

LIITE 1

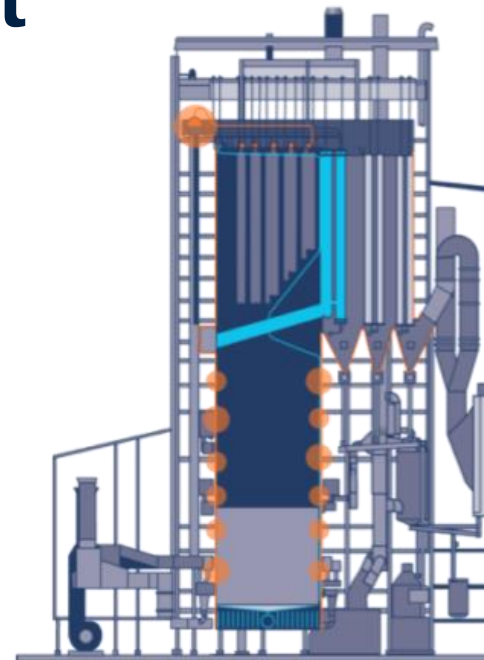
**Varo Oy: Soodakattiloiden käynninaikaiset tiiveydenvalvontamenetelmät –
esitys 28.9.2017**



Soodakattiloiden käynninaikaiset tiiveydenvalvontamenetelmät

Timo Karjunen

VARO
TEOLLISUUSPALVELUT



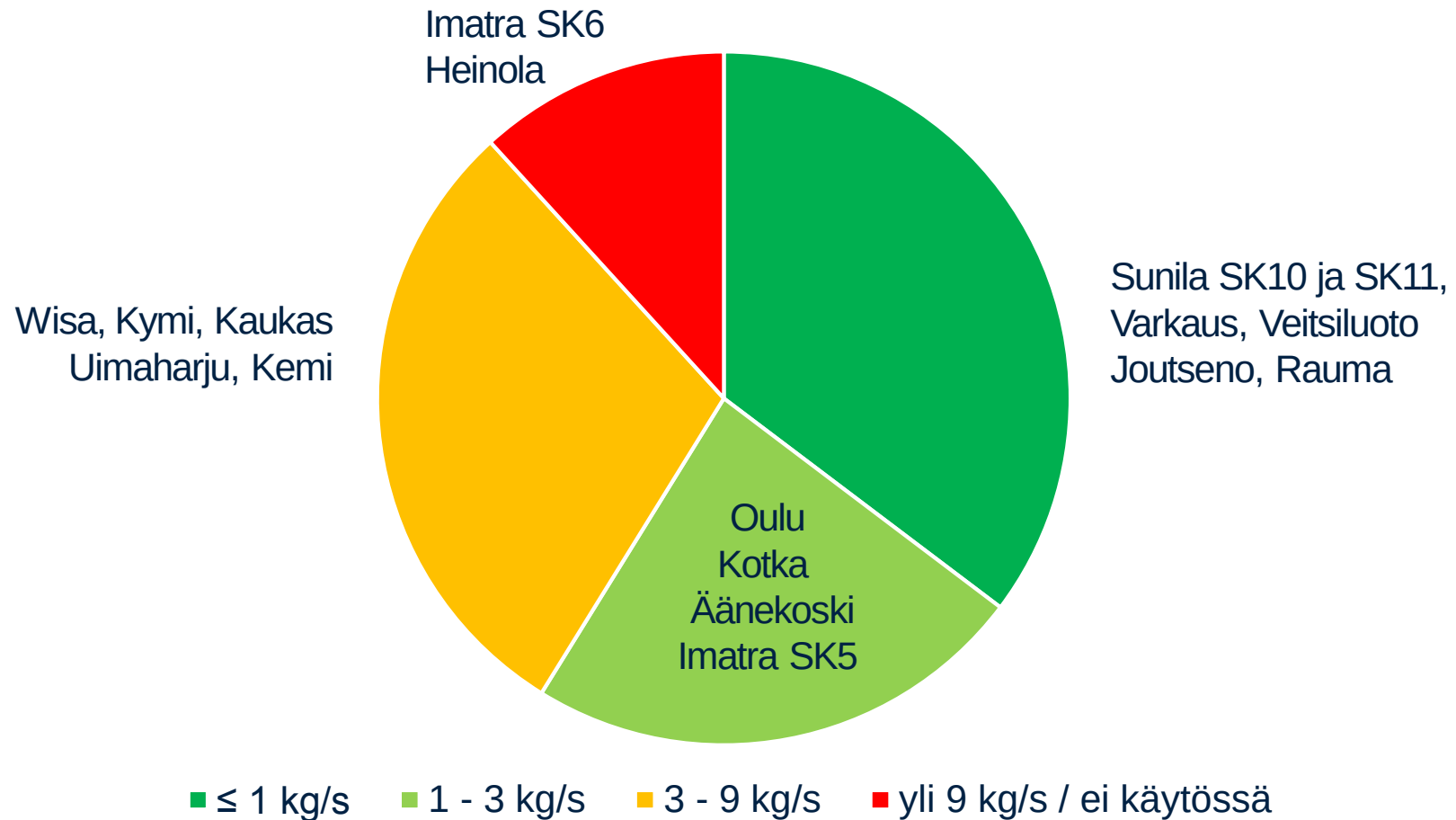


Vuodonvalvontamenetelmät

Menetelmä	Toimittajat	Tarkkuus	Käyttäjät Suomessa
Syöttövesi-höyryero	Automaatio-toimittajat	Vaihtelee toteutustavan ja toimittajan mukaan, parhaimmillaan erinomainen (hälytys kun vuoto on 0,5 – 1 kg/s alle 8 tunnissa)	Käytössä lähes kaikissa kattiloissa 6:ssa tarkkuus erinomainen
Kattilaveden laadun valvonta		Kohtalainen (vuoto voidaan havaita PO_4 :n laskun perusteella 24 – 48 tunnissa, kun vuoto on 1 – 2 kg/s)	Oulu, Wisa
Kemikaalitase	Valmet, Nalco, Solenis	Parhaimmillaan erinomainen (hälytys alle 8 tunnissa kun kattilaveden vuoto on 0,5 – 1 kg/s)	Veitsiluoto, Rauma, Joutseno, Kaukas
Akustinen emissio	Lukuisia, mm. Andritz	Vaihtelee antureiden sijoituspaikkojen ja lukumäärän mukaan, parhaimmillaan erinomainen niissä osissa kattilaa, joissa antureita on tarpeeksi	Ei käytössä



Syöttövesi-höyryeron avulla tunnistettavat vuodot



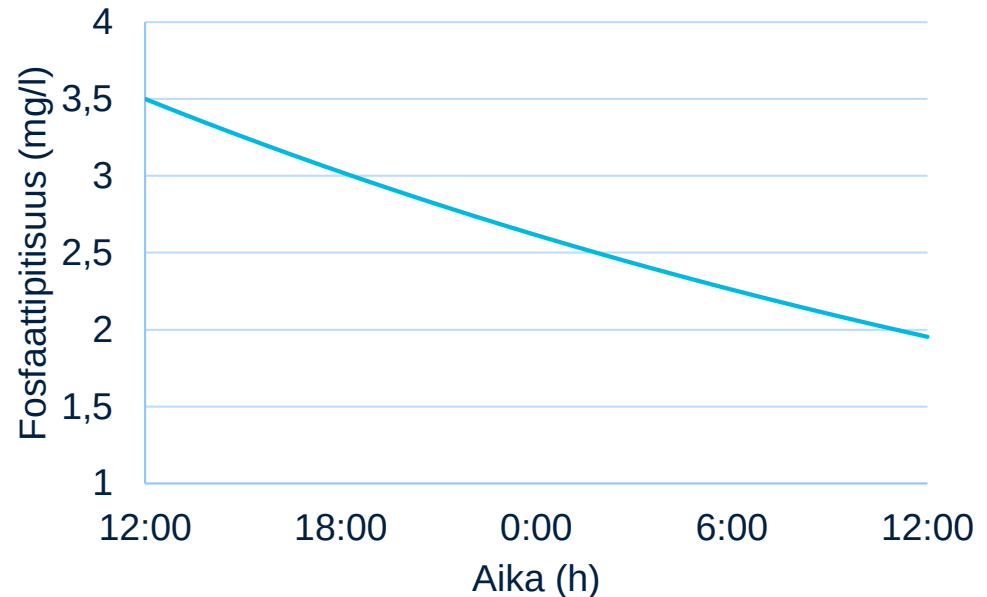
Hälytysraja – normaali taso



Kattilavesivuodon tunnistus kattilaveden laimenemisen perusteella

Fosfaatin annostelu ja ulospuhallus säädetään niin, että PO_4 pysyy normaalisti esim. alueella 3 - 4 mg/l

Jos PO_4 laskee alle 2 mg/l, automaatiojärjestelmä hälyttää valvomossa ja labra tekee ilmoituksen



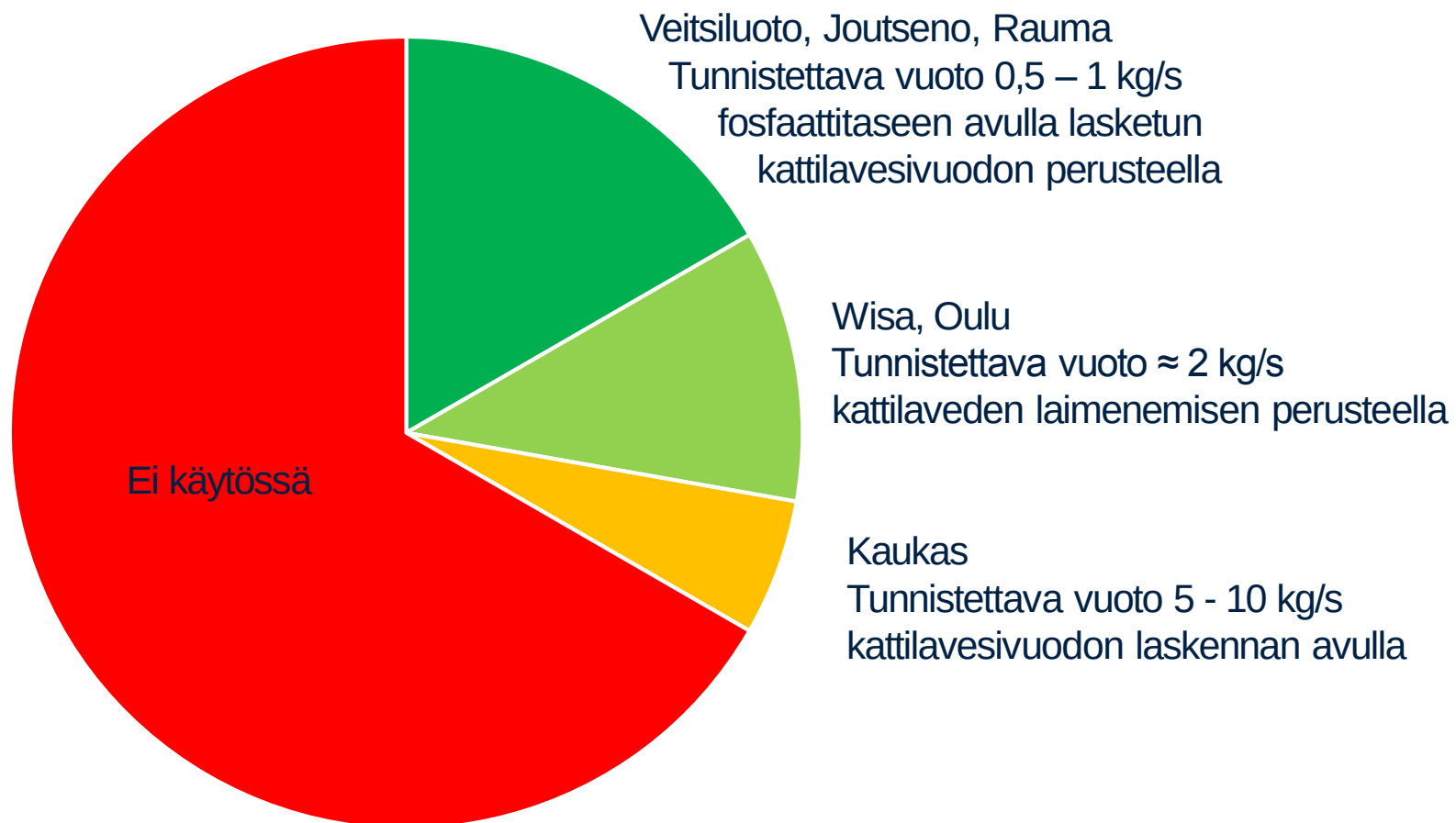
Esimerkki:

