

Miikka Lehtinen

Tarkastukset ja valvonta soodakattilan ilma-aukkojen vaihdon tukena

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Miikka Lehtinen
Työn nimi	Tarkastukset ja valvonta soodakattilan ilma-aukkojen vaihdon tukena
Toimeksiantaja	Replico Oy
Vuosi	2022
Sivut	51 sivua, liitteitä 1 sivu
Työn ohjaaja(t)	Kalle Tarhonen, Sanni Yli-Olli

TIIVISTELMÄ

Soodakattila on kemiallisen puunjalostuksen sivutuotteena syntyvän mustaliipeän polttamiseen tarkoitettu suurtehosäteilykattila, jonka tehtävänä on energian tuotanto ja kemikaalien talteenotto. Soodakattilan tulipesä on korkean lämpötilan ja haasteellisten korroosio-olosuhteiden takia erittäin haastava ympäristö höyrystinputkien materiaalin keston näkökulmasta. Materiaalien kesto on erittäin tärkeä osa soodakattilan turvallisuutta sularäjähdyksen estämiseksi. Sularäjähdyks on yksi suurimmista turvallisuusriskeistä soodakattilan käytön aikana.

Tulipesän haasteellisen ympäristön takia höyrystinputkien materiaaleilla vaikuttaa suuresti vaurioitumiseen, mutta myös komponenttien laadukkaalla valmistuksella ja asennuksella voidaan välttää monia ongelmakohtia tulevassa käytössä. Työssä selvitettiin tulipesän compound-alueella käytössä olevat materiaalit, näiden koostumusta, sekä vertaillaan materiaaleja muun muassa vauriomekanismin näkökulmasta. Työssä käytiin läpi erilaisia tulipesästä havaittuja vauriomekanismeja sekä näiden vaikutuksia käytettävyyteen. Kirjallisuustutkimuksen ja omien kokemusten perusteella luotiin ohjeistus tulipesän aukkopaneelien valmistuksen yhteydessä tehtävälle laadunvalvonnalle. Ohjeistuksen tarkoituksena on selkeyttää ja tarkentaa mahdollisia kohteita, joissa voi esiintyä laadullisia haasteita.

Työn lopputuloksena syntynyt ohjeistus helpottaa uusien henkilöiden laadunvalvonnan suoritusta. Ohjeistuksessa on havainnollistettu käytännössä havaittujen ”kompastuskivien” huomiot kuvin, mikä helpottaa käytännön työtä ja kohdistaa valvontaa tärkeisiin alueisiin.

Asiasanat: soodakattila, laadunvalvonta, valmistus, vauriot

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Miikka Lehtinen
Thesis title	Inspections and quality control to support the replacement of air ports in the recovery boiler
Commissioned by	Replico Oy
Time	2022
Pages	51 pages, 1 appendix page
Supervisors	Kalle Tarhonen, Sanni Yli-Olli

ABSTRACT

Kraft recovery boilers are high-efficiency radiation boilers, designed to burn black liquor produced as a byproduct in pulp production. Their main purpose is to produce energy and chemical recovery. A recovery boiler furnace is a very challenging environment for the boiler tube materials in terms of corrosion and failure resistance due to high fluctuating temperatures and chemicals. Material integrity has a very important role in the safe operation of the recovery boiler and in the prevention of smelt explosions, which are among the main risks during operation.

The aim of this thesis was to create an instruction for manufacturing quality control on kraft recovery boiler openings. The purpose of the instructions is to specify possible situations where qualitative challenges might arise.

For the instructions, different water wall tube materials were compared. Material compositions and differences between these materials were studied, and different failure mechanisms and effects of these failures on the usage of the recovery boiler were investigated. Based on the study, instructions were made for manufacturing and installing quality control.

The instructions resulting from this study facilitate the performance of new personnel with respect to quality control. The quality challenges which were observed in practice are illustrated with pictures in the instructions, which aims to help and give guidelines to target inspections of critical areas.

Keywords: recovery boiler, quality control, manufacturing, failures

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	SOODAKATTILA	6
2.1	Tulipesä	8
2.2	Aukkojen rakenne	10
3	PUTKIMATERIAALIT JA NIIDEN VAURIOITUMINEN	15
3.1	Vaurioitumismekanismit	17
3.1.1	Säröily	19
3.1.2	Korroosio	24
3.2	Tulipesän materiaalit	26
3.3	Soodakattilan erityisvaatimukset ISO 12952-5 Liite E	30
4	VUOSIHUOLLOT	31
4.1	NDT-tarkastukset	31
4.2	Vaurioiden korjaukset	35
5	LAADUNHALLINTA	36
5.1	Laadunvarmistus	37
5.2	Laadunvalvonta	38
6	OHJEISTUS ILMA-AUKKOJEN VALMISTUKSEN JA ASENNUKSEN LAADUNVALVONNASTA	39
6.1	Valmistusdokumentit ja työkokeet	39
6.2	Esivalmistus	40
6.3	Asennus	46
6.4	Dokumentointi	47
7	POHDINTA	47
	LÄHTEET	49
	KUVALUETTELO	51
	LIITTEET	

Liite 1. Laadunvalvonnan tarkastuslista

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään soodakattilan tulipesän materiaaleja, vaurioita sekä mahdollisuuksia vaurioiden ehkäisemiseen laadunhallinnan kautta. Työn tavoitteena on luoda selkeä ohjeistus soodakattiloiden uusien compound-putkista tehtyjen aukkopaneelien valmistuksen ja asennuksen aikaista laadunvalvontaa varten. Vuosihuoltojen yhteydessä on havaittu toistuvia haasteita aukkojen vaihtotyössä. Laadunvalvonnalla pyritään estämään ongelmakohtien syntyminen, tai ainakin havaitsemaan virheet ajoissa, ja parantamaan laitteen luotettavuutta. Ohjeistuksen avulla selkeytetään ilma-aukkojen tarkastamista ja vaihdon laadunvalvontaa valmistus- ja asennusvaiheessa.

Ohjeistuksen pohjana käydään läpi vuosihuolloissa tehtävät tarkastukset käytössä oleville aukkoputkille, näissä tapahtuville vaihtoon johtaville vaurioitumisille sekä uuden aukkopaneelin valmistus ja siihen liittyvät tarkastukset ja mahdollisia ongelmakohtia. Ongelmakohtia on kerätty omien kokemusten ja havaintojen perusteella, sekä asiantuntijahaastatteluin.

Teoriaosuudessa käsitellään ensin soodakattilan toimintaa yleisesti, sekä käytettävien materiaalien muutosta menneinä vuosikymmeninä. Työssä perehdytään nykyisin käytössä olevien materiaalien vauriomekanismeihin ja näiden korjausvaihtoehtoihin vuosihuollon aikana sekä komponentteja uusimalla. Teoriaosuudessa paneudutaan myös tarkastusmenetelmiin, joilla vaurioituminen voidaan todentaa.

Työ rajoittuu soodakattilan tulipesän compound-putkista valmistettujen, käytössä olevien aukkoputkien tarkastamiseen ja näiden uusimiseen liittyviin valmistusvaiheisiin.

Tämä työ on tehty Replico Oy:lle. Se on suomalaisessa omistuksessa oleva yritys, joka tuottaa korkealuokkaisia, riippumattomia ja puolueettomia asiantuntijapalveluita kaikille teollisuuden toimialoille sekä Suomessa että ulkomailla. Replicon palvelukirjoon kuuluvat muun muassa elinikä tarkastukset ja elinikäselvitykset, vaurioselvitykset, kattiloiden kunnonseuranta, laadunhallin-

tapalvelut sekä näihin muut palveluihin tukitoiminnot. Replicon asiakkaina toimivat metsäteollisuuden laitokset, öljy- ja kaasuntuotannon laitokset sekä muut energiantuotannon laitokset. (Replico 2022.)

2 SOODAKATTILA

Soodakattila on kemiallisen puunjalostuksen sivutuotteena syntyvän mustalipeän polttamiseen tarkoitettu suurtehosäteilykattila. Mustalipeä sisältää puun ligniiniä ja sellun keitossa käytettyjä natrium- ja rikkipohjaisia kemikaaleja.

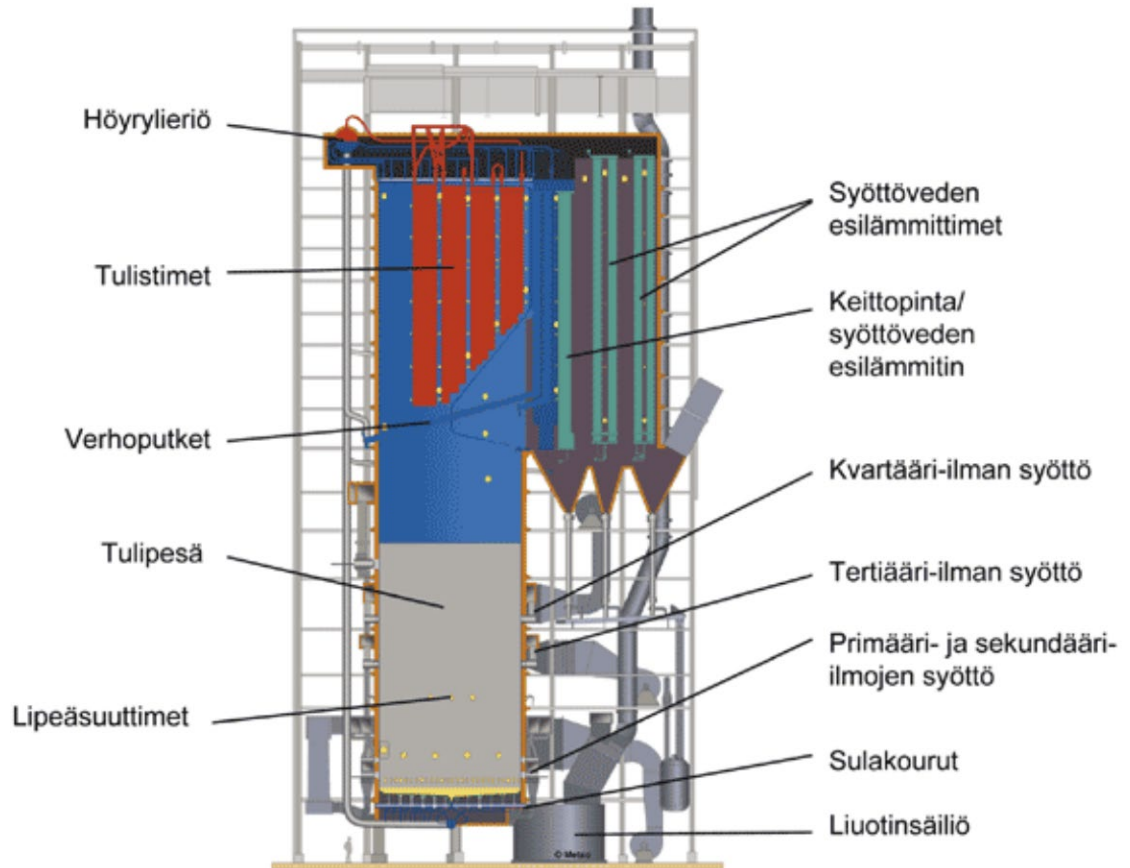
Soodakattilan tehtävinä ovat energiantuotanto ja kemikaalien talteenotto. Kemikaalien talteenoton tarkoituksena on polttoaineena käytettävän lipeän sisältämien natrium- ja rikkikemikaalien talteenotto ja muuttaminen natriumkarbonaatiksi (Na_2CO_3) ja natriumsulfidiksi (Na_2S), jotka toimivat sulfaattikeiton vaikuttavina kemikaaleina. Energiantuotanto tapahtuu polttamalla mustalipeän sisältä orgaaninen puuaines, kuten ligniini, hiilivedyt ja orgaaniset hapot. Polttoprosessissa syntyvä energia käytetään höyryntuotantona sellutehtaan tarpeisiin, sekä sähköntuotantoon höyryturbiinien avulla. (Andritz 2015.)

Sulfaattisellun valmistukseen käytettävät keittokemikaalit ja liuenneet orgaaniset aineet erotetaan sellusta pesuvaiheessa. Sellunvalmistuksen alkuvaiheessa tämä musta ja alkalinen lipeä hävitettiin. 1930- ja 1940-luvulla modernin tyyppinen kemikaalien talteenotto otettiin laajemmalti käyttöön. Tällöin sulatusuuni ja kattila rakennettiin yhdeksi kokonaisuudeksi ja lipeä ruiskutettiin tulipesän pohjalle erityisistä suuttimista. Näin mahdollistettiin kasvaneet linjakoot ja parempi kustannustehokkuus. Sitten kehitys on kulkenut kohti suurempia höyrynpaineita. (Vakkilainen 2005.)

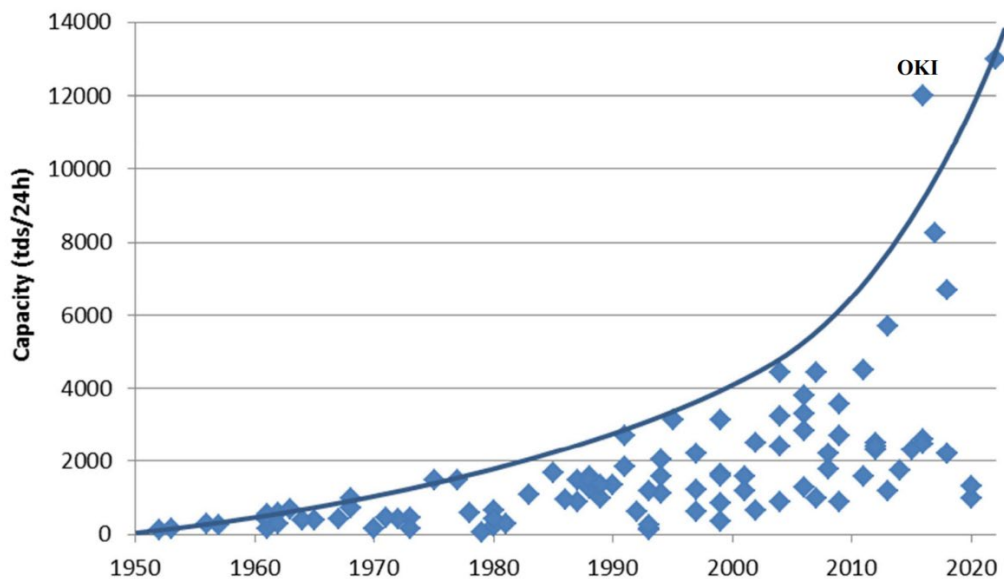
Soodakattiloiden kokoa rajoitti 1980-luvulle asti kaksilieriörakenne, joka rajoitti kattilakoon noin 2300 tka/vrk-tasolle. 1990-luvulle siirryttäessä kaikki valmistajat alkoivat tarjoamaan yksilieriörakennetta ja nykyisin kaikki, pois lukien pienet soodakattilat, rakennetaan yksilieriörakenteena. (Vakkilainen 2005.)

Nykyaikainen soodakattila koostuu yksilieriörakenteesta, jossa on pystysuuntainen keittopintaputkisto ja väljästi sijoitetut tulistin elementit (kuva 1). Soodakattiloiden kapasiteetti on kasvanut suuresti 1990-luvusta, jolloin suurimmat

soodakattilat olivat kooltaan noin 3000 tka/vrk, tämän hetken suurimpiin valmistetuksi oleviin soodakattiloihin, joiden kapasiteetti on noin 13 000 tka/vrk. Soodakattiloiden kapasiteetin kasvua on havainnollistettu kuvassa 2. Samaan aikaan soodakattiloiden höyryarvot ovat kasvaneet vuosien 480 °C:n tasolta 515 °C:seen ja höyryn paineet 85 baarista 110 baariin. (Salmenoja 2019.)



