoivat herkästi muodostaen alkalisuoloja. Natriumille seuraavassa luvussa esitetyt ominaisuudet voidaankin monin osin yleistää kaliumille. Natrium ja rikki muodostavat sellunkeittoprosessin aktiiviset yhdisteet, minkä vuoksi natrium ja kalium on käsitelty eri alaluvuissa.

3.1.1 Natrium- ja rikkiyhdisteet

Natriumia ja rikkiä vapautuu tulipesän alaosissa savukaasuihin. Mustalipeässä alkalit esiintyvät suuressa määrin epäorgaanisina suoloina, joita haihtuu herkästi lipeäpisan pyrolysoituessa [8, s. 16][4]. Mustalipeän natriumista noin 10 % höyrystyy tai kulkeutuu carry overin mukana savukaasuihin. Tyypillinen natriumin osuus mustalipeän kuiva-aineen massasta on noin 20 %. [7] Natriumia vapautuu savukaasuihin pisan pyrolysoitumisessa pääosin alkuainen natriumina, minkä jälkeen se nopeasti muuttuu kaasumaiseksi natriumhydroksidiksi ja -kloridiksi [9]. Tulipesän yläosissa lämpötilan laskiessa suurin

osa natriumista muuttuu sulaksi natriumsulfaatiksi ja -karbonaatiksi reaktioyhtälöiden (3.1–3.3) mukaisesti [7].



Savukaasun edelleen jäähtyessä tulistinalueella natriumsulfaatti ja -karbonaatti jähmettyvät nopeasti. Puhtaan natriumkarbonaatin sulamislämpötila on 851 °C. Natriumsulfaatin sulamislämpötila on 884 °C. [10]

Pisaran pyrolysoitumisvaiheessa 10–20 % mustalipeän sisältämästä rikistä höyrystyy pelkistyneinä yhdisteinä, pääasiassa rikkivetyä (H_2S), mutta lisäksi myös karbonyylisulfidina (COS), metyylimerkaptaanina (CH_3SH) ja dimetyylimerkaptaanina ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$) [7][8]. Lähes kaikki rikkivety hapettuu nopeasti rikkidioksidiksi [1]. Savukaasun jäähtyessä rikkivedyn hapettuminen nopeasti loppuu [3]. Pyrolysoitumisvaiheen lisäksi rikkiä karkaa carry over -hiukkasten mukana.

Natriumin ja rikin höyrystymisen ja siten häviöiden määrä on riippuvainen polton olosuhteista. Matala paikallinen ilmakerroin lisää rikin määrää savukaasuissa [3]. Korkea mustalipeän kuiva-ainepitoisuus johtaa korkeaan lämpötilaan, mikä voi vähentää rikkidioksidin määrää savukaasuissa kahdella tavalla. Lämpötilan nostaminen tulipesässä lisää natriumin höyrystymistä, jolloin lähes kaikki rikki sitoutuu natriumsulfaatiksi. Samalla syntyvän tuhkan määrä kasvaa. [7] Lämpötilan nostaminen voi myös suoraan vähentää rikin vapautumista lipeäpisaran pyrolyysissä [7], mutta asiasta ei ilmeisesti ole yksiselitteistä näyttöä [11].

Rikkidioksidin määrä savukaasuissa on riippuvainen myös mustalipeän sulfiditeetista, eli natriumin ja rikin suhteesta ($\frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}}$). Kuten edellä todettiin, kuiva-ainepitoisuuden ja siten tulipesän lämpötilan nosto vähentää rikkiyhdisteiden vapautumista. Vapautunut rikkivety hapettuu tulipesän hapettavalla vyöhykkeellä lähes kokonaan rikkidioksidiksi ja edelleen natriumsulfaatiksi. Jos savukaasun $\frac{\text{Na}_2}{\text{S}}$ -suhde on suurempi kuin yksi, lähes kaikki rikkidioksidi hapettuu natriumsulfaatiksi. Matala lämpötila tulipesässä vähentää natriumhydroksidin määrää ja lisää rikkivedyn määrää. Jos lisäksi mustalipeän sulfiditeetti on korkea, natriumia ei ole tarpeeksi sitomaan kaikkea rikkiä sulfaatiksi, vaan rikkidioksidia jää savukaasuihin. Edellä esitetyt reaktiot tapahtuvat tulipesän keski- ja yläosissa korkeassa lämpötilassa sulassa olomuodossa. [7]

Jäähtyvässä savukaasussa olevasta rikkidioksidista 1,3–2,5 % hapettuu rikkitrioksidiksi [8]. Reagoidessaan natriumsulfaatin kanssa rikkitrioksidi muodostaa vetysulfaattia

($NaHSO_4$). Vetysulfaatti on hapanta, helposti lämmönsiirtopinnoille tarttuvaa ja se esiin-
tyy putkien pinnoilla kiinteänä ja nestemäisenä. Se voi nopeasti aiheuttaa kerrostumia ja
korroosiota savukaasukanavissa. [3] Reagoidessaan veden kanssa rikkiatrioksidi muodos-
taa rikkihappoa (H_2SO_4), mikä aiheuttaa korroosio-ongelmia savukanavan viileämmillä
alueilla [8].

Nykyaikaisessa soodakattilassa tulipesän lämpötila on korkea ja mustalipeän sulfiditeetti
matala. Tällöin savukaasussa ei juurikaan esiinny rikkidioksidiä eikä vetysulfaattiakaan
muodostu. Rikki on sitoutunut lähes kokonaan natriumsulfaattiin ja ylimääräinen natrium
on natriumkarbonaattina. [7]

Suurin osa savukaasujen natrium- ja rikkiyhdisteistä erotetaan savukaasuista säh-
kösuodattimien ja tuhkasuppiloiden avulla. Kerätty natrium ja rikki palautetaan takaisin
kemikaalikiertoon sekoittamalla tuhka väkevöityyn mustalipeään. Pieni osa keittokemi-
kaaliyhdisteistä kuitenkin karkaa lopullisesti kierrosta savukaasujen mukana. Merkittä-
vimmat karanteet rikki- ja natriumyhdisteet ovat rikkidioksidi ja natriumsulfaatti, tosin
nykyaikaisessa soodakattilassa rikkidioksidiemissio on usein lähes olematon. [7] Pois-
toilman mukana karkaa myös pelkistyneitä rikkiyhdisteitä, lähinnä rikkivetyä ja merkap-
taaneja [3].

3.1.2 Kalium- ja klooriyhdisteet

Kalium ja kloori ovat likaantumisen kannalta tärkeimmät kemikaalikierron ulkopuoliset
alkuaineet savukaasuissa. Mustalipeän kalium ja kloori ovat peräisin puusta, mutta kloo-
ria voi tulla kemikaalikiertoon myös sellunvalmistusprosessin muista vaiheista.

Kalium ja kloori alentavat tuhkan sulamislämpötilaa ja tekevät tuhkasta tarttuvaa. Tyy-
pillinen kaliumpitoisuus suomalaisessa mustalipeässä vaihtelee välillä 1–4 massa-%.
Klooripitoisuus on tyypillisesti 0,1–0,8 massa-%. [7][8, s 117]

Alkaliklorideja ($NaCl$, KCl) muodostuu välittömästi pyrolyysissä höyrystyvien alkalien
vapauduttua pisarasta [11][12]. Kloridien sulamislämpötilat ovat matalia, minkä vuoksi
ne aiheuttavat merkittäviä likaantumisongelmia [13]. Reaktioyhtälön (3.1) (sivu 8) mu-
kaisesti rikkidioksidi muuttaa klooria vetykloridiksi (HCl), joka ei tiivisty savukaasuissa
eikä kerrostu lämmönsiirtopinnoille [14]. Rikin vähentyminen tulipesässä on lisännyt klori-
dien määrää tuhkassa, koska edellä esitetty kloridin muuttuminen sulfaatiksi on vähen-
tynyt [8, s. 117–118]. Nykyaikaisessa kattilassa suuri osa kloorista sitoutuu lipeän pala-
misessa alkaliklorideiksi. Kloridit ovat tulipesän korkeissa lämpötiloissa kaasufaasissa.
Lämpötilan laskiessa tulistinalueella suurin osa alkaliklorideista muuttuu alalisulfaa-
teiksi ja vetykloridiksi. Osa ylikylläisestä kaasumaisesta alkalikloridista tiivistyy tuhka-
hiukkasten pinnalle tehden siitä tarttuvaa. [13]

Pyrolyysissä höyrystyvä kalium reagoi pitkälti kuten natrium. Luvussa 3.1.1 esitetyt reaktioyhtälöt (3.1–3.3) on kirjoitettu natriumille, mutta pätevät myös kaliumille. Tutkimuksessa [12] mallinnettiin alkaliyhdisteiden koostumusta puuhakkeen poltossa. Tutkimuksen mukaan tulipesän alaosissa kalium on pääasiassa kaliumhydroksidina (60 % KOH) ja kaliumkloridina (15 % KCl). Tuloksia voitaneen verrata myös soodakattilaproessiin. Kuten natriumhydroksidi, kaliumhydroksidi hapettuu tertiääri-ilmassa tulipesän keski- ja yläosissa muodostaen kaliumsulfaattia (K_2SO_4). Kalium on sitoutunut tuhkassa myös kaliumkarbonaatiksi (K_2CO_3) [12][15].

3.1.3 Fume-hiukkaset soodakattilassa

Fume-hiukkasilla tarkoitetaan englanninkielisessä kirjallisuudessa pientä, lähteestä riippuen halkaisijaltaan 0,1–1 μm :n tai alle 3 μm :n kokoista kiinteää tuhkaa [13][12][11]. Tässä työssä fume-tuhka ei tarkoita lentotuhkaa, vaan lentotuhkan määritelmään sisältyy kaikki savukaasun mukana virtaava kiinteä aines. Fume-tuhka on tulipesässä höyrystynyttä epäorgaanista ainesta, joka tiivistyy jäähtyessään.

Tulipesässä höyrystyvistä yhdisteistä merkittävimpiä ovat natriumsulfaatti ja natriumkarbonaatti. Tulipesän jälkeen natriumkarbonaatti sulfatoituu nopeasti, jolloin jopa 90 % fume-tuhkasta on natriumsulfaattia. [7, s. 255] Sulfatoitumisen aste riippuu kuitenkin rikidioksidin määrästä. Lisäksi fume-tuhkassa on kloorisuoloja ($NaCl$, KCl).

Fume-hiukkasen tiivistyminen voi tapahtua homogeenisesti tai heterogeenisesti. Homogeeninen ydintyminen (nukleaatio) tapahtuu savukaasuvirrassa ilman tiivistymisalustaa, kun tiivistyvän kaasun kylläisen höyryn paine ylittyy moninkertaisesti. Heterogeeninen tiivistyminen tapahtuu joko suoraan lämmönsiirtopintojen seinämiin tai savukaasuvirtauksessa kulkeutuvan hiukkasen pintaan. [12]

Olosuhteet vaikuttavat siihen, kumpi mekanismi on vallitseva. Jos tiivistymispintoja, eli lämmönsiirtoputkien seinämiä ja tuhkapartikkeleita, on runsaasti, heterogeeninen tiivistyminen yleistyy. Lämpötilan, ja siten kylläisen höyrynpaineen, nopea lasku puolestaan suosii homogeenistä tiivistymistä. [12] Homogeenisen tiivistymisen merkitys on kuitenkin kyseenalainen, koska savukaasuvirtauksessa on inertejä tuhka hiukkasia, jotka voivat toimia tarttumispintana.

3.1.4 Carry over -hiukkaset soodakattilassa

”Carry over” on nimitys ilmiölle, jossa tulipesään ruiskutettu, osittain palanut mustaliipeäpisara tempautuu polttoilman ja nousevien savukaasujen virtauksen mukana tulipesässä ylöspäin. Carry over -ilmiö aiheuttaa huomattavia ongelmia tulistimien ja muiden lämmönsiirtopintojen toiminnassa. Pisarat aiheuttavat paksuja, tahmeita kerrostumia, jotka voivat aiheuttaa lämmönsiirron heikkenemisen ja painehäviön kasvun lisäksi teräspintojen korroosiota.

Merkittävimmät tekijät carry over -ilmiön esiintymisessä ovat mustalipeäpisan koko ja palamisilman syöttötapa. Liian pieneksi hajotetut lipeäpisarot kulkeutuvat helpommin tulipesän yläosiin, mutta liian suuri pisara ei ehdi palaa ennen koksikekoon laskeutumista. Samalla viskoosin mustalipeän hajottaminen täysin samankokoisiksi pisaroiksi on hankalaa.

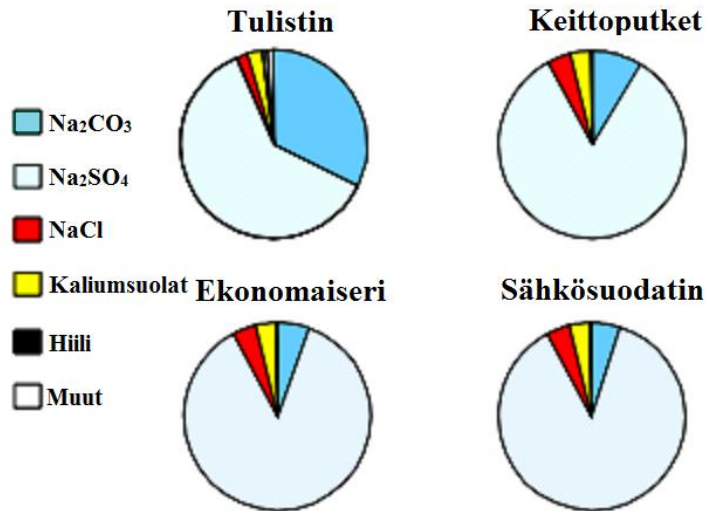
Palamisilman syöttäminen aiheuttaa tulipesään epätasaisen pystysuuntaisen virtausjaukuman [3]. Virtausnopeuden huippukohdissa pisara tempautuu helpommin virtauksen mukaan. Palamisilmaa syötetään tulipesään useaan kerrokseen. Pisaroiden karkaamista voidaan rajoittaa syöttämällä mahdollisimman vähän ilmaa lipeäruiskujen alapuolelle, lähelle koksikekoa. Ilmaa tarvitaan kuitenkin koksen palamiseen, jotta riittävää lämpötilaa ja yleisesti prosessin tasapainoa voidaan pitää yllä.

Carry over -hiukkanen koostuu pääasiassa natriumkarbonaatista ja -sulfaatista. Osittain sula hiukkanen takertuu helposti lämmönsiirtopinnoille. Carry over -hiukkaset ovat kooltaan noin 10–3000 µm. [13] Kloorin ja kaliumin määrä carry over -hiukkasessa on suoraan verrannollinen niiden määrään mustalipeässä [16].

3.2 Tuhkakerrostumat

Soodakattilan likaantumis- ja tukkeentumisongelmat ovat tapauskohtaisia. Tässä työssä likaantumisella tarkoitetaan tuhkan kerrostumista lämmönsiirtopinnoille ja muille kattilan sisäpinnoille. Tukkeentumisella tarkoitetaan kahden lämmönsiirtoputken välisen kanavan täydellistä tukkeutumista. Mustalipeän koostumus, tulipesän lämpötila ja kattilan ajotapa vaikuttavat savukaasun koostumukseen, ja siten tuhkakerrostumien nuohottavuuteen. Lämpötila savukaasukanavan eri vaiheissa vaihtelee kattiloiden välillä, mikä vaikuttaa tuhkapartikkeleiden jähmettymisalueisiin. Kaikki tekijät yhteensä vaikuttavat olosuhteisiin tuhkakerrostumien muodostumisen kannalta, ja tukkeentumisongelmia on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Periaatteet kerrostuman syntymiselle ovat kuitenkin samat, ja tässä työssä kattilassa oletetaan vallitsevan nykyaikaisen soodakattilan tyypilliset olosuhteet.

Tuhkahiukkaset voidaan jakaa fume- ja carry over -hiukkasiin, kuten edellisessä luvussa 3.1 on esitetty. Ne tarttuvat lämmönsiirtopintoihin eri mekanismein, ja niiden aiheuttamilla kerrostumilla on omat piirteensä. Täysin näitä kahta ei voida kuitenkaan toisistaan erottaa, sillä samassa kerrostumassa on usein sekä fume- että carry over -tuhkaa. Carry over -tuhka on vallitseva kerrostumien aiheuttaja tulistinalueella, kun taas fume-tuhkaa on enemmän tulistimien jälkeisillä lämmönsiirtopinnoilla [13]. Kuvassa 3.1 on esitetty tyypillinen tuhkakerrostuman koostumus eri lämmönsiirtopinnoilla.



Kuva 3.1. Tuhkakerrostumien koostumus eri lämmönsiirtopinnoilla [4].

Kuvasta 3.1 nähdään, että natriumkarbonaatti sulfatoituu lähes kokonaan tulistinalueella. Kloori ja kalium rikastuvat tulistimien jälkeen, kun kloridit tiivistyvät savukaasun jäähtyessä. Hiiltä on vain tulistinalueella carry over -tuhkassa. Muiden aineiden osuus kerrostumissa on pieni, ja niitä voidaan pitää nuohouksen kannalta merkityksettöminä [13]. Kerrostuma ei ole homogeeninen, vaan yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat eri osissa kerrostumaa. Usein kerrostumasta voidaan erottaa selkeästi eri yhdisteistä koostuvia kerrostumia, joiden fysikaaliset ominaisuudet poikkeavat toisistaan. [17]

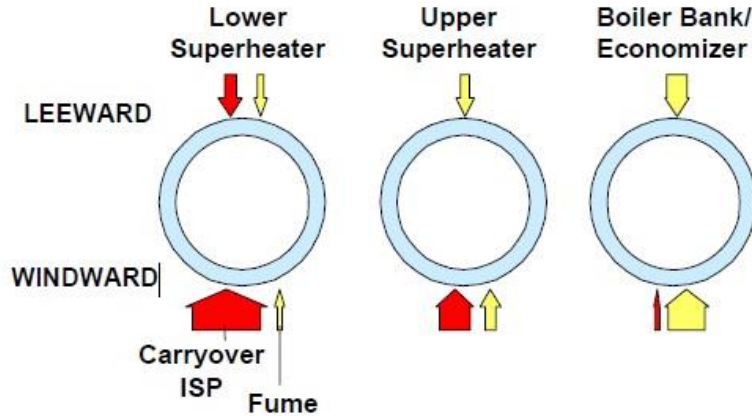
3.2.1 Carry over -tuhkan kerrostuminen

Carry over -hiukkanen on usein tahmea, osittain nestemäinen ja helposti tarttuva. Viileälle pinnalle iskeytyessään carry over -hiukkanen kiinteytyy ja muodostaa kovaa, pinnaltaan sulaa ja väriltään vaaleanpunaista tai harmaata kerrostumaa [13]. Carry over -hiukaset aiheuttavat ongelmia eniten tulistinpinnoilla.

Carry over -hiukkasen sulan aineksen osuuden täytyy olla välillä 15–70 %, jotta se tarttuu putken pintaan [18]. Kiinteä hiukkanen kimpoaa pois pintaan törmättyään ja täysin nestemäinen pisara vierii pintaa pitkin tarttumatta siihen. Kiinteä hiukkanen voi kuitenkin tarttua putkeen, jos kerrostuman pinta on tahmea [17]. Lämpötilan alarajaa, jossa hiukkanen on tahmea, merkitään tässä työssä symbolilla T_{15} . Vastaavasti tahmean alueen lämpötilan ylärajaa merkitään symbolilla T_{70} . Hiukkasen koostumus vaikuttaa tahmeaan lämpötila-alueeseen. Tuhkan kemialliset yhdisteet sulavat laajalla lämpötilavälillä, minkä vuoksi tahmea lämpötila-alue voi olla laaja. Luvussa 3.1.2 esitetysti kalium ja kloori alenavat tuhkan sulamislämpötilaa oleellisesti.

Kuvassa 3.2 on havainnollistettu, miten fume- ja carry over -tuhkan osuudet vaihtelevat eri lämmönvaihdinten kerrostumissa. ”Windward” tarkoittaa lämmönsiirtoputken puolta,

joka on savukaasuvirtauksen etupuolella. ”Leeward” tarkoittaa putkipintaa virtauksen jätöpuolella. ”ISP” on tuhkahiukkanen, joka muistuttaa ominaisuuksiltaan carry over -hiukasta [4]. Tässä työssä ISP-hiukkasta (engl. intermediate size particle) ei käsitellä, koska sen merkitys ääninuohouksen kannalta lienee pieni.



Kuva 3.2. Tuhkan kertyminen lämmönsiirtoputken pinnalle [13].

Kuvasta 3.2 nähdään, että carry over -tuhka aiheuttaa merkittävimpiä ongelmia säteilytulistimessa. Fume-tuhkan määrä kerrostumassa lisääntyy konvektiotulistimessa ja sen jälkeen. Inertia vaikuttaa carry over -hiukkasten virtaukseen. Carry over -tuhka aiheuttaa kerrostumia törmätessään lämmönsiirtoputkien virtauksen puoleisille seinämille kuvan 3.2 mukaisesti [13][4]. Hiukkanen poikkeaa inertian vuoksi virtauksen suunnasta sitä helpommin, mitä painavampi se on. Virtausnopeus tulistimissa pidetään matalana, jotta tuhkan iskeytyminen lämmönsiirtopinnoille olisi mahdollisimman vähäistä [3]. Carry overin osuus kerrostumissa vähenee savukaasukanavassa eteenpäin mentäessä, koska jähmettyessään se ei enää painavana hiukkasena tartu helposti putken pinnoille. Carry over -tuhkan määrä savukaasuvirtauksessa vähenee myös sitä mukaa, kun carry over -hiukkasia kerrostuu lämmönsiirtopinnoille. [13]

3.2.2 Fume-tuhkan aiheuttama kerrostuminen

Fume-tuhkasta muodostuva tuhkaerostuma on valkoista. Se muodostuu tiivistyneistä alkalisuoloista, jotka muodostavat hienojakoisesta tuhkasta koostuvaa huokoista kerrostumaa. Fume-tuhkaa ei välttämättä esiinny kuumimmilla tulistinpinoilla, jossa se on suureksi osaksi vielä kaasufaasissa. Inertia ei vaikuta merkittävästi kevyen hiukkasen lentorataan, minkä vuoksi fume kulkeutuu turbulentissa virtauksessa myös putkien takapuolelle kuvan 3.2 mukaisesti [13]. Fume-tuhkalla ei ole carry over -tuhkan kaltaista tarttuvan lämpötilan aluetta, koska kevyt hiukkanen tarttuu pinnoille sekä kiinteänä että nestemäisenä, jos esimerkiksi termoforeettinen voima vie sitä pintoja kohti.

Termoforeesi on vallitseva fume-tuhkan kiinnittymismekanismi soodakattilan lämmönsiirtopinnoilla [19][1]. Termoforeesissa hiukkanen ajautuu kohti lämmönsiirtoputken

pintaa, kun lämpöliikkeen aiheuttama voimaresultantti työntää hiukkasta kohti matalampaa lämpötilaa. Termoforeettinen kerrostuminen vähenee tuhkakerroksen kasvaessa, koska lämpötilagradientti savukaasuvirrassa pienenee, kun lämmönsiirtopinnalle syntyy eristävä kerros.