Kattilaan tulee perjantaina klo 12 vuoto, jonka suuruus on 1 kg/s, kun PO_4 on 3,5 mg/l.

Jatkuva seuranta tekee hälytyksen vuorokauden ja labra kolmen vuorokauden kuluttua

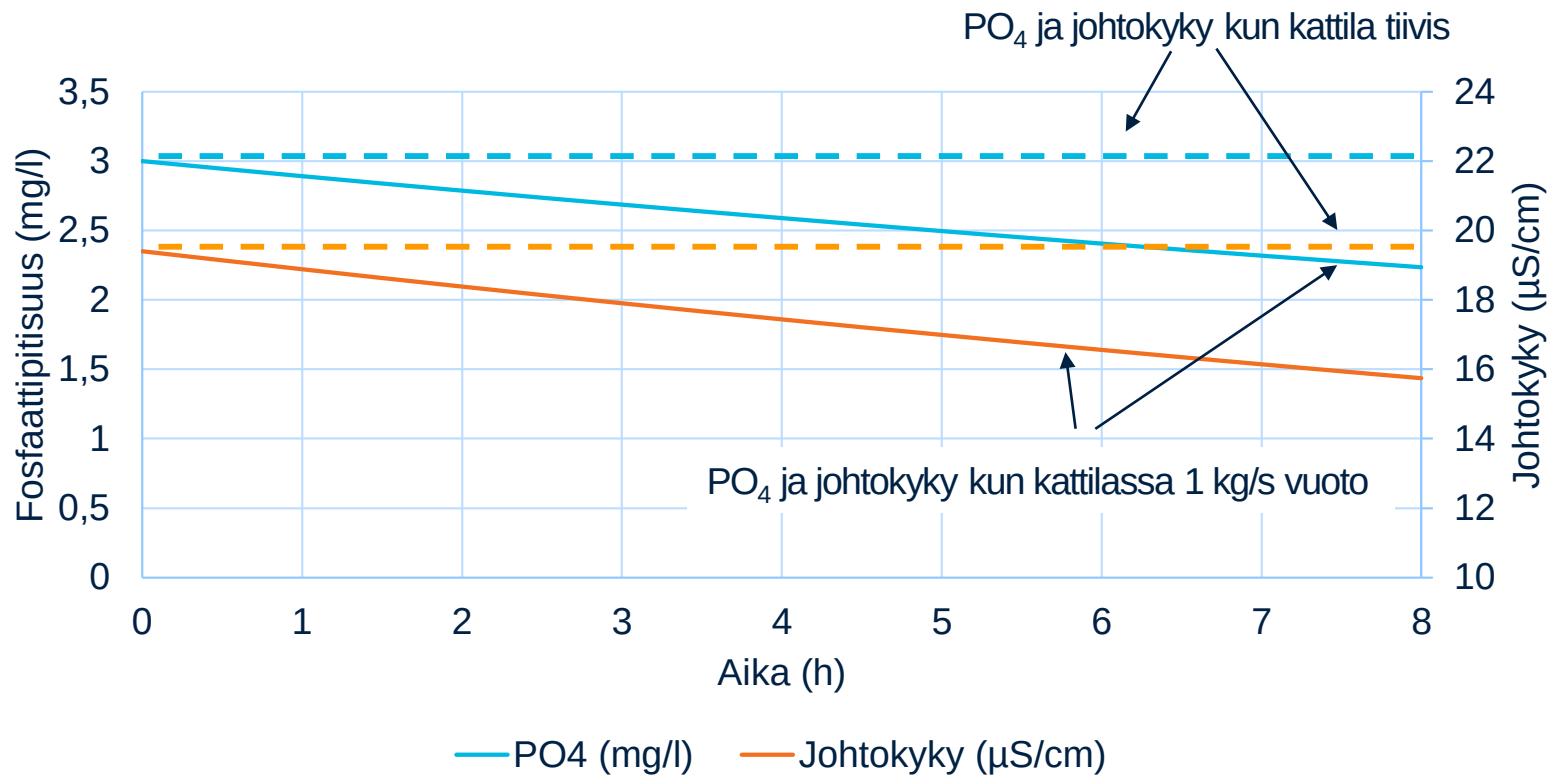


Kattilaveden kemikaalitaseen tai laimenemisen seurannan perusteella tunnistettavat vuodot





Käynninaikaisen tiiveyskokeen tulokset, kun kattilan höyrystinosan vuoto on 0 tai 1 kg/s



Höyrystimen koko 200 m³



Valmet Recovery Boiler Leak Detection

- Tiiveyttä seurataan syöttövesi-höyryeron ja fosfaattitaseesta lasketun kattilavesivuodon perustella
- Vuoto on paikannettavissa valvomosta käsin höyrystinosaan / ekoihin & tulistimeen
- Toiminta ja hälytykset voidaan koestaa käynnin aikana
- "Betaversiot" Veitsiluodossa ja Raumalla
- Käytössä Natron Hayat'n Maglajin kattilassa Bosniassa

Leak Detection

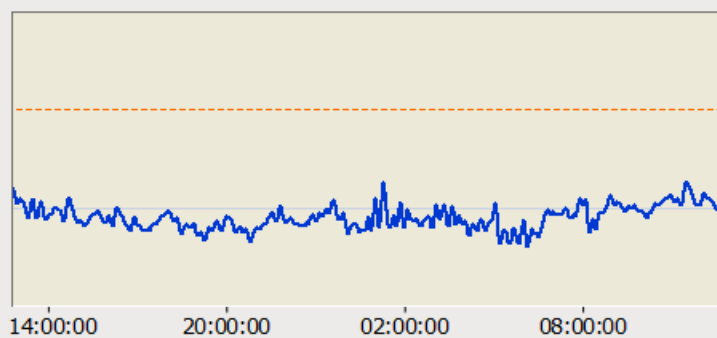
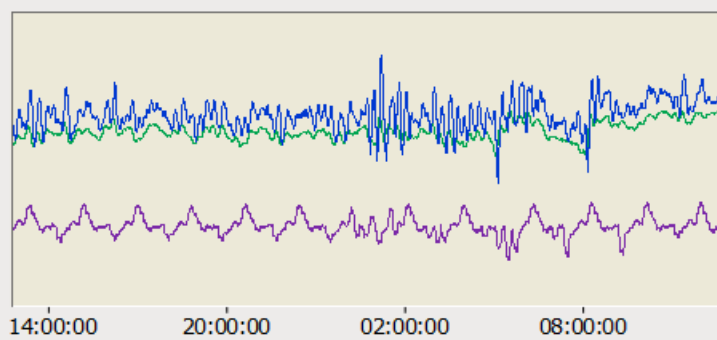
3



Mass balance based leak detection

7d

28d

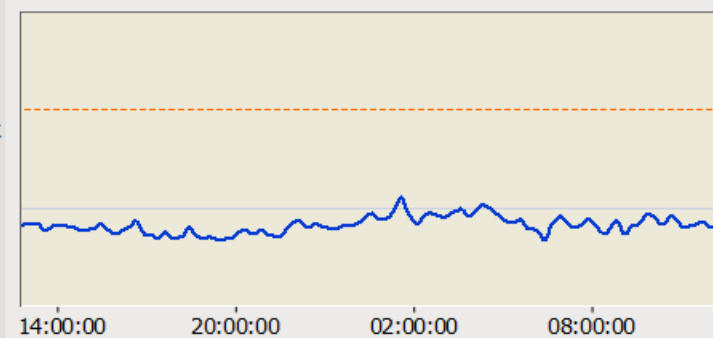
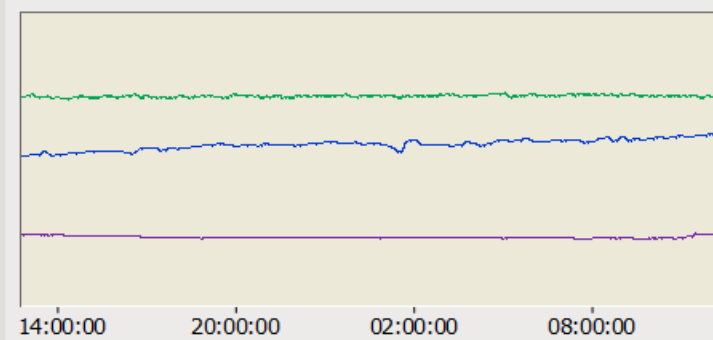