Kuva 1. Soodakattilan rakenne



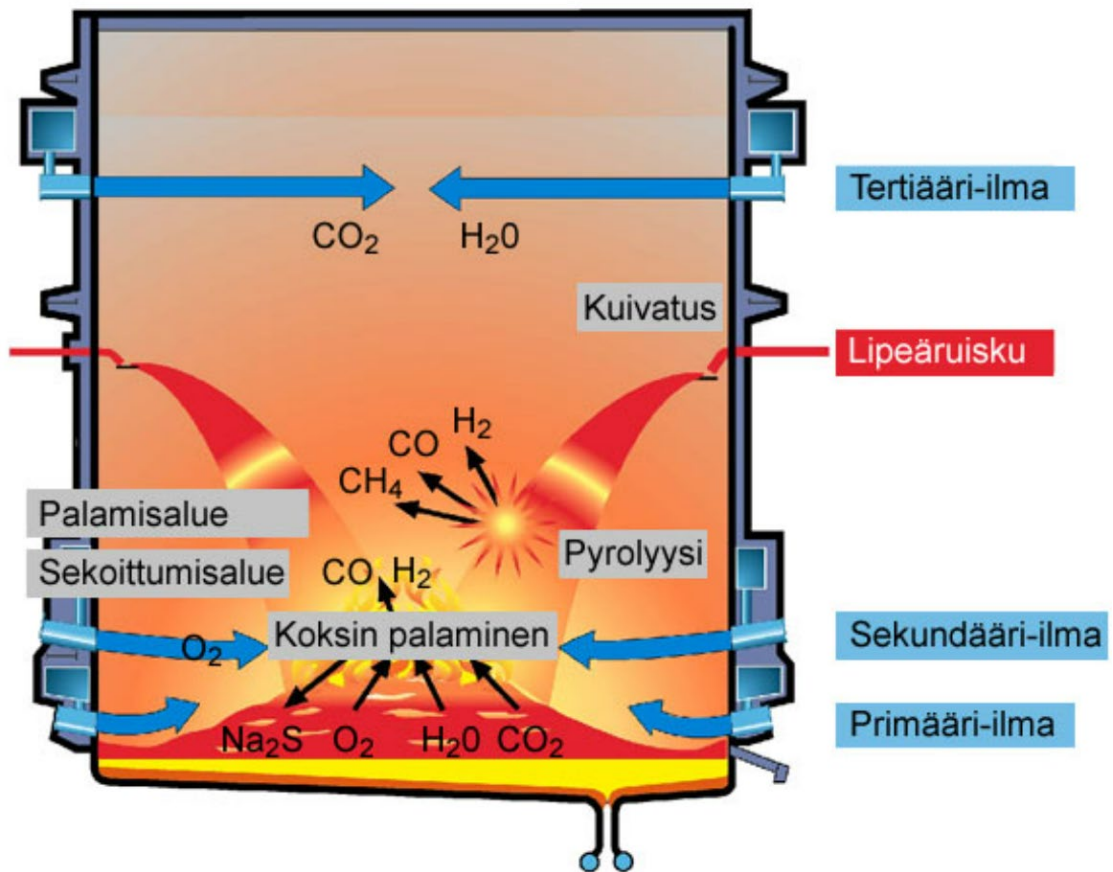
Kuva 2. Soodakattiloiden kapasiteetin kehitys 1950–2021

2.1 Tulipesä

Soodakattilan tulipesällä tarkoitetaan kattilan osuutta, jossa mustalipeän palaminen tapahtuu. Tulipesä koostuu vierekkäisistä höyrystinputkista, jotka yhteen hitsattuina muodostavat kaasutiiviin rakenteen. Kaasutiivis rakenne muodostetaan joko membraaniseinillä, joissa putkien väliin on hitsattu kapea levy, tai vaihtoehtoisesti tangenttiseinin, joissa putkien välit tiivistetään hitsaamalla.

Mustalipeä syötetään tulipesään lipeäruiskujen avulla. Mustalipeä pyritään ruiskuttamaan siten, että pohjalle muodostuu, tasaisesti koko pohjan alalle muodostunut, lumikasaa muistuttava keko. Lipeäruiskujen tehtävänä on hajottaa syötettävä polttoaine pieniksi pisaroiksi, kuitenkin siten, että pisaroiden roiskuminen seinille ja kulkeutuminen tulistimille olisi mahdollisimman vähäistä. Lipeäruiskuaukot sijaitsevat noin 8–10 metriä pohjan yläpuolella. Tulipesän pohjalle muodostuneesta keosta sula valuu sula-aukkojen ja sulakourujen kautta liuossäiliöön. (Knowpulp 2022.) Tulipesäreaktio on havainnollistettu kuvassa 3.

Palamisilma tuodaan tulipesään monivaiheisen palamisilmajärjestelmän avulla, jossa ilmaa syötetään usealta tasolta tulipesään. Ilmansyötöllä hallitaan reduktioastetta, keon muotoa, tasaista sulavirtaa sularänneissä ja pyritään mahdollistamaan polttoaineen jäännöshiilen mahdollisimman tehokas palaminen. Mustalipeän ja palamisilmojen syöttöä, käynnistyspolttimia ja sulan poistamista varten höyrystinputket muodostavat membraaniseinään läpivientiaukkoja. Aukko-ohituksien konstruktio vaihtelee käyttötarpeen mukaan. (Knowpulp 2022.)



Kuva 3. Tulipesäreaktio

Tulipesässä on korkean lämpötilan lisäksi haasteelliset korroosio-olosuhteet, jotka vaihtelevat reaktioalueittain. Putkien materiaaleille tämä haasteellisuus ilmenee vaihtelevana lämpötilana ja kemiallisena ympäristönä. Nämä seikat tekevät materiaalin kustannustehokkaan valinnan eri kohteisiin vaikeaksi. Ensimmäiset soodakattiloiden tulipesän alaosat suojattiin tiilivuorauksella, tai tapitetuilla putkilla, joiden päällä oli tulenkestävä massaus. Tulipesän putket olivat aiemmin hiiliteräksestä valmistettuja putkia. 1972 Tampella toimitti ensimmäisen täysin compound-putkista valmistetun soodakattilan tulipesän. (Vakkilainen 2005.) Tänä päivänä uudet soodakattilat sisältävät useita eri materiaali-ratkaisuja, joista tyypillisimmät tulipesän alimmat alueet ovat korkeammin seostettua compound-putkea ja tätä seuraavat putket vähemmän seostettua ”normaalia” compoundia ja tulipesän yläosat kuumalujaa seostamatonta tai niukkaseosteista terästä. Myös suurin osa suomalaisista ”vanhoista” kattiloista on modernisoitu vastaamaan tulipesän materiaaleiltaan nykykäytäntöä.

Soodakattilan käytön aikana yksi suurimmista riskeistä on sularäjähdyks. Sularäjähdyks voi syntyä, kun jo pieni vesimäärä, esimerkiksi muutama litra vettä,

pääsee nopeasti höyrystymään kosketuksissa suolasulan kanssa. Sularäjähdyksessä tämä äkillinen veden höyrystyminen aiheuttaa tilavuuden kasvun ja paineaallon, joka voi olla 10 Pa–100 kPa. (Vakkilainen 2005.)

Sularäjähdyksen aiheuttama paineaalto on usein riittävä aiheuttamaan höyrystinputkiin ja höyrystimen seiniin muodonmuutoksia ja taipumia. Putkien muodonmuutokset voivat lisätä vesimäärää ja sitä kautta pahentaa tilannetta ja seinien muodonmuutos mahdollistaa sulavuodot kattilan ulkopuolelle. Tästä syystä soodakattilat on varustettu hätäpysäytysjärjestelmillä, jotka suorittavat tietyn sekvenssin mukaisesti kattilan alasajon automaattisesti. Suuren sularäjähdyksen yhteydessä syntyvä paineaalto, tai kattilasta ulos räjähtävä kuuma lipeä sekä purkautuvat myrkylliset reaktiokaasut, aiheuttavat kattilahuoneessa ja sen läheisyydessä työskenteleville ihmisille hengenvaarallisen riskin. (Vakkilainen 2005.)

Sularäjähdyksen mahdollisuuden pienentämiseksi, etenkin soodakattilan vesi-putket ovat erityisen tarkan ja systemaattisen tarkastuksen alla vuosihuolloissa.

2.2 Aukkojen rakenne

Soodakattilan aukkojen rakenne vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. Aukkojen rakennetta kuvataan tarkemmin seuraavissa kappaleissa tulipesän puolelta. Tulipesän ulkopuolella aukot ovat pääsääntöisesti joko massakotelon sisällä tai ilmarekisterin takana. Massakotelon tarkoituksena on mahdollistaa riittävän paksun tulen kestävä massan valaminen aukon ympärille. Tulenkestävällä massauksella suojataan aukon peltiosia. Ilma-aukon massakoteloa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Ilma-aukon massakotelo sisältä katsottuna

Sula-aukot

Sula-aukot sijaitsevat pohjan taivealueella, pääsääntöisesti takaseinällä, joskin erikoistapauksissa nämä voivat sijaita etuseinälläkin. Sula-aukoista sula virtaa sulakouruja pitkin pohjalta liuotussäiliöön. Sula-aukko on yleensä varustettu massakotelolla ja ohitusputkien välit on tiivistetty massauksin. Sula-aukon konstruktio tulipesän sisältä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Sula-aukon rakenne sulakouru poistettuna

Ilma-aukot

Ilmajärjestelmällä pyritään vaikuttamaan sulakeon muotoon ja korkeuteen, reduktioasteeseen sekä päästöjen hallintaan. Ilma-aukkojen lukumäärä ja koko vaihtelevat kattilan koosta ja valmistajan ilmansyöttöjärjestelmästä riippuen.

Primäärisuuttimien tehtävänä on säädellä keon muotoa ja mahdollistaa mahdollisimman korkea reduktioaste. Primääriaukot sijaitsevat tulipesässä sula-aukkojen yläpuolella. Primääri-ilmasuuttimet on sijoitettu jokaiselle seinälle ja suuttimet ovat fyysisesti pieniä. Suuttimet valmistetaan tulenkestävästä materiaalista, joko valamalla muottiin tai levyosista muotoilemalla. Primääri-aukkojen rakennetta on kuvattu kuvassa 6.

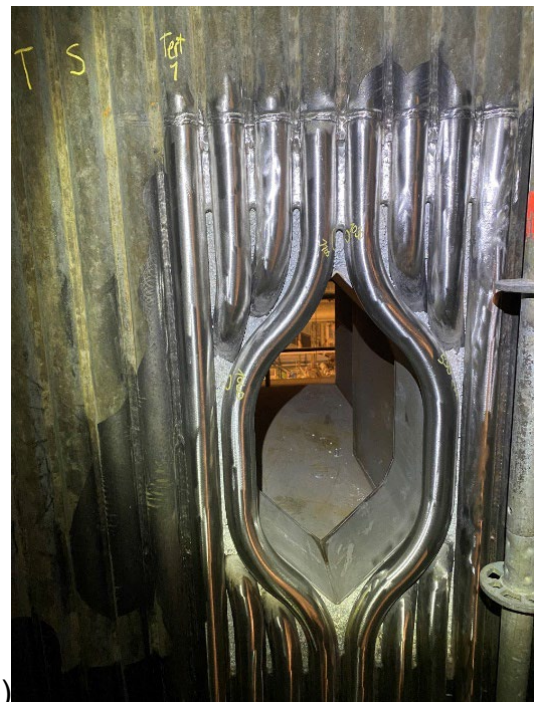
Ylemmiksi ilma-aukoiksi luokitellaan sekundääri-, tertiääri- ja kvartääriaukot. Sekundääri-ilmansyötön tehtävänä on muun muassa keon yläosan säätely ja mahdollisesti tuoda myös sellutehtaan muiden osastojen hönkä- ja hajukaasuja poltettavaksi. Tertiääri- ja kvartääri-ilmansyötön tehtävinä ovat esimerkiksi savukaasujen jäännöshapen hallinta, palamiskaasujen tehokkaampi sekoittaminen ja savukaasujen seassa olevan orgaanisen aineen loppuun palamisen varmistaminen. Ilma-aukkojen koko ja muoto vaihtelevat valmistajien mallien mukaan, joten tässä sekundääri, tertiääri ja kvartääri ilma-aukkojen osalta on esitetty vain esimerkkejä aukkojen mahdollisesta konstruktiosta (kuva 7). (Knowpulp 2022.)



Kuva 6. Primääriaukkojen rakenne, valusuuttimilla varustettu primääriaukko



a)



b)

Kuva 7. Esimerkki a) sekundääriaukon ja b) tertiääriaukon rakenteesta

Poltinaukot

Polttimien tehtävänä on muun muassa käynnistysvaiheessa aloittaa polttoprosessi, polttaa hajukaasuja ja lisätä tehoa suurella kuormalla ajettaessa (Knowpulp 2022). Poltinaukkojen ohitusputkien tiivistys tehdään nykyisin pääsääntöisesti massauksin. Ohitusputkien tiivistyksessä on aiemmin käytetty myös tulenkestävästä teräksestä valmistettuja levyosia, mutta näiden vaurioherkkyyden ja korjauksen hankaluuden takia on nykyisin siirrytty lähes kokonaan massattuihin aukkoihin (kuva 8).



Kuva 8. Esimerkki poltinaukoista a) levyosilla ja b) massauksella tiivistettynä

Lipeäruiskuaukot

Lipeäruiskuaukot ovat pieniä massattuja aukkoja (kuva 9), noin 6–8 metrin korkeudella pohjasta. Aukot on yleensä sijoitettu symmetrisesti kattilan kaikille seinille keon mahdollisimman tasaisen jakautumisen aikaansaamiseksi. Lipeä syötetään kattilaan lipeäsuuttimen avulla. Syötettävä polttoliipeä pyritään hajotamaan optimaaliseen pisarakokoon, jotta pisarat ennättävät kuivua ja suorittaa pyrolyysivaiheen ennen palamattoman, orgaanisen aineen osumista pohjalla olevaan keoon. (Knowpulp 2022.)



Kuva 9. Esimerkki lipeäruiskuaukon rakenteesta

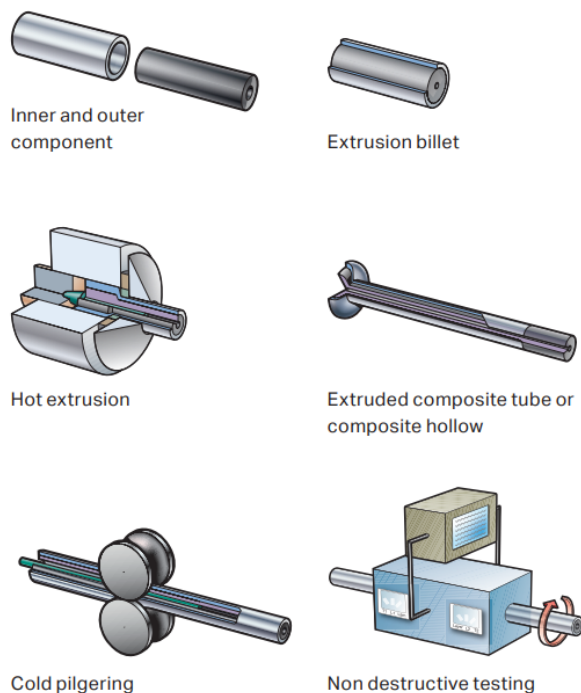
3 PUTKIMATERIAALIT JA NIIDEN VAURIOITUMINEN

Tulipesän alaosissa havaitaan muutamia tyypillisiä vaurioita, jotka johtuvat haasteellisesta ympäristöstä, aukkojen rakenteesta sekä käytetyistä materiaaleista. Tyypillisimmät vauriomuodot tunnetaan hyvin ja niiden eteneminen on verrattain hidasta, joten normaalisti ne havaitaan huoltoseisakkien tarkastusten yhteydessä ennen vuotoon johtavaa vaurioita.

Nykyiset soodakattiloiden tulipesän alaosat on pääasiassa valmistettu compound-putkista, jotka koostuvat kahdesta eri metallurgisesti toisiinsa liitetystä metalliseoksesta. Compound-putkien käyttö ulottuu pääsääntöisesti viimeisten ilma-aukkojen yläpuolelle, josta tulipesä jatkuu pinnoittamattomana hiiliteräspana. (Pohjanne 2005.)