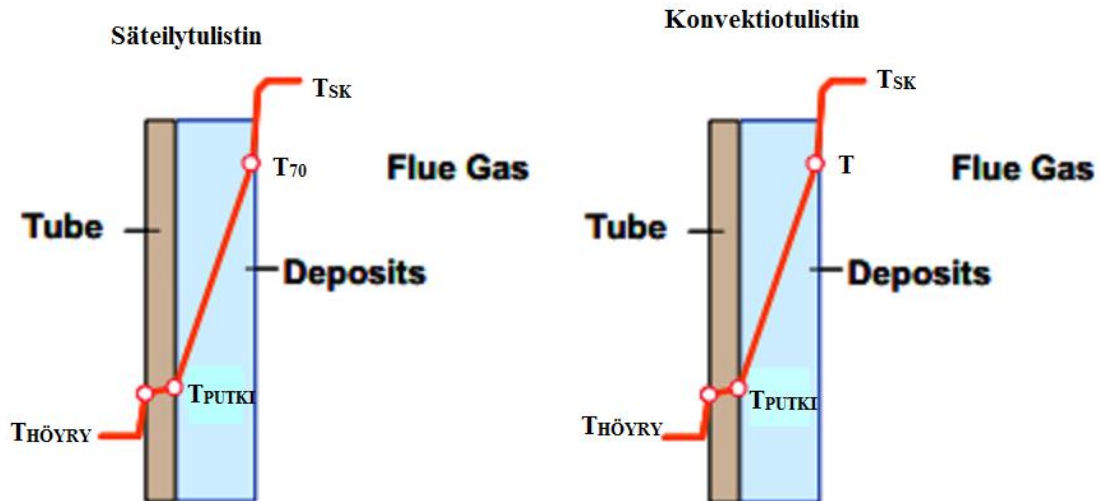
Kloorin määrä fume-tuhkassa kasvaa savukaasukanavassa eteenpäin mentäessä. Luvussa 3.1 esitettiin, kuinka kloridit tiivistyvät suhteellisen matalassa lämpötilassa tulipesän jälkeen lentotuhkan pinnalle, minkä jälkeen tahmeaa lentotuhkaa kerääntyy lämmönsiirtopinnoille. Eräässä väitöskirjassa [1] tehty klooripitoisuuden mallinnus kerrostumissa osoittaa, että tutkimuksen kohteena olleessa soodakattilassa kloorin määrä on suurin keittoputkissa. Tämä riippuu kuitenkin kattilan lämpötilakentästä ja mustalipeän klooripitoisuudesta. Sähkösuodattimen keräämä tuhka koostuu lähes yksinomaan fume-tuhkasta, kuten kuvasta 3.1 (s. 12) nähdään. Sen sijaan tulistin- ja keittoputkipintojen tuhkakerrostumissa kaliumia ja klooria esiintyy vähemmän. [13]

Pölymäinen fume-tuhka voi kovettua sintraantumalla. Sintraantumisessa tuhka hiukkasten väliset raot kuroutuvat umpeen. Tuhkan tiheys kasvaa merkittävästi, ja tuhka muuttuu lujemmaksi. Tuhkan sintraantuessa kerrostuma tarttuu voimakkaammin kiinni lämmönsiirtopintaan [20]. Sintraantuminen tapahtuu kiinteässä olomuodossa, kun tuhkan lämpötila on yli 300 °C. Lämpötilaa nostettaessa kohti tuhkan sulamislämpötilaa tuhka hiukaset kiinnittyvät toisiinsa muodostaen yhtenäistä huokoista massaa. Sulamislämpötilan yläpuolella tuhka sulautuu täysin yhtenäiseksi, tiiviiksi massaksi [17]. Korkea lämpötila ja pieni hiukkaskoko nopeuttavat sintraantumista merkittävästi. Korkeassa lämpötilassa lähellä tuhkan sulamispistettä kerrostuman puristuslujuus voi monikymmenkertaistua lähes maksimiarvoonsa jo tunnin aikana. Lähellä tuhkan sulamispistettä kiinteä kerrostuma on elastista, kun matalammassa lämpötilassa kerrostuma haurastuu. [13]

3.2.3 Tulistimien likaantuminen

Carry over -tuhka aiheuttaa eniten likaantumisongelmia tulistimissa. Tulistimessa savukaasun lämpötila on riittävän korkea ($T_{SK} > T_{15}$), jotta tuhka on tarttuvaa. [13] Carry over -tuhkan tarttuvasta lämpötila-alueesta kerrottiin luvussa 3.2.1. Lämpötila-alue tulistinalueella on laaja, ja myös likaantumismekanismit vaihtelevat eri tulistimilla.

Kuvassa 3.3 on esitetty säteily- ja konvektiotulistimien kerrostumien lämpötilajakaumat sekä höyryn ($T_{HÖYRY}$), lämmönsiirtoputken (T_{PUTKI}) ja savukaasun (T_{SK}) lämpötilat. Sininen väri kuvaa tuhkakerrostumaa ja harmaa väri lämmönsiirtoputkea. Punainen viiva havainnollistaa, kuinka lämpötila nousee kohti kerrostuman ulkopintaa.



Kuva 3.3. Lämpötilajakauma säteilytulistimen ja konvektiotulistimen tuhkerrostumissa [4].

Kuvassa 3.3 vasemmanpuoleiset lämpötila-arvot ovat tyypillisiä säteilytulistimissa, joissa savukaasu on kuumimmillaan. Oikeanpuoleinen tilanne on tyypillinen konvektiotulistimille, joissa savukaasun lämpötila on laskenut jonkin verran.

Säteilytulistimissa savukaasun lämpötila on niin korkea, että tuhka on suureksi osaksi nestettä ($T_{SK} > T_{70}$). Tulistinalueelle tullessaan savukaasu on nykyaikaisessa soodakattilassa lähes 1000 °C:n lämpötilassa [8]. Putkissa virtaava höyry kuitenkin viilentää lämmönsiirtopintoja, minkä vuoksi tuhkaa kerrostuu säteilytulistimen pinnoille ($T_{PUTKI} < T_{70}$). Kerrostuman kasvaessa sen ulkopinnan lämpötila nousee ja saavuttaa lopulta aseman, jossa kerrostuman kasvaminen loppuu ($T = T_{70}$). Tällöin kerrostuman pinta on sulaa ja pinnalle osuva tuhkahiukkanen valuu pois putken pinnalta, jolloin kerrostuma on saavuttanut suurimman mahdollisen paksuutensa. [13] Sen vuoksi nuohousta ei usein tarvita kuumimmilla pinnoilla.

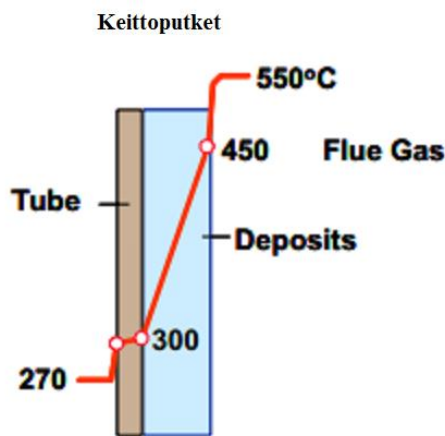
Savukaasuvirtauksen suunnassa seuraavissa tulistimissa savukaasun lämpötila on tuhkan tarttuvalla alueella ($T_{15} < T_{SK} < T_{70}$). Kerrostuman pintaan osuva tuhkahiukkanen on osittain nestemäinen ja tarttuu helposti tulistimen putkiin. Tuhkakerroksen paksuudella ei ole ylärajaa, vaan putkien väli voi jopa tukkeentua täysin. [13]

Nopeaa sintraantumista tapahtuu tulistimien kerrostumissa lämpötiloissa, joissa tuhka on kiinteää. Lämmönsiirtoputkissa virtaava höyry jäädyttää putkia, ja tulistinpinnat ovat aina riittävän matalassa lämpötilassa, jotta tuhka kiinteytyy tulistinkerrostuman sisäpinnalle. Tulistinalueen loppupäässä kerrostuma voi olla koko paksuudeltaan sintraantunut, kun savukaasun lämpötila on jäähtynyt ja kerrostuman pinta on kiinteää ($T_{SK} < T_{15}$). [13][20]

3.2.4 Keittoputkien likaantuminen

Tulistimien jälkeen savukaasu on jäähtynyt huomattavasti. Tarttuvan tuhkan määrä vähenee, kun tuhka alkaa jähmettyä täysin ($T < T_{15}$). Korkea kaliumin ja etenkin kloorin määrä voi kuitenkin tehdä tuhkasta tarttuvaa vielä keittoputkien lämpötiloissa. Klooria on erityisesti fume-tuhkassa, kun alkalikloridit tiivistyvät tulipesän jälkeen kiinteiden lento-tuhkahiukkasten pintaan. [13] Voidaan olettaa, että keittoputkien jälkeen kaikki kloridi on jähmettynyt, minkä jälkeen tuhka ei ole tahmeaa [1]. Kiinteää tuhkaa kerrostuu kuitenkin termoforeesin vaikutuksesta, kuten luvussa 3.2.2 on esitetty.

Kuvassa 3.4 on esitetty tyypillinen lämpötilajakauma keittoputkien tuhkakerrostumassa.



Kuva 3.4. Tyypillinen lämpötilajakauma keittoputkien tuhkakerrostumassa [4].

Runsaasti kaliumia ja klooria sisältävän tuhkan sulamislämpötila voi olla alle 500 °C [18]. Kuvasta 3.4 nähdään, että vain runsaasti klooria ja kaliumia sisältävä tuhka voi olla tahmeaa.

Carry over -tuhkan määrä keittoputkien tuhkakerrostumissa vähenee kahdesta syystä. Osa carry over -tuhkasta on jo törmännyt tulistinputkiin. Jäljelle jäänyt carry over -tuhka on jähmettynyttä, eikä siksi tartu keittoputkiin. Carry over -tuhka voi kuitenkin aiheuttaa likaantumista keittoputkissa, jos tulistimien lämmönsiirto on heikentynyt voimakkaasti. Tässä tapauksessa keittoputkiin tuleva savukaasu on vielä tuhkan tahmealla lämpötila-alueella ($T_{15} < T_{SK} < T_{70}$). Carry over -tuhkan tarttumista keittoputkien pinnoille edesauttaa se, että savukaasun virtausnopeus kasvaa tulistimen jälkeen. Lisäksi soodakattilan lämmönsiirtoputket on usein aseteltu tiiviimmin keittoputkissa kuin tulistimissa. Keittoputkien sisääntuloalue on tyypillinen paikka, jossa tukkeentumista esiintyy sekä fume-että carry over -tuhkan vaikutuksesta. [13]

Tuhkan sintraantumista tapahtuu etenkin viimeisten keittoputkien kerrostumien ulkopinnoilla, kun kerrostuman ulkopinta on korkeassa lämpötilassa. Keittoputkissa kerrostuman sisäpinta on usein lämmönsiirtoputken vaikutuksesta matalassa lämpötilassa, jolloin

tuhka ei sintraannu. Kerrostuman kasvaessa sintraantuneen tuhkan määrä lisääntyy, kun lämpötila kerrostumassa nousee. [13][20]

3.2.5 Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet

Kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet riippuvat kerrostuman koostumuksesta, kerrostumismekanismeista, lämpötilasta, paksuudesta ja huokoisuudesta [17]. Jo tehdyt tutkimukset tuhkan ominaisuuksiin liittyen on tehty pääasiassa höyrynuohouksen yhteydessä. Tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää ääninuohoukseen, vaikka ääninuohouksen kerrostumaan aiheuttamia voimia ei yksiselitteisesti tunneta. Voidaan kuitenkin olettaa, että samat kerrostuman fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat sekä höyry- että ääninuohouksen lopputulokseen.

Adheesiovoimalla tarkoitetaan kahden tuhka hiukkasen tai tuhka hiukkasen ja kiinnittymispinnan välistä vetovoimaa. Adheesiovoima on riippuvainen hiukaskoosta, tarttumispinnan lämpötilasta ja epätasaisuudesta sekä kerrostuman kemiallisesta koostumuksesta [21]. Tutkimuksen [21] mukaan tuhka hiukkasten välinen adheesiovoima kasvaa nopeasti lämpötilan noustessa kohti tuhkan sulamispistettä. Adheesiovoima on suurempi pienillä hiukkasilla.

Tuhkan ja putkipinnan väliseen adheesiovoimaan vaikuttavat lämpötilan ja pinnan epätasaisuuden lisäksi käytettävän teräslaadun ominaisuudet [17]. Teräksen adheesio- ja pintaenergiavoimia on tutkittu runsaasti eri yhteyksissä. Tässä työssä lämmönsiirtopinnan vaikutuksia nuohottavuuteen ei tutkita.

Tutkimuksessa [17] kerrostuman hajoamiselle esitetään kaksi eri mekanismia. Kerrostuma voi hajota hauraasti (engl. brittle break-up), kun kerrostuman ulkopintaan kohdistuva rasitus rikkoo tuhka hiukkasten väliset sidokset. Toisaalta heikosti lämmönsiirtopintaan kiinnittynyt kerrostuma voi irrota putkesta (engl. debonding), jos kerrostuman ulkopintaan kohdistuva rasitus aiheuttaa kerrostuman sisäpinnan ja putken välille suuremman rasituksen kuin niiden välinen adheesiovoima.

Adheesiovoima kerrostuman ja putkipinnan välillä on pienin silloin, kun kerrostuman sisäpinnalla putkipintaa vasten oleva tuhka kerros on huokoista tai hienojakoista [17][13][20]. Tällainen tilanne on tyypillisesti keittoputkissa ja sen jälkeisissä lämmönvaihtimissa, missä lämmönsiirtoputki on riittävän viileä, jotta tuhkan sintraantumista ei tapahdu. Nuohouksen mahdollisesti aiheuttama putkien värähtely voi heikentää kerrostuman ja pinnan välistä adheesiovoimaa, mikä voi edesauttaa kerrostuman irtoamista. Tutkimuksen [21] mukaan yli 450 °C lämpötilassa kerrostuman ja putken välinen adheesiovoima on huomattavasti pienempi kuin sintraantuneen tuhkan murtolujuus, mikä viittaa siihen, että kerrostuma irtoaa putkipinnasta todennäköisimmin kokonaan.

Tutkimuksessa [22] tutkittiin soodakattilan sähkösuotimen keräämän tuhkan sintraantumista ja sintraantumisen vaikutusta tuhkakerrostuman ominaisuuksiin. Tutkimuksessa havaittiin, että lämpötilan noustessa tuhkan huokoisuus alkaa vähentyä, kuten myös kirjassa [13] on esitetty. Tutkimuksen mukaan tuhkakerrostuman lujuus kasvaa huokoisuuden vähentyessä. Lujuus on korkeimmillaan, kun kerrostuman lämpötila lähestyy tuhkan sulamispistettä. Lujuus laskee nopeasti, kun tuhka alkaa sulaa. Osittain sula kerrostuma on kuitenkin elastinen, eikä se hajoa helposti. Sula kerrostuma on tiivis, sitkeä ja hankala nuohota [17][23]. Tutkimuksessa [21] esitetään, että sintraantuneen kerrostuman murto-
lujuus riippuu ainoastaan huokoisuudesta. Kuten edellä on todettu, huokoisuus puolestaan riippuu lämpötilasta.

Kerrostuma on hauras matalassa lämpötilassa. Kun lämpötila alkaa lähestyä tuhkan sulamispistettä, joka kloori- ja kaliumpitoisuudesta riippuen on tyypillisesti noin 550–800 °C, kerrostuma alkaa muuttua elastisemmaksi. [17] Kloorin vaikutus kerrostuman nuohottavuuteen on yksittäisistä aineista merkittävin [23]. Kloori alentaa lämpötilaa, jossa kerrostuma alkaa muuttua hauraasta sitkeäksi [22]. Tutkimuksen [22] mukaan jonkin verran klooria sisältävä kerrostuma muuttuu sitkeäksi lämpötilassa 500–550 C. Kalium on tuhkan ominaisuuksien kannalta merkittävä aine, koska se alentaa kloorin tavoin tuhkan sulamislämpötilaa. Natriumkarbonaatilla ei ole merkittävää vaikutusta kerrostuman nuohottavuuteen. [23]

3.3 Likaantumisen vaikutus soodakattilan toimintaan

Tuhkakerrostumat lämmönsiirtoputkien pinnalla heikentävät lämpövirtaa savukaasusta höyryyn. Samalla kattilan hyötysuhde laskee, kun suurempi osa polttoaineen lämpötehosta karkaa savukaasujen mukana. Likaantuminen vähentää lämpövirtaa kahdella tavalla. Kerrostuma lämmönsiirtopinnalla vähentää merkittävästi lämmönsiirtoa savukaasusta höyryyn, koska tuhkakerrostumien lämmönsiirtokertoimet ovat pieniä verrattuna putkimateriaalien lämmönsiirtokertoimiin. Samalla tuhkakerrostuma ahtauttaa virtauskanavia, jolloin savukaasun virtausnopeus kasvaa ja savukaasu ei ehdi luovuttaa lämpöenergiaansa riittävästi. [8] Likaantuminen ja etenkin tukkeutuminen voivat häiritä virtauskenttää koko kattilan alalta, kun virtaus ohjautuu vähemmän likaantuneille alueille. Tällöin lämmönsiirto on epätasaista lämmönvaihtimen eri lämmönsiirtoputkissa. Ahtautunut savukaasukanava toimii siis kuristimen tavoin, jonka seurauksena paine pienenee ja virtausnopeus kasvaa.

Likaantumista havainnoidaan usein mittaamalla savukaasun painehäviötä lämmönvaihtimen yli. Kuten edellä on esitetty, likaantuminen kasvattaa savukaasun virtausnopeutta ja paine-eroa. Paine-eron kasvua voidaan kompensoida savukaasupuhaltimen avulla. Savukaasukanavan loppupäähän sijoitettu puhallin aiheuttaa kanavaan alipaineen, mikä aikaansaa savukaasun virtaamisen eteenpäin. Jos paine-ero lämmönvaihtimessa kasvaa, savukaasun virtausnopeus hidastuu lämmönvaihtimen jälkeen. Puhaltimen tehoa lisäämällä

alipainetta voidaan kasvattaa, jotta riittävä savukaasun virtausnopeus saavutetaan. Samalla kuitenkin puhaltimen tehonkulutus kasvaa. [8]

Lämmönsiirtopintojen likaantumisen seurauksena heikentynyt lämmönsiirto laskee tuorehöyryn lämpötilaa ja siten vähentää soodakattilan sähköntuotantoa. Kattilan kuormitusta voidaan joutua vähentämään, jos savukaasu virtaa liian nopeasti eikä ehdi jäähtyä. Liian kuuma savukaasu voi myös aiheuttaa ongelmia materiaalien kestämisen kannalta. Kuumuutta kestävät materiaalit ovat kalliita, minkä vuoksi savukanavan komponentteja ei ole mitoitettu kestämaan huomattavasti kohonneita savukaasun lämpötiloja. Toisaalta likaantuminen rajoittaa koko sellutehtaan tuotantokapasiteettia, jos kattilan kuormaa joudutaan rajoittamaan. [8]

Lämmönsiirtopintojen korroosio aiheuttaa huoltokustannuksia. Merkittävimmät korroosiota aiheuttavat yhdisteet sisältävät klooria ja rikkiä. Etenkin kloorin määrä vaihtelee mustalipeässä, ja on tapauskohtaista, kuinka voimakkaita korroosio-ongelmia kattilassa esiintyy. Kloorin yhdisteet natriumin ja kaliumin kanssa aiheuttavat korroosio-ongelmia korkeissa lämpötiloissa tulistimissa, kun höyryn lämpötila ylittää 480–500 °C. Höyryn lämpötila joudutaankin tyypillisesti rajoittamaan tähän arvoon soodakattiloissa. Syöpyminen voi olla nopeaa varsinkin, jos kerrostuma on sulassa olomuodossa. [8]

Likaantumisongelmien vuoksi soodakattila voidaan joutua ajamaan säännöllisesti alas perusteellisen puhdistamisen ajaksi [24]. Alasajon aikana sähkönmyyntistä saatavat tulot menetetään. Koska soodakattila on osa tuotantoprosessia, koko tehtaan selluntuotanto keskeytyy. Etenkin kattilan suunnittelematon alasajo aiheuttaa huomattavia tulonmenetyksiä.

4. PERINTEISET LÄMMÖNSIIRTOPINTOJEN PUHDISTUSMENETELMÄT

Perinteisesti lämmönsiirtopintoja on puhdistettu höyryn avulla. Höyrynuohouksessa käytetään kattilan tuottamaa korkeapaineista höyryä. Höyry ohjataan kattilan sisään muuttaman metrin pituisella eteenpäin liikkuvalla, pyörivällä höyrynuohouslaitteella. [13]

Höyrynuohouksen tehokkuus on riippuvainen höyryn dynaamisesta paineesta [13]. Höyrynuohous kohdistaa voiman kerrostuman pintaan, mikä rikkoo kerrostuman rakenteen tai aiheuttaa kerrostuman irtoamisen putkipinnasta [17]. Höyrynpaine suuttimessa on tyypillisesti 1–3 MPa, ja metrin etäisyydellä suuttimesta paine on laskenut muutama sataan kilopascaliin. Vastaavasti nopeus nousee höyryn laajentumisen vuoksi yllääniseksi. [13] Kiinteiden kerrostumien tehokas nuohousetäisyys on muutaman metrin luokkaa, mutta höyrynuohouksen teho ei riitä irrottamaan sulia tulistinalueen kerrostumia [3]. Tyypillisesti nuohoukseen käytetään 2,5–12 % tuotetusta höyrystä [8][13]. Nuohoushöyryn tarve vaihtelee kattiloiden ja savukanavan eri alueiden välillä.

Höyrynuohous vähentää kattilan sähköntuotantoa, mikä on ristiriidassa sen kanssa, että sähköntuotanto on noussut yhä tärkeämmäksi tehtäväksi nykyaikaisessa soodakattilaprosessissa. Höyry irrottaa tuhkaa ainoastaan ensimmäisestä pinnasta johon höyrystuuhku osuu, minkä vuoksi höyrynuohouksen toimivuus on rajoittunutta tiiviissä lämmönvaihtimissa. Lisäksi höyrynuohous voi aiheuttaa korroosio-ongelmia, kun höyry tiivistyy teräspinnoille.

Höyrynuohous toimii pitkällä toimintavälillä verrattuna ääninuohoukseen. Tällöin tuhkaa ehtii kerrostua ja sintraantua enemmän nuohouskertojen välillä. Pitkän nuohousvälin vuoksi suuri määrä tuhkaa irtoaa lyhyessä ajassa savukaasuvirtaukseen. Tuhkasuodattimet kykenevät suodattamaan vain rajallisen määrän tuhkaa, minkä vuoksi höyrynuohous aiheuttaa emissiopiikkejä savukaasupäästöihin. Lisäksi suuret irtoavat tuhkakerrostumat voivat juuttua myöhempien lämmönsiirtoputkien väleihin.

Likaantumisongelmien vuoksi joissain tapauksissa soodakattila ajetaan säännöllisesti alas perusteellisen puhdistamisen ajaksi [24][25]. Huoltoseisokin aikana kerrostumia poistetaan mekaanisesti. Höyrynuohoimilla voidaan ruiskuttaa myös vettä alasajon aikana.

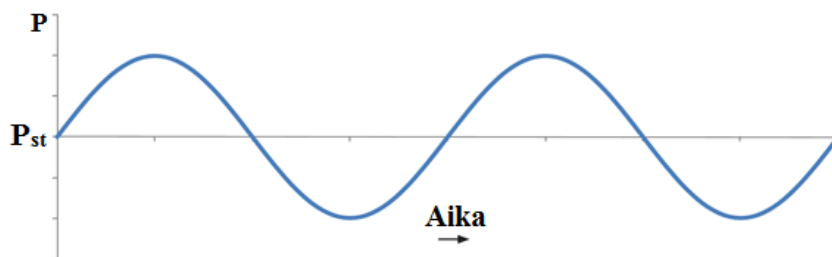
5. ÄÄNINUOHOUK

Ääninuohous on höyrynuohoukseen verrattuna vähän käytetty menetelmä lämmönsiirtopintojen puhdistuksessa. Uuteen kattilaan suunnitellaan yleensä höyrynuohousjärjestelmä. Höyrynuohoinlaitteiden rikkoutuessa tai laiteusintoja tehdessä ääninuohous on kuitenkin vaihtoehtoinen menetelmä. Kokeiluja soodakattilan ääninuohoamisesta on tehty jo pitkään, mutta menetelmä ei ole vakiintunut höyrynuohouksen korvaajana. Tuhkan koostumus on soodakattilaprosessin kehityksen myötä muuttunut ja ääninuohouslaitteet ovat kehittyneet, minkä vuoksi ääninuohouksen soveltuvuutta soodakattilaprosessin yhteyteen on syytä tutkia edelleen.

Julkista tutkimusmateriaalia ääninuohouksesta soodakattilaprosessin yhteydessä ei ole saatavilla. Tässä luvussa aihetta on käsitelty laitevalmistajien välittämiin tietoihin perustuen. Lähteinä on käytetty lisäksi yleisiä fysiikan ja akustiikan teoksia, joiden tietoa on pyritty tässä työssä soveltamaan ääninuohousprosessiin. Luvussa 5.5 on käsitelty, millä soodakattilan savukanavan alueilla ääninuohouksen voidaan olettaa toimivan.

5.1 Ääniaalto

Mekaanisella värähtelyllä tarkoitetaan kappaleen tai väliaineen edestakaista liikettä. Paineilmaalla toimivissa ääninuohoimissa värähtelyn saa tyypillisesti aikaan värähtelevä metallikalvo [24]. Kalvon värähtely aiheuttaa väliaineen molekyyliden edestakaista liikettä, minkä seurauksena syntyy pientä painevaihtelua. Tämä äänenpaine määritellään ilman staattisen paineen ja hetkellisen paineen erotuksena $P = P_{huippu} - P_{st}$. Mekaaninen värähtely kuullaan äänenä, mikäli värähtely tapahtuu kuuluvan äänen alueella (yli 20 Hz). [26] Kuvassa 5.1 on havainnollistettu värähtelyn aiheuttamaa paineenmuutosta väliaineessa.



Kuva 5.1. Paineenvaihtelu havainnointipisteessä ajan funktiona.

Värähtely on sinimuotoista, jos värähtely tapahtuu vain yhdellä taajuudella, kuten tilanne on kuvassa 5.1 [26]. Vaaka-akseli on staattinen paine P_{st} eli ympäristössä vallitseva paine. Pitkittäin etenevä tasoaalto nostaa havainnointipisteessä paineen sen suurimpaan arvoonsa värähtelyn aallonpituuden mittaisin välimatkoin. Tasoaaltojen huippujen välissä

paine on vastaavasti alhaisimmillaan. Paine-ero aiheuttaa molekyyliden liikettä matalamman paineen suuntaan. Kun havainnointipisteen paine kasvaa, väliaineen molekyylit työntyvät eteenpäin. Painehuipun kohdalla väliaineen molekyylit saavuttaa suurimman etäisyytensä $x/2$ tasapainoasemastaan. Painehuipun jälkeen molekyylit kohdistuu paine-eron aiheuttama voima, joka siirtää molekyylin etäisyydelle $x/2$ tasapainoasemastaan. Molekyylin liikepoikkeama on siis x .