Water-Steam OK

PO4 based leak detection

7d

28d



Boiler water OK

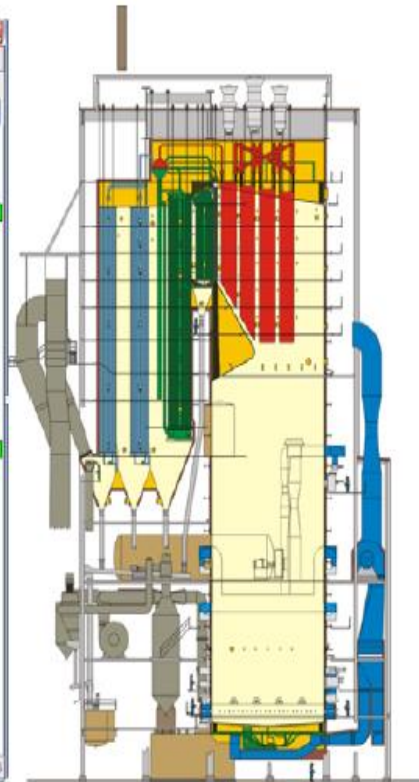
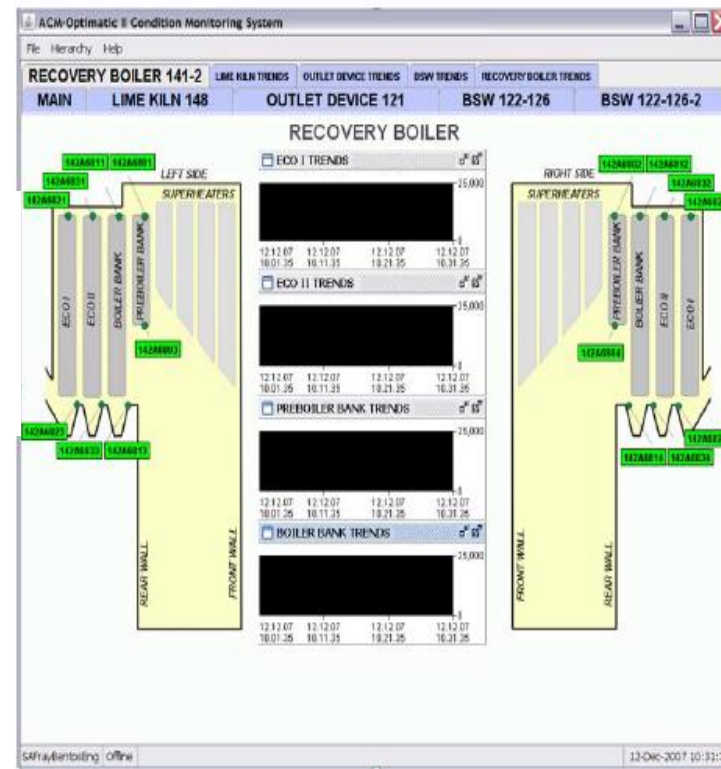
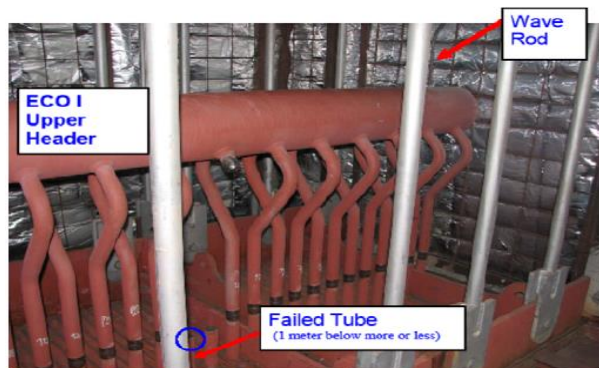
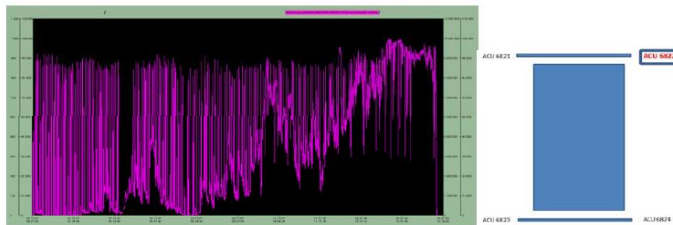
Eventlist and Test
Tuning parameters





Andritzin akustisen emission seurantajärjestelmä

- Asennettu 18 soodakattilaan
- Esimerkit Freu Bentosin ekovuodoista





Kokemukset Pohjois-Amerikasta 2007 - 2017

- Tehtaiden oman ilmoituksen mukaan noin puolessa kattiloista on käytössä jonkinlainen tiiveydenvalvontajärjestelmä (kattiloita tällä hetkellä USA:ssa ja Kanadassa yhteensä 188 kpl)
- Eniten käytetyt menetelmät
 - Syöttövesi-höyryero: noin 40 kattilassa
 - Syöttövesi-höyryero & kemikaalitaseen seuranta: noin 40 kattilassa
 - Akustinen emission: noin 20 kattilassa
- Lopuissa 90 – 100 kattilassa tiiveydenvalvonta ei käytössä



Kokemukset Pohjois-Amerikasta 2007 - 2017

Recovery Boiler Leak Indication, Nalco

- Tiiveyttä seurataan syöttövesi-höyryeron ja oman merkkiaineen kattilavesipitoisuuden perusteella
- Käytössä 34 kattilassa (2017)
- Mainittu vuodonvalvontamenetelmänä 70 vaurioraportissa
- 31 vuodoista tunnistettiin tai voitiin varmistaa ko. järjestelmän avulla
- Vuodoista kriittisiä 19, näistä
 - 12 tunnistettiin ko. järjestelmän avulla
 - 10 ko. järjestelmä antoi ensimmäisen indikaation
 - 4 tapauksessa vuoto oli suuri ja äkillinen ja johti nopeaan alasajoon
 - 3 tapauksessa vuoto oli pieni ja löydettiin alasajon jälkeen



Kokemukset Pohjois-Amerikasta 2007 - 2017

Triple 5

- Tiiveyttä seurataan akustisen emission perusteella
- Käytössä 16 kattilassa (2017)
- Mainittu vuodonvalvontamenetelmänä 25 vaurioraportissa
- 13 vuodoista tunnistettiin tai voitiin varmistaa ko. järjestelmän avulla
- Vuodoista kriittisiä 8, näistä 4 tunnistettiin ko. järjestelmän avulla
- Tiedossa ei ole miten anturit oli sijoitettu suhteessa vuotopaikkaan



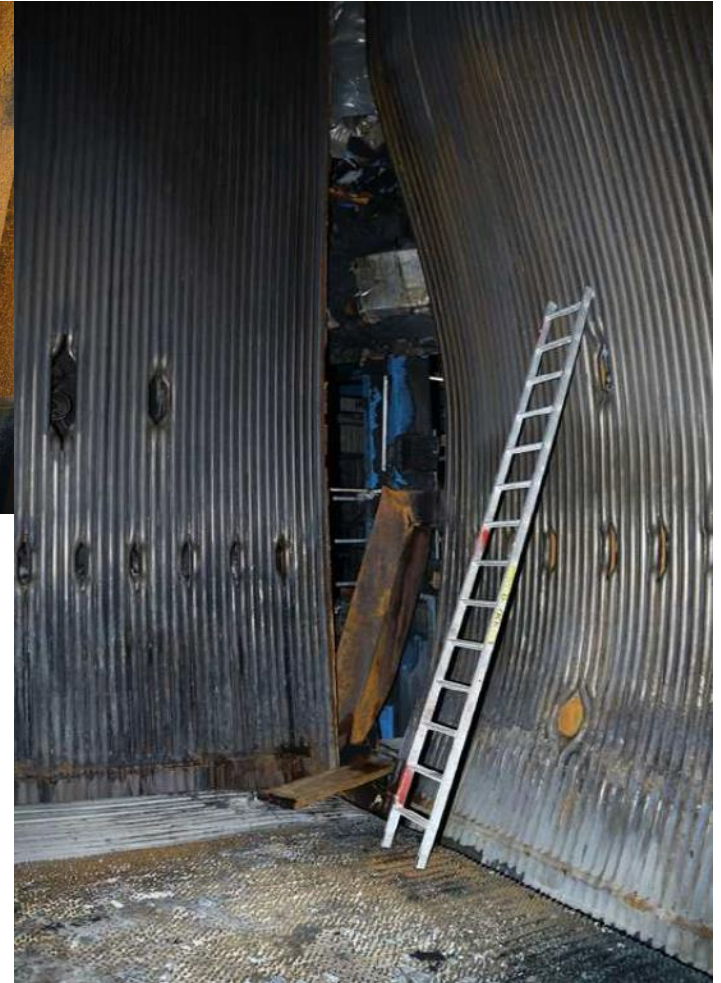
Johtopäätökset

- Parhaimpaan tulokseen tiiveydenvalvonnassa päästään käyttämällä sekä syöttövesi-höyryeron, kattilaveden kemikaalitaseen että akustisen emission seurantaa samanaikaisesti.
- Tällaisilla järjestelmillä on mahdollista järjestää soodakattiloiden tiiveydenvalvonta niin, että pienet vuodot tulevat luotettavasti havaittua ja paikannettua jo siinä vaiheessa, kun riski, että vuoto aiheuttaisi sulavesiräjähdyksen, on pieni.
- Näin olisi voitu estää todennäköisesti suuri osa, mahdollisesti jopa yli puolet, tulipesäräjähdyksistä, joiden aiheuttajana on ollut painerungon vuoto.



Tulipesäräjähdys Zellstoff Pölsin tehtaalla Itävallassa 2014

- Seinäputkeen 2,5 cm² reikä, syöttövesivirtaus kasvoi nopeasti 22 kg/s ja höyryvirtaus laski 14 kg (normaalisti molemmat ≈ 90 kg/s), tulipesän paine nousi 1000 Pa lyhyeksi aikaa
- Operaattori pysäytti lipeän polton
- Kenttämies kävi ottamassa ruiskut pois, tulipesä hiljainen, ei merkkejä vuodosta
- 30 min putken repeämisestä tapahtui tulipesässä räjähdys
- Kaksi henkilöä oli kattilahuoneessa räjähdysten aikaan, mutta selvisivät ilman vakavia fyysisiä vammoja



VARO



Vaarallisen vuotojen hallinta

- Tapahtuneissa vuodoissa operaattorit yleensä tunnistavat, että kyse on kattilavuodosta, mutta eivät pysty arvioimaan tilanteen vaarallisuutta, jos tulipesästä ei kuulu ”suhinaa ja töminää”
- Tämän seurauksena seuraavat toimenpiteet jäävät helposti tekemättä
 - Vaarahälytys ja kattilahuoneen evakuointi & sulkeminen
 - Syöttövesipumppujen pysäytys ja venttiilien sulku
 - Pikatyhjennys
- Toimenpiteiden puuttuminen/viivästyminen kasvattaa tulipesäräjähdyksen ja henkilövahinkojen riskiä
- Korjaavat toimenpiteet Pölsissä
 - Säännöllinen simulaattorikoulutus kaikille operaattoreille
 - Erillinen ”kattilavuotonäyttö” valvomossa



Kokemukset Suomesta 1982 - 2017

Painerungon vuodon aiheuttamat tulipesäräjähdykset, joissa vähintään heikennetty nurkka auki

- Oulu: 1986 keittoputki poikki
- Tervasaari 1992: keittopinnan putkessa 10 mm x 25 mm repeämä
- Kotka 2001: tulipesän seinäputkessa repeämä
- Rauma 2011: verhoputkessa suuri vuoto (> 15 kg/s)
- Veitsiluoto 2014: kattoputkessa repeämä

Suomessa kaksi pikatyhjennystä 1990 - 2017 (molemmat Kaukaalla)?