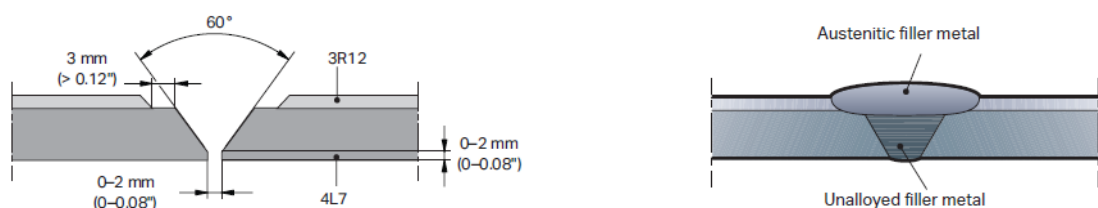
Compound-putki koostuu painetta kantavasta hiiliteräsrungosta ja sitä korroosiolta suojaavasta pinnoitteesta. Kahden eri materiaalin liitos voidaan valmistaa esimerkiksi kuumapursotusmenetelmällä, jonka jälkeen putket kylmävalssataan (kuva 10). Esimerkkinä yleisesti käytetyissä Sandvikin valmistamissa compound-putkissa kuumapursotus tapahtuu 1200 °C:n lämpötilassa. Kattiloiden pohjissa ja ilma-aukoissa voidaan käyttää myös päällehitsaamalla valmistettuja putkia, joissa korroosiolta suojaava kerros lisätään hitsaamalla painetta kantavaan putkeen. (Sandvik Tryckeri AB 2003.)

PRODUCTION ROUTE OF COMPOSITE TUBES



Kuva 10. Compound-putken valmistaminen kuumapursotusmenetelmällä.

Compound-putkien rakenteen vuoksi putkien liittäminen vaatii erityishuomiota. Putken painetta kantava osa on hitsattava vastaavalla lisäaineella, jotta se täyttää putkelle asetetut vaatimukset. Pinnoitemateriaalin mahdollinen sekoittuminen aiheuttaa myös haasteita, joita käsitellään yksityiskohtaisemmin kohdassa 3.1.1. Compound-putken liitoksen valmistelu ja valmis hitsi on esitetty kuvassa 11. (AB Sandvik materials technology 2016.)



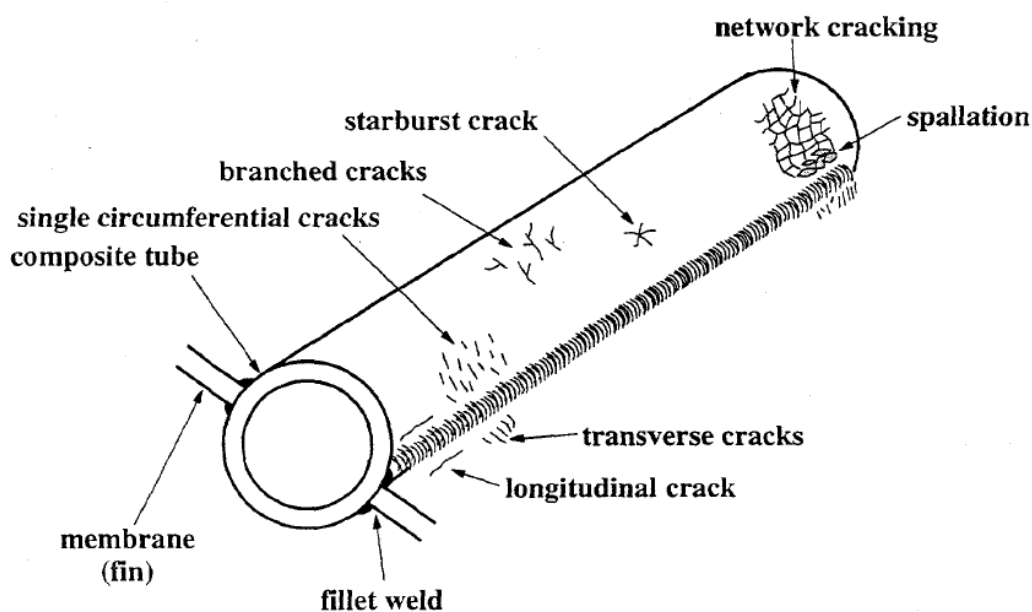
Kuva 11. Compound-putken liitoksen valmistelu ja valmis hitsi.

3.1 Vaurioitumismekanismit

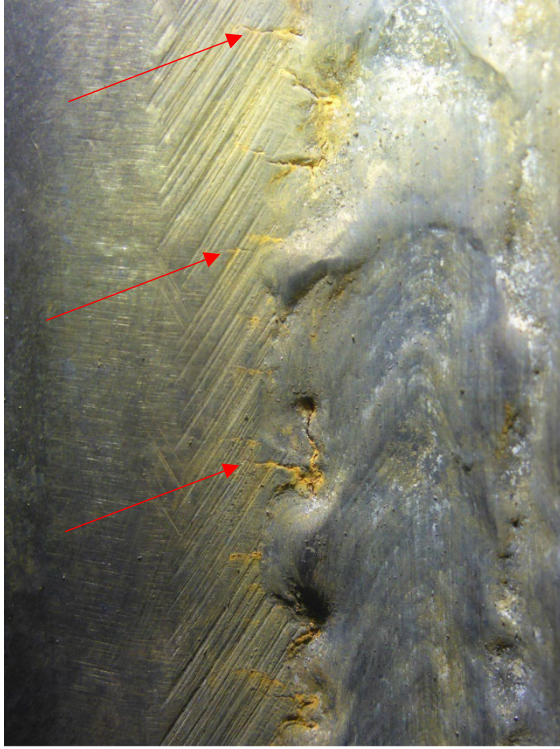
Soodakattilan tulipesän alaosien seinäputkien sisällä virtaa vesi, joten vuotoon johtavat vauriot tällä alueella voivat pahimmillaan johtaa vakavaan sularäjähdykseen. Tämän takia on erityisen tärkeää tunnistaa ja osata ennakoida eri vauriomekanismit, jotka heikentävät putkimateriaaleja. Tulipesän compound-alueella yleisimmät putkia vaurioittavat mekanismit ovat eri korroosion ja säröilyn muodot. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Säröytymistä voi esiintyä eri osissa putkea: perusaineessa, jatkohitseissä sekä putkia yhdistävissä evissä ja evähitseissä. Säröytymistä soodakattilan tulipesässä voivat aiheuttaa useat eri vauriomekanismit, kuten jännityskorroosio sekä terminen- ja korroosioväsyminen. Myös hitsaus voi aiheuttaa eri tavalla ilmenevää säröilyä. Yhtenäistä kaikelle säröilylle on se, että sen synty ja kasvu vaatii aina materiaaliin kohdistuvan staattisen tai dynaamisen jännityksen. (Singbeil 1997.) Säröilyvaurioita on esitelty kuvissa 12 ja 13.

Korroosiossa materiaali syöpyy ympäristössä, johon se on altistettu. Korroosio voi olla tasaista, yleistä korroosiota tai haasteellisempaa paikallista korroosiota. Soodakattiloissa paikallista korroosiota esiintyy esimerkiksi aukko-ohitusten massausten ympäristössä, jota on kuvattu kuvassa 14. (Singbeil 1997.)



Kuva 12. Compound-putken pinnoitteen säröjä.



Kuva 13. Compound-putken säröjä



Kuva 14. Ilma-aukkojen massauksen alle kääntyvien putkien korroosiota

3.1.1 Säröily

Särö tulipesän putkessa on aina suuri riski. Riippumatta särön syntymekanismista, se voi poikkeustilanteessa jatkaa nopeastikin kasvua eri mekanismeilla. Tästä syystä säröjä tai viivamaisia indikaatioita ei voi jättää seurantaan soodakattilan tulipesän höyrystinputkiin, vaan ne on korjattava tai putki vaihdettava. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Muusta kuin hitsauksesta johtuva säröily tulipesässä johtuu yleisimmin termisestä väsymisestä tai jännityskorroosiosta. Hitsauksesta johtuva säröily ilmenee useimmin heti hitsauksen jälkeen ja siihen päästään kiinni pintatarkastuksilla. Viivästyneisiin, hitsauksesta johtuviin, säröilyilmiöihin ei päästä kiinni hitsauksen jälkeisellä pintatarkastuksella ja tästä syystä niitä aiheuttavia virheelisiä menetelmiä on laadullisesti valvottava asennustyön yhteydessä. (Yli-Olli 2022.)

Terminen väsyminen

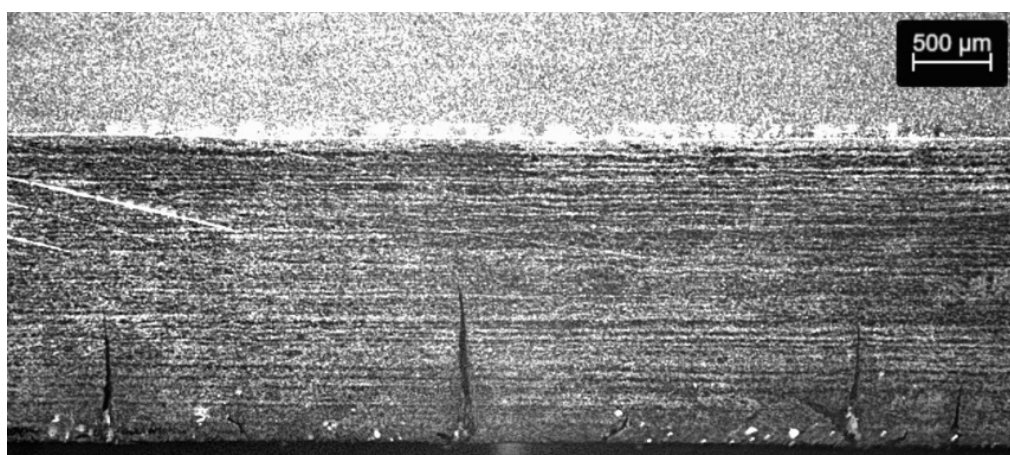
Terminen väsyminen aiheutuu metallin lämpötilan vaihtelun aiheuttamasta väsyttävästä kuormituksesta. Särön kasvu etenee aina väsyttävää kuormaa vasten kohtisuorassa. Putken pinnalla säröt ovat usein avonaisia ja etenevät pinnalla sekä materiaalin sisälle tyypillisesti hyvin suoraviivaisesti välittämättä materiaalin mikrorakenteesta. Joissakin tapauksissa, riippuen materiaalin rakenteesta ja väsyttävästä kuormasta, särö voi edetä myös materiaalin raerajoja pitkin (säröjä havainnollistettu kuvissa 15 ja 16). Vauriomekanismin pääaiheuttaja on kuitenkin väsyttävä kuorma ja compound-materiaalissa pinnoitteessa etenevällä säröllä on suuri todennäköisyys kasvaa myös pinnoitehiiliteräs-rajapinnan yli. Eteneminen jatkuu siihen asti, kunnes väsyttävä kuorma poistetaan tai putki murtuu. Korroosio voi kiihdyttää väsymistä syövyttämällä ja samalla heikentämällä materiaalia särön sisältä. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016; Pohjanne 1992.)

Materiaalin termisen väsymisen kestävyys vaikuttavat sen lämpökapasiteetti sekä lämpölaajenemiskerroin. Compound-putket koostuvat kahdesta eri materiaalista, joilla nämä arvot voivat erota suurestikin toisistaan. Parhaiten termistä väsymistä kestävä materiaali on se, joiden lämpölaajenemisker-

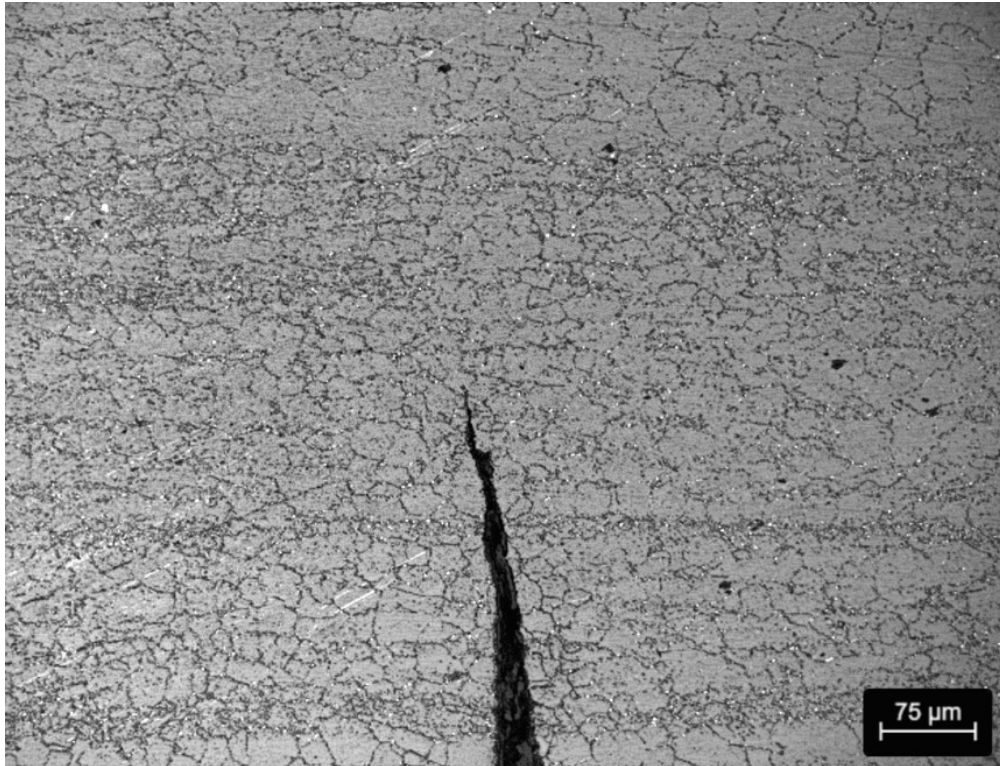
toimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Lisäksi materiaalin lämmönsiirtokyvyn tulisi olla mahdollisimman hyvä, jotta lämpö siirtyy pinnoitteesta runkoputken kautta höyrystettävään veteen, eikä materiaaliin synny sisäisiä lämpögradientteja. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Soodakattiloissa termistä väsymistä esiintyy muun muassa tulipesän pohjaputkissa sekä seinillä etenkin ilma- ja sula-aukkojen ohitusputkissa. Pohjalla termistä väsymistä aiheuttavat pohjalle putoavat, tulistimeen kerääntyneet suolapaakut, jotka aiheuttavat keon murtumista. Vaihtelevaa termistä kuormaa pohjalla voivat aiheuttaa myös pohjaputkien kiertohäiriöt. Kiertohäiriöitä syntyy esimerkiksi kattilan käynnistyksen yhteydessä, kun vesikierto on epätasaista. Epätasaisen vesikierron yhteydessä on mahdollista, että pohjaputkissa tapahtuu paikallista kiehumista, joka mahdollistaa putken yläosaan höryfilmin. Höryfilmin takia putken pinnoite käy mahdollisesti paikallisesti kuumempänä ja aiheuttaa säröilyä. (Singbeil 1997.)

Aukkojen ohitusputkien termiseen väsymiseen vaikuttaa etenkin lipeän ruiskutus ja mahdollinen valuminen seiniä pitkin, sekä ilman syötön jaksollisuus. Seiniille ruiskutettu lipeä aiheuttaa pinnoitteessa lämpötilavaihteluita, joka aiheuttaa termistä väsymistä, mutta myös paikallista korroosiota. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)



Kuva 15. Termisen väsymisen aiheuttamaa säröilyä.



Kuva 16. Termisen väsymisen aiheuttama särö, syövytetty näyte.