Värähtelyn aallonpituuden λ kasvaessa myös molekyylin liikepoikkeama x kasvaa, kun äänenpaine P pysyy vakiona. Molekyylin liikepoikkeamalla x ja äänivärähtelyn taajuudella on kaavan

$$v = 2\pi f x \quad (5.1)$$

mukainen yhteys, jossa v on molekyylin liikenopeus. Kaava (5.1) pätee, kun värähtely tapahtuu vain yhdellä taajuudella. Liikenopeuden ja -poikkeaman arvot ovat molekyylin värähtelyn huippuarvoja. Molekyylin liikenopeus vaikuttaa äänenpaineeseen kaavan

$$P = v\rho c \quad (5.2)$$

mukaisesti, jossa c on äänen etenemisnopeus väliaineessa ja ρ on väliaineen tiheys. Äänen etenemisnopeudella, äänentaajuudella ja äänivärähtelyn aallonpituudella on kaavan

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (5.3)$$

mukainen yhteys. [26] Yhdistämällä kaavat (5.1), (5.2) ja (5.3) päästään muotoon

$$P = 2\pi\rho \frac{c^2}{\lambda} x, \quad (5.4)$$

josta nähdään, että molekyylin liikepoikkeama kasvaa lineaarisesti aallonpituuden kasvaessa, kun äänenpaine on vakio.

Kaavat (5.1) ja (5.2) ovat yksinkertaisuuksia, jotka pätevät sinimuotoiselle tasoaallolle. Kattilaympäristössä värähtelyä tapahtuu laajalla taajuuskaistalla [27], ja värähtelyn matemaattinen käsittely on monimutkaista. Ääniaalto ei myöskään ole tasoaalto, vaan ääniaalto leviää torven suulta edetessään. Yksinkertaisuuksilla voidaan kuitenkin havainnollistaa, miten äänentaajuus vaikuttaa äänen fysikaaliseen käyttäytymiseen. Kattilaolosuhteissa torven suulla väliaineen molekyylin liikepoikkeama x saa kaavojen (5.3), (5.4), (5.7) ja (5.9) perusteella arvoja väliltä 0,5–7 mm, kun äänenpaine torven suulta mitattuna on 632 Pa, savukaasun lämpötila on 500 °C, savukaasun tiheys on $1,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ja äänentaajuus vaihtelee välillä 20–250 Hz. Lämmönsiirtoputkien halkaisijat ovat tyypillisesti kymmeniä millimetrejä [3]. Liikepoikkeaman arvo pienenee etäisyyden kasvaessa torven suulta, koska äänenpainetaso laskee.

Äänenpainetaso ilmoitetaan usein logaritmista desibeli-asteikkoa käyttäen. Äänenpainetaso L_p desibeleinä mittauspisteessä 1 voidaan ratkaista kaavasta

$$L_p = 20 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (5.5)$$

jossa p_1 on äänenpainetaso pisteessä 1 ja p_0 on kansainvälisesti sovittu referenssiarvo, joka on 20 μPa [26]. Kaavaa muokkaamalla voidaan äänenpainetasoksi pisteessä 1 ratkaista

$$P_1 = P_0 10^{\frac{L_p}{20}}. \quad (5.6)$$

Kun äänenpainetaso desibeleinä on valmistajan ilmoittama 150 dB [24], voidaan painetasoksi ratkaista

$$P_1 = 632 \text{ Pa}. \quad (5.7)$$

Tällöin paine-ero tasoaaltorintaman yli on 1,26 kPa. Logaritmisen asteikon vuoksi 10 desibelin muutos tarkoittaa äänen intensiteetin kaksinkertaistumista.

Usean äänilähteen tuottama kokonaisäänepaine voidaan laskea suoraan osatekijöidensä summana. Tällöin on kuitenkin käytettävä pascalleiksi muutettuja yksiköitä. 150 dB vastaa kaavan (5.7) mukaan 632 pascalin äänenpainetta. Kaksi yhdistettyä 632 pascalin äänilähdettä tuottaa siis yhteensä 1264 pascalin paineen, joka kaavan (5.5) mukaan on noin 156 dB. Ääninuohoimia käytetään usein pareittain kattilan vastakkaisille seinille asennettuna. Suuremman äänenpaineen lisäksi pareittain asennetuilla nuohoimilla saavutetaan symmetrisempi puhdistustulos. Usean äänilähteen vaikutusta äänikenttään ja nuohoustulokseen ei tutkita tässä työssä.

Väliaineen lämpötila T ja moolimassa M vaikuttavat äänennopeuteen kaavan

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (5.8)$$

mukaisesti, jossa $R = 8,31447 \text{ kJ/kmolK}$ on kaasuvakio ja γ on ominaislämpöjen suhde eli adiabaattivakio [28][29]. Savukaasun moolimassa on riippuvainen veden määrästä. Riittävän tarkkaan lopputulokseen päästään käyttämällä ilman ominaisuuksia. Ilmalle moolimassa $M = 28,97 \text{ g/mol}$ ja adiabaattivakio $\gamma = 1,4$ [29]. Kaava voidaan yksinkertaistaa muotoon

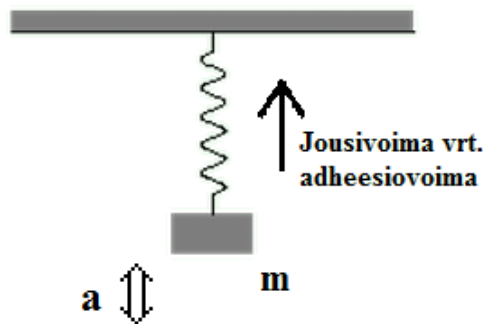
$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}, \quad (5.9)$$

jossa c_0 on äänennopeus ilmassa lämpötilassa 0 °C , joka on $331,4\frac{m}{s}$ [26]. Kaavasta huomataan, että äänennopeus viileässä ilmassa on huomattavasti matalampi, kuin kuumassa savukaasussa. Jos värähtelyn taajuus pysyy vakiona, aallonpituus λ kasvaa äänennopeuden c kasvaessa.

Aallonpituus 20 Hz :n ääninuohoimella on kymmenkertainen verrattuna 200 Hz :n ääninuohoimeen, kuten kaavasta (5.3) nähdään. Jos äänentaajuus vaihtelee välillä $20\text{--}250\text{ Hz}$ ja väliaineen lämpötila välillä $500\text{--}1000\text{ K}$, aallonpituus voi vaihdella välillä $2\text{--}30\text{ m}$. Suuri vaihteluväli korostaa sitä, että kattilan olosuhteilla ja ääninuohoimen tuottaman äänen ominaisuuksilla on hankalasti ennakoitava vaikutus ääninuohouksen toimivuuteen. Äänentaajuus 250 Hz kuulostaa matalalta ääneltä, mutta tämän työn yhteydessä sitä käsitellään korkeana äänentaajuutena.

5.2 Resonointi

Resonanssilla tarkoitetaan värähtelyä, jossa värähtelijään kohdistuvan ulkoisen voiman suunta vaihtelee värähtelijän ominaistaajuudella. Värähtelijään vaikuttaa harmoninen voima, eli voima kohdistuu aina samaan suuntaan kuin värähtelijän liikesuunta. Yksinkertaistuksena ilmiöstä käytetään useissa yhteyksissä jousi-massa-systeemiä [26][30], joka on esitetty kuvassa 5.2.



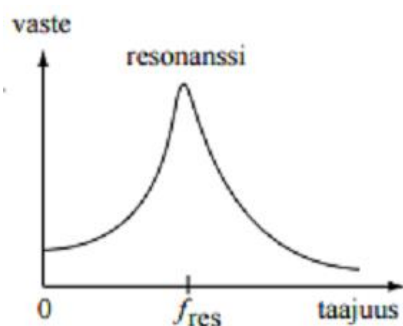
Kuva 5.2. Jousi-massa-systeemi, joka värähtelee systeemin ominaisvärähtelytaajuudella.

Kappaleella on massa m ja siihen kohdistuu jousivoiman aiheuttama kiihtyvyys a . Jousen varassa roikkuva punnus alkaa värähdellä ominaistaajuudellaan, kun se poikkeutetaan tasapainoasemastaan. Ominaistaajuus f_0 voidaan laskea kaavasta

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5.10)$$

jossa k on jousivakio ja m on punnuksen massa. [26] Systeemillä voidaan havainnollistaa myös tuhkahiukkasan värähtelyä. Jousivakio vastaa tuhkahiukkasta pintaan kiinnittävää

adheesiovoimaa. Kaavasta voidaan todeta, että suuremmalla tuhka hiukkasella on matalampi ominaisvärähtely- eli resonanssitaajuus. Toisaalta mitä voimakkaampi adheesiovoima hiukkasen ja pinnan välillä vallitsee, sitä suurempi on ominaisvärähtelytaajuus. Esitetyillä systeemillä on vain yksi liikesuunta ja ominaisvärähtelytaajuus. Todellisessa tilanteessa tuhka hiukkanen voi liikkua useaan suuntaan, minkä vuoksi resonanssitaajuuksia on useita. Kuvassa 5.3 on havainnollistettu resonoinnin merkitystä värähtelijän liikepoikkeaman suuruuteen.



Kuva 5.3. Vasteen suuruus taajuuden funktiona [31].

Jos havainnollistamiseen käytetään jousi-massa-systeemiä, kuvassa 5.3 vasteella tarkoitetaan punnuksen liikepoikkeamaa, joka kasvaa moninkertaiseksi resonanssitaajuuden lähellä. Jos ääninuohous aiheuttaa tuhkan värähtelyä resonanssitaajuudella, irtoamisen todennäköisyys pinnasta kasvaa.

Mikäli ääninuohous aiheuttaa lämmönsiirtoputkien värähtelyä resonanssitaajuudella, rakenteet voivat altistua mekaaniselle rasitukselle. Julkisia dokumentteja ääninuohouksen aiheuttamista vaurioista ei kuitenkaan ole tiedossa. Putkien ominaisvärähtelytaajuutta tai ääninuohouksen mahdollisesti aiheuttamaa rasitusta kattilarakenteisiin ei käsitellä tässä työssä.

5.3 Äänen vaimentuminen lämmönvaihtimessa

Ääni vaimenee kattilassa nopeasti. Vaimenemista aiheuttaa äänen absorboituminen savukaasuun ja tuhkaan. Lisäksi torven suulta lähtevä ääniaalto leviää edetessään, jolloin äänen intensiteetti pienenee etäisyyden kasvaessa torven suulta. Tätä äänen leviämisen vaimennusta voidaan pitää merkittävänä äänen vaimenemismekanismiä. Leviämisen vaimennus on riippuvainen kattilan akustisesta geometriasta. Jos ääni etenee ahtaassa tilassa, äänen suuntavaikutus vähenee. Sen sijaan avoimessa tilassa äänen suuntavaikutus lisääntyy ja leviämisen absorptio voimistuu. Leviämisen vaimennuksen vaikutusta ei ole tutkittu tässä työssä.

5.3.1 Äänen absorboituminen savukaasussa

Väliaineen absorptiovaikutus on riippuvainen äänentaajuudesta sekä väliaineen ominaisuuksista. Molekyyliivaimennus (engl. molar relaxation) on merkittävin absorptiomekanismi huoneilmassa, ja se johtuu väliaineen molekyylien välillä tapahtuvista energiasiirtymistä. Ilmassa molekyyliivaimennus johtuu pääasiassa veden ja hapen välisestä vuorovaikutuksesta. [26] Savukaasussa on huomattavasti enemmän vesihöyryä kuin ilmassa [8]. Savukaasussa on sen sijaan vähemmän vapaata happea, koska suurin osa palamisilman mukana tulleesta hapesta reagoi kattilassa muodostaen eri yhdisteitä. Savukaasussa on lisäksi merkittäviä määriä sellaisia yhdisteitä, joita ilmassa ei ole. Nämä yhdisteet voivat mahdollisesti lisätä molekyyliivaimennuksen määrää. Tässä työssä molekyyliivaimennusta savukaasussa ei tutkita.

Muita väliaineen absorptiomekanismeja ovat viskositeettivaimennus ja lämmönsiirtymästä johtuva vaimennus, jotka ovat pieniä huoneilmassa [26]. Kattilaympäristössä näiden absorptiomekanismien vaikutusten voidaan olettaa olevan pieniä, koska kuumen savukaasun viskositeetti ja lämmönjohtavuus eivät poikkea merkittävästi ilman ominaisuuksista.

Teoreettisen absorptiokertoimen määrittäminen heterogeeniselle kaasulle on hankalaa [32, s. 148]. Käytännössä ääninuohouksen tehokasta toimintaetäisyyttä voidaan arvioida mittaamalla äänenpainetasoja kattilaympäristössä. Liitteessä A on esitetty, että laitevalmistajan kokemuksen mukaan 100–250 Hz taajuutta käytettäessä tehokas nuohousetäisyys on noin 2–7 metriä etäisyyden lyhentyessä nopeasti äänentaajuutta nostettaessa. Nuohousetäisyyttä rajoittaa äänen vaimenemisen lisäksi äänen heijastuminen. Ääniaalto heijastuu lämmönsiirtoputkesta, jos putken läpimitta on äänivärähtelyn aallonpituuden luokkaa [26]. Siksi matalataajuisen äänen voidaan olettaa etenevän lämmönvaihtimessa pidemmälle. Äänen heijastumista on käsitelty seuraavassa alaluvussa.

Liitteessä A on epäilty, että tehokas nuohousetäisyys heikentyy savukaasun lämpötilan noustessa. Tutkimuksen [33] perusteella vaikuttaa, että äänen absorboituminen ilmassa vähentyy lämpötilan noustessa, mikä parantaisi äänen etenemistä. Tutkittu lämpötila-alue on kuitenkin hyvin matala (–10–30 °C) verrattuna savukaasun lämpötiloihin. Lisäksi tutkittu väliaine on ilma. Absorptiokertoimen laskemiseen ilmakehässä on kehitetty menetelmä [34], jonka mukaan sekä lämpötilan että taajuuden nousu alentavat absorptiokerrointa. Menetelmän soveltuvuutta savukaasussa korkeissa lämpötiloissa on vaikeaa arvioida.

Kirjallisuuden [26][33] ja edellä esitellyn laskentamenetelmän [34] mukaan absorptiokertoimet ilmassa ovat hyvin pieniä, eikä absorptioivaimennuksella ole juuri merkitystä äänen vaimentumisessa lyhyillä etäisyyksillä. Laitevalmistajat ovat esittäneet väliaineen absorption kuitenkin merkittävänä tekijänä äänen vaimenemisessa [liite A][35]. On mah-

dollista, että kuuma savukaasu absorboi ääntä enemmän kuin ilma. Tässä työssä savukaasun aiheuttamaa äänen absorboitumista ei kuitenkaan käsitellä enempää, ja väliaineen absorption vaikutuksen oletetaan olevan pieni kattilan ääninuohouksessa.

5.3.2 Äänen absorboituminen tuhkakerrostumaan

Äänen vaimenemista tapahtuu väliaineen lisäksi rakenteeseen. Kun ääniaalto osuu lämmönsiirtoputken pinnalla olevaan tuhkakerrostumaan, osa äänitehosta heijastuu pois pinnasta ja osa kulkee tuhkakerroksen sisään vaimentuen eli absorboituen samalla. Osa äänitehosta voi edetä koko kerrostuman läpi heijastuen putkipinnasta takaisin. Putkipinta heijastaa ääntä lähes täydellisesti. [36]

Äänen absorptiosuhde α tarkoittaa rakenteen pinnan läpäisevän intensiteetin eli rakenteeseen absorboituvan intensiteetin $I_i - I_r$ ja koko rakenteen pintaan osuvan intensiteetin I_i suhdetta [36]

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i}, \quad (5.11)$$

jossa I_r on rakenteen pinnasta heijastuvan äänen intensiteetti. Äänen intensiteetillä ja äänenpaineella on yhteys

$$I = \frac{p^2}{z}, \quad (5.12)$$

jossa z on väliaineen aaltovastus [26].

Rakenteen pinnasta heijastuvan äänen intensiteetti on oleellinen suure, kun tarkastellaan äänen vaimentumista kattilan sisällä. Mitä pienempi absorptiosuhde α on, sitä enemmän ääniteho heijastuu tuhkakerrostuman pinnasta. Tässä työssä absorptiolla viitataan ensisijaisesti äänen heijastumisen määrään, koska se vaikuttaa ääninuohouksen tehokkaaseen toimintaetäisyyteen. Äänen absorboitumisella tarkoitetaan myös ääniaallon energian muuttumista lämpöenergiaksi, kun ääniaalto etenee kerrostuman sisällä. Työssä ei oteta kantaa siihen, kuinka suuri äänen intensiteetti voi edetä kerrostuman läpi ja heijastua putkipinnasta takaisin savukaasuun.

Heijastumisen määrää rakenteen pinnassa määrittää materiaalin virtausvastus eli impedanssi. Mitä suurempi tuhkan virtausvastus on, sitä suurempi osa äänitehosta heijastuu. Myös äänen tulokulma vaikuttaa absorptiosuhteeseen siten, että vinosti pintaan osuva ääniaalto heijastuu enemmän. [26]

Tuhkan huokoisuus kasvattaa virtausvastusta, koska ääniaalto saa huokosissa olevat kaasumolekyylit värähtelemään, jolloin äänienergiaa muuttuu kitkan vaikutuksesta lämpöenergiaksi [36]. Absorptio voimistuu etenkin, jos huokoset ovat yhteydessä toisiinsa [26].

Hyvin hienojakoinen tuhka voi olla tiivistä, koska hyvin pienten tuhkahiukkasten välissä ei ole merkittävästi ilmaa ja tuhkan huokoisuus on matala. Sintraantuminen vähentää samalla tavalla tuhkan huokoisuutta. Tällöin tuhkan virtausvastus voi olla matala ja absorptiokerroin suuri, jolloin suuri osa tuhkakerrostuman pintaan osuvasta äänen intensiteetistä etenee tuhkaan. Toisaalta pienen virtausvastuksen vuoksi vain pieni osa kerrostuman sisällä etenevän ääniaallon energiasta absorboituu eli muuttuu lämpöenergiaksi, jolloin ääniaalto voi heijastua putkipinnasta ja edetä takaisin savukaasuun menettäen vain pienen osan energiastaan. Kattilaympäristössä ääni heijastuu tehokkaimmin silloin, kun lämmönsiirtopinnat ovat puhtaina tai kerrostunut tuhka on huokoista. Tässä työssä absorption ja heijastumisen määrää ei pyritä määrittämään.

Äänen heijastuminen rakenteen pinnasta riippuu aineen virtausvastuksen lisäksi äänentaajuudesta. Ääninuohouksen taajuusalueella (15–250 Hz) korkean äänentaajuuden absorboituminen voi olla moninkertaisesti voimakkaampaa kuin matalan äänentaajuuden absorptio. Lisäksi kerrostuman kasvu lisää oleellisesti absorboitumisen määrää. [26]

Kun ääniaalto etenee tuhkakerrostuman läpi ja heijastuu lämmönsiirtoputkesta, värähtelevän hiukkasen liikenopeus saa suurimman arvonsa etäisyydellä $\lambda/4$ putken seinämästä. Mikäli äänentaajuus on korkea ja putken pinnalla oleva tuhkakerros paksu, voi liikenopeus kasvaa suureksi kerrostuman sisällä. Tällaisessa tilanteessa kaasumolekyylit värähtelevät voimakkaasti kerrostuman huokosissa, ja absorptio on voimakkaimmillaan. [26] Näin voidaan selittää, miksi korkeataajuinen ääni absorboituu rakenteessa enemmän. Kun rakenteen paksuus on pieni $d \ll \lambda/4$, värähtelyn liikenopeuden magnitudi kerrostumassa on pieni. Tilannetta voidaan havainnollistaa lisäämällä kuvan 5.1 käyrälle peili-kuva, jolloin kohtaan $\lambda/4$ muodostuu kupu, jonka kohdalla liikenopeus on voimakkaimmillaan. [36] Todellisessa kattilaympäristössä nuohottavalla alueella tuhkakerrostumien paksuudet eivät kuitenkaan saavuta arvoja $\lambda/4$ (0,35–7 m) äänentaajuuksilla 25–250 Hz. Yli 1 kHz:n äänentaajuuksilla arvo $\lambda/4$ on jo hyvin pieni, jolloin edellä kuvattu liikenopeuden suurin arvo voidaan saavuttaa, mikä tukee tutkimuksen [27] havaintoja, jossa hyvin korkeat äänentaajuudet vaimenevat voimakkaasti.

Ääni heijastuu, kun ääniaallon reitillä olevan esteen koko on äänen aallonpituuden luokkaa [26]. On mahdollista, että korkeataajuiseen ääneen verrattuna matalataajuinen ääni etenee lämmönvaihtimessa helpommin törmäämättä putkiin, jolloin heijastumista tai absorptiota ei tapahdu. Tällä ilmiöllä voitaisiin perustella erään laitevalmistajan [35] väite, jonka mukaan hyvin matalataajuinen ääni etenee kattilassa huomattavasti pidemmälle kuin korkeataajuinen ääni.

Tutkimuksessa [27] havaittiin, että ääni heijastuu tehokkaasti tutkitussa lämmönvaihtimessa. Toisaalta tutkitussa kattilassa 150 dB:n ja 100 Hz:n ääninuohoin ei havaintojen mukaan tuottanut riittävää äänenpainetta kerrostuman irrottamiseen edes torven suulla. Tutkimuksessa ei kommentoitu väliaineen absorption tai leviämismuutoksen vaikutusta.

tusta. Mittaustulokset antavat kuitenkin viitteitä siitä, että väliaineen absorptio ja leviämismuutokset yhdistettynä vaimentavat ääntä enemmän kuin tuhkan aiheuttama absorptio.

Tutkimuksessa [37] selvitettiin kivihiili- ja öljypolton pohjatuhkan ääneneristysominaisuuksia. Tutkittu tuhka koostui pääasiassa piioksidista ja alumiinioksidista. Eristeeseen oli lisätty 20 % sementtiä. Seosaineena käytetyn sementin absorptio-ominaisuudet ovat tutkimuksen mukaan lähellä käytetyn pohjatuhkan ominaisuuksia. Tutkimuksen tuloksia voitaneen vertailla äänen vaimenemiseen soodakattilan tuhkakerrostumissa. Tutkimuksessa havaittiin, että matalilla äänentaajuuksilla (alle 250 Hz) eristeen absorptiokerroin eristeen huokoisuudesta riippumatta oli alle 0,1. Alle 100 Hz:n taajuuksilla absorptiosuhde oli hyvin pieni. Yli 500 Hz:n taajuuksilla tiiviin eristeen (huokoisuus 12 %) absorptiosuhde tasaantui noin 0,2:een. Huokoisempien eristeiden (huokoisuus 28–37 %) absorptiosuhde kasvoi yli 500 Hz:n taajuuksilla nopeasti yli arvon 0,4. Myös eristeen paksuudella havaittiin selkeä yhteys absorptiokertoimen kasvuun. Ääninuohouksen kannalta tällä ei kuitenkaan liene merkitystä, koska toimiva ääninuohous ehkäisee paksujen kerrostumien muodostumisen.

Kaavasta (5.12) voidaan laskea, että absorptiosuhteella 0,1 äänenpaine laskee heijastuksen aikana noin 5 %. Kaavan (5.6) mukaan 130 dB vastaa 63 Pa:n äänenpainetta. Jos tämä äänenpaine vaimenee 5 %:lla, äänenpainetasoksi saadaan 129,6 dB. Voidaan todeta, että hyvin heijastava kerrostuma ei ratkaisevasti vähennä äänenpainetta yhden heijastuksen aikana. Kymmenen heijastusta vastaavassa tilanteessa vähentää äänenpaineen arvoon 125,4 dB. Neljän desibelin vaimennus voi olla ratkaiseva ääninuohouksen toimivuuden kannalta. Lämmönvaihtimessa lämmönsiirto-putket on asennettu tiheästi, ja edetessään muutaman metrin matkan etenkin korkeataajuisen äänen heijastuu useita kertoja. Näin voidaan perustella, miksi ääninuohouksen tehokas toiminta-alue voi olla vain muutamien metrien luokkaa. Jotta riittävä äänenpainetaso saavutetaan sisemmillä putkipinnoilla, ääni on heijastuttava tehokkaasti lämmönvaihtimissa. Tämä edellyttää joko puhtaita putkipintoja tai hyvin heijastavia tuhkakeroistumia.

5.4 Ääninuohouksen periaate

Ääninuohoin tuottaa voimakkaita, matalataajuisia ääniaaltoja. Ääniaaltojen vaikutus tuhkakeroistumien irtoamiseen ei ole yksiselitteinen. Ääniaalto aiheuttaa savukaasuvirtauksessa kulkeutuvan tuhkahiukkasen värähtelyä estäen suurien hiukkasrykelmien muodostumista [38]. Toisaalta jo kerrostumassa olevan tuhkahiukkasen mahdollinen värähtely rasittaa kerrostuman rakennetta ja voi aikaansaada kerrostuman murtumisen. Samalla ääniaallon aiheuttama painegradientti aiheuttaa voimaresultantin kerrostuman pintaan, kun paine kerrostuman sisäpinnalla on korkeampi kuin sen ulkopinnalla [17]. Eräs laitevalmistaja [38] on esittänyt, että ääniaalto ohentaa virtauksen rajakerrosta kerrostuman pinnalla, mikä altistaisi kerrostuman pinnalla olevan tuhkahiukkasen tempautumaan savu-

kaasuvirtaukseen. Yleisesti voidaan todeta, että tuhka hiukkanen irtoaa kiinnittymispinnastaan, jos ääniaallot kohdistavat hiukkaseen suuremman voiman pois päin kerrostumasta kuin mikä hiukkasta kerrostumaan sitovien voimien suuruus ovat. Ääninuohousta voidaan kuvailla tuhkan kerrostumista ehkäisevänä menetelmänä.