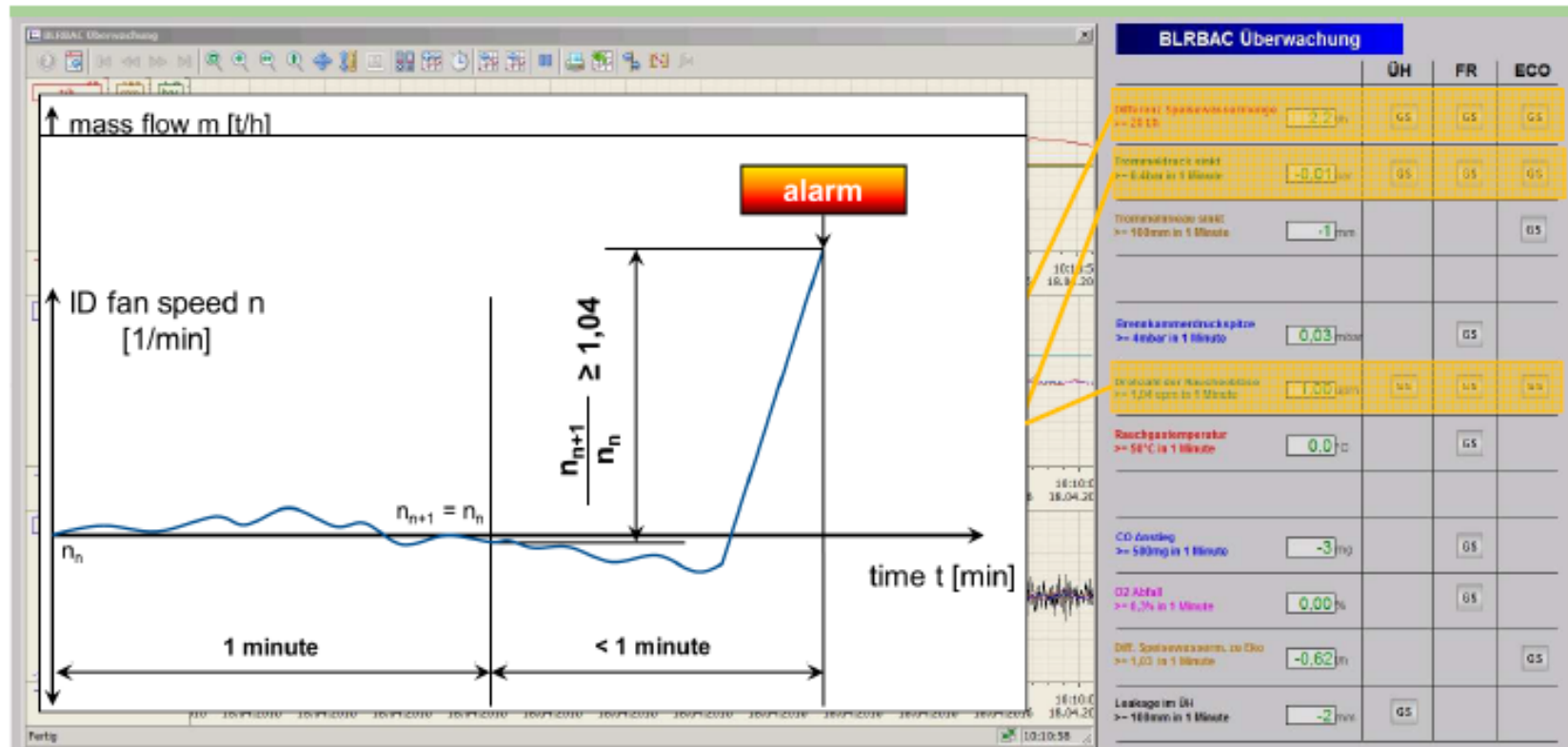
Pohjois-Amerikan tahdilla pikatyhjennyksiä olisi ko. jaksolla yli 30 (likimain kerran yhdeksässä käyttövuodessa)



Kattilavuotonäyttö valvomossa

Leakage detection system

heinzelpulp
ZELLSTOFF PÄIS AG

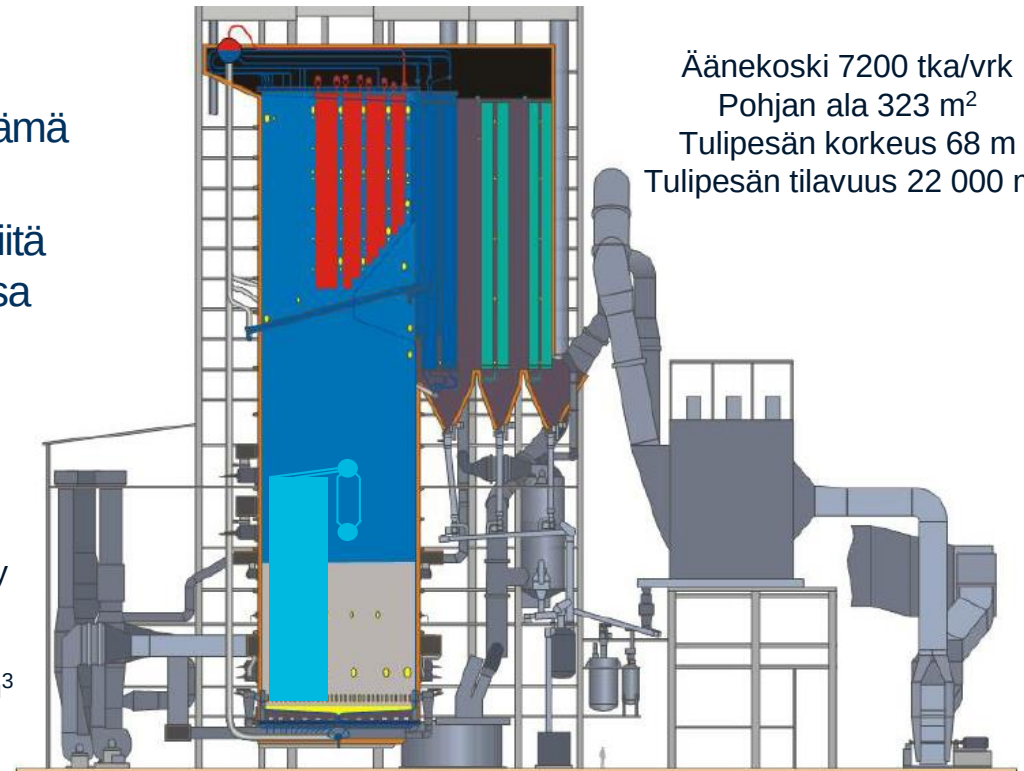




Kattilasuojan toiminta suurissa soodakattiloissa

- Kattilasuoja ajaa kattilan alas vain jos tulipesän paine nousee yli lukitusrajan tai lieriön pinta laskee alle lukitusrajan
- Kattilasuojan toiminta L- ja XL-kattiloissa epävarmaa, jos seinäputkeen tulee repeämä tai keittopinnan putki katkeaa
- Yksittäisen putken repeämä tai katko ei riitä laukaisemaan kattilasuojaa XXL-kattiloissa

Skutskär SP6 600 tDS/day
Pohjan ala 56 m²
Tulipesän korkeus 27 m
Tulipesän tilavuus 1 500 m³



Äänekoski 7200 tka/vrk
Pohjan ala 323 m²
Tulipesän korkeus 68 m
Tulipesän tilavuus 22 000 m³



Suosituksset

Suurten, äkillisten kattilavuotojen, joissa vettä pääsee tulipesään, varalta tulisi soodakattilat varustaa hälytys- ja suojausjärjestelmillä, jotka

- varoittavat operaattoreita ja kattilahuoneessa olevia vaaratilanteesta jo ennen kattilasuojan laukeamista
- laukaisevat automaattisen suojauksen, kun kattilaan tulee suuri, äkillinen vesivuoto

Järjestelmät tulisi suunnitella niin, että ne toimivat vuototilanteessa luotettavasti ja niin, että operaattorit voivat niiden avulla tunnistaa vaaratilanteen ja huolehtia, että alasajo tapahtuu turvallisesti.



The End

LIITE 2

**Varo Oy: Soodakattiloiden käynninaikaiset tiiveydenvalvontamenetelmät –
alustava raportti 19.9.2017**

Soodakattiloiden käynninaikaiset tiiveydenvalvontamenetelmät

Sisällys

1 Johdanto	2
2 Vuodot ja tulipesäräjähdykset soodakattiloissa	4
3 Pienet ja suuret vuodot	11
4 Pienten vuotojen valvonta	21
4.1 Massataseen seurantaan perustuvat järjestelmät	21
4.2 Kattilan höyrystinosan tiiveyden valvonta kattilaveden laadun seurannan avulla.....	24
4.3 Akustisen emission seurantaan perustuvat järjestelmät	32
5 Suurten vuotojen valvonta.....	39
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	45
Lähteet.....	47

1 Johdanto

Tein vuonna 1999 Soodakattilayhdistykselle selvityksen otsikolla "Kaasuräjähdykset soodakattiloissa vesivuotojen aikana". Pontimena selvityksen tekoon oli tekemäni havainto, että BLRBAC:n raporteissa säännönmukaisesti räjähdykset luokiteltiin sulavesiräjähdyksiksi, jos räjähdys tapahtui kattilavuodon aikana. Osassa tapauksia vaurioiden sijainti ja paikallaolleiden havainnot viittasivat pikemminkin siihen, että räjähdysten aiheuttajana oli voimakas kaasupalo.

Näin oli mm. Ruotsissa Vallvikin tehtaalla 1998 tapahtuneessa räjähdyksessä, jossa räjähdystä edelsi tulipesän seinäputken repeäminen. Kattilasuojan laukeamisen jälkeen operaattorit olettivat, että syynä häiriöön oli liian alhainen kuiva-ainepitoisuus, ja yksi operaattoreista meni kattilahuoneeseen ottamaan ruiskuja pois tulipesästä. Vauriosta laaditun raportin mukaan tapahtumat etenivät tämän jälkeen seuraavasti:

"Yksi operaattoreista oli alkanut ottaa pois lipeäruiskua länsipuolen seinällä, kun ensimmäinen räjähdys (kaasuräjähdyks) tapahtui. Räjähdys suihkautti lipeää visiiriin, siinä kaikki. Operaattori kääntyi ja alkoi mennä portaita alas vanhaan valvomoon, ja suuri räjähdys tapahtui heti sen jälkeen. Räjähdys heitti hänet alas portaita, kattilahuoneessa tuli erittäin kuuma ja haisi palaneelle."