Jännityskorroosio

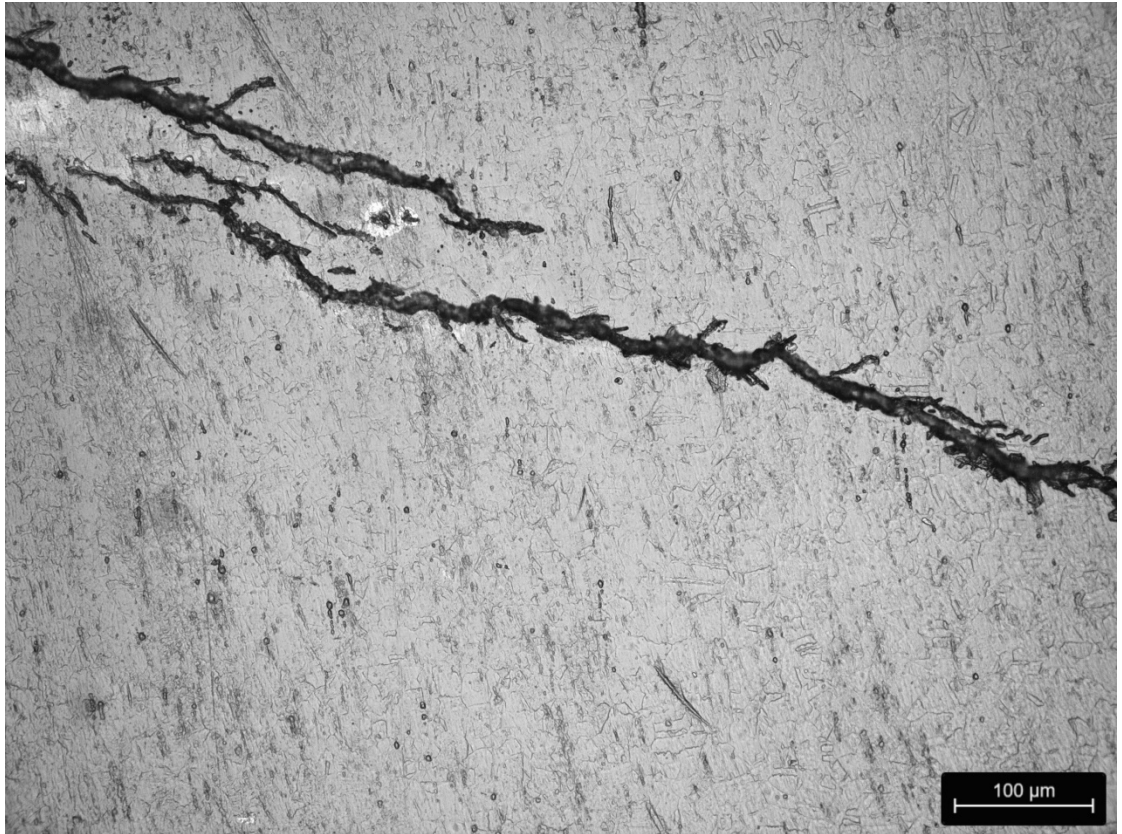
Toinen tyypillinen soodakattilan tulipesän compound-putkien vauriomekanismi on jännityskorroosio. Jännityskorroosiossa metalliin muodostuu murtumia korroosion ja pinnassa vaikuttavien vetojännitysten vaikutuksesta. Jännityskorroosiota esiintyy metalleilla, kun tarvittavat ympäristö, mekaaniset ja metallurgiset tekijät ovat voimassa:

- Ympäristön tulee olla sellainen, että korroosioreaktiota ovat mahdollisia. Ympäristötekijöitä, jotka vaikuttavat jännityskorroosiotaipumukseen ovat muun muassa materiaalin korroosipotentiaali, liuoksen lämpötila, pH, koostumus ja happipitoisuus.
- Mekaanisilla tekijöillä tarkoitetaan metalliin kohdistuvia vetojännityksiä ja kuormitusnopeutta. Nämä jännitykset voivat olla ulkoisesta kuormituksesta johtuvia jännityksiä tai materiaalin sisäisiä jäännösjännityksiä. Sisäisiä jännityksiä tulipesässä aiheuttavat mm. kylmämuokkaus ja hitsaus.
- Materiaalin rakenteen täytyy olla taipuvainen jännityskorroosioon vallitsevassa kemiallisessa ympäristössä. Metallurgisia vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa mikrorakenne, muokkausaste, koostumus ja pinnanlaatu.

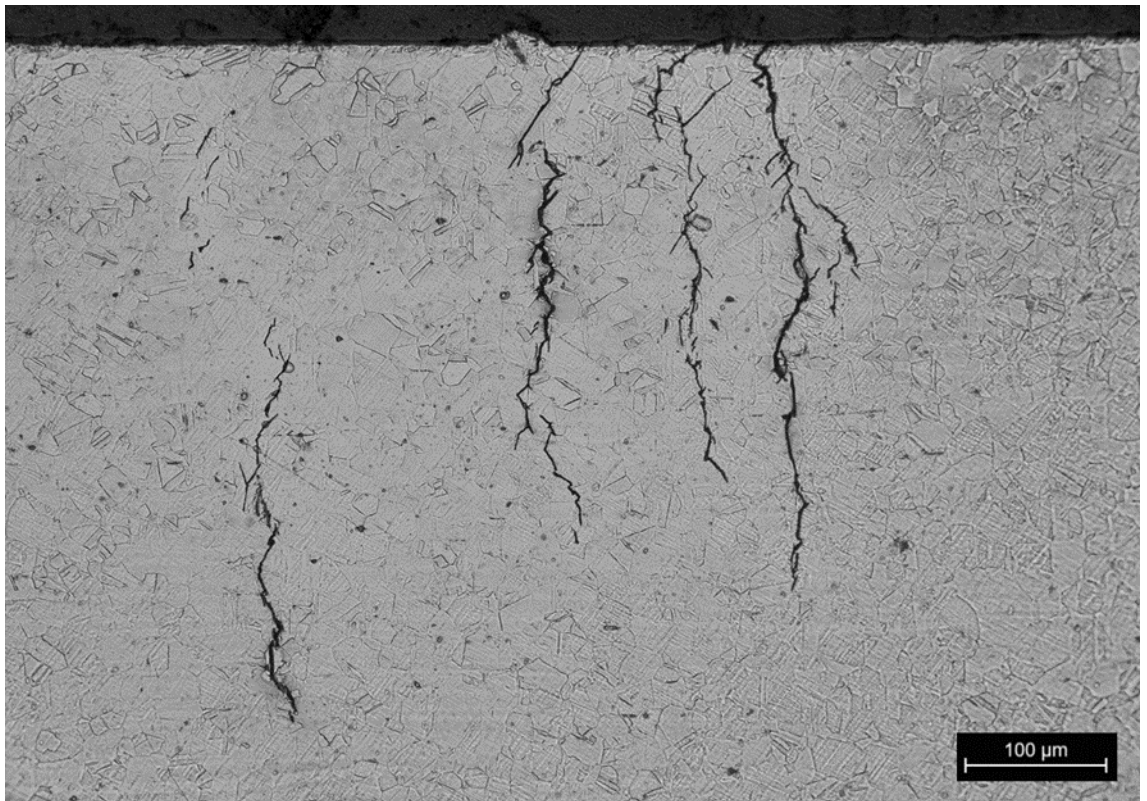
Nämä tekijät vaikuttavat sekä jännityskorroosiosäröjen syntyyn, että kasvuun. Murtuminen estyy, mikäli yksikin edellä mainituista edellytyksistä poistetaan. (Pohjanne 1992.)

Compound-putken valmistuksen ja hitsauksen yhteydessä putkiin jää jäännösjännityksiä. Putkien valmistuksen aikaiset jännitykset ovat käytön aikana pääosin puristusjännityksiä, mutta materiaalin muokkauksesta (esimerkiksi aukko-putkien taivutus) ja hitsauksen takia, nämä jännitystilat voivat muuttua paikallisesti vetojännitykseksi. Materiaalien eri lämpölaajenemiskertoimen takia, putken jännitystila voi muuttua myös putken jäähtyessä (esimerkiksi alasajon yhteydessä) tai putken ylikuumentumisen yhteydessä. Jännityskorroosiosäröt ovat tyypillisesti hyvin tiukkoja ja etenevät runsaasti haarautuen materiaalin sisälle välittämättä materiaalin mikrorakenteesta. Säröt voivat jopa edetä pinnoitteen läpi materiaalien rajapinnalle ennen kuin ne ovat niin suuria, että ne havaitaan. Särön eteneminen pysähtyy usein rajapinnalle, mutta korroosio voi edetä myös hiiliteräsosuteen tai rajapintaa pitkin, pinnoitetta irrottaen. Väsyttävä kuormitus voi kiihdyttää jännityskorroosiosäröilyä ja tapauksissa, joissa vauriomekanismit yhdistyvät, on mahdollista, että säröily etenee myös hiiliteräsmateriaaliin. Jännityskorroosiosäröjä on havainnollistettu kuvissa 17 ja 18. (ASM Handbook 2006; Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Tulipesässä jännityskorroosiota havaitaan tyypillisesti pohjalla, sula-aukoissa ja primääriaukkojen ympäristössä. Kuitenkin riippuen vaihtelevista ympäristöolosuhteista, paikallisista jännityksistä ja materiaaleista, on jännityskorroosiota mahdollista havaita myös korkeammalla tulipesässä. (Singbeil 1997.)



Kuva 17. Jäljennokuva jännityskorroosiosäröstä



Kuva 18. Poikkileikkauskuva jännityskorroosiosta

Jatkohitsien säröily

Hitsauksen yhteydessä voi aiheutua säröilyä myös viivästetysti. Compound-putkilla muista tyyppillisistä hitsaukseen liittyvistä, normaaleista säröilymekanismeista poikkeavana, on päittäishitseissä esiintyvä viivästynyt säröily pinnoitteessa. Tämä johtuu siitä, että ruostumattomasta teräksestä valmistettu pinnoite sekoittuu hiiliteräsosuuksien hitsauksessa käytettävään lisäaineeseen. Tällöin muodostuu paikallisesti rajapintaan ympäristöstä poikkeava martensiittinen rakenne, joka on hyvin kova ja hauras. Käytön aikana tälle alueelle kohdistuvat jännitykset, tai mahdollisesti jopa hitsauksen aiheuttamien jäännösjännitysten relaxoituminen, voivat ydintää särön alueelle. Täältä särö etenee heikointa rakennetta pitkin, joten särö etenee usein pinnoitehitsiä pitkin putken ulkopintaa kohti. (ASM Handbook 1993; Hitsauksen materiaalioppi 2014.)

3.1.2 Korroosio

Tulipesän compound-putkissa esiintyy sekä yleistä että paikallista korroosiota. Yleinen korroosio etenee pinnoitteessa hitaasti ja tasaisesti. Nestemäinen lipeä aiheuttaa korroosiota nopeammin kuin tulipesässä olevat kaasut. Tulipesässä savukaasujen mukana kulkeutuvat lipeäpizarat voivat päästä korkeallekin tulipesään, jopa tulistinalueelle asti. Lipeäpizaroiden aiheuttama korroosio voi näin ollen olla hyvinkin paikallista. Tulipesäkuormien noustessa viime vuosina, pinnoitteiden yleistä ja paikallista korroosiota on havaittu jopa ylimmistä ilma-aukoista.

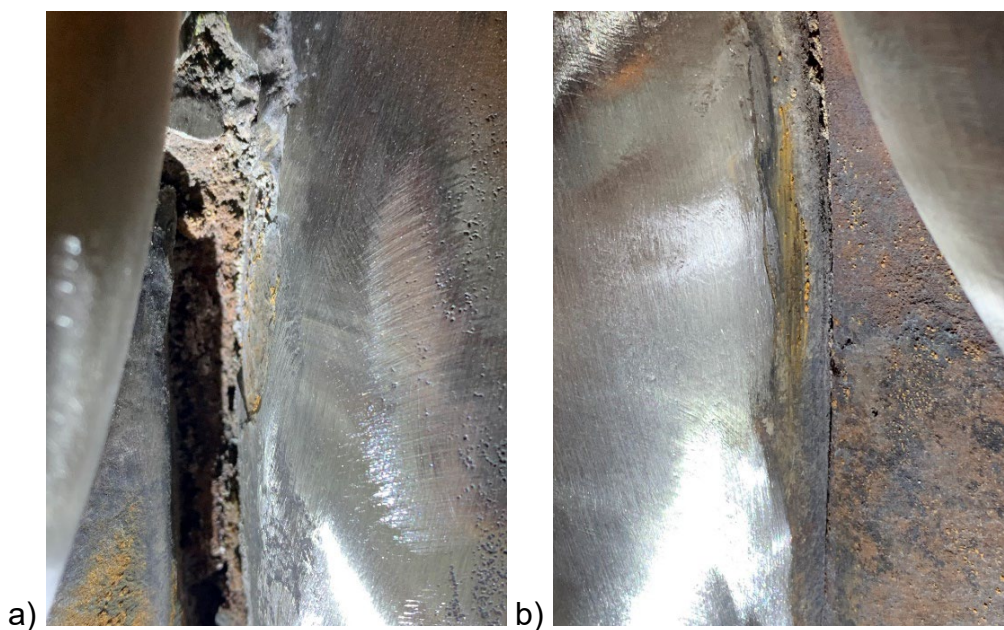
Tulipesässä havaitaan paikallista korroosiota erityisesti massausten rajapinnan kohdissa, joissa massausta on irronnut putken pinnasta ja lipeä pääsee putken ja massauksen väliin konsentroitumaan. Yleinen käsitys, ilman tarkempia tieteellisiä tutkimuksia on, että massausten lämpötila on korkeampi kuin vedellä jäähdytettyjen kattilaputkien. Näin ollen putkien pinnalle, massauksen rajalle, muodostuu alue, jossa lämpötila on paikallisesti sopiva syövyttävän suolasulan muodostumiselle. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016; Vakkilainen 2005.)

Suorassa kosketuksessa metallipinnan kanssa suolasulat aiheuttavat korroosiota. Aukkojen muurausten ympäristössä tätä paikallista korroosiota voi ai-

heuttaa suolasulan rikkipitoisuuden konsentroituminen, jolloin sulaan muodostuu polysulfideja (K_2S_x , Na_2S_x). Polysulfidit laskevat voimakkaasti suolan alinta sulamislämpötilaa. Sulamislämpötila voi laskea jopa normaalin käyttölämpötilan ja metallin pintalämpötilan lähelle. Kokeissa on todettu, että polysulfidisula aiheuttaa austeniittisen ruostumattoman teräksen nopean korroosion lämpötila-alueella >350 °C. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016; Pohjanne 2005; Sharp 2007.)

Paikallista korroosiota voi aiheutua eri mekanismeilla myös alemmissa lämpötiloissa (< 400 °C) (paikallista korroosiota havainnollistettu kuvassa 19). Tällöin korroosiomekanismina on NaOH:n aiheuttama korroosio, jossa sulat alkaliset hydroksidit, kuten natriumhydroksidi (NaOH) ja kaliumhydroksidi (KOH) reagoivat selektiivisesti kromiin ja kromioksidiin, jotka suojaavat austeniittista terästä korroosiolta. Pinnoitteen ollessa altistuneena sulalle natriumhydroksidille, syöpymänopeudet ovat tutkimusten mukaan olleet jopa 0,8 mm vuodessa. Näin suurella syöpymänopeudella, syöpymä saavuttaa hiiliteräsosuiden jo kahden vuoden käytön jälkeen. Korroosion edetessä hiiliteräsosuudelle asti, korroosionnopeus on tutkitusti huomattavasti pienempi kuin ruostumattoman teräspinnoitteeseen. (Tran 1995; Sharp 2007)

Korroosiota on havaittu myös putkien niin kutsutulta kylmältä puolelta. Kylmällä puolella tarkoitetaan aukkojen ohitusputkien ilmakaapin puoleista osaa. Esimerkiksi primääriaukoissa, joissa valusuutin tiivistetään ohitusputkeen tiivistemassalla, korroosiota tapahtuu tiivistemassan kulumisen jälkeen ilmakaapin puolella. Niin kutsutun kylmän puolen korroosion on tutkitusti todettu aiheutuvan myös yllä kuvatulla NaOH-korroosiomekanismilla. (Tran 1995.)



Kuva 19. Tertiääriaukoista havaittua paikallista korroosiota.

3.2 Tulipesän materiaalit

Tulipesän alaosissa käytetään pääsääntöisesti compound-putkia, joissa pinnoitteena käytetään AISI 304L, Alloy 825 tai joissakin tapauksissa Alloy 625 suojaamaan hiiliteräsputkea korroosiolta. Hiiliteräsosuuuden materiaaleina on käytetty P235GH-, P265GH- ja 16Mo3-materiaaleja. Materiaalit ja niiden kauppanimet on lueteltu taulukossa 1. (Pohjanne 2005.)