Ääninuohoin toimii joko paineilmalla tai nestekaasulla. Yksinkertainen paineilmalla toimiva ääninuohoin koostuu torvesta, generaattorista ja kompressorista. Generaattoriin syötetään korkeapaineista ilmaa, mikä aiheuttaa generaattorin sisällä olevan metallikalvon värähtelyä. Värähtelyssä syntyvä ääniaalto ohjataan torviosan läpi kattilan sisälle. Torven pituus määrittää äänentaajuuden siten, että matalampi taajuus saavutetaan pidemmällä torviosalla. Kaasulla toimivat nuohoimet ovat rakenteeltaan huomattavasti monimutkaisempia. Nestekaasulla toimivassa kaasupulssinuohoimessa pieni määrä kaasua poltetaan laitteen polttokammiossa. Kaasupulssinuohoimella saavutetaan perinteistä paineilmaa käyttävää ääninuohointia korkeampia äänenpainetasoja. [24] Nuohouksessa käytetään tyypillisesti lyhyitä, 10–15 sekunnin jaksoja 5–10 minuutin välein. Jaksojen ja taukojen pituudet vaihtelevat, ja ne optimoidaan tapauskohtaisesti. [24][38]

Ääninuohous soveltuu kiinteiden kerrostumien irrottamiseen [24][38]. Myös savukaasun ja kerrostuman kosteuspitoisuus vaikuttaa nuohottavuuteen [27]. Kosteus sitoo tuhka hiukkasia yhteen, mikä voi heikentää ääninuohoamisen vaikutusta. Savukaasuvirtauksen on oltava riittävän voimakas, jotta irronnut tuhka siirtyy pois lämmönsiirtopinnalta. [38]

Ääninuohouksessa käytetään matalataajuisia ääntä. Ääninuohouksessa käytettävät äänentaajuudet ovat yleisesti välillä 15–250 Hz [24][38][25]. Matalataajuinen ääni absorboituu väliaineessa ja rakenteessa korkeataajuisia ääntä vähemmän. Lisäksi matalataajuinen ääni diffraktoituu eli taipuu paremmin. [26]

Infraäänien äänentaajuus on kuuluvan äänen taajuutta matalampi. Laittevalmistajan [35] mukaan infraäänitaajuuksia käyttämällä voidaan saavuttaa monia etuja kuuluvaan äänentaajuuteen verrattuna. Laittevalmistajan mukaan infraäänien käyttäminen vähentää kuultavaa melua. [35] Fysikaalisesti voidaan perustella, että diffraktoituminen paranee ja äänen absorboituminen väliaineessa vähenee, kun äänentaajuus pienenee [26][32]. Haittapuolena on esitetty liitteessä A, että infrataajuinen ääni voi aiheuttaa kattilarakenteiden värähtelyä ja altistaa siten rakenteet mekaaniselle rasitukselle.

Kuten on todettu, kuuluvan äänen taajuusalueella toimiva ääninuohous on tehokasta vain muutamien metrien etäisyydellä nuohoimesta. Laittevalmistajan [35] väitteen mukaan infraääninuohouksen tehokas nuohousetäisyys voi olla huomattavasti laajempi. Kuten luvussa 5.3 on todettu, infraääni absorboituu väliaineeseen ja rakenteisiin vähemmän kuin kuuluva ääni. Lisäksi äänen taipuminen ja heijastuminen vaikuttavat siihen, kuinka hyvin ääni kantautuu sokkeloisissa lämmönvaihtimissa.

Pidemmän aallonpituuden käyttäminen lisää savukaasun molekyylien liikepoikkeamaa, eli aiheuttaa voimakkaampaa savukaasun edestakaista virtausta, mikä on perusteltu luvussa 5.1 kaavoilla (5.1–5.4). Erään laitevalmistajan [35] mukaan suuri liikepoikkeama lisää ääninuohouksen tehokkuutta. Valmistajan mukaan pidempi liikepoikkeama voi lisätä virtauksen turbulenssia lämmönsiirtoputkien virtauksen takapuolella ehkäisten tuhkan tarttumista kerrostuman pintaan. Lisäksi voidaan todeta, että pidemmän aallonpituuden vuoksi kerrostuman ja kaasun välinen paine-ero kohdistaa voiman suuremmalle alalle ja voi siten edesauttaa kerrostuman irtoamista.

Akustinen geometria lämmönvaihtimissa on monimutkainen, ja äänenpainetasojen laskeminen teoreettisesti on hankalaa. Laitevalmistaja [35] ilmoittaa käyttävänsä tietokone-mallinnusta äänen käyttäytymisen arviointiin. Tehokkaan nuohousetäisyyden ja vaadittavien äänenpainetasojen selvittämiseen vaaditaan kuitenkin käytännön havaintoja.

5.5 Soodakattilan ääninuohoamisen edellytykset

Soodakattilan tuhkakerrostumat ovat ääninuohoamisen kannalta haastavia. Korkea kloorin ja kaliumin määrä voivat tehdä tuhkasta tarttuvaa laajalla lämpötila-alueella. Kuten liitteessä A on todettu, ääninuohous ei ole tehokas menetelmä osittain sulan kerrostuman poistamiseen. Ääninuohousta sovelletaankin lähinnä täysin kiinteiden kerrostumien poistamiseen.

Vapaan rikkidioksidin määrä savukaasuissa on vähentynyt useissa moderneissa soodakattiloissa lähes olemattomaksi [3]. Samalla vetysulfaatin muodostumisesta on pääosin päästy eroon, kuten luvussa 3.1.1 on esitetty. Toisaalta vapaan rikkidioksidin puute voi johtaa alkalikloridien määrän kasvuun, kuten luvussa 3.1.2 on esitetty. Aiemmin vetysulfaatti aiheutti likaantumisongelmia etenkin keittoputkien loppuosien ja ekonomaiserin viileillä pinnoilla [13]. Tämä ongelma lienee vähentynyt, mutta nykyaikaisissa soodakattiloissa kloridit voivat aiheuttaa tahmeita kerrostumia tulistimissa ja keittoputkissa. Erään tutkimuksen [39] mukaan kaliumin ja kloorin määrä on useimmissa ruotsalaisissa soodakattiloissa matala, minkä vuoksi kloori- ja kaliumyhdisteet ei aiheuta merkittäviä likaantumisongelmia.

Kerrostuma on tehokkaimmin ääninuohottavissa alueilla, joissa tuhka on kiinteää [38]. Kuten on todettu, tuhkan sulamislämpötila riippuu kloorin ja kaliumin määrästä. Savukaasun lämpötilat ovat riippuvaisia myös kattilan kuormitusasteesta ja likaantumisen tasosta. Savukaasu ei jäähdy likaantuneessa lämmönvaihtimessa suunniteltuun lämpötilaan. Yksiselitteisesti ei voidakaan todeta, millä soodakattilan alueella tuhka muuttuu tahmeasta kiinteäksi. Voidaan kuitenkin olettaa, että tuhka on täysin kiinteää keittoputkien jälkeen.

Kuten luvussa 3.2.2 on esitetty, viileillä pinnoilla (alle 300 °C) sintraantumista ei juuri tapahdu, ja fume-tuhka on lämmönsiirtopinnalla hienojakoisena pölynä. Sintraantumaton

tuhka on pölymäistä ja hienojakoista niillä pinnoilla, joiden lämpötila on tuhkan sulamislämpötilan alapuolella. Näillä alueilla nuohoustuloksen voidaan olettaa olevan hyvä. Sen sijaan tulistimissa ja mahdollisesti keittoputkissa, missä savukaasun lämpötila on tuhkan sulamispisteen yläpuolella, on tahmeaa tuhkaa, joka voi muodostaa nopeasti tiiviitä ja sitkeitä kerrostumia.

Sintraantuminen voimistuu lämpötilan kohotessa, ja sintraantuminen kasvattaa tuhkan ja lämmönsiirtoputken välisiä adheesiovoimia [13]. Siksi ääninuohouksen voidaan olettaa toimivan parhaiten keittoputkien jälkeisillä alueilla, missä savukaasun lämpötila on matala ja sintraantuminen ei ole voimakasta tai sitä ei tapahdu ollenkaan. On huomattava, että lämmönvaihtoputket ovat savukaasua matalammassa lämpötilassa putkien sisällä virtaavan höyryn viilentäessä lämmönsiirtopintoja. Tuhka voi sintraantua viilentämättömillä savukanavan pinnoilla, vaikka lämmönsiirtopinnoille tarttunut tuhka olisi sintraantumaton.

Kuten luvussa 3.2 on esitetty, lämpötilan noustessa ja tuhkan sintraantuessa kerrostuman huokoisuus alkaa vähentyä, mikä parantaa sen lujuutta. Kerrostuman muuttuessa lujemmaksi ääninuohous ei välttämättä pysty yhtä tehokkaasti aiheuttamaan kerrostuman murtumista tuhkahiukkasten välillä. Sen sijaan voidaan olettaa, että kerrostuman irtoaminen putkipinnalta yleistyy, kun sidokset sisäpinnan ja putken tai kahden tuhkakerroksen rajapinnalta rikkoutuvat.

Ääninuohouksen toimintasykli on tiheä, ja voidaankin olettaa, että nuohoukertojen välissä kerrostuma ei ehdi kasvaa paksuksi. On kuitenkin epäselvää, kuinka paljon tuhka sintraantuu nuohoukertojen välissä, ja on mahdollista, että tuhka ehtii sintraantua huomattavasti jo muutaman minuutin aikana. On myös mahdollista, että gravitaation vaikutuksesta kerrostuma irtoaa vasta, kun se on saavuttanut riittävän paksuuden. Tuhkan sintraantumisenopeutta on syytä tutkia tarkemmin, jotta nuohousvälin pituus voitaisiin optimoida.

Käytännön kokemus liitteessä A osoittaa, että hyvin hienojakoinen tuhka on joissain tapauksissa vaikeasti ääninuohottavaa. On mahdollista, että hyvin hienojakoinen tuhka muodostaa tällaisia vaikeasti nuohottavia tiiviitä kerrostumia, vaikka sintraantumista ei tapahtuisikaan. Sen sijaan selkeästi sulamislämpötilaansa viileämmät suurempikokoiset tuhkahiukkaset voivat sintraantuessaan muodostaa huokoista, haurasta massaa, jonka lujuus on matala, kuten luvussa 3.2.5. on esitetty. Joissakin tapauksissa sintraantunut, hauras kerrostuma voi mahdollisesti olla tehokkaammin nuohottavissa kuin hyvin hienojakoinen, sintraantumaton tuhka.

Tutkimuksessa [27] ääninuohousta on kokeiltu jo likaantuneille pinnoille. Laitevalmistajan mukaan ääninuohous on kuitenkin tehokkainta, kun lähtötilanteessa lämmönsiirtopinnat ovat puhtaat [24]. Eräs selitys tähän voi olla sintraantumisen aiheuttama kerrostuman kovettuminen.

Voidaan olettaa, että carry over -tuhkaa ei keräänny merkittävästi ekonomaiseriin, koska suuret hiukkaset tarttuvat lämmönsiirtopinnoille tulistimessa. Lisäksi painavammat hiukkaset eivät kiinteänä kerrostu helposti. Siksi ekonomaiserin tuhkan voidaan olettaa olevan hienojakoista. Lämmönsiirtoputkien matalan lämpötilan vuoksi tuhka ei sintraannu kerrostuman sisäpinnalla, ja adheesiovoimat kerrostuman ja putken rajapinnalla ovat todennäköisesti heikommät kuin kerrostuman sisällä. Kerrostuman voidaankin olettaa irtoavan ekonomaiserin lämmönsiirtoputken pinnasta kokonaan.

Pienet tuhka hiukkaset törmäilevät savukaasuvirrassa muodostaen suurempia hiukkasia. Siksi hienojakoisen fume-tuhkan hiukkaskoko kasvaa savukanavassa eteenpäin mentäessä. Hiukkaskoon kasvaessa hiukkasten väliset adheesiovoimat heikkenevät ja kerrostuman huokoisuus kasvaa, minkä vuoksi tuhka voi olla helpommin nuohottavaa kohti savukanavan loppupäätä.

Luvussa 5.2 esitetyn jousi-massa-systeemin avulla voidaan pohtia adheesiovoimien ja yksittäisen hiukkasen koon vaikutusta resonanssitaajuuteen. Kuten kaavasta (5.10) nähdään, jousivoiman kasvattaminen nostaa systeemin resonanssitaajuutta. Täten voidaan epäillä, että sintraantuneiden, lujasti toisiinsa kiinnittyneiden tuhka hiukkasten resonanssitaajuus on suurempi. Vastaavasti pieni hiukkaskoko ja siten pieni massa nostaa resonanssitaajuutta. Esimerkiksi keittoputkistossa oleva sintraantuneesta hienojakoisesta tuhasta koostuva kerrostuma voi irrota parhaiten korkeammilla taajuuksilla. Heinolan soodakatilan tulistimessa parhaan nuohoustuloksen tuottaakin matalataajuisemman nuohoimen sijaan 100 Hz:n ääninuohoin, kuten liitteessä A on esitetty.

6. ÄÄNINUOHOUKSEN KÄYTTÖKOKEMUKSIA

Ääninuohousta ei ole käytetty soodakattilaprosessin yhteydessä runsaasti, ja tutkimustietoa on saatavilla rajoitetusti. Tämän työn ääninuohouskokeilut soodakattiloissa perustuvat valmistajien julkaisemiin raportteihin. Aineistona on myös Suomenojan hiilivoimalaitoksella suoritettujen mittausten tuloksia, joita on esitetty luvussa 6.2 ja liitteessä B.

6.1 Ääninuohous soodakattiloissa

Ääninuohouslaitteiden valmistajat ovat julkaisseet raportteja ääninuohouksen toiminnasta soodakattilaprosessin yhteydessä [24][35]. Lisäksi tässä luvussa viitataan liitteessä A esitettyihin laitevalmistajan kokemuksiin.

Suomessa ääninuohousta on käytetty soodakattilaprosessin yhteydessä Heinolassa ja Uimaharjulla. Laitevalmistajan mukaan Heinolassa ääninuohousta käytetään tulistimissa sekä sähkösuodinta edeltävillä jakovirtauslevyillä ja savukaasun kuivausjärjestelmässä. Kyseisessä soodakattilassa on kokeiltu eritaajuisia nuohoimia. Toimivammaksi nuohoimeksi tulistimessa on todettu 100 Hz:n taajuisia ääntä tuottava nuohoin. Savukaasun kuivausjärjestelmässä toimivaksi on havaittu kaasupulssinuohoin [24]. Ääninuohousta on käytetty laitevalmistajan mukaan noin 20 vuotta. Liitteessä A on esitetty lisätietoja tapauksesta.

Uimaharjun sellutehtaalla käytetään ääninuohousta soodakattilan sähkösuotimen ja savukaasupuhaltimen välisissä kahdessa lämmönvaihtimessa. Nuohoimet on asennettu vuonna 2014, ja kirjoitushetkellä nuohoimista on vain suuntaa-antavia kokemuksia. Painemittausten perusteella nuohoimet vaikuttavat kuitenkin toimivan, eikä nuohoimien asentamisen jälkeen ole koettu tukkeentumiseen liittyviä ongelmia. [40]

Ääninuohousta on käytetty soodakattiloissa myös ulkomailla. Kanadassa Windsorissa ääninuohous on ollut käytössä noin kymmenen vuotta. Kuiva tuhka aiheutti ennen ääninuohouksen käyttöä likaantumisongelmia ekonomaisierissa. Liitteessä A on esitetty lisätietoja tapauksesta.

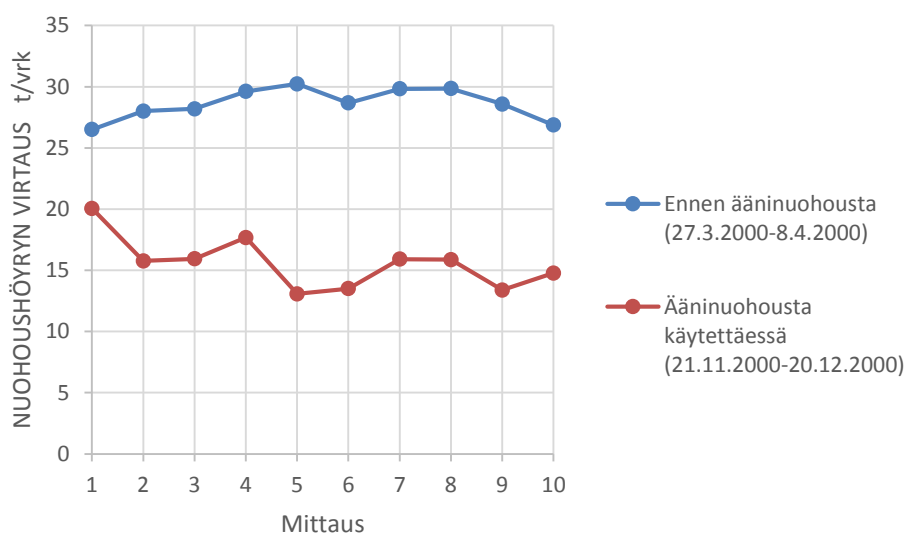
Ruotsissa Frövin tehtaan soodakattilassa laitevalmistajan raportin [35] mukaan tuhkan kerääntymisen vuoksi keittoputkien ja ekonomaisierin välistä savukanavan osaa jouduttiin nuohoamaan höyryllä ja pesemään säännöllisesti alasajon aikana, mikä aiheutti korroosiota teräspinoilla. Lisäksi savukaasupuhaltimen tehonkulutusta jouduttiin lisäämään, koska painehäviö lämmönvaihtimien yli kasvoi. Laitevalmistajan mukaan yhden infraäänitaajuisen nuohoimen asentamisen jälkeen pesun tarve hävisi, nuohoushöyryn kulutus vähentyi ja painehäviö lämmönvaihtimen yli pieneni. Laitevalmistajan tietojen mukaan nuohous on ollut onnistuneesti toiminnassa vuodesta 2007 lähtien [41].

Yhdysvalloissa Stevensonin tehtaan soodakattilassa käytetään laitevalmistajan raportin [35] mukaan samanlaista infraääninuohointia kuin Ruotsissa Frövissä. Raportin mukaan happaman tuhkan kerääntyminen sähkösuodinta edeltävään savukanavan mutkaan aiheutti ongelmia sähkösuotimen toiminnassa, mikä johti kattilan viikoittaiseen alasajoon ja siten heikentyneeseen käyttöasteeseen. Valmistajan mukaan ääninuohoimen käyttöönoton jälkeen sähkösuotimen toiminta parantui sekä päästöjen määrä ja alasajojen tarve savukanavan puhdistamista varten vähentyi.

6.2 Ääninuohous Suomenojan voimalaitoksella

Suomenojan hiilivoimalaitoksella käytetään ääninuohoimia ekonomaisierissa ja ilman esilämmittimessä. Liitteessä B on Suomenojan voimalaitoksen henkilökunnan tekemien mittausten tuloksia vuodelta 2000. Tässä luvussa esitetyt lukuarvot ovat nähtävissä kyseisessä liitteessä.

Kuvassa 6.1 on esitetty nuohoushöyryn kulutus Suomenojan voimalaitoksella. Sininen käyrä kuvaa nuohoushöyryn kulutusta ennen ääninuohouksen käyttöönottoa ja punainen käyrä nuohoushöyryn kulutusta ääninuohouksen käyttöönoton jälkeen.



Kuva 6.1. Nuohoushöyryn kulutus Suomenojan voimalaitoksella.

Kuvasta 6.1 nähdään, että nuohoukseen käytettävän höyryn kulutuksen keskiarvo laski vertailuajanjaksolla huomattavasti, noin 45 %. Ääninuohous aiheutti siis merkittäviä kustannusetuja vähentyneen höyrynkulutuksen vuoksi, kun säästyneellä höyryllä tuotettu sähköenergia voidaan myydä.

Nuohoushöyryn kulutus on ainoa mittausarvo, joka muuttui oleellisesti mittausajanjaksolla. Pieniä muutoksia kaikkien mittauskertojen keskiarvoissa voidaan havaita myös ekonomaisierin ja ilman esilämmittimen alueilla. Lämpötilaero ekonomaisierin yli kasvoi

ääninuohouksen myötä 1,7 °C. Parantunut lämmönsiirto viittaa puhtaampana pysyviin lämmönsiirtopintoihin.

Taulukkoon 6.1 on koottu savukaasun mittausarvoja ilman esilämmittimen vasemman ja oikean puolen yli ajanjaksoilta ennen ja jälkeen ääninuohouksen käyttöönoton. Luvut ovat ajanjaksojen keskiarvoja, jotka on laskettu liitteessä B esitetyn taulukon lukuarvojen perusteella.

Taulukko 6.1. Savukaasun mittausarvoja Suomenojan voimalaitoksella ilman esilämmittimen yli.

	Ennen ääninuohousta (keskiarvo ajalta 27.3.2000-8.4.2000)		Ääninuohousta käytettäessä (keskiarvo ajalta 21.11.2000-20.12.2000)	
	Vasen puoli	Oikea puoli	Vasen puoli	Oikea puoli
Paine-ero ilman esilämmittimen yli	11,0 mbar	9,0 mbar	9,6 mbar	9,2 mbar
Savukaasun lämpötilaero ilman esilämmittimen yli	220,0 °C	225,4 °C	220,6 °C	227,0 °C

Taulukon 6.1 perusteella ennen ääninuohouksen käyttöönottoa paine-ero kasvoi ekonomaisemmin vasemman puolen yli enemmän kuin oikean puolen yli, mikä johtuu mahdollisesti vasemman puolen likaantumisesta. Ääninuohouksen käyttöönoton jälkeen paine-erot ovat tasoittuneet. Lisäksi savukaasun lämpötila on laskenut hieman enemmän, mikä viittaa parantuneeseen lämmönsiirtoon.

Suomenojan tapauksessa ääninuohouksen vaikutukset näkyvät erityisesti nuohoushöyryn kulutuksen puolittumisessa. Jos nuohoukseen käytettäisiin prosessihöyryä arvoilla 10 bar ja 200 °C, höyryn entalpia olisi noin $2830 \frac{kJ}{kg}$. Jos nuohoushöyry lauhdutettaisiin arvoon $2400 \frac{kJ}{kg}$, vuorokaudessa säästyneen höyryn lämpöenergia olisi höyrynkulutuksella $10 \frac{t}{vrk}$

$$(2830 - 2400) \frac{kJ}{kg} * 10000 kg = 4300 MJ \quad (6.1)$$

eli 1,2 MWh. Tämä lämpöenergia voitaisiin käyttää energiantuotantoon. Paineilmalla toimivan ääninuohouksen päiväkohtaiset käyttökustannukset ovat hyvin pieniä.

6.3 Ääninuohous muissa voimakattiloissa

Ääninuohousta on käytetty pitkään erityyppisissä voimakattiloissa. Eniten tutkimustietoa löytyy fossiilisia polttoaineita polttavien kattiloiden ääninuohouksesta. Bioperäisiin polttoaineisiin, kuten mustalipeään, verrattuna fossiiliset polttoaineet sisältävät vähän tuhkaa ja tuhka sulaa tyypillisesti korkeammissa lämpötiloissa.

Puolassa tehdyssä tutkimuksessa [27] kiertoleijupetikattilan tulistimien kerrostumia pyrittiin poistamaan paineilmalla toimivilla ääninuohoimilla seisokin aikana. Polttoaineena kattilassa käytettiin fossiilisia polttoaineita. Tutkimuksessa ääninuohouksella ei saavutettu riittävää äänenpainetasoa kerrostumien irrottamiseen kymmenen metrin etäisyydellä nuohoimesta. Äänenpainetaso pieneni tällä matkalla huomattavasti, ja äänentaajuus hajaantui nopeasti torven suulta usean kilohertsin kaistalle. Kuten luvussa 5.4 ja liitteessä A on esitetty, ääninuohous on tarkoitettu ennaltaehkäisemään tuhkan kerrostumista. Kyseisessä tutkimuksessa pinnat olivat kuitenkin lähtötilanteessa likaantuneita. Tutkimuksessa todetaan, että puhdistamiseen tarvittaisiin yli 130 dB:n äänenpainetasoja yhdellä äänentaajuudella mitattuna. Tässä työssä ei tutkita, miten äänen hajaantuminen laajalle taajuuskaistalle vaikuttaa puhdistustulokseen.

Tutkimuksen [42] mukaan Salmisaaren hiilivoimalaitoksella ääninuohousta käytetään rikinpoistojärjestelmässä puhdistamaan kalsiumsulfaatin ja -sulfiitin aiheuttamia kerrostumia. Tutkimuksen mukaan ääninuohous toimii kohteessa hyvin. Tutkimuksen [43] mukaan Kymijärven hiilikattilassa ääninuohousta käytetään ekonomaisierissa, jossa ääninuohous on korvannut höyrynuohouksen kokonaan.

Ääninuohousta on käytetty myös Kiinalaisissa kivihiilivoimaloissa, joista ääninuohoinvalmistaja on julkaissut kaksi käyttöraporttia [25]. Raporteissa esitetyt tiedot ovat vajavaisia. Ne antavat kuitenkin viitteitä ääninuohouksen myötä parantuneesta lämmönsiirrosta, mikä pienissäkin määrin saa vuositasolla aikaan suuria säästöjä.

7. YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä luvussa on esitetty yhteenveto työn havainnoista. Lisäksi luvun loppuun on koottu ehdotuksia jatkotutkimuksen aiheiksi. Ehdotettuja aiheita ei tutkittu tässä työssä tai niihin ei löydetty yksiselitteisiä vastauksia.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli kerätä soodakattilan ääninuohoukseen liittyviä kokemuksia ja kartoittaa tuhkakerrostumien koostumukseen ja ominaisuuksiin liittyvää tutkimusta. Käyttökokemusten perusteella ääninuohouksen käyttö on joissain tapauksissa vähentänyt nuohoukseen käytettävän höyryn määrää ja siten lisännyt kattilan sähköntuotantoa. Ääninuohous voi höyrynuohoukseen verrattuna mahdollisesti tuottaa paremman puhdistustuloksen sokkeloisissa lämmönvaihtimissa, koska ääni heijastuu lämmönsiirto-putkista. Merkittävä mahdollinen ääninuohouksen aiheuttama hyöty onkin tukkeutumisen ja siitä seuraavan odottamattoman kattilan alasajon välttäminen.

Soodakattilan kerrostumat ovat haastava kohde ääninuohoukselle. Laajalla lämpötila-alueella sulassa olomuodossa oleva tuhka rajoittaa ääninuohouksen käyttömahdollisuuksia. Ääninuohous soveltunee kuitenkin viileämpien pintojen, missä tuhka on kiinteää, puhdistamiseen soodakattilassa yhtä hyvin kuin muissakin voimakattilatyypeissä.

Ääninuohouksen etuina höyrynuohoukseen voidaan pitää erityisesti sen matalia käyttökustannuksia ja tiheää toimintasykliä. Tiheän toimintasyklin tavoitteena on irrottaa tuhka-hiukkaset nopeasti kiinnittymisen jälkeen, jolloin paksun tuhkakerrostuman muodostuminen ehkäistään kokonaan. Ääniaallon heijastumisen ja taipumisen vuoksi ääninuohous soveltunee höyrynuohousta paremmin sokkeloisten lämmönsiirto-putkien nuohoomiseen. Voidaan tosin kyseenalaistaa, riittääkö heijastuneen äänen paine irrottamaan kerrostumia.

Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden nousu on johtanut vapaan rikkidioksidin vähenemiseen soodakattilan savukaasuissa. Samalla huomattavia likaantumisongelmia aiheuttavan vetyhapon muodostuminen on vähentynyt oleellisesti. Toisaalta rikkidioksidin väheneminen on johtanut kloridien rikastumiseen tuhkassa, minkä vuoksi fume-tuhka on tahmeaa laajemmalla lämpötila-alueella kuin aiemmin. Mustalipeän kloori- ja kaliumpitoisuus on kuitenkin joissakin tapauksissa hyvin matala, jolloin ne eivät vaikuta merkittävästi tuhkan jähmettymiseen. Onkin tapauskohtaista, missä lämpötiloissa ja millä kattilan alueilla tuhka muuttuu tahmeasta kiinteäksi.

Tuhkan sintraantumista tapahtuu, kun kerrostuman lämpötila on yli 300 °C. Sintraantumisen voidaan olettaa heikentävän nuohoustulosta, koska kerrostuman sintraantuessa sen huokoisuus vähenee. Tällöin kerrostuman lujuus kasvaa. Lämpötilan noustessa sintraantuminen nopeutuu ja kerrostuma muuttuu elastisemmaksi, mikä vaikeuttaa kerrostuman

nuohoamista. Lisäksi sintraantunut tuhka mahdollisesti heijastaa ääntä vähemmän, jolloin ääni vaimenee nopeammin lämmönvaihtimessa. Pinnaltaan sintraantunut kerrostuma voi kuitenkin irrota putkipinnan ja kerrostuman rajapinnasta, jossa adheesiovoimat ovat heikommat kuin tuhkahiukkasten välillä. Toisaalta ääninuohous toimii tiheällä syklillä, jolloin tuhka ei mahdollisesti ehdi sintraantua merkittävästi nuohoukertojen välillä. Tuhkan sintraantumisenopeutta lyhyellä aikavälillä ei tunneta tarkasti.

Tuhkan aiheuttamat likaantumismekanismit soodakattilan savukanavan eri vaiheissa tunnetaan melko hyvin. Lisäksi yleisimpien tuhkan kemiallisten yhdisteiden fysikaalisia ominaisuuksia on tutkittu runsaasti. Aiheita on käsitelty luvussa 3. Tuhkakerrostuman matala huokoisuuden taso ja pieni hiukkaskoko sekä korkea lämpötila tekevät kerrostumasta lujemman ja elastisemman, mikä heikentää ääninuohouksen tulosta. Varmoja johtopäätöksiä asiasta ei kuitenkaan voida tehdä, koska tutkimusta tuhkakerrostumien ominaisuuksista on tehty vain höyrynuohouksen yhteydessä. Myöskään ääninuohouksen tuhkaa irrottavat mekanismit eivät ole yksiselitteisiä.

Laitevalmistajat esittävät useita ääninuohouksen vaikutusmekanismeja, joista eräs on tuhkahiukkasen värähtelystä johtuva kerrostuman hajoaminen. Ääninuohous aiheuttaa tuhkakerrostuman ja lämmönsiirtoputkien värähtelyä. Mikäli yksittäisen tuhkahiukkasen tai tuhkakerrostuman värähtely tapahtuu ominaisvärähtelytaajuudella, nuohouksen lopputulos saattaa parantua oleellisesti. Toisaalta lämmönsiirtoputkien voimakas värähtely ja resonointi voi aiheuttaa rakenteisiin mekaanista rasitusta. Ominaisvärähtelytaajuus voi selittää, miksi ääninuohouksen toimivuutta ja soveltuvaa äänentaajuutta on hankalaa ennakoita. Tässä työssä äänentaajuuden vaikutusta tuhkan irtoamiseen ja kattilarakenteisiin kohdistuvaan rasitukseen ei ole käsitelty enempää.

Äänen fysikaalisia ominaisuuksia on käsitelty luvussa 5. Ääninuohouksessa käytetään äänentaajuuksia laajalla taajuusalueella, ja äänentaajuudella näyttäisi olevan keskeinen vaikutus äänen vaimenemiseen. Matalampi ääni kantautuu kattilassa huomattavasti pidemmälle. Ei kuitenkaan ole varmaa, mikä äänentaajuus aiheuttaa parhaiten tuhkan irtoamisen lämmönsiirtopinnalta. Tähän työhön kerätyn kokemuksen perusteella voidaankin epäillä, että on tapauskohtaista, mikä äänentaajuus tuottaa parhaan puhdistustuloksen.

Ääni vaimenee kattilassa, kun äänienergiaa absorboituu tuhkaan ja savukaasuun. Nuohouksessa käytettävällä äänentaajuudella vaikuttaisi olevan huomattava vaikutus äänen etenemiseen kattilan sisällä siten, että korkeampi äänentaajuus vaimenee enemmän. Työssä esitellyt tutkimukset antavat viitteitä, että etenkin matalataajuinen ääni voi heijastua tuhkakerrostumasta hyvin, jolloin äänenpaine ei ratkaisevasti heikkene yhdestä heijastuksesta. Tiheässä lämmönsiirtoputkistossa etenkin korkeataajuinen ääni heijastuu kuitenkin lyhyen etenemisen aikana useita kertoja. Tämä voi selittää, miksi laitevalmistajan kokemuksen mukaan korkeataajuinen ääni menettää nuohousteihonsa jo muutaman met-

rin etäisyydellä. Voidaan myös epäillä, että hyvin matalataajuinen ääni etenee lämmönvaihtimessa törmäämättä lämmönsiirtoputkiin, minkä vuoksi matalataajuinen ääni etenee kattilassa hyvinkin pitkälle vaimentumatta.

Väliaineen absorption merkitystä ei työssä kyetty selvittämään, mutta kirjallisuuden perusteella sen voidaan olettaa olevan pieni. Merkittävänä äänen vaimentumismekanismina voidaan sen sijaan pitää äänen leviämismekanismista. Leviämismekanismien vaikutusta ei tutkittu tässä työssä.

Jatkotutkimuksessa voitaisiin tutkia äänen käyttäytymistä kattilaympäristössä ja kattilarakenteiden akustiikkaa, jotta ääninuohouksen toimivuutta voitaisiin ennakoida ja nuohoustulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten äänentaajuutta ja nuohoimien sijoituspaikkaa, optimoida. Äänenpaine hajaantuu kattilassa laajalle taajuuskaistalle, minkä vaikutus nuohoustulokseen on tuntematon. Lisäksi äänentaajuuden vaikutus äänen etenemiseen savukanavassa ja heijastumiseen kerrostumasta on epävarma. Myös äänen eri absorptiomekanismien merkitys äänen vaimentumiseen kattilaympäristössä on tuntematon.

Eräs keskeinen ääninuohouksen kehittämistä hidastava tekijä vaikuttaa olevan epätietoisuus ääninuohouksen kattilarakenteille aiheuttamasta rasituksesta. Jatkossa myös tätä aiheutta on syytä tutkia.

Jatkotutkimuksessa voitaisiin myös pyrkiä selvittämään, miten ääninuohous aiheuttaa tuhkakerrostuman irtoamisen. Jos ääninuohouksen aiheuttamat tuhkakerrostuman hajoamismekanismit olisivat tiedossa, olisi helpompaa arvioida, miten tuhkakerrostuman fysikaaliset ominaisuudet ja äänen ominaisuudet vaikuttavat kerrostuman irtoamiseen. Myös tuhkan sintraantumisenopeutta on syytä tutkia tarkemmin, jotta nuohousvälin pituus voitaisiin optimoida ja tuhkan sintraantuminen nuohouskertojen välillä välttää. Kaikkiaan ääninuohouksen tulokseen vaikuttavia tekijöitä on runsaasti ja niiden vaikutuksia ei täysin tunneta, minkä vuoksi ääninuohouksen kehittäminen vaatii tutkimusta todellisessa soodakattilaympäristössä.

LÄHTEET

- [1] Leppänen, A., Modeling Fume Particle Dynamics and Deposition with Alkali Metal Chemistry in Kraft Recovery Boilers, Tampere University of Technology, Publication 1273, 2015, 64 p.
- [2] Vakkilainen, E. K., Kraft Recovery Boilers – Principles and practice, Suomen Soodakattilayhdistys, Helsinki, 2005, 242 s.
- [3] Raiko, R., Saarenpää, I., Höyrytekniikka, TTY Energia- ja prosessitekniikan laitos, 254 s.
- [4] Tran, H., Recovery fireside deposits and plugging prevention, Pulp & Paper Centre and Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto, 13 s.
- [5] Xianglin, S., Ying C., Haibin, L., Research on the Melting Points of some Chinese Coal Ashes, Kluwer Academic Publishers, New York, 1999, s. 433-440.
- [6] Konttinen, J., Teollisuuden prosessit, TTY Energia- ja prosessitekniikan laitos, 165 s.
- [7] Hupa, M., Kraft recovery boilers – Chapter 2: Recovery Boiler Chemistry, TAPPI Press, New York, 1997, s. 46-60.
- [8] Tikka, P., Papermaking Science and Technology, Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy, Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy, Jyväskylä, Finland, 2008, 387 s.
- [9] Jokiniemi, J. K., Pyykkönen, J., Mikkanen, P., Kauppinen, E., Modelling fume formation and deposition in kraft recovery boilers, TAPPI Journal, Vol 79(7), 1996, s. 171-181.
- [10] Työterveyslaitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 8.3.2015): <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit>.
- [11] Mikkanen, P., Kauppinen, E. I., Pyykönen, J., Jokiniemi, J. K., Aurela, M., Vakkilainen, E. K., Alkali Salt Ash Formation in Four Finnish Industrial Recovery Boilers, Energy&Fuels, Vol 13(4), 1999, s. 778-795.
- [12] Doshia, V., Vuthalurub, H. B., Korbeec, R., Kiel, J. H. A., Development of a modeling approach to predict ash formation during co-firing of coal and biomass, Fuel Processing Technology, 2009, Vol 90(9), s. 1148-1156.

- [13] Tran, H., Kraft recovery boilers – Chapter 9: Upper Furnace Depositioning and Plugging, TAPPI Press, New York, 1997, s. 247-184.
- [14] Aho, M., Ferrer, E., Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass, *Fuel*, Vol 84(2-3), 2005, s. 201-212.
- [15] Bernatha, P., Siquefielda, S., Baxtera, L., Sclippaa, G., Rohlfinga, C., Barfield, M., In situ analysis of ash deposits from black liquor combustion, *Vibrational Spectroscopy*, Vol 16(2), 1998, s. 95-103.
- [16] Tran, H., Khalaj-Zadeh, A., Composition of Carryover in Kraft Recovery Boilers, *Suomen Soodakattilayhdistys*, 2009, s. 157-166.
- [17] Zbogar A., Frandsen, F., Jensen, P., Glarborg, P., Shedding of ash deposits, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, Vol 35(1), s. 31-56.
- [18] Backman, R., Hupa, M., Skrifvars, B. J., Predicting Superheater Deposit Formation in Boilers Burning Biomass, Kluwer Academic Publishers, New York, 1999, s. 405-414.
- [19] Cameron J. H., Goerg-Wood, K., Role of thermophoresis in the deposition of fume particles resulting from the combustion of high inorganic containing fuels with reference to kraft black liquor, *Fuel Processing Technology*, Vol 60(1), 1999, s. 49-68.
- [20] Tran, H. N., Barham, D., Reeve, D. W., Sintering of Fireside Deposits and its Impact on Plugging in Kraft Recovery Boilers, *Tappi Journal*, Vol 70(4), 1988, s. 109–113.
- [21] Kaliazine, A., Tran, H., Cormack, D. E., The Mechanisms of Deposit Removal in Kraft Recovery Boilers, *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol 25(12), 1999, s. 418–424.
- [22] Piroozmand, F., Tran, H., Kaliazine, A., Cormack, D., Strength of Recovery Boiler Fireside Deposits at High Temperatures, *Proceedings of the TAPPI International Engineering Conference*, Miami, Florida, 13-17 syyskuuta, 1998, s. 169–179.
- [23] Mao, X., Tran, H., Cormack, D. E., Effects of Chemical Composition on the Removability of Recovery Boiler Fireside Deposits, *Tappi Journal*, Vol 84(6), 2001, s. 68.
- [24] Nirafon, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.3.2015): <http://www.nirafon.com>.

- [25] Sound Blast, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 11.3.2015):
<http://www.sound-blast.com>.
- [26] Borenius, J., Lampio, E., Pesonen, K., Jauhiainen, T., Nuotio, J., Pyykkö, I., Akustiikan perusteet, Insinööritieto Oy, 1981, 176 s.
- [27] Mirek, P., Field Testing of Acoustic Cleaning System Working in 670 MWTB CFB Boiler, Chemical and Process Engineering, Vol 34(2), 2013, s. 283-291.
- [28] Carvalho, M. G., Fiveland, W. A., Lockwood, F. C., Papadopoulos, C., Clean Combustion Technologies Part 2, OPA N. V., Amsterdam, 1999, 1153 s.
- [29] Cengel, Y. A., Boles, M. A., Thermodynamics – An Engineering Approach, McGraw-Hill, New York, 2011, 978 s.
- [30] Kolhinen, A., Characterizing the Ash Samples and the Removal of Ash by Acoustic Cleaning in Energy Technical Applications, Tampere University of Technology, Master of Science Thesis, 2004, 103 s.
- [31] Karjalainen, M., Hieman akustiikkaa, Teknillinen korkeakoulu, 2000, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 25.3.2015):
<http://www.cs.tut.fi/sgn/arg/akusem/akuintro.pdf>.
- [32] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, USA, 1982, 480 s.
- [33] Harris, C. M., Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 40(1), 1966, s. 148-159.
- [34] Bass, H. E., Sutherland, L. C., Zuckerwar, A. J., Blackstock, D. T., Hester, D. M., Atmospheric Absorption of Sound, Journal of the Acoustic Society of America, Vol 97, 1995, s. 680-683.
- [35] Infrafone, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10.3.2015): <http://www.infrafone.se/?lang=en>.
- [36] Hongisto, V., Meluntorjunta, Aalto-yliopisto Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, 2013, 213 s.
- [37] Arenas, C., Leiva, C., Vilches, L. F., Cifuentes, H., Use of Co-combustion Bottom Ash to Design an Acoustic Absorbing Material for Highway Noise Barriers, Waste Management, Vol 33(11), 2013, s. 2316–2321.

- [38] Kockum Sonics, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 10.3.2015):
<http://www.kockumsonics.com>.
- [39] Svedin, K., Wallin, E., Ahlroth, M., Sotningsmetoder och Sotångförbrukning i Svenska Sodapannor, Värmeforsk Service AB, Stockholm, 2008, 63 s.
- [40] Kolehmainen, J., Stora Enso Oyj, Uimaharju. Haastattelu 26.3.2015.
- [41] Ellebro, M., Director Engineering, Infracore AB, Sundbyberg, Sweden. Haastattelu 9.2.2015.
- [42] Niinikoski, O. M., Salmisaaren Voimalaitoksen Rikinkoistolaitoksen Pitkääntähtäimen Kunnossapito- ja Kehityssuunnitelma, Insinööritoimisto, Metropolia, 2009, 52 s.
- [43] Salonen, S., Pääkattilan Nuohouksen Optimointi Kymijärven Voimalaitoksella, Opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu, 2009, 50 s.

LIITE A: KESKUSTELU ÄÄNINUOHONVALMISTAJAN EDUSTAJIEN KANSSA

Vierailu Nirafonin toimistolla Lahdessa 5.3.2015. Vierailulla mukana oli kirjoittajan lisäksi tämän työn ohjaaja TkT Aino Leppänen. Tapaamisessa Nirafonia oli edustamassa Sales- / Project Manager Kimmo Savolainen, Research and Development Worker Jussi Leivo sekä Managing Director Sirkka Junikka. Vierailun aikana keskusteltiin ääninuohouksesta sooda- ja muiden voimakattiloiden yhteydessä. Esille nousseita asioita on listattu alle. Liitteen on oikolukenuut Jussi Leivo.

Nirafonin ääninuohomet

Paineilmaa käyttävät nuohomet tuottavat torven suulta mitattuna noin 150 dB äänenpaineen taajuudella 60, 100 tai 250 Hz.

Kaasupulssinuohoin tuottaa torven suulta mitattuna noin 170 dB äänenpaineen leveällä äänentaajuuskaistalla. Kaasupulssinuohointa käytetään nouhoussyklissä, jossa pamauteaan noin 2–10 pulssia sekunnissa (käyttötaajuus n. 10 Hz). Sykli kestää noin 10–20 sekuntia. Nuohoussyklin toistoväli optimoidaan tapauskohtaisesti.

Miten ääninuohous toimii pitkällä aikavälillä?

Ääninuohomet on ollut käytössä jo pidemmän aikaa muun muassa Stora Enson Heinolan tehtaan soodakattilassa ja Kanadassa Domtarin sellutehtaan soodakattilassa Windsorin kaupungissa.

Heinolassa ääninuohousta on käytetty jo parikymmentä vuotta. Ääninuohomet puhdistavat tulistimia, sähkösuodatinta edeltäviä jakovirtauslevyjä ja savukaasun kuivausjärjestelmää (harpaa). Tulistimeen kokeiltiin ensin kaasupulssinuohointa, jonka oletettiin toimivan parhaiten. Kaasupulssinuohometin jälkeen kokeiltiin 60 Hz:n nuohointa. Toimivimmaksi osottautui kuitenkin 100 Hz:n nuohoin. Harpassa (matalampi lämpötila) on kokeiltu kaikki paineilmaikäyttöiset nuohomet (60 Hz, 100 Hz ja 250 Hz), mutta kaasupulssinuohoin toimii harpassa parhaiten. Ennakko-oletusten mukaan tulistinalueen kertymät ovat vaikeampia poistaa, minkä vuoksi voimakkaampaa äänenpainetta tuottavan kaasupulssinuohometin voisi olettaa toimivan tulistimissa parhaiten. Näin ei kuitenkaan käytännön kokemusten mukaan ole. Eräs selitys tulistimen yllättävään tulokseen on se, että viimeisissä tulistimissa lämpötila voi olla laskenuut riittävästi (<800°C), jolloin vähän kaliumia ja klooria sisältävät kerrostumat eivät ole tahmeita. Syy, miksi Heinolassa kaasupulssinuohometin puhdistusteho tulistimissa ei ollut riittävä, on tuntematon.

Windsorissa neljä ääninuohointa on ollut käytössä kymmenisen vuotta. Käyttäjän raportin mukaan ongelmana on ollut kuivan tuhkan kerrostuminen ekonomaiserin loppupuo-

lella. Tuhka on koostunut pääosin natriumsulfaatista, ja sisältänyt myös natriumkarbonaattia. Raportissa ilmoitetun mustalipeän kalium- ja klooripitoisuudet ovat melko korkeita (4,7 % K; 0,8 % Cl). Windsorissa ongelmien ratkaisemiseksi kaksi nuohointia on sijoitettu ekonomaiseriin, missä savukaasun lämpötila on noin 440 °C. Lisäksi kaksi nuohointia on sijoitettu tuhkasuppiloon, missä savukaasun lämpötila on noin 300 °C. Näissä lämpötiloissa tuhkan voidaan olettaa olevan kiinteää korkeista kalium- ja klooripitoisuuksista huolimatta, ja siten helpommin nuohottavissa olevaa.

Ääninuohousta on kokeiltu myös Äänekoskella Metsä-Botnian (nykyinen Metsä Fibre) soodakattilan ekonomaiserin jälkeisen tuhkasuppilon nuohoamisessa. Kokeiluissa törmättiin kuitenkin odottamattomaan ongelmaan, kun tuhkaa alkoi nopeasti kerrostua nuohojen torven pinnoille. Syy ilmiöön jäi tuntemattomaksi. Syitä voidaan kuitenkin pohtia jälkikäteen. Yleisesti voitaneen olettaa, että torven pinnalle kertynyt tuhka irtoaa tehokkaasti ääninuohouksen aktivoituttua. Erikoista onkin, miksi tässä tapauksessa näin ei tapahtunut. Torviosa on kattilan sisällä savukaasuvirrassa, ja sen vuoksi kuuma. Torveen syötettävä paine-ilma on kuitenkin kylmää, mikä voi viilentää torven pintaa. Jos torvi olisikin huomattavasti savukaasuvirtausta viileämpi, hienojakoista fume-tuhkaa voi kertyä termoforeesilla torven pintaan, kuten luvussa 3.2.2 on esitetty. Lisäksi mikäli savukaasussa on vetysulfaattia, sen happokastepiste voisi ylittyä kylmän torven pinnalla, minkä seurauksena tahmeaa vetysulfaattia voisi kerrostua torven pinnalle. Paikanpäällä otetuissa kuvissa ei kuitenkaan näy selkeitä viitteitä vetysulfaatista. Toisaalta hienojakoista valkeaa pölyä voisi helposti tarttua tahmean vetysulfaattikerroksen päälle. Voidaan myös pohtia, onko tapauksessa savukaasun virtaus ollut poikkeuksellisen pyörteilevä kuljettaen hienojakoista tuhkaa torven sisään.

Myös Stora Enson Uimaharjun soodakattilaan on asennettu Nirafonin ääninuohaimet. Nuohaimet asennettiin kahteen uuteen sähkösuodattimen jälkeiseen ekonomaiseriin.

Nirafonin nuohaimia käytetään pääasiassa muissa voimakattilatyypeissä.

Mitkä ovat soodakattilan ääninuohouksen edellytykset verrattuna muihin voimakattiloihin?

Nirafon ei ole varsinaisesti tutkinut soodakattiloiden ääninuohousta tehdasympäristössä. Kokemusta joistain soodakattiloista kuitenkin on, kuten edellä on esitetty.

Tehokas nuohousetäisyys

130 dB:ä voidaan karkeasti pitää rajana, joka vaaditaan tuhkan irrottamiseen. Tätä rajaa voidaan kutsua tehokkaaksi nuohousetäisyydeksi. Väliaineen lämpötila vaikuttaa oleellisesti tehokkaaseen nuohousetäisyyteen, kun lämpötilan noustessa väliaine harvenee ja ääniaallon absorboituminen lisääntyy. Myös äänen taajuus vaikuttaa merkittävästi tehokkaaseen etäisyyteen. Lisäksi kerrostumat absorboivat ääniaaltoja merkittävästi. Koke-

muksen perusteella tuhannen asteen lämpötilassa 250 Hz (150 dB) aallon tehokas nuohousetäisyys on 2–3 metriä. Tehokas etäisyys 100 Hz aallolle 7–8 metriä. Aihetta on lähestytty myös fysikaalisesta näkökulmasta luvussa 5.

Kokemus on osoittanut, että useampi lähekkäin sijoitettu nuohoin voi irrottaa kerrostumia oleellisesti paremmin kuin yksittäinen nuohoin.

Äänentaajuuden vaikutus

Äänentaajuuden suora vaikutus tuhkan irrottamiseen on tuntematon. Kokemus osoittaa, että optimaalista äänentaajuutta on hankalaa arvioida ennen käytännön kokeiluja. Erot nuohoustuloksessa eri taajuutta käyttävien nuohointien välillä voivat olla suuria: samassa kohteessa tuhkaa ei välttämättä irtoa juuri ollenkaan tietyllä taajuudella, kun taas toinen taajuus poistaa suuren osan tuhkasta. Eräs selitys ilmiöön voi olla tuhkahiukkasten ominaisvärähtelytaajuuden löytyminen.