Operaattorin tekemät havainnot viittaavat siihen, että kattilasuojan laukeamisen jälkeen tulipesään kertyi palavia kaasuja, joiden äkillinen palo sekoitti tulipesän pohjalla olleen sulan ja veden saaden aikaan voimakkaan sulavesiräjähdyksen.

Vuonna 1999 tehty selvitys osoittautui enteelliseksi, sillä vuonna 2001 Kotkassa tapahtui tulipesäräjähdyks, joka vaurioiden sijainnin perusteella oli mitä todennäköisimmin kaasuräjähdyks. Räjähdystä edelsi tulipesän seinäputken repeäminen kattilan ajaessa normaalia kuormaa ja kattilasuojan laukeaminen tulipesän ylipaineesta. Noin 20 min tämän jälkeen kuului "isompi tössäys", joka aukaisi heikon nurkan ja taivutti tulipesän seinät pulleiksi. Räjähdys ei vaurioittanut lainkaan kattilan pohjaa, mikäli olisi hyvin poikkeuksellista sulavesiräjähdykselle.

Vuonna 1999 laatimani selvityksen loppuun olen kirjannut suosituksenomaisesti, että

"Kokemukset tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä osoittavat, että käyttöturvallisuuden varmistamiseen vesivuototilanteissa ei ole kaikilta osin kiinnitetty riittävää huomiota. Vastaavien läheltä piti-tilanteiden välttäminen jatkossa edellyttää, että operaattoreiden valmiuksia tunnistaa ja paikantaa kattilavuotoja kehitetään niin, että vuodot tulevat selvästi tunnistettua nykyistä aikaisemmin ja tarvittavista toimenpiteistä voidaan päättää ilman, että esim. vuodon paikkaa tarvitsee varmentaa kattilahuoneesta käsin. Mahdollisia keinoja ovat

- massa-, energia- tai kemikaalitaseiden, vuodon aiheuttaman äänen tai tuhkan kosteuden seurantaan perustuvien vuodonvalvontamenetelmien käyttöönotto
- syöttövesi- ja höyryvirtauksen erosta, höyryvirtauksen laskusta ja/tai kattilan paineen laskusta tulevien hälytysten käyttöönotto
- kattilakohtaisten häiriö- ja suojaohjeiden laadinta."

Soodakattilayhdistys tilasi minulta vuonna 2001 selvityksen tuolloin käytössä olleista kattilavuotojen valvontamenetelmistä (Kattilavuotojen valvonta ja ohjeistus, raportti 2/2001). Tuolloin Suomessa käytettyjä menetelmiä olivat syöttövesi-höyryeron seuranta ja akustisen emission seuranta. Syöttövesi-höyryerosta käytössä oli hälytys ainoastaan kahdeksassa kattilassa (22:sta). Akustisen emission seuranta oli käytössä yhdeksässä kattilassa. Ulkomailta oli käytössä myös kemikaalitaseen seurantaan perustuvia menetelmiä.

Vuonna 2001 tapahtuneen tulipesäräjähdyksen jälkeen päätettiin Kotkaan hankkia Suomen ensimmäinen erityisesti vuotojen valvontaan suunniteltu järjestelmä. Järjestelmän toimittajana oli allekirjoittanut ja se toimitettiin 2002. Kattilavahdiksi ristitty järjestelmä koostui erillisestä tietokoneesta, joka sai syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden fosfaattitaseen seurantaan tarvittavien suureiden tiedot kattilan automaatiojärjestelmästä, ja valvomossa olleesta erillisestä näytöstä, jossa oli operaattoreiden nähtävissä syöttövesi-höyryeron ja kattilavesivuodon trendit ja hälytykset.

Kotkan Kattilavahdin käyttöönottoa seuranneina vuosina on useimmilla tehtailla tehostettu soodakattiloiden tiiveydenvalvontaa parantamalla syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden laadun valvontaa. Osalla tehtaista on otettu käyttöön myös kattilaveden fosfaatti- tai silikaattitaseen perusteella toteutettu kattilavesivuodon valvonta.

Tehdyistä parannuksista huolimatta vaarallisia vuotoja, joita ei havaita niin aikaisessa vaiheessa kuin olisi mahdollista, esiintyy yhä. Viimeisin tällainen vuoto oli vuonna 2015 Heinolassa, kun vettä pääsi tulipesään tulipesän seinäputken vaurion seurauksena. Vuoto havaittiin vasta alasajon jälkeen, kun sularänneistä valui vettä. Tilanteesta selvittiin onnekkaisesti ilman räjähdystä.

Kattavan kuvan saamiseksi suomalaisten soodakattiloiden tiiveydenvalvonnan nykytilanteesta päätti Soodakattilayhdistys teettää aiheesta kyselyn. Samalla yhdistys päätti selvittää mitkä ovat tällä hetkellä parhaat käytössä olevat menetelmät Suomen ulkopuolella käytössä olevissa soodakattiloissa. Tähän raporttiin on dokumentoitu em. selvitysten tulokset.

Kiitän Soodakattilayhdistyksen yhdyshenkilöitä sekä Kari Auraa Andritz Oy:stä selvitystä tehdessäni saamastani avusta.

Helsingissä 19.9.2017

Timo Karjunen

2 Vuodot ja tulipesäräjähdykset soodakattiloissa

Mikäli kuuma suolasula ja vesi pääsevät kosketuksiin, voi tapahtua nk. sulavesiräjähdyks, jossa vesi höyrystyy nopeasti saaden aikaan voimakkaan paineaallon. Tulipesään tai savukaasukanavaan purkautuva vesi voi myös höyrystyessään estää palavien kaasujen poistumisen tulipesästä. Vuodon seurauksena voi tulipesässä tai savukaasukanavassa tapahtua siten myös kaasuräjähdyks tai voimakas palo.

Voimakkain Suomessa tapahtunut soodakattilaräjähdyks tapahtui Äänekoskella 1965. Räjähdyks tapahtui noin 15 min kattilan verhoputken repeämisen jälkeen. Räjähdyksessä kuolivat ylikonemestari Reino Rönneberg, lämmittäjät Erkki Kolu ja Edward Hyvärinen sekä pillimies Viljo Nieminen, jotka kaikki olivat räjähdyksen sattuessa kattilahuoneessa.

Äänekosken soodakattilaräjähdyksen jälkeen on soodakattiloiden turvallisuutta pyritty parantamaan mm. ottamalla käyttöön kestävämpiä materiaaleja ja tehostamalla kattiloiden kunnonvalvontaa. Pyrkimyksenä on ollut ensi sijassa estää veden pääsy tulipesään ehkäisemällä kattilavuodot, sillä yrityksistä huolimatta mitään varmaa keinoa estää räjähdykset tilanteessa, jossa vesi vuotaa tulipesään, ei ole keksitty. Kattilavuotojen taajuutta onkin saatu laskettua, mutta vuotoja – eikä myöskään tulipesäräjähdyksiä – ole pystytty täysin ehkäisemään.

Viimeisimmät vakavat muistutukset soodakattiloiden käyttöön liittyvistä riskeistä saatiin 21.1.2014 Stora Enso Skoghallin tehtaalla Ruotsissa, 23.3.2014 Zellstoff Pölsin tehtaalla Itävallassa ja 26.7.2016 Natron Hayatin Maglajin tehtaalla Bosnia-Hertsegovinassa.

Skoghallin tehtaan soodakattilassa, jonka kapasiteetti on 2200 tKA/vrk, tapahtui voimakas räjähdyks, kun kattilaa ajettiin noin 1500 tKA/vrk lipeäkuormassa. Räjähdyks tapahtui kaksi tuntia liuottajan hönkäjäjärjestelmän pesun aloituksen jälkeen. Räjähdyksen seurauksena heikennetty nurkka aukesi enimmillään noin 70 mm. Seinien taipumat olivat enimmillään 96 mm. Räjähdyksen seurauksena kattilahuoneeseen purkautui palavia kaasuja niin voimallisesti, että myös osa kattilahuoneen ulkoseinää irtosi niin että osa kaasuista purkautui suoraan ulos (kuva 1). Onneksi räjähdyksen sattuessa ketään ei ollut kattilahuoneessa, joten henkilövahingoilta vältyttiin. Vaurioiden korjaus aiheutti 18 vuorokauden pituisen katkoksen tehtaan tuotannossa. Räjähdyksen syyksi todettiin myöhemmin liuottajan hönkäjäjärjestelmän tyhjennyslinjojen osittainen tukkeutuminen, jonka seurauksena pesuveden pinta järjestelmässä nousi niin ylös, että vettä kulkeutui tertiääri-ilmakanavan kautta tulipesään.



Kuva 1. Stora Enson Skoghallin tehtaan soodakattila räjähdysen jälkeen

Zellstoff Pölsin tehtaalla käytössä olleessa soodakattilassa, jonka kapasiteetti oli 2200 tKA/vrk, repesi takaseinän seinäputki tertiääritason yläpuolelta (kuva 2).



Kuva 2. Zellstoff Pölsin tehtaan soodakattilan seinäputken repeämä

Putken repeämän seurauksena vettä pääsi suoraan tulipesään saaden aikaan voimakkaan räjähdysen. Räjähdysen aikana kattilahuoneessa oli kaksi työntekijää, jotka onneksi selvisivät räjähdyksestä vähäisin vammoin. Kattila kärsi pahoja vaurioita. Tulipesän kaikki kulmat aukesivat useiden metrien matkalta, seinät taipuivat voimakkaasti varsinkin tulipesän alaosassa (kuva 3).

Vauriot todettiin niin vakaviksi, että kattila päätettiin rakentaa kokonaan uudelleen. Uusi kattila otettiin käyttöön joulukuussa 2015, joten uudelleenrakennus aiheutti 21 kk pituisen osittaisen käyttökatkon tehtaan toiminnassa. Tänä aikana tehdasta ajettiin käyttäen varalla ollutta pienempikapasiteettista soodakattilaa, jota käyttäen tehtaan tuotanto pystyttiin pitämään hieman alle puolessa aiemmasta selluntuotantokapasiteetista (400 000 t/a).



Kuva 3. Zellstoff Pölsin soodakattila räjähdysen jälkeen

Natron-Hayatin Maglajin tehtaan soodakattilassa, jonka kapasiteetti oli 600 tKA/vrk, repesi seinäputki lähellä primääri-ilma-aukkoja saaden aikaan kattilasuojan laukeamisen. Pian tämän jälkeen tulipesässä tapahtui räjähdys, jonka seurauksena tulipesän kaksi kulmaa aukesivat. Räjähdyksessä kuoli lämmittäjä, joka räjähdys hetkellä oli katsomassa tulipesään tarkastusluukusta. Muut kattilahuoneessa olleet selvisivät palovammoilla ja ruhjeilla. Kattila vaurioitui räjähdyksessä niin, että kaikki seinät ja tulistimet vaihdettiin. Korjaustyöt aiheuttivat noin 5,5 kuukauden pituisen katkoksen tehtaan toiminnassa.