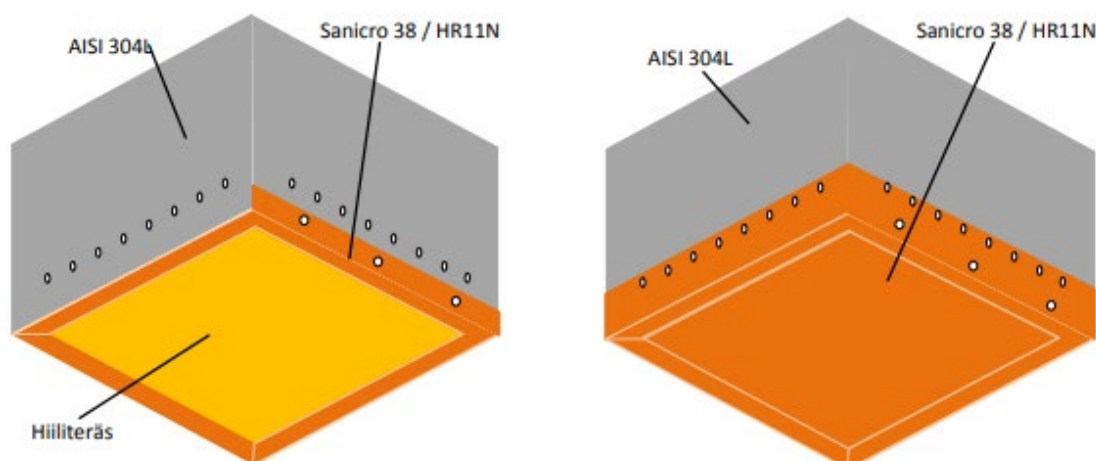
Taulukko 1. Esimerkkejä soodakattiloiden höyrystinputkissa käytetyistä materiaaleista. Pinnoitemateriaalit merkitty tähdellä.

Materiaali	Mahdollinen kauppanimi (toimittaja)	Koostumus (paino-%)
P235GH	-	C ≤ 0,16 %, Mn ≤ 1,2 %, Cr ≤ 0,3 %, Ni ≤ 0,03 %, Mo ≤ 0,08 %, Nb ≤ 0,020 %, Fe bal.
P265GH	4L7 (Sandvik)	C ≤ 0,2 %, Mn ≤ 1,4 %, Cr ≤ 0,3 %, Ni ≤ 0,03 %, Mo ≤ 0,08 %, Nb ≤ 0,020 %, Fe bal.
16Mo3	3Mo1 (Sandvik)	C 0,12-0,20 %, Mn 0,4-0,9 %, Cr ≤ 0,3 %, Ni ≤ 0,03 %, Mo ≤ 0,25-0,35 %, Nb - %, Fe bal.
AISI 304L (EN 1.4306) *	3R12 (Sandvik) TP304 (Sumitomo)	Cr 17-19 %, Ni 9-12 %, Mn 1,3 %, Fe bal. Cr 17-19 %, Ni 9-12 %, Mn 1,3 %, Fe bal.
AISI 310 (EN 1.4845) *	3RE28 (Sandvik) TP310S (Sumitomo)	Cr 24-26 %, Ni 19-22 %, Mn 1,8 %, Fe bal. Cr 24-26 %, Ni 19-22 %, Mn 1,8 %, Fe bal.

Alloy 825 (EN 2.4858) *	Sanicro 38 (Sandvik) HR11N (Sumitomo)	Cr 19–23,5 %, Ni 38–46 %, Mo 2,5–3,5 %, Mn 0,8 %, Fe bal. Cr 27–31 %, Ni 38–46 %, Mo 0,5–1,5 %, Mn ≤ 2,0 %, Fe bal.
Alloy 625 (EN 2.4626) *	Sanicro 63 (Sandvik) Sanicro 65 (Sandvik) Super 625 (Sumitomo)	Cr 21 %, Ni bal., Mo 8,5 %, Fe 8 %, Mn 0,5 %, Nb 3,5 % Cr 21 %, Ni bal., Mo 8,5 %, Fe 8 %, Mn 0,5 %, Nb ≤ 3,5 % Cr 20–23 %, Ni bal. %, Mo 8–10 %, Fe 14 %

Usein pääosa tulipesän compound-putkista on kustannussyistä pinnoitettu 304L-pinnoitteella, mutta esimerkiksi tulipesän alaosien ja aukkojen ohitusputkien materiaaliksi on usein valittu enemmän kromia ja nikkeliä sisältävä pinnoitemateriaali, kuten esimerkiksi Alloy 825, paremman korroosionkeston sekä paremman termisen väsymisen sietokyvyn takia. Tulipesän alaosien materiaalivalintoja on esitetty kuvassa 20.

Tulipesän pohjaputket voidaan kuitenkin valmistaa hiilliteräsputkesta ilman korroosiolta suojaavaa pinnoitetta. Tapauksissa, joissa pohjassa käytetään hiilliteräsputkia, kuitenkin reunimmaisiet putket, sekä pohjan taivealueet etu- ja takaseinällä, valmistetaan compound-putkista. Hiilliteräksen käyttö on mahdollista, koska keon pohjalla oleva jähmettynyt sula suojaa pohjaputkia, eikä korroosionopeus ole niin suuri, että suojaavaa pinnoitetta tarvittaisiin. Lisäksi hiilliteräs ei ole yhtä altis jännityskorroosiolle tulipesäolosuhteissa kuin compoundputken ruostumaton pinnoite. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)



Kuva 20. Tulipesän pohjan materiaaliratkaisuja

Compound-putkien pinnoitteiden paksuudet ovat tavallisesti 1,4 mm–1,8 mm ja painetta kantava osuuden seinämävahvuus on vähintään 3,66 mm–4,71 mm, riippuen putken ulkohalkaisijasta ja käytettävästä pinnoitemateriaalista. Putkien nimelliset dimensiot on esitetty taulukoissa 2 ja 3.

Hiiliteräsosuiden materiaalin valinta, niin pelkissä hiiliteräsputkissa, kuin compound-putkien runkoputkena, riippuvat materiaalin korkean lämpötilan lujuusominaisuuksien mukaan määritettävästä pienimmästä vaaditusta seinämävahvuudesta. Vaadittava seinämävahvuus, joka määritetään jokaisella kattilalla tapauskohtaisesti standardin ISO 12952-3, vesiputkikattilat, osa 3: paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta mukaisesti. Pienimpään vaadittuun seinämävahvuuteen vaikuttavat laskentapaine, suunnittelujännitys, lujuuskerroin ja putken ulkohalkaisija. Materiaalin korkean lämpötilan lujuusominaisuuksia kasvattamalla, voidaan pienentää vaadittavaa seinämävahvuutta, joten Sandvikilla on valittavana muun muassa P265GH- ja 16Mo3-hiiliteräsputki compound-putken painetta kantavaksi osaksi. (ISO 12952-3 2022.)

ISO 12952-3 mukaisesti kattilaputkien pienintä sallittua seinämävahvuutta määritettäessä, on otettava huomioon, ettei korroosiolta suojaavaa pinnoitetta oteta huomioon vaaditussa seinämävahvuudessa.

Taulukko 2. Sandvik Sanicro 38 pinnoitettujen standardikokoisten putkien nimellismitat. (AB Sandvik materials technology 2016)

Stock standard sizes

Outside diameter		Total minimum wall thickness		Thickness of stainless component		Minimum thickness of carbon steel component	
mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch
50.8	2	5.08	.200	1.42	.056	3.66	.144
63.5	2.5	6.53	.257	1.82	.072	4.71	.185
76.2	3	6.58	.259	1.86	.073	4.72	.186

Taulukko 3. Sandvik 304L-pinnoitettujen standardikokoisten putkien nimellismitat. (AB Sandvik materials technology 2016)

DIMENSIONS, STANDARD SIZES

OUTSIDE DIAMETER		TOTAL MINIMUM WALL THICKNESS		THICKNESS OF STAINLESS COMPONENT		MINIMUM THICKNESS OF COMPONENT	
mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch
38	1 1/2	5.00	0.197	1.30	0.051	3.70	0.146
50.8	2	5.08	0.200	1.30	0.051	3.78	0.149
63.5	2 1/2	6.53	0.257	1.65	0.065	4.88	0.192
76.2	3	6.58	0.259	1.65	0.065	4.93	0.194

304L-pinnoitteet

Tulipesän suojauksessa pääasiassa käytetty materiaali on 304L-pinnoite.

304L-pinnoitteen nimellinen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1. (AB Sandvik materials technology 2016.)

Sandvikin toimittamia 304L-compound-putkia on asennettu yli 300 soodakattilaan ympäri maailman ja ensimmäinen kaupallinen asennus on tehty 1972. Uusien kattiloiden kohdalla 304L-compoundia käytetään primääriaukkojen yläpuolelta aina musta-compound rajalle asti. Rajasauman korko vaihtelee kattiloiden välillä, mutta pääasiassa rajasauma sijaitsee viimeisten ilma-aukkojen yläpuolella. Suomessa soodakattiloiden kuorman ja käyttöasteen noustessa, myös korroosio-ongelmat nousevat, tästä syystä useissa suuremmissa kattiloissa on 304L-compound rajaa nostettu korkeammalle.

Superausteniittiset pinnoitteet

Enemmän kromia sisältävät pinnoitteet on tarkoitettu korvaamaan 304L-pinnoite tilanteissa, joissa olosuhteet vaativat materiaalilta parempaa korroosion kestoja, tai parempaa kestoja termistä väsymistä vastaan. Esimerkkinä Suomessa eniten käytetty Sandvik Sanicro 38-pinnoitemateriaali, jolla on normaalia 304L-pinnoitetta korkeampi kromi- ja nikkelpitoisuus. Muita vaihtoehtoja olisi esimerkiksi Sumitomo HR11N.

Sanicro 38 on tarkoitettu soodakattiloiden pohjan materiaaliksi sen huomattavasti paremman korroosiokeston takia. Sanicro 38:lla on 304L-pinnoitetta huomattavasti parempi kestävyys jännityskorroosiota vastaan ja termistä väsymistä vastaan. Ensimmäinen kokonaan Sanicro 38-materiaalilla pinnoitettu tulipesän pohja on toimitettu Metsä Fibren Rauman tehtaalle vuonna 1996. (Sandvik Tryckeri AB 2003.)

Viime vuosina enemmän kromia ja nikkeliä sisältävien pinnoitteiden käyttö on lisääntynyt niiden paremman korroosiokeston myötä. Parempaa korroosionkestävyyttä pyritään saamaan etenkin aukkoputkien osalta, joissa pinnoitteiden kulumat ovat aiheuttaneet suuria ongelmia pitkillä ajojaksoilla. Tästä syystä nykyään suositellaan korkeakuormaisissa kattiloissa kaikkien aukkojen ohitusputkien materiaaliksi vähintään Sanicro 38:aa. (Pohjanne 2005; Yli-Olli 2022.)

3.3 Soodakattilan erityisvaatimukset ISO 12952-5 Liite E

Standardissa ISO 12952-5, Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteisto, osa 5: paineenalaisten osien valmistus, määritetään soodakattiloiden rakennetta ja valmistusta koskevat erityisvaatimukset liitteessä E. Erityisvaatimukset ovat lisävaateita standardin muille vaatimuksille.

Compound-putkien hitsauksen suoritusta tarkennetaan kohdassa E.6.2. Standardi määrittää jatkohitsien tunkeumasta seuraavaa: Pinnoitehitsin tunkeuma ei saa tunkeutua olennaisesti ferriittiseen, painetta kantavaan runko osaan. Tunkeutumaton minimiseinämävahvuus tulee aina säilyttää.

Standardi antaa kuitenkin mahdollisuuden tunkeutua vähimmäisseinämävahvuuteen tietyin rajoituksin:

- Pinnoitushitsaus voi kuitenkin tunkeutua vähimmäisseinämävahvuuteen (max 1,5 mm), mikäli pinnoitteen ja hitsin lujuus- ja kovuusominaisuudet täyttävät painettakantavan osan materiaaliominaisuudet.
- Manuaalista hitsausta suoritettaessa jokaisen hitsaajan on tehtävä valmistuskokeet / työkokeet ja rikkomaton aineenkoetus on tehtävä standardin vaatimusten mukaan, pinnoitteen hitsauksen jälkeen. Suomessa kuitenkin suoritetaan volumetrinen tarkastus (röntgentar-

kastus) painetta kantavalle hiiliteräspankulle jo ennen pinnoitteen hitsausta. Pinnoitteen hitsaamisen jälkeen pinnoitehitti tarkastetaan pintatarkastuksin. Tarkastukset esitetty tarkemmin kappaleessa 4.1.

Compound-alueen erityisvaateissa esitetyt rajoitukset vähimmäisvähvyyteen tunkeutumisesta asettavat siten rajoitteita myös liitoksen esivalmistelussa tehtävälle kuorinnalle. Pinnoitteen kuorinnan jälkeen on varmistettava putken hiiliteräspannuden riittävä seinämävahvuus mittauksin. (ISO 12952-5, 2021.)

4 VUOSIHUOLLOT

Soodakattilan tulipesässä tapahtuvien vaurioiden havaitsemiseksi suoritetaan vuosihuolloissa tarkastuksia erilaisin menetelmin. Tarkastuksilla pyritään luomaan edellytykset mahdollisimman turvalliselle käytölle, sekä estämään odottamattomat tuotannon keskeytykset.

Suomen Soodakattilyhdistyksen tekemässä suosituksessa soodakattilan materiaaleista ja tarkastuksista annetaan suositukset tarkastusväleistä ja tekniikoista. Soodakattiloiden määräaikaivaatimukset tulevat kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksestä painelaiteturvallisuudesta 953/1999, jossa vähimmäisvaatimukseksi on asetettu käyttötarkastus joka toisena vuotena ja sisäpuolinen tarkastus neljän vuoden välein. Näiden lisäksi joka kahdeksas vuosi vaaditaan painekoe. Suositusten lähtökohtana on, että jokaisessa vuosihuoltoisakissa tehdään tarkastuksia. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Vuosihuoltojen välit vaihtelevat laitoskohtaisesti vuoden ajoksesta aina kahden vuoden ajokseen vuosihuoltojen välillä.

4.1 NDT-tarkastukset

Soodakattilan tarkastuksia suoritetaan vuosihuoltojen aikana erilaisin NDT-tarkastuksin, joilla pyritään havaitsemaan vaurioita ja todentamaan muun muassa jäljellä olevia seinämävahvuuksia. NDT-tarkastuksilla tarkoitetaan ainetta rikkomattomia tarkastustekniikoita (Non-destructive testing). NDT-menetelmät

ovat toisiaan tukevia menetelmiä ja 100 %:n tarkastuslaajuudellakin kohde tulee harvoin täysin luotettavasti tarkastetuksi, eikä näin ollen 100 %:n varmuudella sisällä vikoja. Tarkastusmenetelmät valitaan ensisijaisesti etsittävän vauriomekanismin perusteella, mutta myös tarkastettava materiaali vaikuttaa menetelmän valintaan. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Tarkastusmenetelmistä tässä työssä käsitellään NDT-tarkastusmenetelmistä visuaalisen tarkastuksen (VT), tunkeumanestetarkastuksen (PT), röntgentarkastus (RT), pinnoitteen paksuusmittauksen (PPM) ja ultraäänitarkastuksen (UT) osalta paksuusmittauksen.

NDT-tarkastukset ovat standardeihin perustuvia tarkastuksia, pois lukien pinnoitteen paksuusmittaus, joka ei ole standardoitu testausmenetelmä. Standardeilla ja pätevöinnillä pyritään varmistamaan tarkastustulosten toistettavuus ja arvioinnin luotettavuus, koska menetelmien suoritukseen vaikuttaa suuresti tarkastushenkilön oma suoritus. Koska NDT-tarkastajille ei Suomessa ole koulutusohjelmia, varmistetaan pätevöinnillä tarkastushenkilön ymmärrys ja tietotaito kyseistä menetelmää kohtaan. Pätevöinti perustuu henkilösertifiointijärjestelmään ja Suomessa käytetään yleisesti ISO-järjestelmän mukaista pätevöintiä. ISO (the International Organization for Standardization) on maailmanlaajuinen kansallisten standardisoimisjärjestöjen liitto, jonka mukaisesta pätevöinnistä Suomessa vastaa KIWA Sertifiointi.