Millaisen kerrostuman nuohoamiseen ääninuohous soveltuu?

Ääninuohous toimii parhaiten, kun tuhka on kiinteässä olomuodossa ja sintraantumaton. Optimaalinen tilanne onkin aloittaa nuohous puhtaalta putkipinnalta, jolloin tuhka ei pääse kovettumaan. Jos tuhka sintraantuu, sen nuohoaminen hankaloituu. On kuitenkin todettava, että putkien pinnoilla lienee aina jonkin paksuinen kerrostuma, vaikka pinta olisikin nuohottu hyvin. Ääninuohousta päästäänkin todennäköisesti käyttämään täysin puhtaalle putkipinnalle ainoastaan, kun lämmönvaihdin on uusi.

Ääninuohous ei kokemusten mukaan toimi, jos kerrostuma on osin sulaa. Tällaisia kerrostumia on tyypillisesti tulistinpinoilla. Viileämmillä tulistinpinoilla kerrostumat saattavat kuitenkin olla täysin kiinteitä, joten ääninuohousta voidaan käyttää (ja on käytetty) soodakattiloissa tulistimissakin.

Kokemusten mukaan jotkin aineet, kuten silikaatit, tekevät tuhkan ääninuohoamisesta hyvin hankalaa, vaikka tuhka olisikin hienojakoista, pölymäistä ja oletettavasti nuohottavissa. Syytä tähän ei tunneta. Hiukkasten agglomeraatio ja sähköinen varaus voivat vaikuttaa nuohottavuuteen.

Myös hiukkaskoon on epäilty vaikuttavan nuohoustulokseen. Joissakin tapauksissa hyvin pienijakoinen tuhka ei irtoa hyvin.

Ääninuohouksen edut höyrynuohoukseen verrattuna

Säästöt käyttökustannuksissa ovat ilmeisiä. Höyryn käyttäminen nuohoukseen vähentää sähköntuotantoa.

Ääninuohoimet ovat huomattavasti höyrynuohoimia pienikokoisempia.

Höyrynuohous voi aiheuttaa eroosio-ongelmia, kun höyryvirtaan liittyy kiinteitä hiukkasia. Soodakattilassa eroosio-ongelmat eivät kuitenkaan todennäköisesti ole suuria. Lisäksi höyry voi aiheuttaa korroosio-ongelmia tai joissakin tapauksissa tuhkan kovettumista.

Aiheuttaako ääninuohous mekaanista räsitystä kattilarakenteisiin?

Ääninuohous aiheuttaa putkien värähtelyä, mutta kuuluvan äänen taajuudet ovat todennäköisesti rakenteiden ominaisvärähtelytaajuuksia korkeampia. Rakenteet eivät todennäköisesti ala resonoida nuohouksen vaikutuksesta. Teoriassa lienee todennäköisempää, että infraääninuohous (äänentaajuus kuuluvan äänen taajuusalueella matalampi) aiheuttaa räsitysongelmia, koska nuohouksen äänentaajuudet voivat olla samalla taajuusalueella rakenteiden ominaisvärähtelytaajuuden kanssa. Nirafo ei teekään infraäänitaajuudella toimivia nuohoimia.

Suhtautuminen ääninuohoamiseen soodakattilaprosessin yhteydessä metsäteollisuuden yrityksissä on usein epäileväistä. Eräs syy tähän lienee pelko ääninuohouksen mahdollisesti aiheuttamista mekaanisista vaurioista.

Miten ääninuohouksen toimivuutta mitataan/havainnoidaan?

Toimivuutta arvioidaan erilaisia kattilan mittausparametreja seuraamalla (savukaasun ja höyryn massavirtaus, lämpötila, paine-ero, nuohoushöyryn määrä ja niin edelleen). Pitkän aikavälin tulosten analysointi on pitkälti nuohouslaitteiden tilaajan vastuulla. Julkisia mittaustuloksia ei juurikaan ole saatavilla. Tämän työn aineistoksi saatiin mittaustuloksia Espoon Sähkön Suomenojan voimalaitokselta. Aineistoa on esitetty liitteessä B ja sitä on käsitelty luvussa 6.2.

Minkä suuruisia ovat ääninuohouksen kustannukset?

Ääninuohointen hinnat ovat alle 10 000 € ja kaasupulssinuohoimen kokonaishinta 30 000–40 000 €. Käyttökustannukset ovat kohtuullisia verrattuna höyrynuohoukseen.

LIITE B: MITTAUSDATAA SUOMENOJAN HIILIVOIMALAITOKSELTA ÄÄNINUOHOUKSEN YHTEYDESSÄ

Kuvassa 7.1 on esitetty ääninuohoinvalmistajan luovuttamia mittaustuloksia Suomenojan voimalaitokselta. Laitoksen henkilökunta on toteuttanut mittaukset. Aikavälillä 27.3.2000–8.4.2000 kattilassa ei käytetty ääninuohousta. Aikavälillä 21.11.2000–20.12.2000 ääninuohous oli käytössä. Kuva 6.1 (sivu 35) on laadittu alla esitetyn taulukon pohjalta.

Kuva 7.1 Mittaustuloksia Suomenojan voimalaitokselta.

Äänitusohous 1.tul. lämpöteho		27.3.2000	28.3.2000	29.3.2000	30.3.2000	3.4.2000	4.4.2000	5.4.2000	6.4.2000	7.4.2000	8.4.2000	21.11.2000	23.11.2000	25.11.2000	26.11.2000	27.11.2000	28.11.2000	16.12.2000	17.12.2000	18.12.2000	20.12.2000
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SAUKKAASUN LITENNEN EKO A C	443.1	441.2	442.3	443.2	439.8	441.4	443.1	441.5	441.0	442.5		435.3	439.1	441.9	441.1	441.0	438.2	440.7	440.6	439.8	439.0
	362.9	361.9	363.0	363.6	361.9	362.1	362.8	362.6	362.2	363.4		356.0	356.6	360.6	359.7	359.6	356.2	359.8	358.9	356.5	357.3
PRIMAARTILUSSA SIRT.LÄMPÖ MW		43.9	43.7	43.8	43.6	45.8	42.6	42.8	42.6	42.6	43.0	42.0	42.2	42.9	42.9	42.7	41.8	41.8	42.0	42.3	41.8
EKOSSA SIRT.LÄMPÖ MW		11.5	11.4	11.5	11.5	11.1	11.3	11.5	11.2	11.2	11.3	11.5	11.7	11.9	11.9	11.8	11.5	11.4	11.6	11.4	11.4
K1 Polttoainehe MW		260.4	259.8	261.7	260.9	259.1	257.5	258.2	257.3	255.3	256.2	259.5	259.7	260.1	259.7	260.3	258.1	255.8	257.1	256.9	255.5
Sk-virtaus emmen luoja kq/s		128.2	128.7	129.4	129.3	128.1	127.5	127.9	127.5	126.7	127.1	129.6	130.3	131.0	130.8	130.2	128.3	125.8	126.4	125.9	124.7
Saukkaasun lämpöteho, eko		80.2	79.3	79.3	79.6	77.9	79.3	80.3	78.9	78.8	79.1	79.3	80.5	81.3	81.4	81.5	80.0	80.8	81.7	81.3	81.7
Ekon lämpöteho		11.5	11.4	11.5	11.5	11.1	11.3	11.5	11.2	11.2	11.3	11.5	11.7	11.9	11.9	11.8	11.5	11.4	11.6	11.4	11.4
PAINE-ERO SAUK. LUVON VASEN YLI mbar		10.9	10.8	11.1	11.3	11.2	11.0	11.3	11.0	10.8	10.9	9.5	9.7	9.9	10.0	9.8	9.6	9.5	9.5	9.4	9.2
PAINE-ERO SAUK. LUVON OKEA YLI mbar		9.0	8.9	8.9	9.0	9.0	9.0	9.2	8.9	8.8	8.8	9.2	9.3	9.4	9.3	9.3	9.0	9.3	9.3	9.1	8.8
SAUKKAASUVIRTAUS ENNEN SK-LUVOA. VASEN kq/s		64.2	64.3	64.8	65.0	64.6	64.1	64.5	64.4	63.9	63.7	64.8	65.0	65.3	64.9	65.0	65.4	64.4	64.6	64.3	63.8
SAUKKAASUVIRTAUS ENNEN SK-LUVOA. OKEA kq/s		64.1	64.4	64.7	64.3	63.6	63.4	63.5	63.1	62.8	63.4	64.8	65.3	65.7	65.9	65.2	62.8	61.4	61.8	61.5	60.9
LMA SK-LUVO 1 JÄLKEEN XD:N KA.(E/YHD) C		324.9	323.8	326.2	327.1	324.8	324.8	325.8	325.5	324.7	326.1	314.2	316.7	317.7	318.3	317.9	318.8	319.0	318.1	318.2	317.5
LMA ENNEN SK-LUVO 1 XD:N KA. C		33.5	33.6	34.1	35.8	34.2	34.7	35.9	35.8	37.2	36.8	34.0	35.0	35.6	34.8	34.9	34.3	36.7	35.5	33.7	32.4
LMA SK-LUVO 2 JÄLKEEN XD:N KA.(E/YHD) C		315.8	313.5	314.2	315.7	313.6	314.1	314.9	314.0	313.2	313.8	304.1	304.6	306.4	304.8	305.2	303.4	306.1	304.7	304.8	304.1
LMA ENNEN SK-LUVO 2 XD:N KA. C		37.1	36.9	37.5	39.1	37.4	37.9	39.2	39.1	40.4	39.9	35.4	36.5	36.2	36.0	36.3	35.8	38.7	36.7	36.0	35.2
SAUKKAASUN LITEKON JÄLKEEN C		362.9	361.9	363.0	363.6	361.9	362.1	362.8	362.6	362.2	363.4	356.0	356.6	360.6	359.7	359.6	355.2	359.8	358.9	356.5	357.3
SAUK:N KORJ. LOPPULÄMPÖTLA. VASEN C		141.9	141.0	143.5	144.5	141.9	141.6	143.0	142.9	142.7	143.8	137.1	138.2	139.3	140.6	139.7	139.2	137.8	136.7	136.7	136.1
SAUK:N KORJ. LOPPULÄMPÖTLA.OKEA C		138.9	135.6	136.4	138.8	136.4	137.4	138.5	137.3	136.9	136.4	131.9	132.1	132.1	130.6	131.3	129.7	134.1	132.5	132.3	131.1
LMA:N LÄMPÖTLAERO LUVON VASEN YLI		291.3	290.2	292.1	291.4	290.5	290.0	289.9	289.7	287.5	289.3	280.2	281.7	282.1	283.5	283.0	284.5	282.2	282.6	284.5	285.1
LMA:N LÄMPÖTLAERO LUVON OKEA YLI		278.8	276.6	276.6	276.5	276.2	276.3	275.7	274.8	272.8	273.9	268.6	268.1	270.2	268.8	268.9	267.6	267.4	267.9	268.8	268.8
SAUKKAASUN LÄMPÖTLAERO LUVON VASEN YLI		221.0	220.9	219.5	219.2	220.0	220.6	219.8	219.7	219.5	219.6	218.9	220.5	221.4	219.1	219.8	219.0	222.0	222.2	221.8	221.3
SAUKKAASUN LÄMPÖTLAERO LUVON OKEA YLI		223.9	226.3	226.5	224.8	225.6	224.7	224.3	225.3	225.4	227.0	224.1	226.5	228.5	229.1	228.3	228.5	225.7	226.4	226.2	226.3
NUOHOUSSHÖYRYN VIRTAAUS t/mk		26.4993	28.0056	28.1918	29.6142	30.2282	28.6689	29.8220	29.8515	28.5798	26.8687	20.0532	15.7691	15.9392	17.6786	13.0754	13.5050	15.9121	15.8673	13.3919	14.7688
NUOHOUSSHÖYRYN KULUTUKSEN LASKU t/mk												6.4	12.2	12.3	11.9	17.2	15.2	13.9	14.0	15.2	12.1

LIITE 4

Sularännikyselyn vastaukset 9.9.2015

	Imatra	Wisa	Äänekoski	Kotka Mills	MF Kemi	Enocell
Minkälaisia ongelmia on ollut/vauriota ollut sularänneissä viimeisen 5 vuoden aikana	Rännienpäät palaa puhki vuodessa!	-	-	-	-	-
1. Jäähdytysvesikierto						
Virtausmäärä per ränni, l/s	Yli 12 l/s meillä 6 sularänniä joten 2 l/s	1,85 - 2,3 l/s	Noin 90 l/min = 1,5 l/s	2,7 ja 2,8 l/s	Ei mittausta	2,33 l/s
Lämpötila sisään/ulos, °C	50/54 °C (tuleva VIV-vesi jäähdytysvesisäiliöön on 84 °C ja se jäähtyy 50 °C)	53-55 °C	Sisään 48 °C, ulos 59 °C	78 C / 83 °C. (ulos max 91 °C 300 vrk historiassa) Ei ALIPAINETTA	58 °C	55 / 57-59 °C
Onko jäähdytysvedenlämpötila tasainen (min/max.)	On	21-22 °C	47-49 °C	Pysyy noin kahden asteen sisällä normaalisti.	54 °C, max 63	Menovesi 55 C +- 1(säätö)
Järjestelmän alipaine ”kourulla” tai sen jälkeen vesivirtauksen suhteen, kPa	alipaineella	0,2-0,4 (mittarit on mitä on)	Ei mitata	ei alipainetta	-10 kPa	25
Jäähdytysveden laatu, onko jäähdytysvesi:						
▪ ionivaihdettua vettä	On		On	Ei	Ei	On
▪ kemiallisesti puhdistettua vettä	Ei		Ei	Ei	Ei	Ei
▪ lauhdetta	Ei		Ei	On (kattila omakäytösäiliö)	On	Ei
Jäähdytysvesikierron laadunvalvonta:						
▪ johtokyky	On	On	Labra analysoi		Ei mittauksia	On
▪ pH	Ei	On	Labra analysoi	Harvoin valvottu erikseen.	Ei mittauksia	On
▪ lisäkemikaali	Boilex	Lipeä	Labra analysoi	Mikäli on ongelma, pistonäyte	Ei mittauksia	Boilex
2. Liuottajan tyypillinen pinnankorkeus suhteessa rännin alapään kärkeen, arvio	n.1m	Nokan korkeus pohjasta 7050 mm, liuottajan korkeus 4500 mm. Liuottajan pinta 2400 mm ~ 55 %	Noin 2 m	noin 1,3m.	noin 1 m	noin 1 m
Viherlipeän lämpötila, °C	n.95 °C		n.95 °C	n.95 °C	97 °C	91-94 °C
3. Tulipesän alipaine, kPa	vaihtelee huomattavasti, nyt on n 95 kPa		-0,25 mbar	Hakuarvo painesäädöllä -0,04 kPa	-0,020 kPa	-0,03 kPa
4. Hönkäjärjestelmä:						
Alipaine, kPa	n – 40 kPa, nyt on pisanan erottimet tukossa ja sieltä on yksi kasetti poistettu, seisokissa pestään kaikki kasetit	-0,85 mbar	-2,2 mbar	Hakuarvo -230 kPa	-0,65 kPa	-0,5 kPa
Puhdistussykli, h	tunnin välein, pesuventt. auki 5 min	4 min alaosa, 3 min yläosa	15 min välein ja kerran vuorossa suutinputkien puhallus	Kerran tai kaksi viikossa (hönkälämmitin)	Ei ole	Ei ole

	Imatra	Wisa	Äänekoski	Kotka Mills	MF Kemi	Enocell
Höngän lämpötila, °C	85 °C	ei mittausta	53 °C	77 °C pesurin ja lämmittimen jälkeen tertiääri-ilmakanavaan		80 °C lämmittimen jälkeen
Onko hönkäjäjärjestelmässä ollut ongelmia?	Pisaran erottimet ei kestä vuotta auki, vaikka on pesuaikoja lyhennetty	Ei ongelmia	Ei	Lämmönvaihtajan tukkeentumista on ollut joskus.	Ei. Kamia kertyy putkien seinään mutta vuoden ajojaksolla ei ongelmia	hönkäpuhaltimen juoksupyörä likaantuu
5. Huuvien huuhteluvesi						
Kuinka usein huudellaan	Sularännihuuvilla on jatkuva huuhtelu	Jatkuvasti	Jatkuva	Jatkuva	Jatkuva	Jatkuva huuhtelu vedellä rännin taakse ja hajotushöyrypillille
Millä huuhdellaan:						
▪ Laihavalkolipeä	X	X (pääasiassa)	X	X		
▪ Vesi		X			X	
Onko huuvien kanssa ollut ongelmia	Roiskumista ja helmojen puhkipalamista, ja sotkee helvetisti ympäristöä.	Ei ongelmia	Välillä kamittuu jolloin tehdään lisähuuhteluja	Helmoja on parsittu kasaan vuosittain, kohtuu pientä.	Ei ongelmia	X Ei pahemmin. Hajotushöyrypillit kuluvat ja vaihto vaatii hitsausta, hankala homma käynnin aikaan
6. Sulfiditeettitaso, %	EVI: 79 %, EVA: 35 - 37 %	~38%	32 - 37%	30-35%	38 %	40-42 %
7. Hajotushöyryn paine, bar	10bar		4,4 bar	12 bar	9 bar	11 bar
8. Onko ongelmia sulan hajotuksessa esim. paukkuuko jatkuvasti						
	No sitä riittää jytinää ja pauketta	Harvemmin	Normaalisti ei, alhaisella sufiditeetillä kyllä	Ajoittain paukkuu, yleensä höyryhajoituksessa on silloin vikaa tai suuntaus pielessä.	Ei jatkuvaa ongelmaa. Sekalipeällä paukkuu enemmän	Ei pahemmin
9. Kuinka usein rännejä rassataan (per vuoro)	niin usein että rännit pysyy auki, yövuorolla ehkä harvemmin, mutta norm. n. 4x päiväaikaa	Noin 6 kertaa	6 kertaa vuorossa, tarvittaessa enemmän.	Noin tunnin välein normaalisti. Kameravalvonnan mukaan useammin jos tilanne vaatii.	noin 1h välein	8-12 kertaa vuorossa
10. Rännin vaihtoväli, vuosia	1 vuosi	1,5 vuotta	Vuosittain	Vaihdetaan vuosittain (vain kaksi ränniä)	1 vuosi	1,5 vuotta
11. Onko rännitoimittaja ollut vakio	sama toimittaja	Vakiotoimittaja	Kattilatoimittaja	Andritz rännit	Kattilatoimittaja	Kattilatoimittaja
12. Mitä vaatimuksia tilaajalla on valmistetuille ränneille (jos on)		Painekoe ja tunkeumanestetarkistus + nyt etureunan RTG	Ei erityisvaatimuksia koska ei ole ollut ongelmia.	NDT valmistuksen laadun takaamiseksi.	Vesipainekoe, väritarkastus ja rtg	NDT- tarkastukset. Kärkien ja kourun pohjan kovahitsaus
13. Rännin materiaalit (jos tiedossa)	patarautaa	Compound-pinnoitus etuosan suuosassa ja rännin kaukalossa	HII, S235JRG2, P265GH, SS2333	Compoud kourut materiaalina P265GH sekä S235JR/AISI 304L		

Muuta

Imatra

Wisa

Äänekoski

Kotka Mills

MF Kemi

Enocell

materiaalin kesto saatava paremmaksi, nyt on ollut jo vuosia niin että jättöreunasta ränninpää palaa/kuluu puhki,näinkin on jonkun kerran käynyt.

Aiempina vuosina ränneissä oli kulumaa ja säröjä. Olivat toisen mallisia. Näitä korjailtiin hitsaamalla, se ei ollut mikään menestystarina. Ongelmia ei ole ollut uudella rakenteella ja vuosittaisella vaihtovälillä.

LIITE 5

Vaurioraportti: SE Heinola 20.7.2015



Soodakattilavauriot, Heinolan Flutingtehdas

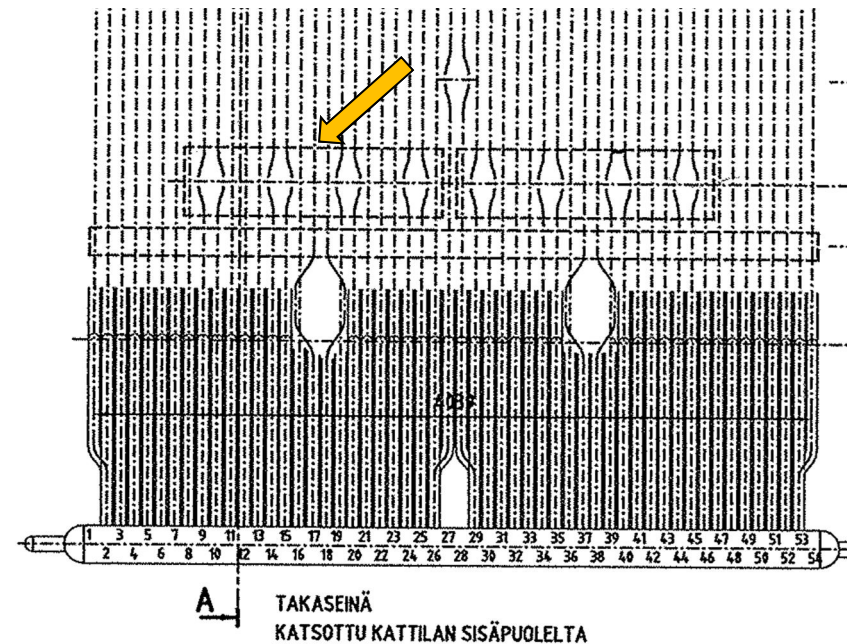
Eija Liikola

Soodakattila, SK2

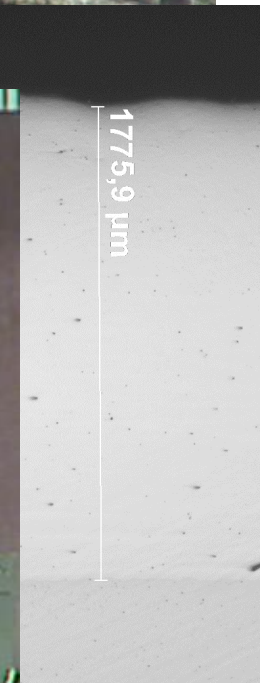
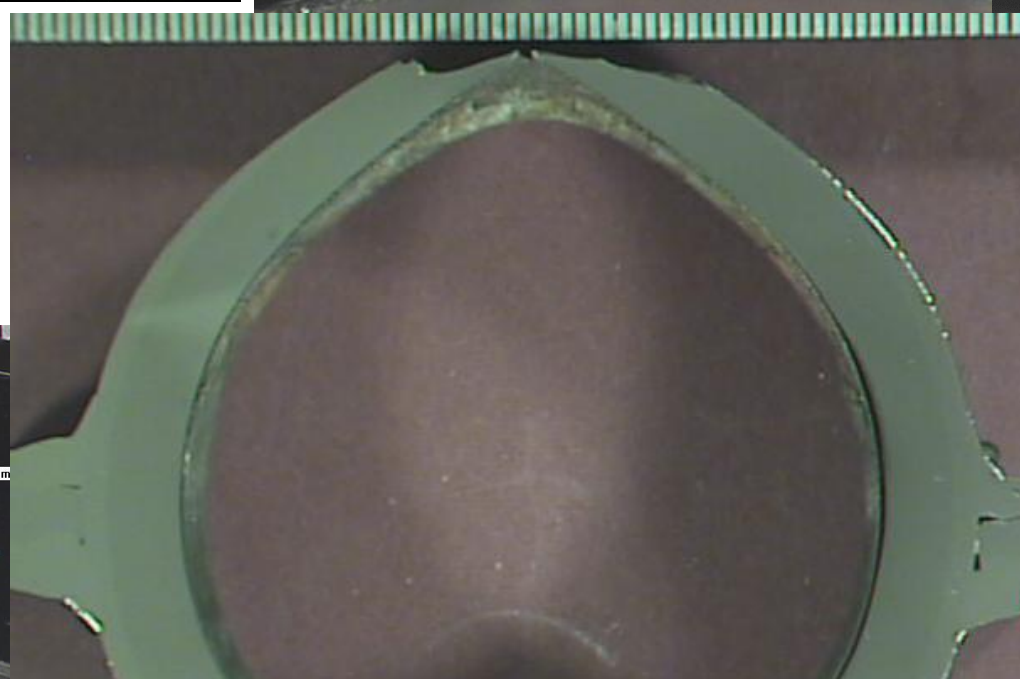
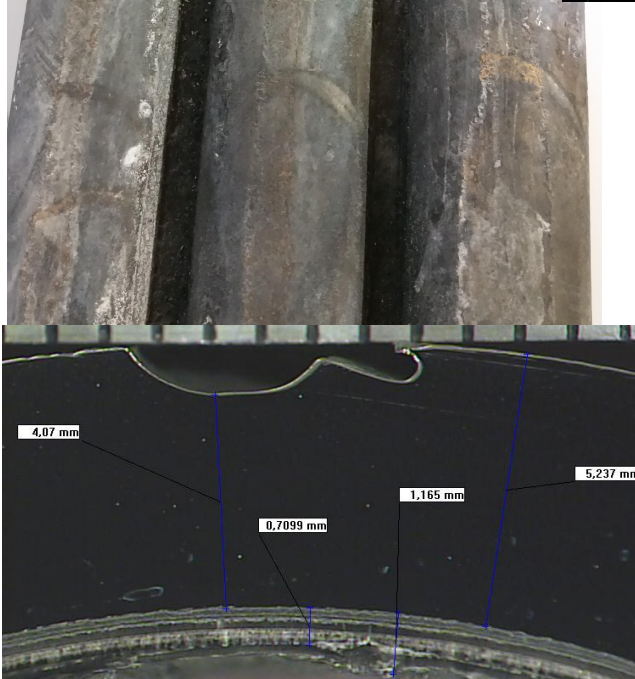
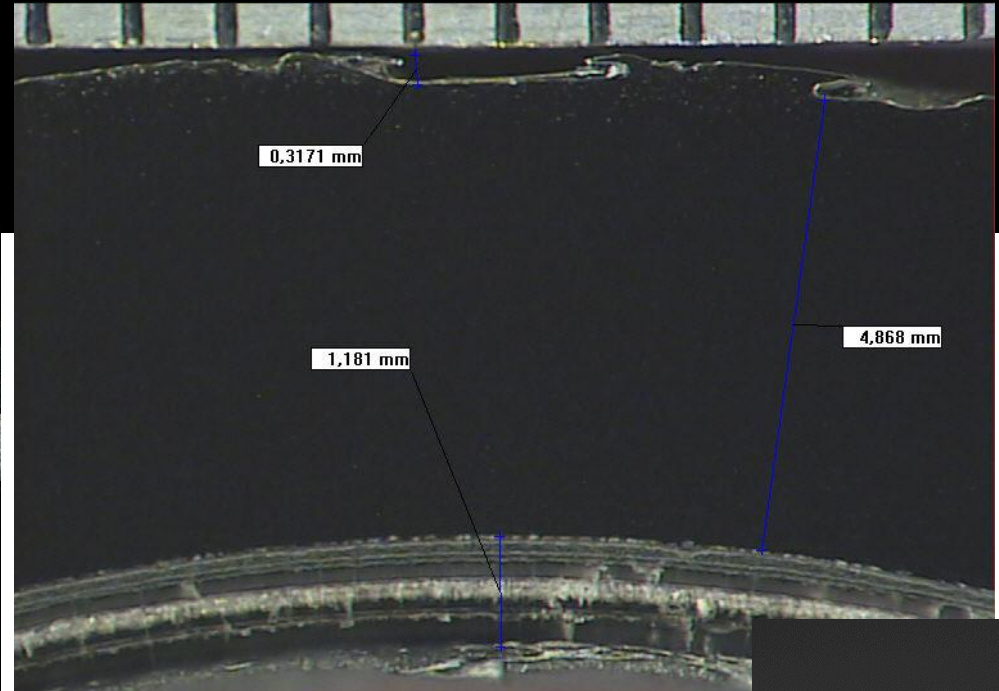
sulfiittisellutehdas, kattilan valm. 1990, 92 bar, 37 MWpa, 250 t ka/vrk