Yhteistä kaikille neljälle edellä kuvatulle tapaukselle on, että jokaisessa niissä vettä virtasi tulipesään huomattavan paljon.

Äänekoskella todettiin jälkeinpäin, että tulipesän oikeassa seinässä oli noin metrin levyinen kaista, jonka verhoputkesta purkautunut vesi oli pessyt puhtaaksi. Vettä on siten valunut pohjalle samaan tapaan kuin Skoghallissa, jossa vesi valui tertiääri-ilma-aukoista seinää pitkin.

Pölsin ja Maglajin räjähdyksissä vuodon koko on arvioitavissa karkeasti seinäputkiin tulleen aukon alan perusteella. Kuvasta 3 arvioiden Pölsissä repeämän ala oli noin $2,5 \text{ cm}^2$, ja Maglajissa repeämän kooksi arvioitiin $4,5 \text{ cm}^2$. Kokemukset muissa kattiloissa tapahtuneista vuodoista osoittavat, että tällaisissa tapauksissa vuoto tulipesään on huomattavasti yli 10 kg/s.

Nämä kokemukset viittaavat siihen, että voimakas tulipesäräjähdys edellyttää, että tulipesään vuotaa vettä vuolaasti, vähintään useita kiloja sekunnissa, joko putken repeämän tai muuta kautta.

Tätä olettamusta tukevat myös aiemmat kokemukset Pohjoismaissa tapahtuneista voimakkaista soodakattilaräjähdyksistä. Tällaisia räjähdyksiä on tapahtunut Vallvikissa Ruotsissa 1998 seinäputken repeytyessä puolen metrin matkalta, Stora Enson Oulun tehtaalla 1981 verhoputken

katkeamisen takia ja Stora 2, Enso Kotkan tehtaalla 2001 seinäputken repeytyessä samaan tapaan kuin Pölsissä.

Vallvikissa räjähdysten seurauksena kattila kärsi vakavia vaurioita, joiden korjaaminen aiheutti 4 kk pituisen seisokin. Myös Oulussa vauriot olivat huomattavat, etunurkat aukesivat 20 cm, sivuseinät ja sidepalkit taipuivat max 25 cm ja kattilan pohjaputket taipuivat yhdeltä nurkalta alaspäin 20 cm. Räjähdyks tapahtui 14 min putken katkeamisen jälkeen.

Eniten kokemuksia tulipesäräjähdyksistä on Pohjois-Amerikassa, ja niistä yhteenvedon esitti Tom Grace Soodakattilayhdistyksen 30-vuotisseminaarissa 1994. Esitys kattoi jaksolla 1970 – 1993 tapahtuneet räjähdykset. Esityksessä mm. listattiin räjähdysten aiheuttaneiden vuotojen koot, sijainnit ja niistä seuranneet vahingot, ks. taulukko 1.

Taulukko 1. Pohjois-Amerikassa 1970 – 1993 tapahtuneiden soodakattilaräjähdyksien, joiden syynä oli vuoto painerungossa, aiheuttaneiden vuotojen koot, sijainnit ja vahinkojen voimakkuus

Vuodon koko	Vuodon sijainti	Räjähdyksen voimakkuus		
		Suuri	Kohtalainen	Vähäinen
Suuri	Tulipesän pohja	1	2	0
	Tulipesän seinät	3	5	0
	Tulipesän katto	1	0	0
	Verhoputket	4	2	2
	Keittopinta	0	1	1
	Tulistin	1	0	0
	Yhteensä	10	10	3
Pieni	Tulipesän pohja	1	0	1
	Tulipesän seinät	0	0	4
	Tulipesän katto	0	0	0
	Verhoputket	0	0	0
	Keittopinta	0	0	0
	Tulistin	0	0	0
	Yhteensä	1	0	5

Suurten vuotojen aiheuttamia räjähdyksiä oli 23 ja pienten 6. Pienten vuotojen koot olivat seuraavat:

- pohjaputkivuodot: puolen tuuman särö ja pistemäinen reikä halkaisijaltaan alle 1 mm
- seinäputkivuodot: neulanpäävuoto, puolen tuuman särö, halkaisijaltaan 3 mm reikä ja 3 x 5 mm suuruinen reikä

Ainoa huomattavia vaurioita aiheuttanut pieni vuoto oli pohjaputken puolen tuuman särö. Poikkeuksellista ko. tapauksessa oli, että räjähdys tapahtui 3 h 15 min pikapysäytyksen jälkeen. Pohjalle on todennäköisesti kertynyt vuodon seurauksena vettä pikapysäytyksen jälkeen ja ”alkupanoksena” räjähdykselle on todennäköisesti ollut tulistimista pudonnut kami. Ko. tapauksessa ei kokonaan voida sulkea pois myöskään kaasuräjähdyksen mahdollisuutta.

Suurista vuodoista lähes kaikki olivat puolestaan putken katkoja tai repeämiä, joissa vuotovirtaus on ollut hyvin suuri, selvästi yli 10 kg/s. Tapauksia, joissa vuodon koko on saattanut rajoittaa veden virtaamista tulipesään, olivat ainoastaan seuraavat:

- verhoputkivuoto, ei vaurioita, vuodon koko 5 mm x 25 mm, aikaa kului hetkestä, kun vuoto tunnistettiin, pikapysäytyksen tekoon 25 min
- verhoputkivuoto, suuret vauriot, vuodon koko 10 mm x 37 mm, aikaa kului hetkestä, kun vuoto tunnistettiin, pikapysäytyksen tekoon 3 min

- pohjaputkivuoto, suuret vauriot, vuodon koko 6 mm x 25 mm, vuodon alusta ei tietoa (vuotoa ei tunnistettu eikä pikapysäytystä tehty ennen räjähdystä)

Vuotovirtaus em. tapauksissa on ollut arviolta 8 - 25 kg/s.

Suomessa on tapahtunut 2000-luvulla neljä kattilavuotoa, jotka aiheutuivat (suoraan tai välillisesti) tulipesäräjähdysten:

- seinäputken repeämä Stora Enso Laminating Paper Oy:n tehtaalla Kotkassa 2001
- tulistinputken katko Metsä Fibren Kemin tehtaalla 2008
- verhoputken vuoto Metsä Fibren tehtaalla Raumalla 2011
- kattoputken repeämä Stora Enson Veitsiluodon tehtaalla 2014

Huomattavia vahinkoja aiheutui ainoastaan Kotkan räjähdyksestä (seisokkiaika 302 h). Kemissä, Raumalla ja Veitsiluodossa vauriot rajoittuivat pääosin heikon nurkan avautumiseen max 100 mm ja seinien lievään taipumaan (seisokkiajat 117 h, 85 h ja 82 h).

Kemin tapaus oli poikkeuksellinen, koska räjähdys tapahtui tulistimien vesipesun aikaan noin 18 tuntia pikapysäytyksen jälkeen ja noin tunti tulistimien vesipesun aloituksen jälkeen. Muut tapaukset sitä vastoin vaikuttavat tyypillisiltä: yhteistä kaikille kolmelle vuodolle on, että vuodot olivat huomattavan suuria, luokkaa 20 kg/s tai enemmän.

Edellä esitetyt havainnot tukevat sitä luonnolliselta tuntuva oletusta, että vuodon koko ja sijainti vaikuttavat huomattavasti sekä todennäköisyyteen, että vuodosta seuraa räjähdys, että todennäköisyyteen, että räjähdys on tarpeeksi voimakas aiheuttaakseen huomattavia vahinkoja.

Vaarallisimpia ovat suuret vuodot tulipesän seinä-, verho- tai kattoputkissa sekä sellaiset suuret vuodot keittopinnassa, joissa vesi suihkuu tulipesään. Lähes kaikki vakavia vahinkoja aiheuttaneet tulipesäräjähdykset olivat tällaisten vuotojen aiheuttamia.

Vaarallisista vuodoista ei aina seuraa tulipesäräjähdystä: suomalaisillakin tehtailla on kokemusta esim. suurista seinäputkivuodoista, joista on selvitty ilman vahinkoja.

Suomessa on 2000-luvulla tapahtunut ainakin yhdeksän vuotoa, joissa vettä pääsi tulipesään (taulukko 2). Neljässä tapauksessa kattilan käyttö pysäytettiin pian vuodon alun jälkeen joko operaattorin toimesta tai kattilasuojan laukeamisen takia. Pikatyhjennys tehtiin ainoastaan yhdessä tapauksessa.

Taulukko 2. Vaaralliset vuodot suomalaisissa soodakattiloissa 2000 - 2016

	Tehdas	Vuodon paikka	Pikapysäytys/kattilasuoja	Pikatyhjennys
2000	MF Kaskinen	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2001	Kotkamills	Seinä	Molemmat	Ei
2006	UPM Kaukas	Verho	Pikapysäytys	Kyllä
2007	UPM Tervasaari	Seinä	Ei kumpaakaan	Ei
2011	Stora Enso Imatra	Seinä	Molemmat	Ei
2011	MF Rauma	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2012	MF Rauma	Verho	Ei kumpaakaan	Ei
2014	Stora Enso Veitsiluoto	Katto	Pikapysäytys	Ei
2015	Stora Enso Heinola	Seinä	Ei kumpaakaan	Ei

Ko. jaksolla käyttövuosia kertyi noin 300, joten keskimäärin vaarallisia vuotoja näyttäisi tapahtuvan noin kerran 30 vuodessa.

Tulipesäräjähdys sattui Kotkassa, Raumalla ja Veitsiluodossa, joten räjähdyksiä tapahtui yhdessä tapauksessa kolmesta. Saman suuruiseen arvioon (30 %) räjähdys todennäköisyydestä tilanteessa, jossa vettä pääsee tulipesään, päätyi myös Grace vuonna 1994 BLRBAC:n vaurio- ja räjähdystilastojen perusteella.

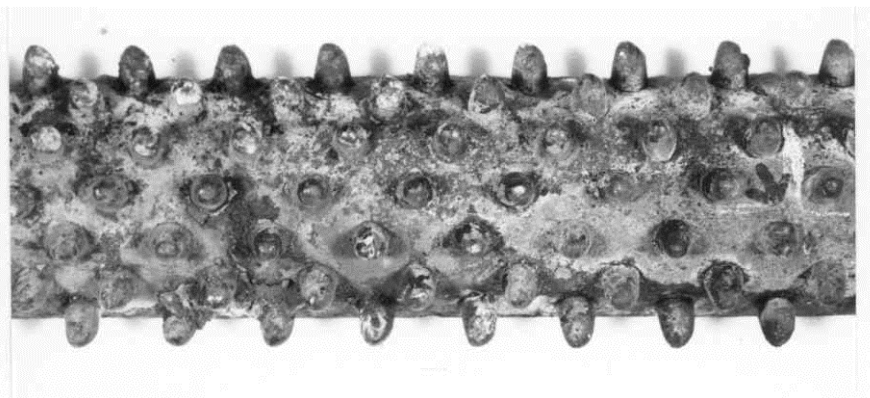
Pienet vuodot näyttäisivät aiheuttavan tulipesäräjähdyksiä sitä vastoin hyvin harvoin. Esim. Suomessa ei ole tapahtunut yhtään pienen vuodon aiheuttamaa tulipesäräjähdystä ainakaan viimeiseen 30 vuoteen.