Visuaalinen tarkastus

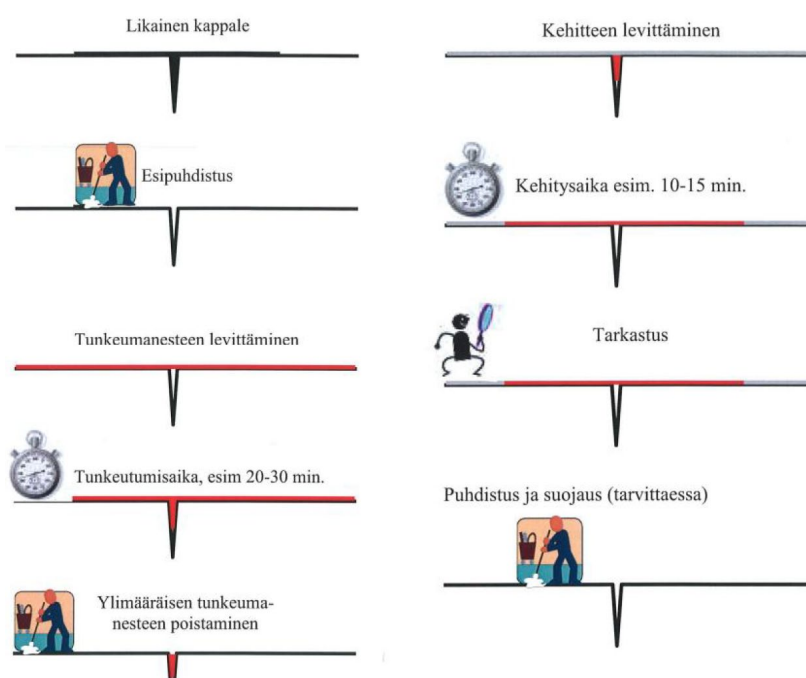
Visuaalisella tarkastuksella tarkoitetaan tarkastuksia, jotka perustuvat ainoastaan visuaalisesti havaittaviin vaurioihin tai vikoihin. Visuaalinen tarkastus on standardoitu menetelmä, mutta käytössä olleiden komponenttien, kuten vuosi- huolloissa suoritettavien tarkastuksien kohdalla, havainnot ja kirjaukset pohjautuvat pääasiassa tarkastajan kokemukseen ja ammattitaitoon. Visuaalisella tarkastuksella pyritään löytämään käytön aikana tapahtuneita muutoksia, joita tarpeen mukaan varmistetaan ja täydennetään muiden NDT-tarkastuksien avulla.

Uusien komponenttien valmistuksessa visuaalisella tarkastuksella on suuri merkitys etenkin compound-alueen komponentteja valmistettaessa. Compound-alueen haastavat olosuhteet luovat erityisvaatimuksia muun muassa hitsausliitoksille, sekä materiaalien pinnan muotoihin.

Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus on pintatarkastusmenetelmä, joka perustuu matalan viskositeetin ja pintajännityksen omaavan nesteen tunkeutumiseen pinnassa oleviin epäjatkuvuuskohtiin. Menetelmä soveltuu kaikille materiaaleille, joiden pinta ei ole huokoinen, eikä materiaali itsessään ime nestettä.

Tunkeumanestetarkastus monesta peräkkäisestä työvaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastettava pinta on puhdistettava ja kuivattava huolellisesti, siten ettei pinnalla ole mitään epäpuhtauksia, jotka voisivat sitoa tunkeumanestettä ja häiritä tarkastuksia. Puhdistuksen jälkeen tarkastettavalle pinnalle levitetään tunkeumaneste, jonka annetaan tunkeutua 20–30 minuuttia, olosuhteista ja materiaalista riippuen. Tunkeutumisaikojen jälkeen ylimääräinen neste poistetaan liuotinta tai vettä hyväksi käyttäen ja alueelle levitetään kehite. Mikäli tarkastetulla alueella on epäjatkuvuuskohtia, kehite imee sisäänsä tunkeumanestettä, joka muodostaa kehitteeseen selvästi havaittavan, suurentuneen näyttämän. (Toivonen 2016.)



Kuva 21. Tunkeumanestetarkastuksen vaiheet

Röntgentarkastus

Röntgentarkastusta käytetään hitsien ja materiaalien läpivalaisemiseen ja materiaalin sisäisten virheiden tarkastukseen. Röntgentarkastusten avulla voidaan havaita esimerkiksi hitsausvirheet, jotka eivät ole pintaan asti avoimia. Laitteisto koostuu säteilylähteestä ja tallennuslaitteesta, joka voi olla esimerkiksi digitaalinen detektoripaneeli tai filmi.

Säteilylähteenä voidaan käyttää joko sähköisesti toimivaa säteilylähdettä, röntgenkameraa, tai radioaktiivista isotooppia, joka ei tarvitse sähköä. NDT-tarkastuksissa käytettävät isotoopit ovat pääasiassa koboltti-60 ja iridium-192. Pääasiassa tarkastuksissa käytetään kuitenkin röntgenkameroita, näiden ollessa säteilyturvallisuuden kannalta turvallisempia, sekä kuvalaadun kannalta parempi vaihtoehto. Sähköisesti tuotetussa säteilylähteessä säteilyn intensiteettiä, eli säteilyn läpäisykykyä voidaan säätää tuotetun korkeajännitteen avulla, joten ohuilla materiaaleilla kuvatarkkuus on parempi. Turvallisuuskulmasta sähköinen röntgenlaite on parempi, sen tuottaman säteilyn loppuessa, kun laitteen sähkönsaanti loppuu. Isotoopin säteilyä ei pysty katkaisemaan, joten laitteiston vaurioitilanteessa säteily aiheuttaa suuremman riskin kuin sähköinen röntgenlaite. (Radiografinen tarkastus 2010.)

Pinnoitteenpaksuusmittaus

Pinnoitteenpaksuusmittausta käytetään compound-putkien korroosiosuojana olevan pinnoitemateriaalin paksuuden määrittämiseen. Pinnoitepaksuusmittaus perustuu pyörrevirtamenetelmään, joka tunnistaa ferromagneettisen materiaalin ei magneettisen kalvon alta ja mittaa tämän kalvon paksuuden. Mittaus suoritetaan joko skannaamalla tai painamalla anturia pinnoitteen päälle.

Tarkastukset kohdennetaan pääosin visuaalisen tarkastuksen perusteella havaittuihin korroosiokohtiin, sekä aukkoputkien taivutusalueille, joiden on havaittu olevan alttiita pinnoitteen kulumille.

Kuluman seuranta varten on valmistusvaiheessa harkittava soodakattilan compound-putkista valmistettujen aukkojen pinnoitteiden 0-pistemittausten tekoa kuluma-alttiiden kohtien osalta. 0-pistemittaus helpottaa kunnonseurannan näkökulmasta kulumaseuranta ja sitä kautta myös korjaustoimenpiteitä.

Ultraäänitarkastus

Ultraäänellä tarkoitetaan mekaanista aaltoliikettä, joka etenee väliaineessa. Perinteisesti ultraääniluotaimen taajuudet metallien tarkastuksissa ovat 2 – 5 MHz. Ultraäänitarkastus perustuu ultraääniaaltojen läpäisykykyyn ja heijastukseen materiaalissa. Paksuusmittauksessa hyödynnetään menetelmän heijastukseen perustuvaa ominaisuutta, jossa materiaalin paksuus määritetään laskemalla aika, jonka ääneltä kestää kulkea materiaalin läpi ja palata takaisin luotaimeen. Ultraäänien nopeus materiaalissa riippuu tarkastettavan materiaalin ominaisuuksista ja laitteiston kalibrointi tulisikin tehdä aina vastaavaan materiaalin kuin tarkastettavana oleva materiaali on. (Ultraäänitarkastus 2013.)

Paksuusmittausta käytetään putkien seinämävahvuuden varmistamiseksi etenkin tilanteissa, joissa korroosiosuoja on kulunut pois. Menetelmällä pystytään näin ollen varmistamaan riittävä seinämävahvuus ainetta rikkomatta.

4.2 Vaurioiden korjaukset

Soodakattiloiden vuosihuoltojen korjaustyöt pyritään tekemään mahdollisimman suunnitellusti. Paineastian korjauksista mainitaan soodakattilayhdistyksen kestoisuustyöryhmän tekemässä ohjeistuksessa seuraavaa: *Soodakattilan käyttövarmuuden ja käytöturvallisuuden 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 vuotovauriopaikat ovat tällaisia.* (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

Kuten ohjeessakin mainitaan, kattiloilla tulee tapauksia, jolloin vauriot ovat yllättäviä, eikä näihin ole varauduttu. Tästä huolimatta korjaukset on tehtävä laitteiden asetukset ja turvallisuusnäkökulmat täyttävien menetelmin. Tätä varten laitoksilla tulisi olla kattiloiden jokaiseen lämpöpintaan kohtuullinen määrä varaosaputkea, jolla vauriot voidaan korjata.

Ennen compound-putken korjaushitsausta tulisi vauriomekanismi olla selvillä, ettei tilannetta pahenneta esimerkiksi hitsauksen aiheuttamalla lisäjännityksillä korjattavan kohdan vieressä. Suomen Soodakattilayhdistyksen ohjeistuksessa

määritetään korjaushitsauksista tapaukset, jolloin vauriota ei saa korjaushitsata, kuinka monta kertaa korjaushitsaus sallitaan, kuinka suuren pinta-alan voi korjaushitsata ja kuinka lähellä korjaushitsauskohdat voivat olla toisiaan.

Ohjeistuksen perusteella compound-putkia ei saa korjaushitsata, mikäli putkista havaitaan ylikuumentumisen merkkejä ruostumattomassa pinnoitteessa, tai mikäli putkissa havaitaan lommoja, kolhuja tai soikeutta. Näissä tapauksissa compound-putki tulee vaihtaa.

Mikäli putkista havaitaan esimerkiksi säröjä, on säröt ensin poistettava, jonka jälkeen on varmistettava joko pinnoitteen tai hiiliteräsosuuuden seinämävahvuus. Hiiliteräsosuuuden seinämävahvuuden kasvattamista täytehitsaamalla seinämän vähimmäispaksuuden saavuttamiseksi ei suositella. Mikäli kriteerit täyttyvät, voi putken pinnoitushitsausta harkita.

Samaa vauriota voi korjata maksimissaan kolme kertaa ja rajoitus koskee myös korjauksessa syntyviä säröjä. Korjauksissa on otettava huomioon myös korjausalueen koko ja korjauskohtien etäisyys toisistaan. Korjauskohdan pinta-ala tulee harkita tapauskohtaisesti, muun muassa sijainnin mukaan. Kahden korjauskohdan etäisyyden tulee olla suurempi kuin suuremman korjauskohdan koko. (Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset 2016.)

5 LAADUNHALLINTA

ISO 9000, laadunhallintajärjestelmät, perusteet ja sanasto standardissa esittää laadunhallintajärjestelmien keskeiset käsitteet, periaatteet ja sanasto. Nämä toimivat muiden laadunhallintajärjestelmien perustana. Laadunhallinnalla pyritään antamaan organisaatiolle kyky vastata toimintaympäristön asettamiin haasteisiin. Laadun merkitys ulottuu asiakastyytyvyyttä pidemmälle ja sillä voi olla myös suora vaikutus organisaation maineeseen. Organisaation tavoitteet, prosessit ja resurssit, jotka tarvitaan haluttujen tulosten saavuttamiseen, katetaan laadunhallintajärjestelmien avulla. (ISO 9000 2015.)

Laadunhallinta kuuluu olennaisena osana soodakattilan elinkaaren hallintaa. Valmistusta ohjataan viranomais määräyksillä sekä standardeilla, joissa esitetään vähimmäisvaatimukset. Laadunhallinta alkaa jo projektin esisuunnitteluvaiheessa laadunvarmistuksella.

Laadunvarmistus eli quality assurance, jäljempänä QA. QA määritellään ISO 9000 standardissa ”osaksi laadunhallintaa, jonka tarkoituksena on saada aikaan luottamus siihen, että laatuvaatimukset täyttyvät”. Laadunvarmistuksen tarkoituksena on varmistaa lopputuotteelta vaadittu laatu. Laadunvarmistuksella pyritään ennalta estämään prosessit ja menetelmät, jotka voivat aiheuttaa virheitä lopputuotteessa.

Laadunohjaus tai laadunvalvonta eli quality control, jäljempänä QC. QC määritellään ISO 9000 -standardissa ”osaksi laadunhallintaa, joka keskittyy laatuvaatimusten täyttämiseen”. Laadunvalvonta on suorittava toimi, joka pyrkii havaitsemaan poikkeamat laatuvaatimuksiin. Laadunvalvonta valvoo myös, että sovittuja toimintatapoja ja ohjeita noudatetaan.

Työssä keskitytään laadunvalvonnan suoritukseen ja ohjeistukseen, mutta laadunvalvonnan ollessa tiukasti kytkettynä laadunvarmistukseen, esitellään seuraavaksi laadunhallinnasta laadunvarmistus sekä laadunvalvonta termeinä.

5.1 Laadunvarmistus

ISO 9001, laadunhallintajärjestelmät, vaatimukset, standardissa ulkoisesti tuotettujen palvelujen ja tuotteiden osalta velvoitetaan organisaatiota varmistamaan tuotteiden ja palveluiden täyttävän vaatimukset. Tätä varten organisaation on määriteltävä hallintakeinot ja kriteerit, sekä sovellettava niitä arviointiin. Vaatimukset täyttävän tuotteiden laadun varmistamiseksi standardi velvoittaa organisaatiota laatimaan todentamistavat tai -toiminnot.

Laadunvarmistuksen apuvälineenä laadun toteamiseksi on muun muassa Inspection and Testing Plan, jäljempänä ITP. Sen avulla määritetään, kuinka komponentin laatu varmistetaan eri tuotannon vaiheissa. ITP luodaan projek-

tin alkuvaiheessa ja se on valmistusmenetelmä-, komponentti- ja materiaali-kohtainen. ITP:ssä määritetään eri valmistusvaiheiden tarkastustasot ja mahdolliset lisävaateet tarkastuksille ja testauksille.

Laadunvarmistuksen tekijällä tulee olla tietämys valmistusmenetelmistä sekä vaurioitumismekanismeista soodakattilassa. Etenkin soodakattilan sularäjähdyksen riskien ja compound-alueen erityisvaateiden kautta laadunvarmistuksen tekijällä tulee olla vahva ymmärrys laatuvaatimuksista.

5.2 Laadunvalvonta

Laadunvalvonnalla seurataan sovittujen toimintatapojen ja laatuvaatimusten täyttymistä. Laadunvalvonta seuraa projektin laadullista etenemää valmistuksen eri vaiheissa. Valvonnalla pyritään havaitsemaan ja dokumentoimaan mahdolliset poikkeamat sekä reagoimaan näihin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tarvittavalla vakavuudella. Valvonnalla pyritään estämään tai vähintään katkaisemaan systemaattisten virheiden muodostuminen.

Soodakattilan compound-alueen erityisvaateiden takia laadunvalvonta on erityisen tärkeää, sillä mahdolliset vakavat poikkeamat voivat aiheuttaa sularäjähdykseen johtavan vaurion. Compound-alueen komponenttien valmistuksessa laadunvalvonnassa tärkeimpiä tarkastuskohteita ovat standardin mukainen valmistus, oikeat työmenetelmät ja laadun lisävaatimusten noudattaminen.

Uusien komponenttien valmistuksessa laadunvalvonta keskittyy oikeiden standardien mukaiseen valmistukseen, työohjeiden noudattamiseen ja valmistuksen laadun täyttymiseen.

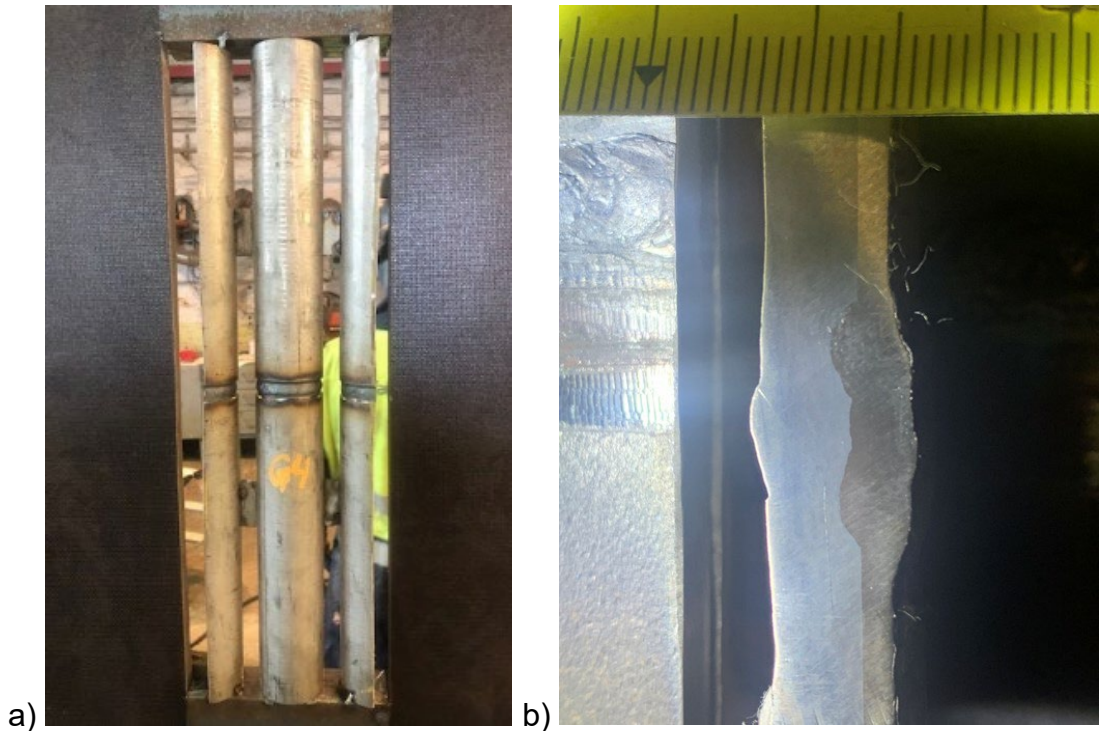
6 OHJEISTUS ILMA-AUKKOJEN VALMISTUKSEN JA ASENNUKSEN LAADUNVALVONNASTA

Ohjeistuksen tavoitteena on kuvata aukkopaneelien valmistuksen laadunvalvontaa ja siinä esiintyviä valmistuksellisia haasteita. Tämän lisäksi tavoitteena on selkeyttää laadunvalvonnan prosessia ja sen eri vaiheissa tehtäviä toimenpiteitä.