Vaurio 20.7.2015

- Kattilan molemmat sularännit tukkeutuivat. Alasajon jälkeen sularänneissä havaittiin vesivirtaus.
- Kattilan takaseinältä vasemman sularännin yläpuolelta löytyi vuotokohta.
- Kattilasta vaihdettiin 3 putkea ja pinnoitehitsattiin läheltä löytyneet ,vuodosta aiheutuneet vauriot.
- Kattilan pysähdysaika 5 vrk



Vaurioituneet putket 20.7



1775,9 μ m

Vuotoepäily 18.8.2015

- Oikea sularänni tukkeutuu äkillisesti ja eikä lähde sulamaan
- Tapahtuma on kattilalle poikkeuksellista normaalin ajon aikana.
- Kekoa poltetaan öljyllä alemmas toisen sularännin pysyessä auki.
- Kamerasta ei havaita nopeasti tummuvaa aluetta eikä kattilasta kuulu poikkeuksellista ääntä.
- Kattilan ajasajo, jäähdytys ja puhdistus sularännin alueelta.
- Vuotoa ei löydy painekokeessa.
- Silmämääräisesti havaittujen uusien ohenema alueiden vuoksi takaseinän compound alueelle tehdään laajemmat pinnoitteen paksuusmittaukset.
- Pinnoitehitsauksia välttämättömiin kohtiin.

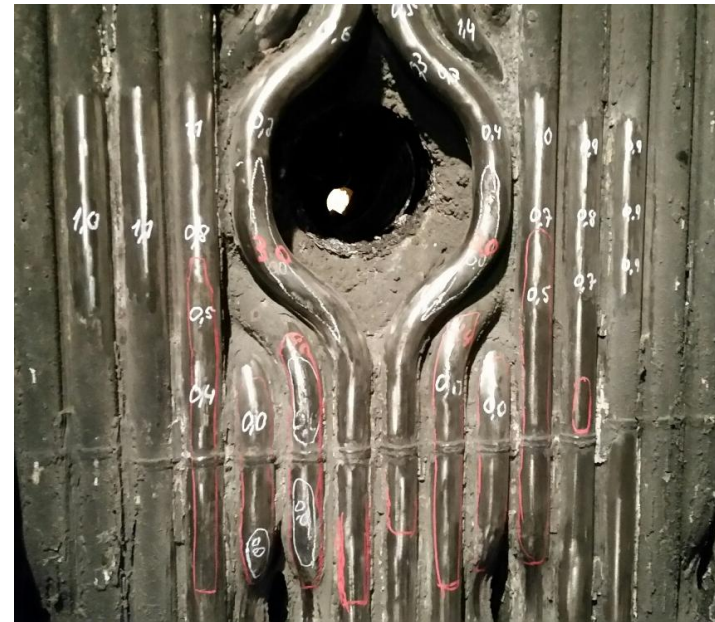


Tilanne 21.8

- Paksuus mittaukset valmistuvat.
- Määritellään rajat, joihin on tehtävä pinnoitehitsaukset.
- Öljypolttimen aukossa pahin tilanne, compound-pinnoite hävinnyt kokonaan ja mustaa jäljellä 2mm. Kahden putken vaihto.

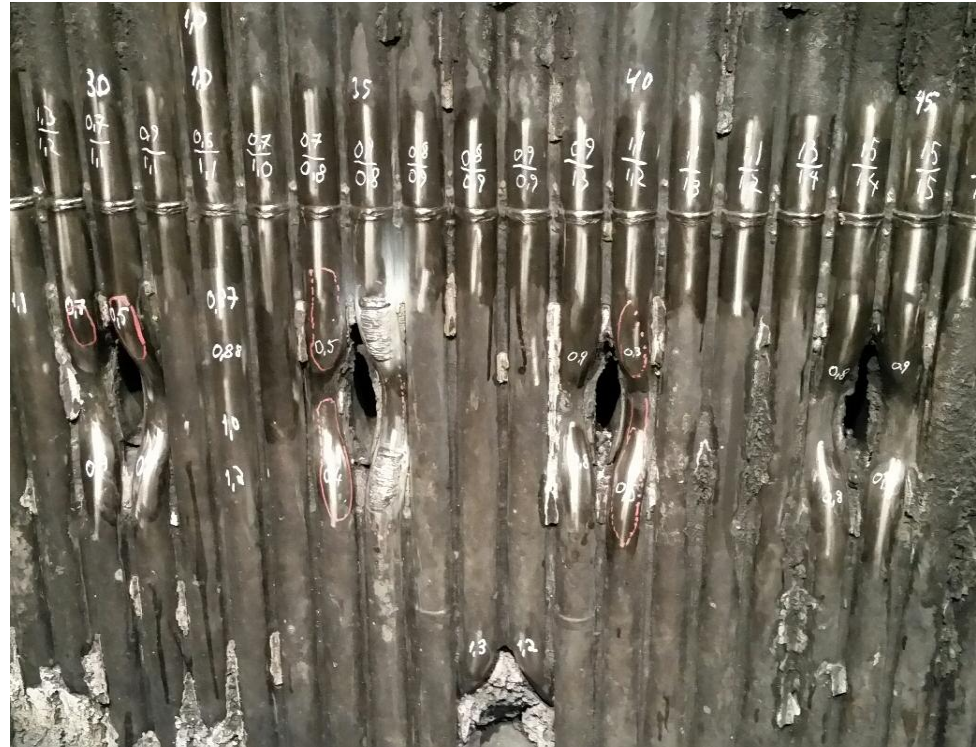
MIKSI?

- Pinnoitteen häviämisen syynä on todennäköisesti ylikuumeneminen.
- Yritimme selvittää mitkä ovat olleet edellisissä tarkastuksissa pinnoitteen paksuudet. Tietoa ei ole saatavilla, tai varmuutta onko alueen pinnoitetta mitattu.
- Meidän tiedossa ei ole ollut aiemmin pinnoitteen ohenemia näillä alueilla.



Jatkotoimenpiteet

- Kattilan alaosan tarkastuslaajuus muuttuu 1,5 kk päästä olevaan seisakkiin
- Pinnoitepaksuuden laaja mittaus ja tarvittavien korjattujen putkien vaihto
- Kattilan peittäus seisokin päätteeksi
- Aikataulun uudelleen suunnittelu
- Jatkossa pinnoitteen mittaaminen laajemmalla alueella säännölliseen tarkastussuunnitelmaan
- Pohjan vaihto ja katkaisukohta primääriaukkojen yläpuolelta vuoden päästä.



Painelaitteiden käytönvalvojan vastuu

Painelaitelain määritelmä

3 §

Painelaite on rakennettava ja sijoitettava ja sitä hoidettava, käytettävä ja tarkastettava niin, ettei se vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta.



storaenso

LIITE 6

**Tutkimusehdotus: Pinnoitushitsattujen compound-putkien käyttö
soodakattiloissa**

Hitsauspinnoitettujen putkien käyttö soodakattiloissa

Tausta

Kompound-putkia on käytetty menestyksellisesti soodakattiloissa 70-luvulta lähtien, aluksi kattilan pohjalla ja alaosissa, ja myöhemmin rakennusasteiden noustessa ja käyttöolosuhteiden muuttuessa myös tulistimissa. Compound-putkien pinnoitemateriaalit valitaan käyttö/korroosio-olosuhteiden mukaan. Tällä hetkellä soodakattiloissa käytetään mm. AISI 304L, Sanicro38/Alloy 825/HR11N, AISI 310, Sanicro28 ja Alloy625/Sanicro67/Super625 compound-putkia. Perinteisesti compound-putket on valmistettu kuumapursotuksella (Sandvik ja Nippon Steel & Sumitomo Metal). Viimeaikoina markkinoille on tullut useita toimittajia, jotka tarjoavat hitsauspinnoitettuja compound-putkia. Hitsauspinnoitetut putket on koettu kiinnostavaksi vaihtoehdoksi, koska ne ovat hinnaltaan edullisempia kuin perinteiset compound-putket, mutta käyttöä rajoittaa tällä hetkellä käyttökokemusten puute sekä epävarmuus eräistä valmistettavuuteen liittyvistä kysymyksistä (esim. putken taivutus, liitoshitsaukset)

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää hitsauspinnoitettujen putkien käytettävyyttä soodakattilan tulipesässä (alaosassa) ja tulistinalueella. Aiemmin tehdyissä materiaaliselvityksissä aihetta on sivuttu, mutta laajempaa tutkimusta erilaisten pinnoitushitsattujen soveltuvuudesta (valmistustekniset haasteet, tarkastuskriteerit, korjaushitsaukset ja käytettävyyys) ei ole tehty.

Tutkimuksen sisältö ja toteutus

A. Kirjallisuusselvitys, kattilavalmistajien kokemukset

Kartoitetaan hitsauspinnoitettujen putkien valmistajat ja saatavilla olevat yleisimmät materiaaliveitohdot. Erityistä huomiota pyritään kiinnittämään komponenttien/kattilaosien osien valmistusteknisiin kysymyksiin ja aikaisempiin käyttökokemuksiin. Kattilavalmistajien (Andritz, Valmet) ja mahdollisuuksien mukaan myös muiden KTR:n jäsenten kokemusten kartoitus haastatteluin. Hyödynnetään jätteenpolttolaitoksista (mm. PREWIN network, www.prewin.eu) saatavia käyttökokemustietoja.

Selvitettäviä tekijöitä mm.

- Materiaalien saatavuus & valmistajat, nykyiset käyttökokemukset
- Valmistustekniikan haasteet (esim. muokattavuus, lämpökäsittelyt, liitoshitsaukset)
- Suunnittelu- ja tarkastuskriteerit, korjaushitsaukset
- Hintavertailu

B. Karakterisointitutkimukset

Karakterisoidaan muutama (4-6 kpl) eri valmistajan hitsauspinnoitettu compound-putki, tavoitteena selvittää, onko eri materiaalien ja/tai valmistajien putkissa merkittäviä eroja.

Selvitettäviä tekijöitä mm.

- Mikrorakenne, kovuus ja koostumus: Eri hitsaus-/valmistusmenetelmien erot (palkojen sijoittelu/muoto – pinnan karheus, sekoittumisaste jne..)
- Materiaalien vanheneminen, herkistyminen sekä vaikutukset käyttöominaisuuksiin: Kylmämuokkaus ja sen vaikutukset mikrorakennemuutoksiin, kiihdytetyt vanhennuskokeet (esim. 500, 600 °C; 100, 300 ja 1000 h, perinteinen compound vrs hitsauspinnoite)
- Liitosten karakterisointi: Hitsauspinnoitetun rakenteen suojaavuuden säilyminen liitospinnan yli sekä erilaisten terästen sekoittumisen aiheuttamat haasteet. Valmistaja toimittaa liitokset

C. Jännityskorroosio

Selvitetään hitsauspinnoitettujen putkien jännityskorroosiotaipumusta simuloiden kattilan ylösajoa (25 °C → 190/250 °C → 25 °C), kun pohjaputket ovat kosketuksissa alkalisen sulfidipitoisen keon kanssa.

- Keon koostumuksen vaikutus jännityskorroosioalttiuteen Na_2S , $\text{Na}_2\text{S}+\text{NaOH}$, $\text{Na}_2\text{S}+\text{NaOH}$ Na_2CO_3 (kidevedelliset suolakokeet).
- Kiinnitetään huomiota siihen, miten materiaaliominaisuudet ja valmistustekniikat vaikuttavat jännityskorroosioalttiuteen

Tulosten raportointi

Tulokset raportoidaan suomen- tai englanninkielisenä tutkimusraporttina.

Aikataulu

Osio A – Kirjallisuusselvitys, kattilavalmistajien kokemukset toteutetaan vuoden 2015 loppuun mennessä

Osio B – Karakterisointitutkimukset, tilauksesta 6 kk sisällä (riippuen laajuudesta ja näytemäärästä)

Osio C – Hitsauspinnoitettujen putkien jännityskorroosio-kokeet

Kustannusarvio (karkea ja alustava)

Osa A: 10 - 15 k€ (riippuen laajuudesta)

Osa B: 10 - 20 k€ (riippuen näytemäärästä ja laajuudesta)

Osa C: 15 - 20 k€ (riippuen näytemäärästä)

Yhteyshenkilöt

Satu Tuurna p. 020 722 6488, e-mail satu.tuurna@vtt.fi ja Sanni Yli-Olli p 020 722 6842; e-mail sanni.yli-olli@vtt.fi

LIITE 7

Esitys: Tulsudouble – tulistimen suojausrakenne



TULISTINPUTKIEN SUOJAUS

ALUSTUS

Tuote-esittelyssä käsitellään soodakattilan tulistimien sekä muiden korroosiolle ja eroosiolle alttiiden kattilaputkien suojausta. Mustalipeän poltosta aiheutuvat korroosio- ja eroosiovaikutukset ilmenevät pääsääntöisesti kattilan alaosissa, joissa natriumsulfaatti ja natriumkarbonaatti muuttuvat polttoprosessin vaikutuksesta natriumsulfidiksi ja natriumhydroksidiksi, savukaasuvirran viileämmissä osissa, joissa voi muodostua alhaisen kastepisteen omaavia yhdisteitä kuten natriumvetysulfaattia sekä tulistimilla, jonka suojaukseen tässä esittelyssä keskitytään.

Lukuisten tutkimusten mukaan tulistimien kuumakorroosion sekä eroosion aiheuttamat vauriot ja putkiston ulkopuolinen kuluminen ovat maailmanlaajuisesti suurin tekijä suunnittelemattomien kattiloiden häiriöiden aiheuttaja. Tulistimien optimaalinen toiminta on siis merkittävässä osassa höyryntuotannon suhteen, ja siksi pyritään kehittämään uudenlaisia suojaustekniikoita, materiaaleja sekä toimintamalleja vahingollisten vaikutusten estämiseksi.

Korroosion kannalta, mustalipeän poltossa syntyvä tuhka koostuu enimmäkseen natriumsulfaatista sekä merkittävästä määrästä kaliumsuoloja, klorideja ja karbonaatteja. Kloridit muodostavat natriumsulfaatin kanssa reaktion, joka aiheuttaa yhdisteiden sulapisteen alenemisen. Tällöin sulasuolat sekä tuhka kiinnittyvät tiukasti tulistinputken pintaan, jolloin kuumakorroosio alkaa kuluttamaan rakennetta. Mustalipeän poltto tuottaa myös muita korroosiota aiheuttavia yhdisteitä, joiden haittavaikutukset muuttuvat eri lämpötiloissa sekä eri suolojen yhdistelmissä. Juuri näiden yhdisteiden vaihtelevien haitallisten ominaisuuksien vuoksi, on hyvin vaikea valita tulistinputkissa käytettävät seosmetallit optimaalisessa suhteessa eri yhdisteiden korroosiovaikutuksen estämiseksi. Parhaimmat tulokset on saatu runsaasti nikkeliä sisältävillä seoksilla.

MENETELMÄT

Tarkasteltaessa nykyisiä tulistinputkien suojausmenetelmiä korroosiota/eroosiota vastaan, voidaan havaita niiden koostuvan a) suojuksista, b) ruiskutettavista metalliseospinnoitteista, c) päälle hitsattavista seoksista sekä d) juotetuista kovametallipinnoituksista.

a) Suojukset ovat yleisesti olleet kourumallisia ns. ”halkaistuja putkia”, jotka ovat kiinnityslenkkien välityksellä hitsattu kiinni tulistimen höyryputkiin. Kourut ovat valmistettu yleisesti kuumankestävistä seosmetalleista sekä asetettu savukaasuvirtaa vastaan. Ko. metodi on edullinen ja sillä on saatu aikaan positiivisia tuloksia eroosiovaikutuksia vastaan, mutta on käyttökelvoton tai jopa riskialtis korroosiovaikutuksiin nähden.

b) Ruiskutettavat metallipinnoitteet (HVOF, plasma, laser) ovat yleistyneet viimeisen 20 vuoden aikana ja kehitys on mennyt eteenpäin myös näiden ko. pinnoitteiden osalta. Näissä menetelmissä käytetään sulaa runkoainesta siirtämään kovapartikkelit pinnoitettavan kohteen pintaan, jolloin pinnoitteen tiheys jää rajoitetuksi. Asia on yritetty ratkaista ruiskuttamalla useita pinnoitekerroksia, mutta tämä altistaa kerrosvälit muun muassa oksideille, jotka saattavat aiheuttaa lohkeilua sekä halkeilua ja tällöin pinnoitteen toimivuus vaarantuu kokonaan. Ongelmia voi aiheutua nopeista lämpötilavaihteluista erityisesti nuohousjärjestelmien alueella, jolloin eri materiaalien laajenemiset sekä supistumiset aiheuttavat jännitteitä pinnoitteen sekä putken välillä. Menetelmällä on saatu vaihtelevaa menestystä tulistinputkien suojuksessa, mutta on ollut toimiva menetelmä suojustinnoitteena.

c) Päälle hitsattavien seosten materiaaliveitsojeita on useita, joista eniten käytettyjä suojaamistarkoituksiin ovat kromikarbidi, vanadiini, volframi, Inconellit sekä eräät ruostumattomat teräkset. Kaikilla on kuitenkin sama lähestymistapa suojuukseen ja materiaalit valitaan suojustavan kohteen olosuhteiden mukaan. Olosuhteet missä korroosiovaikutus on olemassa, ruostumattomat teräkset voivat antaa tarvittavan suojan, mutta olosuhteissa missä korroosiovaikutuksen arvioidaan olevan suuren sekä eroosiovaikutus on olemassa, oikea valinta on volframikarbidi. Nykyisin käytetyin materiaali on Inconel 625. Tämä menetelmä on osoittanut rohkaisevia tuloksia varsinkin tulipesän putkistojen suojuksessa korroosiota vastaan, mutta on ollut toimimaton eroosiovaikutusta vastaan. Menetelmä on samankaltainen kuin ruiskutettavat pinnoitteet, joskaan ei yhtä kehittynyt. Tämä luo samankaltaisia ongelmia myös suuremmissa mittakaavoissa, koska hitsaustoimenpide ei aiheuta samanlaisia lämpötiloja tai kovapartikkelien nopeuksia kuin aiemmin mainittu pinnoitusprosessi. Tämä vaikuttaa merkittävästi hitsattavan seoksen kovapartikkelien määrään, joka normaalisti saavuttaa vain noin 28 % tason seoksessa, lopun ollessa pehmeää ”kantaja-ainesta”. Kuitenkin näissä seoksissa voidaan käyttää hyvin korroosiota kestäviä materiaaleja kantaja-aineksessa, mutta ne ovat äärimmäisen huonoja kestäämään eroosiovaikutusta. Eroosion sietokyky on suoraan verrannollinen kovapartikkelien tiheyteen.

Hitsausprosessissa tapahtuva hiilen laimentuminen (carbon dilution) alentaa myös aineksen kestävyttä eroosiovaikutuksiin nähden. Hitsausmenetelmän suuri kohdistettu lämpötila yhdistettynä hallitsemattomaan jäähtymykseen voivat aiheuttaa hitsatussa materiaalissa jännitteitä, joiden seurauksena aines halkeilee ja antaa mahdollisuuden eroosiopartikkelien tunkeutua suojattavaan pintaan saakka. Aineiden huonosta lämmönsiirto-ominaisuuksista johtuen, tämä ei myöskään ole optimaalinen ratkaisu tulistinputkien suojaukseen. Tulistinputkissa yleisesti käytettyjen seosterästen lämmönjohtavuus on luokkaa 20-30 W/(K·m), mutta Inconel 625:n lämmönjohtavuus on noin 10 W/(K·m) joten esimerkiksi laajasti suojattaessa 3- 5mm paksuisella kerroksella, pinta-aloja muuttamatta on todennäköistä, että huono lämmönjohtavuus aiheuttaa muutoksia höyryntuotantoon.

d) Juotetut kovametallipinnoitukset ovat osoittaneet toimivuutensa tulistinputkien suojausratkaisuna. Sen etuja edellä mainittuihin menetelmiin vertailtuna on;

- A) menetelmä ei vaadi kovapartikkelien liikuttamista, jolloin saavutetaan kovapartikkelien suuri osuus aineksessa, sen ollessa 70 %.
- B) menetelmä aiheuttaa metallurgisen sidoksen kovapartikkeleiden välille sekä kovapartikkeleiden ja suojattavan pinnan välille. Tällöin kovapartikkelien liikehdintää ei tapahdu.
- C) menetelmä ei mahdollista epäpuhtauksien tai oksidien aiheuttamia kerrosten muodostusta, joka varmistaa pinnoitteen eheyden.
- D) menetelmä ei aiheuta hiilen laimentumista, joka varmistaa pinnoitekerroksen tasalaatuisuuden.
- E) menetelmä mahdollistaa jopa 3mm:n vahvuisen pinnoituskerroksen.
- F) metallurginen sidos ja sitkeä kantaja-aines kestävät hyvin äärimmäisiä ja nopeita lämpötilavaihteluita ja niiden vaikutuksia.
- G) seosten lämmönjohtavuus on vähintäänkin sama kuin suojattavilla putkilla (30 W/(K·m)) sekä metallurginen sidos mahdollistaa esteettömän lämmön siirtymisen.
- H) juotteen lämmitys sekä jäähtyminen ovat hallittuja, joten halkeamia ei pääse syntymään.

Tämä menetelmä on suorituskyvyltään erinomainen ja mahdollistaa tulistinputkien täydellisen suojauksen korroosio- sekä eroosiovaikutuksia vastaan. Menetelmä on toimiva sellaisenaan, mutta ratkaisussamme sitä käytetään varmistavana osana rakennetta. Liitteessä 1 EPRI:n saavuttamia tutkimustuloksia eri pinnoitusmenetelmillä ja seoksilla (eroosiovaikutus). Liitteessä 2 puolestaan tutkimustuloksia korroosiovaikutuksia vastaan.

TUOTE

TULSUDDOUBLE on suojarakenne tulistimien putkille. Perusajatuksena on suojata tulistimien putket kaasutiiviisti korroosio- ja eroosio vaikutuksia vastaan. Suojaus suojaa putkia niiden koko kehän osalta, jolloin korroosiota aiheuttavat yhdisteet sekä eroosiota aiheuttavat partikkelit eivät pääse kosketuksiin varsinaisen suojattavan rakenteen kanssa. Suojauksen rakenne perustuu kaksikerroksiseen mekanismiin, jossa materiaaliyhdistelmien sekä juotettavan pinnoituksen yhdistelmän hyödyt on optimoitu. Tuotteen kaasutiiveys varmistetaan valmistuksessa käytettävillä minimaalitoleransseilla, saumakohdat juotetaan ja asennuksessa käytetään joko juotostekniikkaa tai kutistumatonta grafiittipastaa suojattavan rakenteen ja suojauksen välissä. Menetelmällä saavutetaan mm. hyvä lämmönjohtavuus, materiaaalipaksuuden minimointi ja eroosio- sekä korroosioresistanssista. Rakennerratkaisussa on painotettu sen soveltuvuutta toiminnassa olevien tulistinputkien suojaukseen revisioiden yhteydessä, nopeasti sekä kustannustehokkaasti. Rakenne on suunniteltu asennettavaksi mekaanisesti olemassa oleviin rakenteisiin, niitä muuttamatta.