Osaltaan tähän on myötävaikuttanut se, että Suomessa kattiloita on onnistuttu käyttämään niin, että pohjaputkivuotoja on ollut hyvin harvoin. Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannasta löytyi jaksolta 1986 - 2016 ainoastaan kolme raporttia pohjaputkivuodoista, Oulun B&W:n soodakattilasta vuodelta 1986, Sunilan T-9-kattilasta vuodelta 1987 ja Kaskisten soodakattilasta vuodelta 1997. Kaskisten vuoto havaittiin vesipainekokeen aikana. Oulun ja Sunilan pohjaputkivuodot tapahtuivat käynnin aikana, joten molemmissa tapauksissa kyse oli vaaratilanteesta.

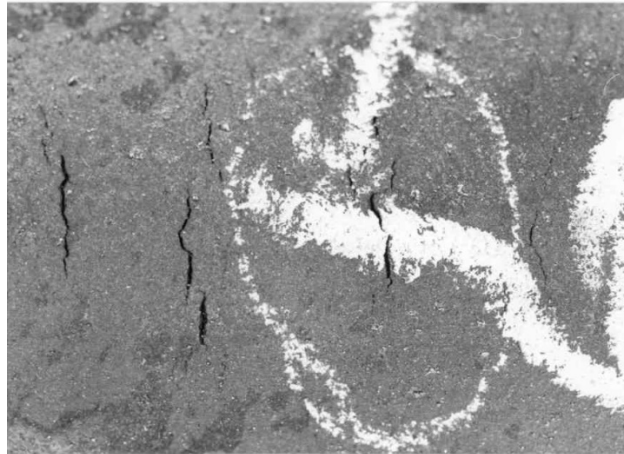
Oulun soodakattilan K-11681 vuodosta laaditussa raportissa on tilanteen kulku kuvattu seuraavasti:

"Kattilalta oli lipeänpoltto keskeytyksissä yövuoron alkupuolella 14.12.1986 tulistimien tukkeutumien poistamiseksi. Noin klo 3.50 kuului tulipesästä 2 – 3 jysähdystä ja pesä kävi hetkellisesti ylipaineen puolella. Ajoittain voitiin nähdä tarkastusluukun kohdalla sulan roiskuvan 20 - 30 cm korkealle. Ko. hetkellä oli päällä lipeänpolton lisäksi myös kaksi öljypoltinta. Vuorossa oleva käyttöhenkilökunta lopetti lipeän polton ja ilmoitti asiasta käytönvalvojalle. Äänihavaintojen jälkeen oli kattilalla kaikki olosuhteet normaalit, eikä tarkastuksen perusteella voitu mitään vuotoa siinä paikallistaa. Kattila päätettiin kuitenkin ajaa alas normaalisti perusteellista tarkastusta varten. Kattilan paine laskettiin nopeasti 60 bar => 32 bar, ja kun sulan muodostus oli enää vähäistä ja keko oli poltettu lähes pois, niin havaittiin kattilan pohjalta oikean sivuseinän läheltä tulevan pienen höyrysuihkun. Tämän jälkeen lopetettiin öljyn poltto ja siirryttiin hoitamaan paineenlaskua yms. kauko-ohjauspaikalta. Tulipesää jäähdytettiin primääri-ilmalla. Tulistimien ja tulipesän vesipesuun päästiin samana päivänä noin klo 15.30. Noin klo 22 lopetettiin nuohoimilla pesu, jolloin nähtiin hyvin pieni, noin puolen metrin korkeuteen nouseva (staattinen paine) vesisuihku kattilan pohjaputkesta."

Vuodon syyksi paljastui pieni särö pohjaputkessa, ks. kuvat 4 ja 5.



Kuva 4. Oulun soodakattilan K-11681 pohjaputki vuonna 1986 (vuoto nuolen kohdalla)



Kuva 5. Oulun soodakattilan K-11681 pohjaputken sisäpinta vuonna 1986 (putken läpi edennyt särö kuvassa ympyröitynä)

Sunilan T-9-kattilan vuodosta laaditun raportin mukaan

"12.1.1997 klo 12.20 vuoromestari soitti, että tulisin katsomaan T-9-kattilan takaseinän primääri-ilma-aukkoja kun keskellä seinää on kummallinen kova möykky, joka ei sula. Kattilassa sillä hetkellä ollut yksi lipeäsuutin otettiin ulos ja avattiin vasemmalla sivuseinällä sekundäärikerroksessa oleva kulkuluukku. Heti näkyi selvästi, että keskellä tulipesää takaseinästä eteenpäin m. 0,5 m oli "tulivuoren" muotoinen n. 1000 - 1200 mm korkea jähmeästä sulasta ja lipeästä muodostunut katkaistu kartio, jonka aukon halkaisija oli noin 400 – 500 mm. Tämä muodostelma oli täynnä vettä, joka kiehui ja aaltoili erittäin voimakkaasti ja roiskui ympärilleen.

Toteamuksen jälkeen heti klo 12.40 suoritettiin keskusvalvomosta käsin pikapysäytys ja kattilahuoneen eteläinen osa, joka katsottiin vaara-alueeksi, tyhjennettiin väestä.

Syöttöveden pumppaus kattilaan keskeytettiin ja kattilan paine laskettiin suurinta sallittua nopeutta. Kattilan annettiin jäähtyä noin 10 tuntia. Tänä aikana vesipinta laski 22 metristä 17 metriin. "Tulivuori" oli sulanut ja palanut pois ja pohjalla oli vain aukko, joka oli täynnä vettä. Vuoto oli noin 7 mm pitkä poikittainen särö noin 300 mm takaseinästä etuseinään päin."

Molemmissa tapauksissa vuodon aiheuttaja oli pieni särö, joten voidaan olettaa, että myös vuotovirtaus on ollut pieni, alle 1 kg/s.

Mielenkiintoista edellä kuvatuissa tapauksissa on, että tilanteista selvittiin ilman räjähdystä, vaikka molemmat kattilat ajettiin alas normaaliin tapaan, kun taas ainoastaan Pohjois-Amerikassa tapahtuneesta räjähdyksessä, joka aiheutui pienestä pohjaputken säröstä ja jossa vahinkoja kuvattiin "laajoiksi", räjähdys tapahtui yli 3 tuntia pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen aloituksen jälkeen. Toisesta Pohjois-Amerikassa tapahtuneesta pienen pohjaputkivuodon (reikä halkaisijaltaan alle 1 mm) aiheuttamasta räjähdyksestä ei aiheutunut lainkaan vaurioita, pikapysäytyksestä ja -tyhjennyksestä huolimatta.

Kokemukset pienistä pohjaputkivuodoista viittaavat kokemuksiin siihen, että pienet vuodot myös pohjaputkissa ovat suhteellisen vaarattomia varsinkin, kun kattila ajetaan alas normaalisti niin, että keko pysyy kuumana alasajon ajan aina niin kauan kun pohjalla on palavaa materiaalia, ja palamisen loputtua pohja jäähtyy nopeasti.

3 Pienet ja suuret vuodot

Edellä on käytetty termejä "pieni vuoto" ja "suuri vuoto" tarkentamatta mitä näillä termeillä tarkoitetaan. Tulipesäräjähdyksriskin kannalta relevantti määrittely voisi olla seuraava:

- vuoto on pieni, kun vettä purkautuu tulipesään niin vähän, että se haihtuu kaasutilassa eikä sulavesiräjähdyksen vaaraa ole
- vuoto on suuri, kun vettä purkautuu tulipesään niin paljon, että osa siitä putoaa tulipesän pohjalle ja voi siten saada aikaan tulipesäräjähdyksen.

Tällaisen määrittelyn hankaluutena on, että käytännössä vuodon "pienuus" ja "suuruus" riippuisi sekä vuodon paikasta että kattilan käyttötilasta. Alhaalla tulipesässä jo 1 kg/s suuruinen vuoto voisi olla "suuri" varsinkin sen jälkeen kun lipeänpoltto keskeytetään, koska tällöin vettä todennäköisesti pääsee pohjalle saakka. Toisaalta esim. 10 kg/s suuruinen vuoto kattilan yläosassa lipeänpolton aikana olisi "pieni", sillä vesi haihtuu matkalla eikä räjähdysvaaraa siten olisi niin kauan kun lipeän polttoa jatketaan.

On myös epäselvää, mitä käytännön hyötyä em. määrittelystä olisi, sillä operaattoreiden voi olla mahdotonta paikantaa vuotoa luotettavasti tulipesän alueella, jolloin edellä kuvatun kaltaista määrittelyä ei voitaisi useimmiten tehdä vuodon aikana.

Onkin selvempää määritellä "pieni" ja "suuri" vuoto yksinkertaisesti vuodon koon perusteella niin, että vuoto on "pieni" kun vuodon aiheuttaa läpiseinän oleva särö tai pieni reikä, kun taas suuressa vuodossa putkessa on virtausalaltaan tyypillisesti useita neliösenttejä oleva repeämä tai aukko.

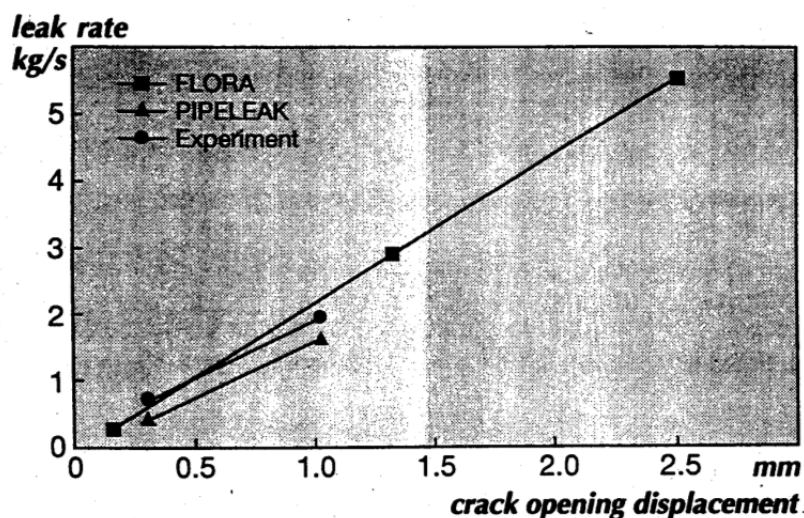
Säröjen aikaansaaman vuodon suuruuteen vaikuttavat monet seikat, kuten

- särön pituus
- särö aukeama
- särön muoto
- pinnan karheus

Luonnollisestikin vuoto on sitä suurempi, mitä suuremmasta säröstä on kysymys, mitä enemmän särö on auki ja mitä suurempia ja sileämpiä ovat särön synnyttämät metallipinnat, joiden välissä vesi virtaa.