6.1 Valmistusdokumentit ja työkokeet

Laadunvalvonnan tarkastukset konepajavalmistuksessa on syytä aloittaa dokumenttien läpikäynnillä. Dokumenteista on varmistettava käytettävät standardit, käytettävät materiaalit, piirustukset, hitsausohjeet sekä hitsaajien pätevyydet ja työkokeiden suoritukset. Dokumentaation läpikäynnin yhteydessä on varmistettava, että mahdolliset asiakkaan lisävaatimukset on täytetty. Lisävaatimuksia voidaan esittää esimerkiksi pinnoitepaksuudenmittausten suorituksesta korroosiolle alttiille kohdille. Myös mahdolliset suoritettavat NDT-tarkastukset on syytä käydä läpi ja varmistaa onko tarkastuksissa havaittu virheitä ja näiden perusteella tehty korjauksia jo valmistusvaiheessa. Dokumenttien tarkastuksen yhteydessä on myös varmistettava, että mahdolliset poikkeamat on dokumentoitu oikein.

Laadunvalvonnan näkökulmasta compound-alueen erityisvaateet on syytä ottaa erityistarkkailuun ja esimerkiksi työkokeiden suoritus tulee suorittaa kuten työ suoritettaisiin työmaalla. Työkokeita tehdessä on putken oltava samassa asennossa, kuin työmaalla. Samoin putken vieressä tulee olla haittaputket samalla etäisyydellä, kuin hitsattavassa kohteessa. Koejärjestelyistä ja tunkeuman määrittämisestä on annettu esimerkki kuvassa 20 a) ja b).

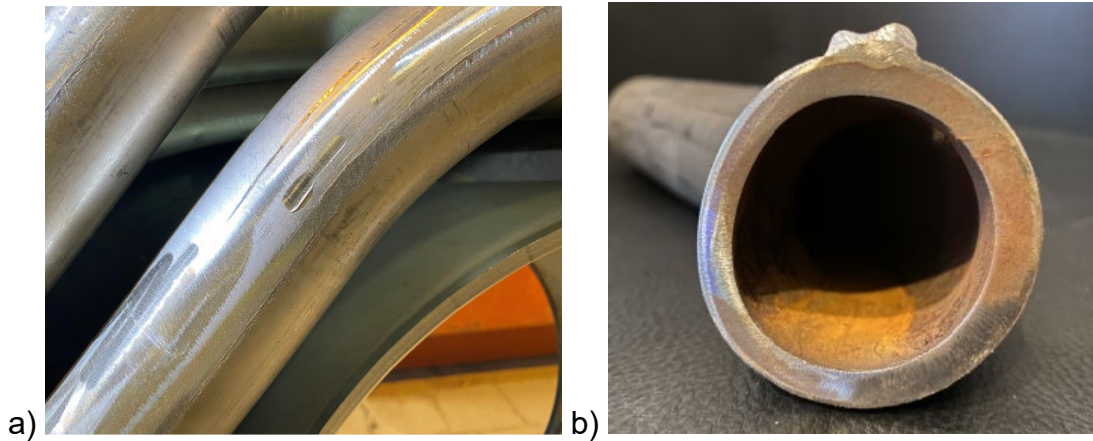


Kuva 22. Kuva a) Esimerkki työkojärjestelystä ennen tuotannon aloitusta ja b) tunkeuman määräys valmiin liitoksen poikkileikkauksesta.

6.2 Esivalmistus

Valmistus konepajalla aloitetaan pääsääntöisesti aukkoputkien taivutuksilla. Tulipesän aukkojen valmistuksessa putket taivutetaan kylmätaivutuksina, aukon mallin mukaan. Taivutukset suoritetaan lestejä käyttäen ja lestit voivat aiheuttaa pinnoitteisiin esimerkiksi pinnoitteen ohenemaa ja teräviä jälkiä, jotka korroosionäkökulmasta ovat molemmat loppukäyttäjän kannalta otettava huomioon. Mikäli taivutuksissa on selvästi havaittavissa pinnoitteen ohenemaa, tai hiontajälkiä, on näille kohdille suoritettava pinnoitepaksuuden mittaukset todellisen pinnoitepaksuuden lähtötilanteen selvittämiseksi. Taivutuksessa aiheutuneita jälkiä ja putken epäpyöreyttä on kuvattu kuvassa 23 a) ja b).

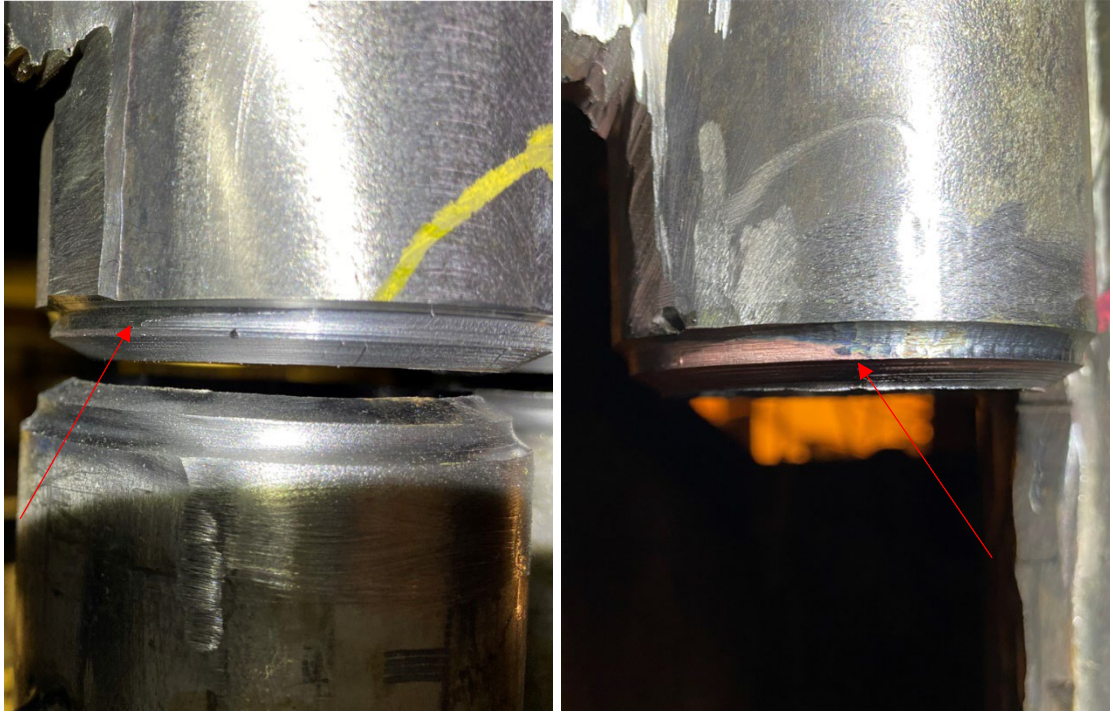
Compound-putkien valmistuksessa voi syntyä visuaalisesti havaittavia pinnoitevirheitä. Näitä vikoja on jo mahdollisesti hiottu putkien valmistuksen yhteydessä, joten putkien hiontakohtien pinnoitepaksuudet on varmistettava pinnoitepaksuusmittauksin. Korroosion estämiseksi kaikki terävät nurkat on pyrittävä hiomaan pois, näin estetään lipeän kertyminen yksittäiseen kohtaan ja vähennetään riskiä pinnoitteen korroosioon. Taivutusten jälkeinen mahdollinen epäpyöreys on myös varmistettava.



Kuva 23. Esimerkkejä taivutusten jälkeisten tarkastusten havainnoista. A) kolhun aiheuttama pinnoitehävikki ja terävä reuna, b) putken epäpyöreyttä taivutuksen jälkeen.

Compound-alueen putkien jatkohitsien valmistelussa suoritettavan kuorinnan jälkeinen putkien seinämävahvuuden mittaaminen on varmistettava ennen hiiliteräsosuuksien hitsaamista. Compound-pinnoitteen täydellinen poistuminen on varmistettava, kuitenkin siten, että kyseisen soodakattilan pienintä sallittua seinämävahvuutta ei aliteta. Myös hitsin tunkeuma on otettava huomioon. Asennuksen näkökulmasta on myös varmistettava kuorinnan riittävä pituus, jolla varmistetaan se, ettei hiiliteräsosuuksien hitsi pääse sekoittumaan austeniittiseen pinnoitteeseen. Austeniittisen pinnoitemateriaalin poistuminen voidaan varmistaa esimerkiksi kuparisulfaatin avulla, mikäli visuaalisesti poistumista ei pystytä varmistamaan. Kuparisulfaattilla tarkastettaessa, kostutetaan liitospinta joko kuparisulfaattiin kastetun pensselin tai reilusti kostutetun pumppulin avulla. Kuparisulfaatti värjää hiiliteräksen hieman kuparin väriseksi ja austeniittinen osuus pysyy värjäytymättömänä. Mikäli kuorinnan jälkeen aluetta on hiottu käsin, on ainut mahdollisuus varmistaa austeniittisen pinnoitteen poistuminen kuparisulfaatin avulla. Kuvassa 24 on esitetty esimerkit kuorintojen tarkastamisesta ja havainnoista.

Kuorintojen mittaamisessa työntömitalla on havaittu tulevan jopa 0,5 mm heittoa mittaustuloksissa, pikamittakellolla suoritettuihin mittauksiin verrattuna. Näin ollen kuorintojen mittaukset tulee aina suorittaa pikamittakellolla tai vastaavalla putkien seinämävahvuuden mittaamiseen tarkoitetulla mittalaitteella. Kuvassa 25 on esitetty esimerkki kuorintojen mittaukseen käytettävästä pikamittakellosta.



Kuva 24. Kuorintojen visuaalinen tarkastus. A) havaittavissa kirkas pinnoite ilman kuparisulfaattia ja b) austeniittinen pinnoite, kuparisulfaattilla varmistettuna. Austeniittisen pinnoitteen ja hiiliteräksen raja merkitty punaisella nuolella.



Kuva 25. Kuorintojen mittaukseen käytettävä pikamittakello.

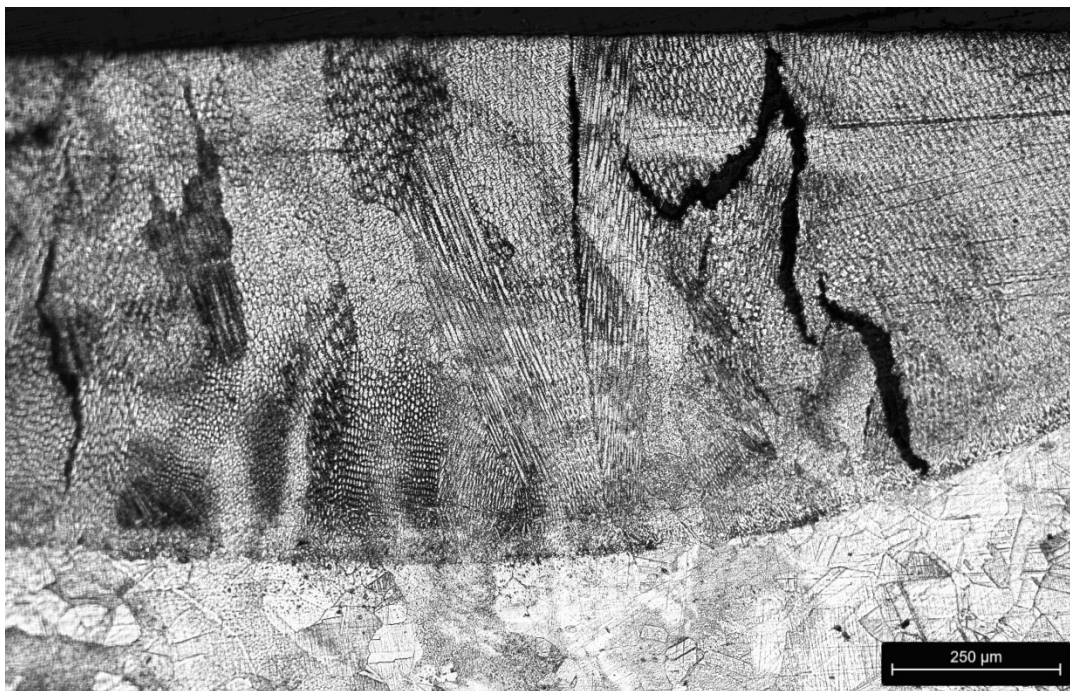
Evähitsien hitsauksen jälkeen paneeleista on tarkastettava evähitsien jouhea liittymä sekä putkeen, että evään. Evät hitsataan konepajoilla automaattikooneilla, joten viat voivat olla systemaattisia. Mikäli evähitseistä havaitaan paljon korjauskohtia, on nämä syytä kirjata ylös ja kartoittaa tulevia seisakkeja ja seurantatarkastuksia varten.

Massakoteloiden hitsauksilta vaaditaan usein pintatarkastuksia esimerkiksi 10 %:n otannalla. Massakoteloiden hitsauksissa on varmistettava etenkin lope-tuskohtien virheettömyys, sekä etenkin tiukkojen nurkkien hitsin laatu, mikäli hitsaukset on suoritettu lankakoneella. Massakoteloiden liitoshitsit ovat paine-runkoon liittyviä hitsejä, joten säröt näissäkin hitseissä voivat aiheuttaa vaka-via vaurioita.

Aukkojen valmistuksessa ja asennuksissa on myös kiinnitettävä huomiota mahdollisiin hitsauksessa aiheutuneisiin sytytysjälkiin sekä roiskeisiin. Sytytys-jäljet voivat aiheuttaa pinnoitteessa korroosionopeuden kasvua. Kuvassa 26 esitetty raapaisujäljen kohdalle keskittyneestä korroosiosta ja kuvassa 27 austeniittiseen putkeen tullut vaurio sytytysjäljestä.



Kuva 26. Käytössä syntynyt, sytytysjälkeen keskittyneestä korroosiosta seinäputkessa.



Kuva 27. Austeniittisen putken raapaisujäljestä tehty jäljenne. Materiaali on sulanut ja säröilyä on havaittavissa noin 0,7 mm syvyyteen asti.

Ennen asennusta

Paneelin valmistuksen ollessa loppusuoralla on syytä suorittaa visuaalinen tarkastus tuotteelle, jossa varmistetaan paneelin laadun riittävä taso. Tässä tarkastuksessa varmistetaan muun muassa putkien suoruus, varmistetaan ettei putkissa ole havaittavissa lämmittämisestä johtuvia värimuutoksia ja että putket ovat samassa tasossa. Etenkin halkaisijaltaan isojen aukkojen valmistuksessa ja käytössä on havaittu lievää sisimpien putkien ulos työntymistä. Tämä aiheuttaa rasituksia evähitseille ja voi aiheuttaa säröilyä näihin. Kuvissa 29 ja 30 on havainnollistettu esimerkillä putkien tason eroavaisuuden mittausta.