TULSUDDOUBLE suojausjärjestelmä mahdollistaa eri metalli- ja pinnoiteyhdisteiden yhdistelmien käytön erilaisten kohdeolosuhteiden haittojen eliminoimiseksi.

VALMISTUS JA ASENNUS

Tuotteet valmistetaan aina asiakkaan ilmoittamien mittojen mukaisesti. Liitteiden kuvissa esitetyt sisäkuoret (1,2), ulkokuoret (4,5) ja kiinnityselin (6) valmistetaan puristamalla, mietoa lämpöä käyttäen. Puristusprosessin aikana ulkokuoriin (4,5) muotoillaan myös pituus-saumojen ulokkeet (4.1, 4.2) sekä jatkosten puoliholkit (4.2, 5.2). Tämän jälkeen osat pinnoitetaan olosuhteisiin parhaiten soveltuvilla metallipinnoitteilla, käyttäen hallittua induktiokuumennusta juotostekniikan sulatusmetodinä. Asennusvaiheessa sisäkuoria (1,2) asennettaessa, suojattavan putken pintaan lisätään joko juotosmateriaali (3) tai grafiitti/nikkelipasta (3) varmistamaan kaasutiiveyden. Mikäli käytetään juotosmateriaalia, sisäkuori yhdistetään suojattavaan putkeen käyttäen nopeaa induktiokuumennusta, ja mikäli käytetään grafiitti/nikkelipastaa, ylimääräinen pasta puristetaan pois asennusvaiheessa. Sisäkuorien pituus saumat juotetaan induktiokuumennusta käyttäen. Tämän jälkeen asennetaan ulkokuoret (4,5) siten, että sisä- ja ulkokuorien pituus-saumat ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden mahdollisen ilmasillan eliminoimiseksi. Seuraavaksi asetetaan kiinnityselimet (6) paikoilleen ja kiristetään mekaaniset liitokset. Sisä- ja ulkokuorien jatkosten liitokset on sijoitettu eri kohdille eliminoimaan mahdollisen ilmasillan syntymisen. Sisäkuorien (1,2) jatkos-saumat juotetaan kiinni. Mikäli sisäkuorien sekä suojattavan rakenteen välillä käytetään juotosta, sekä materiaalien että juotosten osalta kokonaisuuteen valitaan optimaaliset materiaalit lämpölaajenemishaittojen eliminoimiseksi. Rakennekokonaisuuden joka osassa on huomioitu lämpölaajenemisvaikutukset. Ulkokuorien pysty- ja vaakasuuntaiset saumat voidaan myös juottaa umpeen, mikäli se katsotaan tarpeelliseksi. Mikäli tulistinputkien vapaat välitilat ovat ahtaita, voidaan kiinnityksessä käyttää kiinnityselimien sijasta juotoskiinnitystä.

TULSUDDOUBLE-suojausjärjestelmän kaikki osat ovat yhteensopivia, ja tämä mahdollistaa laajempienkin kokonaisuuksien suojaamisen.

TULSUDDOUBLE-suojausjärjestelmällä voidaan suojata niin suorat osuudet kuin kulmat ja käyrät.

HYÖDYT

Suojaavaan rakenteeseen ei kohdistu höyryn painetta, jolloin yhdistelmällä metallien sekä pinnoitemateriaalien eri ominaisuuksia voidaan ratkaista ongelmia, jotka johtuvat eroosio- ja korroosiovaikutuksista. Käytettyjen metallien materiaalivalintaan vaikuttavia tekijöitä ovat lähinnä lämmönjohtavuus ja lämmönkestävyys, jolloin käytettävien metallien

valintamahdollisuudet ovat suuremmat. Tällöin on ehkä hyväksi tarkastella käytettävien metallien lämmönjohtavuuksia, koska suojauksen pintalämpötilalla on suora yhteys

likaantumiseen sekä syövyttäviin vaikutuksiin, siten myös huoltotoimenpiteisiin ja kustannuksiin. Hyvillä lämmönsiirto-ominaisuuksilla höyry pyrkii jäähdyttämään suojausten pintalämpötilaa ja pintalämpötila ohjautuu optimaalisesti höyryn lämmittämiseen.

TULSUDDOUBLE-suojausjärjestelmän suoria ja epäsuoria hyötyjä tunnettuihin ratkaisuihin sekä suojaamattomiin rakenteisiin nähden ovat muun muassa;

- Tulistinputket eivät kulu korroosion tai eroosion vaikutuksesta, jolloin alkuperäisen tulistinputken elinikä nousee merkittävästi.

- Minimaalinen eristysvaikutus

- Ei jännityksiä rakenteissa, halkeamat ja säröt eliminoitu.

- Voidaan räätälöidä kaikkiin olosuhteisiin maksimaalisella eroosio- ja korroosioresistanssilla.

- Huollon helppous, rakenteeseen ei kohdistu samoja vaatimuksia kuin paineastioihin.

- Rakenteeseen voidaan valita käytettäväksi monenlaisia materiaaleja ja pinnoitteita, tekemättä kompromisseja.

- Suojaus on helppo ja nopea asentaa, poistaa ja korvata.

- Edullinen suorien kustannusten ja pitkän aikavälin kustannuksia tarkastellessa.

- Varsinainen asennus ei vaadi hitsausta paineastioiden ja tai muiden rakenteiden osalta.

Asennus ei vaadi erityistaitoja tai erikoistyökaluja lukuun ottamatta juotosprosessia.

TESTIT

Pinnoitteiden, metallien sekä näiden yhdistelmien käyttöä tulistinputkien eroosio- sekä korroosiovaikutusten haittojen eliminoinnissa on tutkittu laboratorioissa ja varsinaisissa käyttötesteissä laajasti niin Suomessa kuin maailmanlaajuisestikin. Tässä esittelyssä ilmaistut asiat perustuvat lähinnä Suomessa, Euroopassa sekä Yhdysvalloissa suoritettuihin tutkimuksiin ja testaukseen.

TULSUDDOUBLE suojausten testausta on tehty laboratorio-oloissa sekä 12 viikon kenttäkokeissa, autenttisissa olosuhteissa. Raportit sekä mahdolliset kulumisarvot 12kk:n käyttötesteistä saadaan vuoden 2016 alkupuolella, mutta kiihdytettyjen testien sekä välitarkasteluiden perusteella suojat ovat osoittaneet toimivuutensa soodakattiloiden tulistinputkien sekä veden esilämmittimien putkien suojauksessa. Suojaukset on suunniteltu ja toteutettu yhteistyönä

DOOSAN BABCOCK:n edustajan Mr. Peter Fosterin sekä TULSUCOR Ltd. edustajan, suunnitteluinsinööri Sami Vaittisen välillä. Suomessa asennuskoulutukseen on valittu Kunnossapito Rekko Oy, kotipaikkanaan Pori. Patenttihakemukset on jätetty sekä neuvottelut tiiviimmästä yhteistyöstä Doosan Babcock:n kanssa ovat meneillään.

Liitteet:

Liite 1; EPRI tutkimistuloksia, eroosiovaikutus

Liite 2; Tutkimustuloksia, korroosiovaikutus

Liite 3; 3:n dia. 38mm tulistinputken suojausnäkö

Liite 4; Suojuksen komponentit

Liite 5; Rakenteen kerrokset

Liite 6; Käyräkomponentin rakenne

6

Kiitän mielenkiinnostanne tuotettamme kohtaan sekä toivon kommentteja tuotteen soveltuvuudesta operoimienne kattiloihin. Toivon myös avointa dialogia mahdollisten parannusehdotusten muodossa voidaksemme yhteistyössä parantaa kattiloiden toimintaedellytyksiä sekä mahdollisuuksia asentaa ko. suojaukset osaksi operoimianne kattiloita.

Lisätietoja allekirjoittanee

Kunnioittaen

Sami Vaittinen

TulsuCor Ltd.

sami.vaittinen@tulsucor.com

Performance Comparisons

High Temperature Erosion Comparisons

Multiple lab comparisons of infiltration brazed tungsten carbide cladding have been performed in order to benchmark its erosion protection capabilities against other, more commonly known, materials. In December 2003, the Electric Power Research Institute (EPRI) completed a hot erosion comparison utilizing ASTM G73 test methodology. The test, which used fluidized boiler bed ash as the erodent material, compared the following commonly accepted erosion “resistant” materials:

- SA387 steel
- Inconel 52 weld overlay
- Inconel 72 weld overlay
- Inconel 622 weld overlay
- Inconel 625 weld overlay
- 312 SS weld overlay
- 309L weld overlay
- Duocor[®] coating
- 602CA coating
- Conforma Clad[®] infiltration brazed tungsten carbide cladding



Figure 6. Erosion Testing Fixture

Figure 7 indicates that infiltration brazed tungsten carbide outperformed all of the alternative materials, by as much as a factor of ten, in a high temperature ash erosion environment.

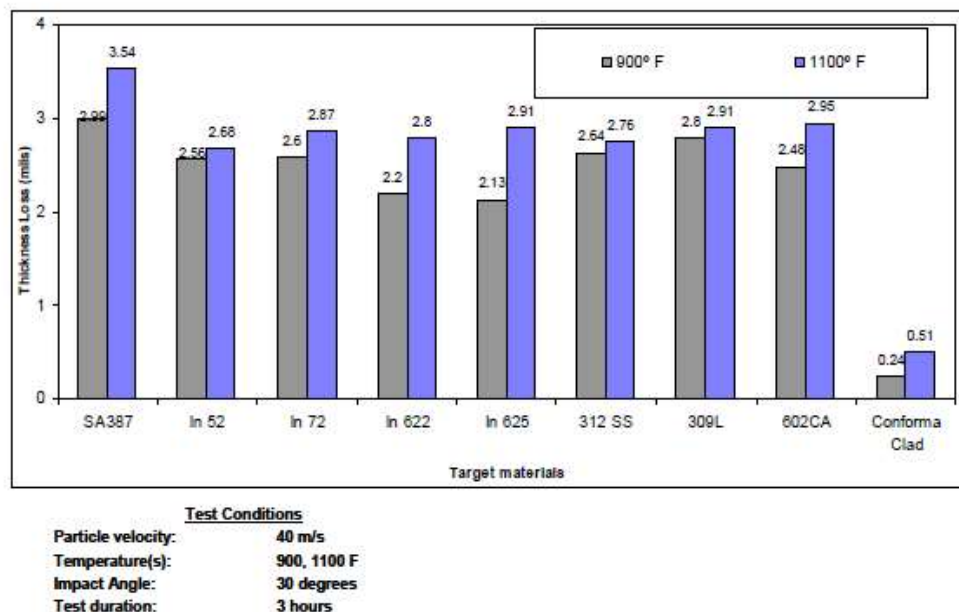


Figure 7. EPRI Hot Erosion Comparison Results

Corrosion Resistance Comparisons

Corrosion is not typically the primary driver for failure of steam boiler tubes in the flue gas stream, such as primary superheater tubes. However, corrosion can play some role in accelerating other modes of failure, such as high velocity ash erosion. Therefore, corrosion resistance characteristics are of some interest.

ASTM specifies a standardized corrosion resistance test methodology referred to as G31. G31 testing exposes a material sample to a 10%, by weight, concentration of boiling corrosive material. ASTM classifies any material as a CLASS A corrosion resistant material if the amount of material lost over the period of one year is less than 0.002". Figure 8 is a graphical representation of the ASTM G31 test results, illustrating that all three primary formulations (WC200, WC210, WC219) of infiltration brazed tungsten carbide cladding are CLASS A corrosion resistant materials in Nitric and Sulphuric Acid environments. All infiltration brazed tungsten carbide claddings, except WC200, are CLASS A resistant to Hydrochloric Acid.

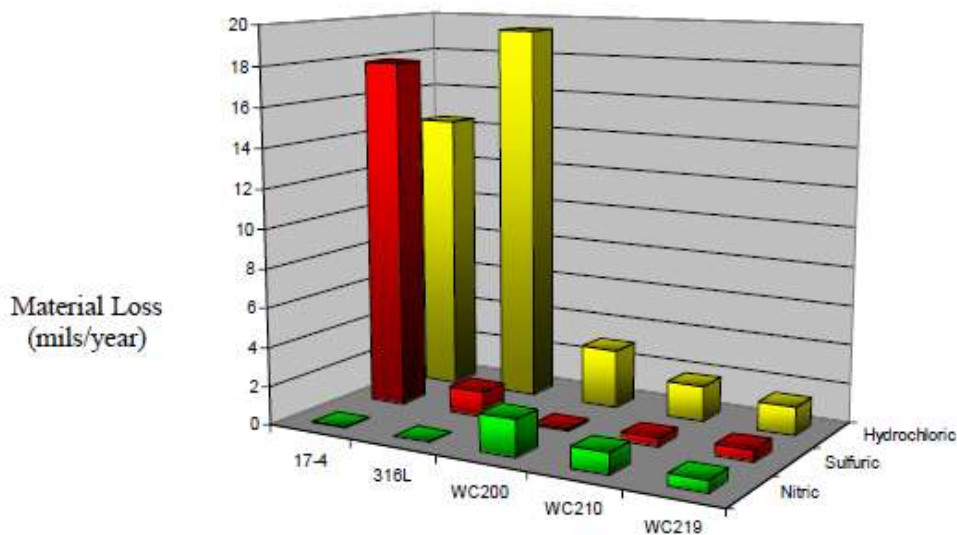
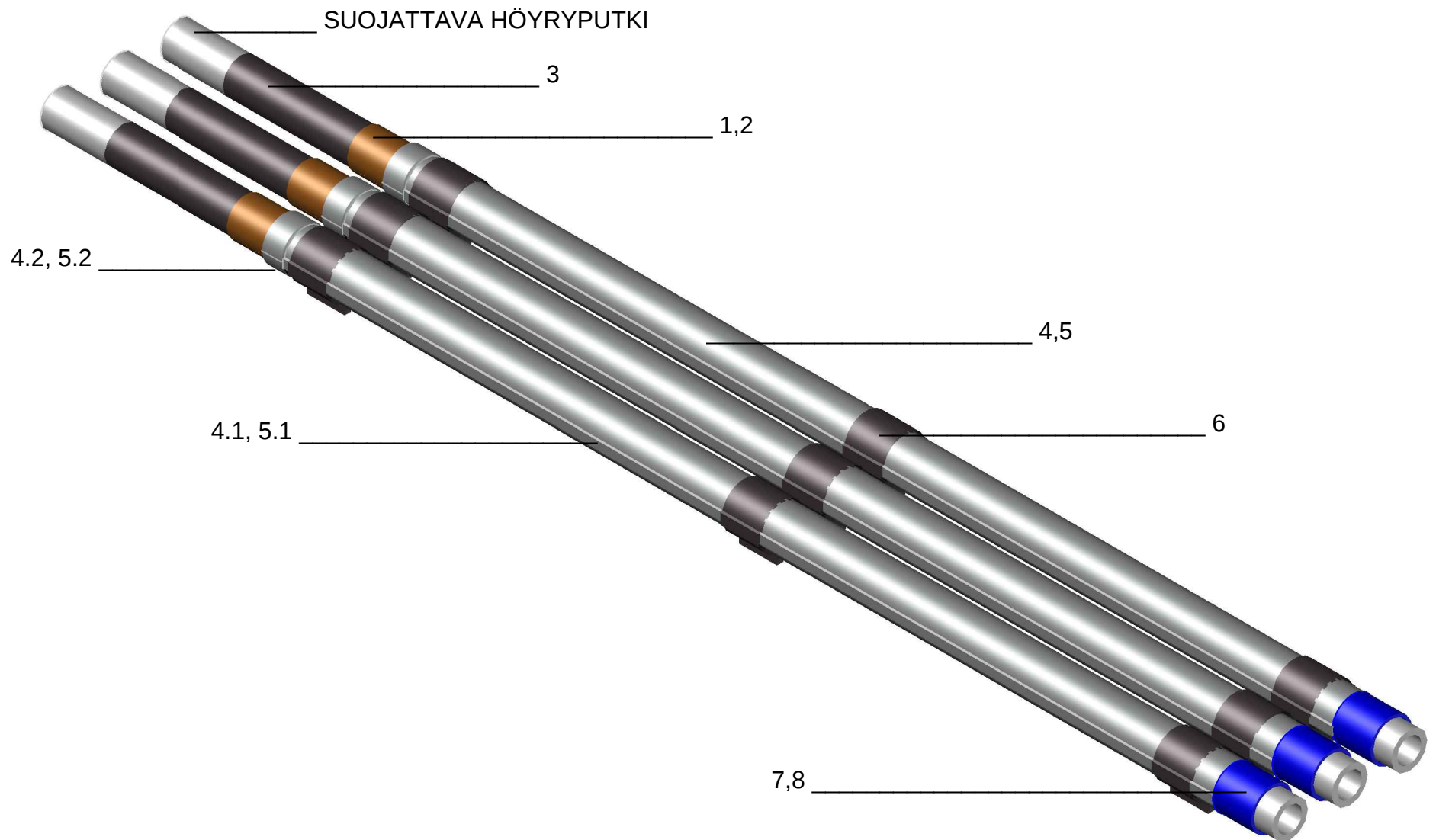
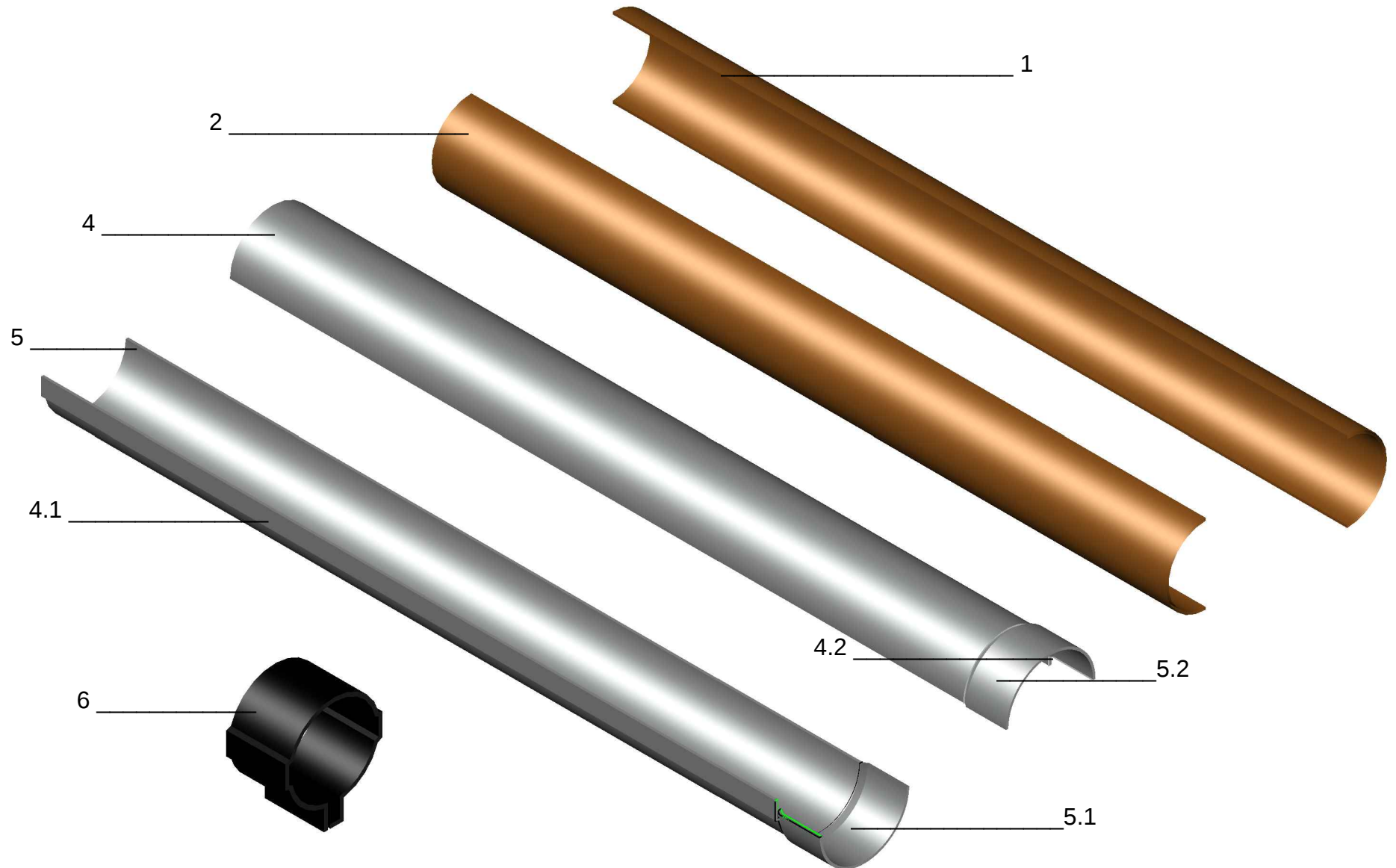


Figure 8. ASTM G31 Corrosion Resistance Results

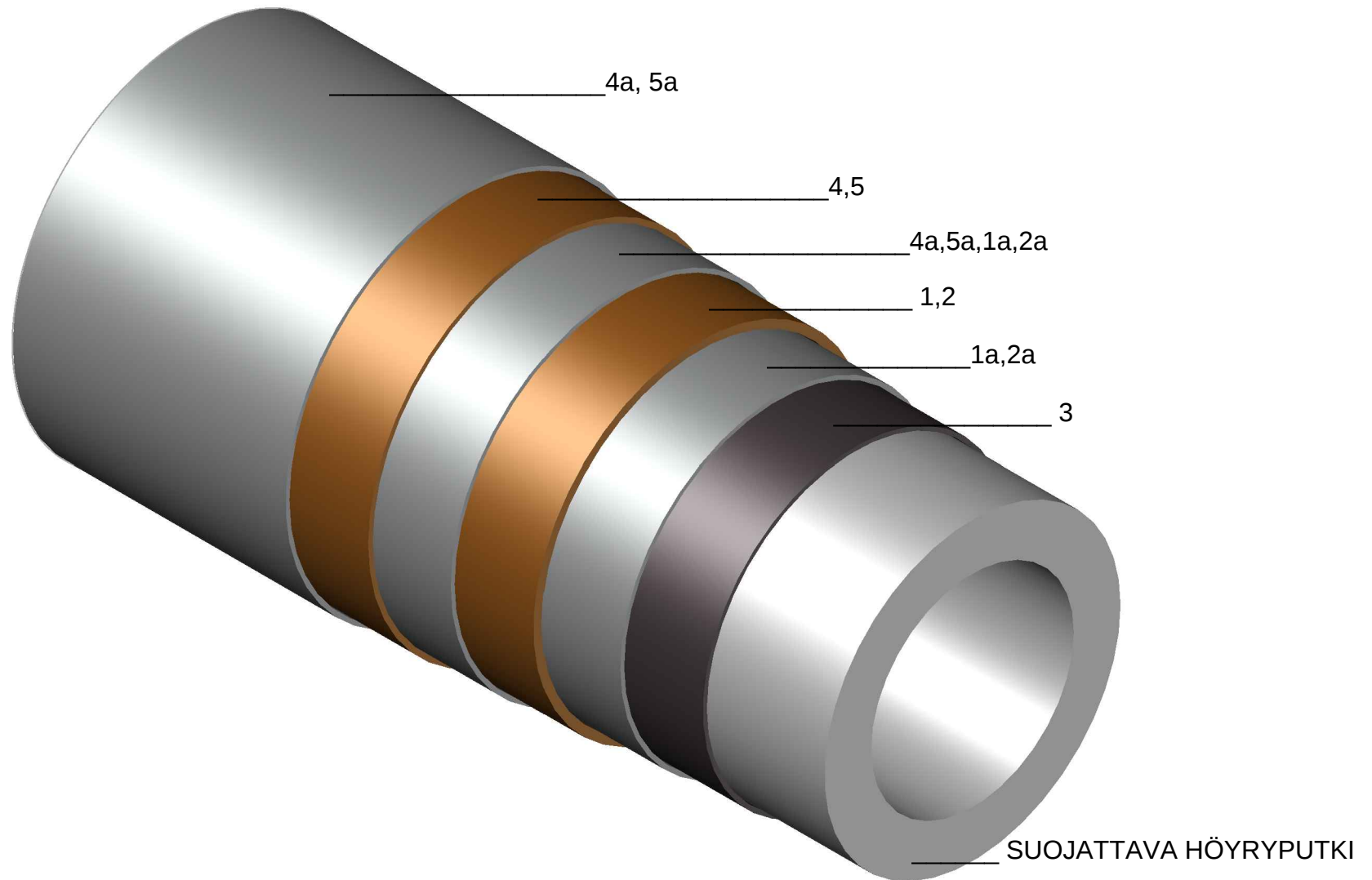
KUVA 1



KUVA 2



KUVA 3



KUVA 4