Putkien suoruuden ja putkien linjan voi tarkastaa esimerkiksi oikolaudan avulla. Mikäli poikkeamia havaitaan, mitataan poikkeamat siten, että mittaus on toistettavissa myös myöhemmin. Valmistusvaiheessa kirjattavat poikkeamat helpottavat käytön aikaista seuranta ja vauriotapauksissa vaurioiden syiden selvittämiseksi on paremmin dataa käytössä.



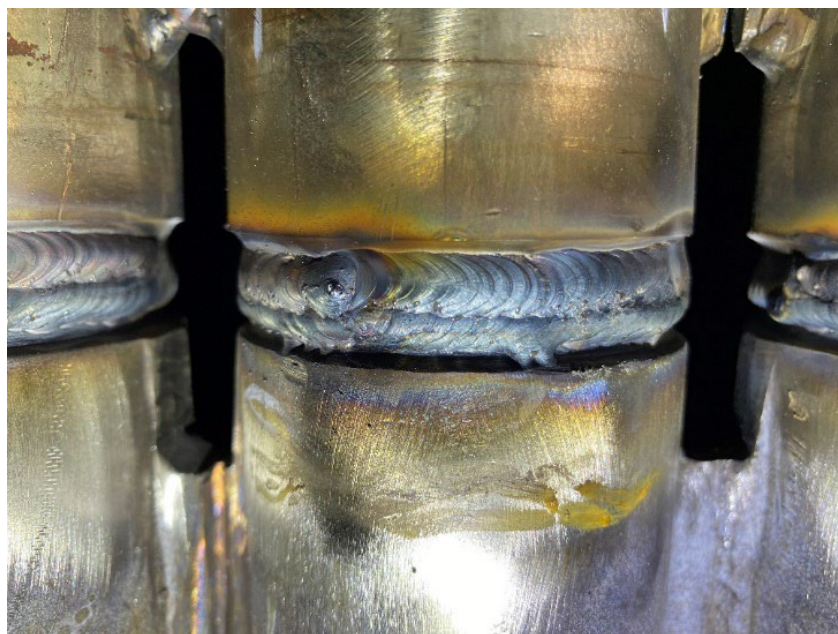
Kuva 28. Putkien linjauksen tarkastus oikolaudan avulla.



Kuva 29. Putkien tason eron mittaus oikolaudan avulla. Putket voidaan mitata järjestelyllä ja seurata käytön aikana tapahtuuko putkien linjauksessa muutoksia.

6.3 Asennus

Compound-alueen jatkohitsien hiiliteräsosuuden hitsauksen jälkeen suoritettavassa visuaalisessa tarkastuksessa on varmistettava, ettei hiiliteräsosuuden hitsaus ole sekoittunut pinnoitteeseen. Mikäli sekoittumista on tapahtunut, on sekoittunut alue hiottava ennen pinnoituksen hitsausta. Hiiliteräsosuuden hitsauksen sekoittuminen pinnoitteeseen on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Esimerkki hiiliteräsosuuden hitsin sekoittumisesta korroosiolta suojaavaan pinnoitteeseen.

Compound-alueen hitsauksissa on otettava huomioon standardissa ISO 12952-6, vesiputkikattilat, osa 6, kattilan paineenalaisten osien valmistuksen aikainen tarkastus, dokumentointi ja merkintä, esitetyt vaatimukset. Pintavirheiden hyväksymisrajat esitetään standardin taulukossa 5. Korkean kuvun lisähuomiona on ”jouhea liittymä vaaditaan”.

Aukkojen jatkohitsien pinnoitushitsauksista erityishuomiota on kiinnitettävä erityishuomiota pinnoitushitsauksen jouheaan liittymään ja kuvun korkeuteen. Standardin hyväksymisrajan jyrkälle liittymälle on 110°:n liittymäkulma. Korkea kupu yhdistettynä jyrkkään liittymään mahdollistaa putken pinnoitteen kiihtynyttä korroosiota seisovan lipeän takia. Tästä syystä pinnoitushitsien kuvun korkeuden tulisi olla maltillinen ja liittymän jouhea. Pinnoitushitsin jouhea liittymä ja maltillinen palkkorkeus on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Esimerkki jouheasta liittymästä ja maltillisesta pinnoitushitsin kuvusta.

6.4 Dokumentointi

Laadunvalvontatarkastuksesta laaditaan kirjallinen raportti, jossa raportoidaan tehdyt tarkastukset, tarkastetut komponentit ja kirjataan havainnot havainnollistavin kuvin. Raportissa tulee käydä ilmi myös työvälineet, joilla esimerkiksi mittauksia on mahdollisesti suoritettu. Raportin alussa voidaan käyttää taulukkoa, jossa käydään läpi keskeiset tarkastetut dokumentit ja kohteet. Tämä taulukko toimii samalla muistilistana, jolla varmistetaan kaikkien tarkastuskohteiden tarkastukset. Taulukko on esitetty liitteessä 1.

7 POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli laatia selkeä ohjeistus soodakattilan compound-alueen aukkopaneelien vaihdon laadunvalvonnan suorittamiseen. Ohjeistuksen avulla pyritään selkeyttämään ilma-aukkojen laadunvalvonnassa tehtäviä tarkastuksia ja mahdollisia selkeyttämään haasteita aiheuttavia tilanteita.

Tavoitteeseen nähden uskon, että ohjeistuksen avulla helpotetaan yhtenäisten toimintatapojen luomista yritykseen. Tavoitteena oli tuoda esiin erilaisia käytön aikana havaittuja vaurioita, jotka vaikuttavat materiaalin kestoon ja käytettävyyteen, sekä haasteita, joita aukkopaneelien valmistuksessa voidaan kohdata. Vaurioiden ja haasteiden pohjalta keskeisimmät tarkastuskohteet ja näissä havaittavia virheitä on kuvattu ohjeistuksessa helpottamaan tarkastusten suorittamista.

Ohjeistuksen jatkokehityksen kannalta olisi suotavaa rakentaa tietopankki, johon olisi kerätty valmistuksessa ja asennuksessa havaittuja haasteita aiheuttavia kohtia ja ratkaisut, joilla nämä on hoidettu. Tietopankki helpottaisi etenkin uusien henkilöiden laadunvalvonnan suorittamista ja tämän avulla voisi helpottaa heidän toimimistaan uusissa tilanteissa.

LÄHTEET

AB Sandvik materials technology. 2016. Sandvik® 3R12/4L7 composite tubes for recovery boilers and other applications. Saatavissa: https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products_downloads/tubular-products/s-1219-ps-eng_3r12_oct_2016.pdf [viitattu 20.2.2022].

AEL NDT-Tekniikka. 2010. Radiografinen tarkastus. NDT-koulutusmateriaali-aineisto. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen yhdistys r.y.

Andritz. 2015. Höyryn tuotanto soodakattilassa. Pohto koulutusaineisto. Oulu: Pohto.

ASM handbook. 1993. Vol 6. Welding brazing and soldering. USA: ASM International.

ASM Handbook. 2002. Vol 11. Failure Analysis and Prevention. USA: ASM International.

Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2014. Hitsauksen materiaalioppi. 4. korjattu painos. Helsinki: Suomen Hitsaustekniikan Yhdistys r.y.

Tran, H., Katiforis, N. A., Utigard, T. A. & Barham, D. 1995. Recovery boiler air-port corrosion Part 3: Corrosion of composite tubes in molten NaOH. Tappi Journal. 78. 111-117. Saatavissa: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/95/SEP/95SEP111.aspx> [viitattu 11.3.2022].

ISO 12952 - 1–6. 2022. Vesiputkikattilat. Osat 1–6.

ISO 9000. 2015. Laadunhallintajärjestelmät. Perusteet ja sanasto

Knowpulp. 2022. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. Verkkosivusto. Saatavissa: <https://www.knowpulp.com/> [viitattu 21.2.2022].

Pohjanne, P. & Hänninen, H. 1992. Ruostumattomien terästen jännityskorroosion ja korroosioväsytymisen estäminen. Kirjallisuustutkimus. VTT Tiedotteita 1420. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Pohjanne, P. 2005. SOODAKATTILA TULEVAISUUDESSA – materiaalivaihtoehtojen valinta osaprojekti. Suomen Soodakattilayhdistys. Raportti 2/2005. Saatavissa: www.soodakattilayhdistys.fi jäsensivut. [viitattu 18.3.2022].

Replico Oy yrityseshittely. 2022. Saatavissa: www.replico.fi [viitattu 12.2.2022].

Salmenoja, K. 2019. Development of kraft recovery boilers – What have been the main development steps? Tappi konferenssijulkaisu. Saatavissa: <https://www.tappi.org/content/Events/19PEERS/19PEE59.pdf> [viitattu 12.2.2022].

Sandvik Tryckeri AB. 2003. Sandvik Sanicro® 38/3L7 Composite tube for black liquor recovery and other boilers. Saatavissa: <https://www.materials.sandvik/contentassets/1a283c301e094421b1feac664f21029e/s-12126-eng-2003-02.pdf> [viitattu 20.2.2022].

SFS-ISO 3452-1:2021. Rikkomaton aineenkoetus. Tunkeumanestetarkastus. Osa 1: Yleisperiaatteet.

Sharp, W.B.A. 2007. Corrosion and cracking in recovery boiler. Tappi Kraft recovery Course 2007. Saint Petersburg, Florida: Curran Associates Inc.

Singbeil, D., Prescott, R., Keiser, J. & Swindeman, R. 1997. Composite tube cracking in kraft recovery boilers: A state-of-the-art review. Oak Ridge National Laboratory publication ORNL/TM-13442. Vancouver, Canada: Pulp and paper research institute of Canada.

Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset. 2016. edit. Soodakattilan kestoisuustyöryhmä. Suomen Soodakattilayhdistys ry. Raportti 9/2016. 16A0913-E0170. Saatavissa: www.soodakattilayhdistys.fi jäsensivut [viitattu 14.3.2022].

Toivonen, J. 2016. Tunkeumanestetarkastus 1- ja 2-tasolle. AEL koulutusmateriaalikansio. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen yhdistys r.y.

Toivonen, J. & Lehtinen, V. 2013. Ultraäänitarkastus. Taitotalo koulutusmateriaalikansio. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen yhdistys r.y.

Vakkilainen, E. 2005. Kraft recovery boilers – Principles and practices. Helsinki: Suomen Soodakattilayhdistys r.y.

Yli-Olli, S. 2022. Materiaaliasiantuntija. Haastattelu 13.3.2022. Replico Oy

KUVALUETTELO

Kuva 1. Soodakattilan rakenne. Kuvakaappaus. Knowpulp. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. Verkkosivusto. Saatavissa: www.knowpulp.com [viitattu 21.2.2022.]

Kuva 2. Soodakattiloiden kapasiteetin kehitys 1950–2021. Kuvakaappaus. Salmenoja, K. 2019. Development of kraft recovery boilers – What have been the main development steps? Tappi konferenssijulkaisu.

Kuva 3. Tulipesäreaktio. Kuvakaappaus. Knowpulp. Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. Verkkosivusto. Saatavissa: www.knowpulp.com [viitattu 21.2.2022.]

Kuva 4. Ilma-aukon massakotelo sisältä katsottuna. Lehtinen, M.

Kuva 5. Sula-aukon rakenne sulakouru poistettuna. Lehtinen, M.

Kuva 6. Primääriaukkojen rakenne, valusuuttimilla varustettu primääriaukko. Lehtinen, M.

Kuva 7. Esimerkki a) sekundääriaukon ja b) tertiääriaukon rakenteesta. Lehtinen, M.

Kuva 8. Esimerkki poltinaukoista a) levyosilla ja b) massauksella tiivistettynä. Lehtinen, M.

Kuva 9. Esimerkki lipeäruiskuaukon rakenteesta. Lehtinen, M.

Kuva 10. Compound-putken valmistaminen kuumapursotusmenetelmällä. Kuvakaappaus yrityksen esityksestä. AB Sandvik materials technology. 2016. Saatavissa: https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products_downloads/tubular-products/s-1219-ps-eng_3r12_oct_2016.pdf [viitattu 10.2.2022.]

Kuva 11. Compound-putken liitoksen valmistelu ja valmis hitsi. Kuvakaappaus yrityksen esityksestä. AB Sandvik materials technology. 2016. Saatavissa: https://www.materials.sandvik/globalassets/global/downloads/products_downloads/tubular-products/s-1219-ps-eng_3r12_oct_2016.pdf [viitattu 10.2.2022]

Kuva 12. Compound-putken pinnoitteen säröjä. Kuvakaappaus artikkelista. 1997. Composite tube cracking in kraft recovery boilers: A state-of-the-art review. Singbeil, D., Prescott, R., Keiser, J., Swindeman, R.

Kuva 13. Compound-putken säröjä. Lehtinen, M.

Kuva 14. Ilma-aukkojen massauksen alle kääntyvien putkien korroosiota. Lehtinen, M.

Kuva 15. Termisen väsymisen aiheuttamaa säröilyä. Mikroskooppikuva. Yli-Olli, S.

Kuva 16. Termisen väsymisen aiheuttama särö, syövytetty näyte. Mikroskooppikuva. Yli-Olli, S

Kuva 17. Jäljennekuva jännityskorroosiosäröstä. Mikroskooppikuva. Yli-Olli, S.

Kuva 18. Poikkileikkauskuva jännityskorroosiosta. Mikroskooppikuva. Yli-Olli, S.

Kuva 19. Tertiäriaukoista havaittua paikallista korroosiota. Yli-Olli, S.

Kuva 20. Tulipesän pohjan materiaaliratkaisuja. Kuvakaappaus. Soodakattilan materiaalit ja tarkastukset. 2016. edit. Soodakattilan kestoisuustyöryhmä. Suomen Soodakattilayhdistys ry. Raportti 9/2016. 16A0913-E0170.

Kuva 21. Tunkeumanestetarkastuksen vaiheet. Lindström, J. 2014. Kattilatar-
kastusten huomioiminen seisokkisuunnittelussa. Saatavissa:

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201403153196> [viitattu 1.3.2022.]

Kuva 22. Kuva a) Esimerkki työkoejärjestelystä ennen tuotannon aloitusta ja
b) tunkeuman määrittäminen valmiin liitoksen poikkileikkauksesta. Valokuva. Salmi,
P.

Kuva 23. Esimerkkejä taivutusten jälkeisten tarkastusten havainnoista. A) kol-
hun aiheuttama pinnoitehävikki ja terävä reuna, b) putken epäpyöreyttä taivu-
tuksen jälkeen. Lehtinen, M.

Kuva 24. Kuorintojen visuaalinen tarkastus. A) havaittavissa kirkas pinnoite il-
man kuparisulfaattia ja b) austeniittinen pinnoite, kuparisulfaattilla varmistet-
tuna. Austeniittisen pinnoitteen ja hiiliteräksen raja merkitty punaisella nuo-
lolla. Lehtinen, M.

Kuva 25. Kuorintojen mittaukseen käytettävä pikamittakello. Lehtinen, M.

Kuva 26. Käytössä syntynyt, sytytysjälkeen keskittynyttä korroosiota seinä-
putkessa. Lehtinen, M.

Kuva 27. Austeniittisen putken raapaisujäljestä tehty jäljenne. Materiaali on
sulanut ja säröilyä on havaittavissa noin 0,7 mm syvyyteen asti. Mikroskooppi-
kuva. Yli-Olli, S.

Kuva 28. Putkien linjauksen tarkastus oikolaudan avulla. Lehtinen, M.

Kuva 29. Putkien tason eron mittaus oikolaudan avulla. Putket voidaan mitata järjestelyllä ja seurata käytön aikana tapahtuuko putkien linjauksessa muutoksia. Lehtinen, M.

Kuva 30. Esimerkki hiiliteräsoisuuden hitsin sekoittumisesta korroosiolta suojaavaan pinnoitteeseen. Lehtinen, M.

Kuva 31. Esimerkki jouheasta liittymästä ja maltillisesta pinnoitushitsin kuvusta. Lehtinen, M.

Liite 1

TOIMINNOT	VAATIMUKSET		HUOMIOT	TARKASTAJAN KUITTAUS
	TÄYTTY	EI TÄYTY		
KÄYTETYT STANDARDIT				
MATERIAALI SERTIFIKAATIT				
HITSAUKSET HITSAUS SERTIFIKAATIT WPQR WPS PÄTEVÖNNIT TYÖKOKEET				
NDT DOKUMENTAATIO TARKASTAJIEN PÄTEVYYDET MENETELMÄT LAAJUUS				
LAADUNVALVONTA TAIVUTUKSET KUORINNAT HIILITERÄSTEN HITSIT PINNOITUS- HITSIT				