Säröjen aikaansaamien vuotojen koon arviointiin on laadittu laskentaohjelmia, mutta tässä tapauksessa riittää, että "pienelle vuodolle" määritetään realistinen yläraja. Tämä yläraja on määritettävissä kokeellisten tulosten perusteella.

Tarkoitukseen sopiva koe tehtiin 1990-luvun alussa Saksassa. Kokeessa mitattiin vuoto putkesta, jonka halkaisija oli 88,9 mm, seinämänpaksuus oli 5,6 mm ja paine oli 105 bar. Putkeen oli tehty poikittainen särö, jonka pituus oli 100 mm. Putken materiaali oli 1.4571. Materiaalia lukuun ottamatta koeolosuhteet vastasivat siten kohtalaisen hyvin soodakattilan tulipesän putken olosuhteita tilanteessa, jossa putkessa on koko kuumen puolen poikki ulottuva särö. Materiaalilla on vaikutusta lähinnä särön pinnan karheuteen, joka hiiliteräksellä on tavallisesti suurempi kuin austeniittisilla teräksillä. Koetulosta voidaan siten pitää yläarvona vastaavalle vuodolle hiiliteräspanputkessa. Kokeessa putkea taivutettiin asteittain niin, että vuodon kokoa voitiin havainnoida sekä putken ollessa suorassa että taivutettuna. Tulokset (yhdessä laskentamallien tulosten kanssa) on esitetty kuvassa 4.



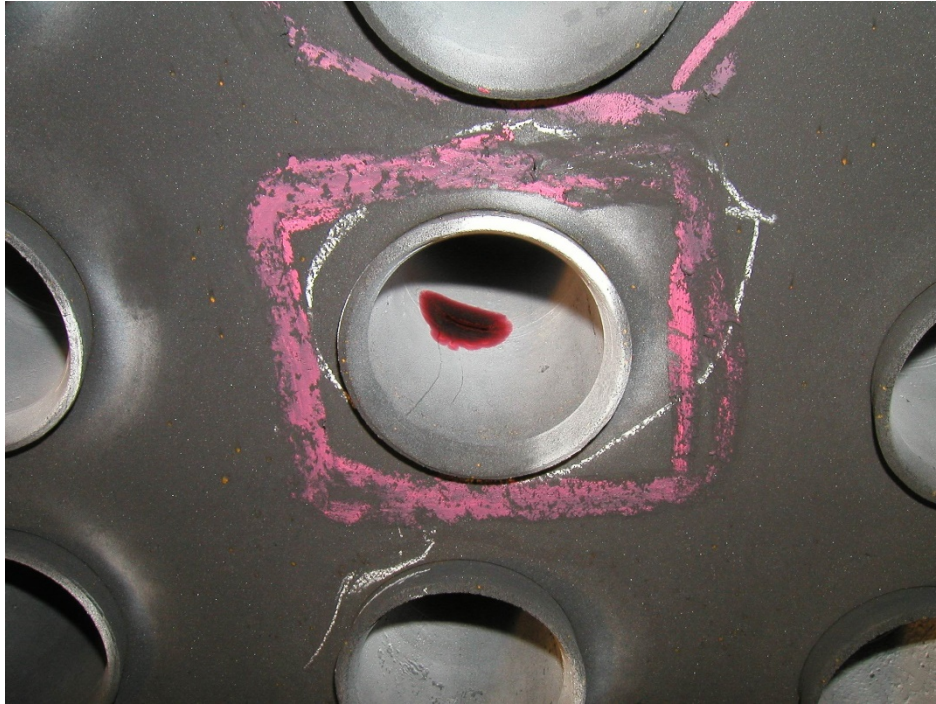
Kuva 6. Vuotovirtaus 88,9 x 5,6 mm putkesta, jossa oli 100 mm pitkä poikittainen särö ja jonka paine oli 105 bar, erilaisilla taivutuksilla [1].

Kuvan 6 tulosten mukaan särön aiheuttama vuoto on korkeintaan luokkaa 0,2 kg/s särön ollessa kiinni, mutta särön avautuessa vuoto kasvaa useisiin kiloihin sekunnissa.

Koetulokset vastaavat hyvin kokemuksia soodakattilavuodoista. Soodakattilayhdistyksen keräämissä vaurioraporteissa on kuvattu useita tilanteita, joissa vuotoa on alettu epäillä, kun syöttövesi-höyryero on 0,2 - 0,3 kg/s. Esimerkkinä tällaista vuodosta on Sunilan soodakattilassa SK10 2004 todettu vuoto, jota koskevan vaurioraportin teksti on seuraava:

”Ma 29.3.04 n. klo 07.00 havaittiin vesitasekäyrissä selkeää nousua alkaen su 28.3.04 n. klo 16.00 ollen luokkaa 0,2 - 0,3 kg/s. Kattila normaalilla kuormalla 8,5 l/s (KA 79,5%) höyrystys 33 kg/s. Kattilakierrokset eivät tuoneet esiin mitään vuotoon viittaavaa, toiminta normaalia. Tilannetta seurattiin puolille öin mm. tarkkailemalla suolan laatua kuljettimilla, ei poikkeavaa. Ti 30.3.04 aamulla tutkimuksia jatkettiin ja todettiin tasekäyrissä hienoista nousua ollen nyt luokkaa 0,4 kg/s. Polttoa pienennettiin, nuohous keskeytettiin ja pyrittiin kuuntelemaan miesluukuista mahdollista vuodon aiheuttamaa ääntä. Kohisevan äänen havaittiinkin tulevan jostakin lieriöiden väliltä keittopinnalta. Päätettiin ajaa kattila alas, suoritettiin tarvittavat viranomaisilmoitukset, pienennettiin polttoa edelleen ja suoritettiin pikapysäytys klo 10.54. Ylälieriöllä ja keittopintaputkissa havaittiin puhallusjälkiä mutta vuotokohtaa ei voitu paikantaa. N. klo 20.00 kattilan ollessa paineeton havaittiin alalieriön päällä valuvan vettä, vuotokohtaa ei voinut todeta. Ke 31.3.04 iltapäivällä telinetöiden jälkeen päästiin vuotokohteeseen. Kattilaa hetken täytettyä vettä tuli alalieriön vaipan/keittoputken välistä. Kattilan tyhjennyksen jälkeen alalieriöstä ei kuitenkaan voitu todeta vuotokohtaa. Alalieriön ulkopuolelle vuotoalueelle suihkutettiin purkillinen punaista tunkeumanesteväriä, jolloin hetken kuluttua väri tuli läpi putkesta 39H. Vuoto oli ilmeisesti mankelointilaitteen rissan jättämän poikittaisen, terävähkön lopetusjäljen suuntainen n. 12 mm pitkä halkeama n. 10 mm vaipan ulkopinnasta. (Em. terävähköjä jälkiä lienee lähes kaikissa reikäkentän 980:ssä putkissa).”

Kuvassa 7 on ko. putki tunkeumaväriä avulla tehdyn vuodon paikannuksen jälkeen.



Kuva 7. Pieni särö keittopinnan putkessa 29.3.2004 Sunilan soodakattilassa SK10

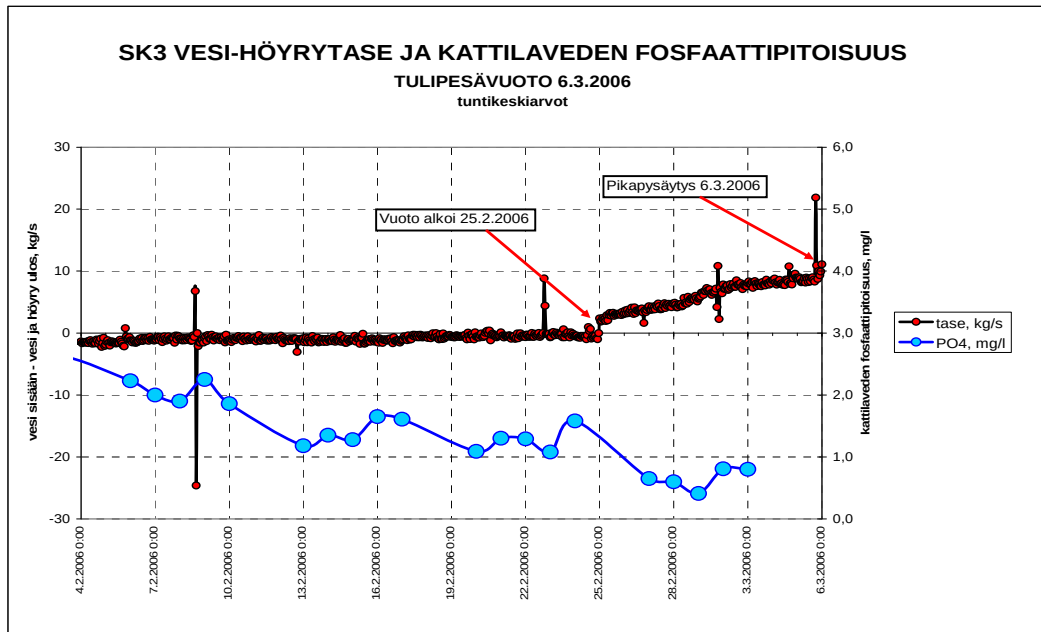
Edellä kuvattu Sunilan vaurio havainnollistaa hyvin miten pieniä vuotoja on mahdollista löytää yksinomaan syöttövesi-höyryeron seurannan perusteella, kun eron laskenta on toteutettu niin, että mittausten kohinan ja lieriön pinnan vaihtelun aiheuttama huojunta on suodatettu pois.

Mikäli Sunilan vuotoa ei olisi havaittu niin nopeasti kuin se ko. tapauksessa havaittiin, olisi vuoto vähitellen kasvanut ja saanut luultavasti aikaan myös vaurioita ympäröivissä putkissa.

Vastaava vaurio UPM Kymmenen Tervasaaren soodakattilassa 1992 johti viereisen putken ohentumiseen niin, että lopulta ko. putkeen repesi 10 x 25 mm suuruinen aukko. Putken repeämisen seurauksena syöttövesivirtaus kasvoi yli 17 kg/s (yli piirturin alueen), mutta lieriön pinta laski tästä huolimatta kattilasuojan laukaisurajan alle, joten kattilasuoja keskeytti lipeän syötön kattilaan. Myös polttoilmapuhaltimet pysähtyivät. Syöttövesipumppu pysäytettiin operaattoreiden toimesta. Tunti ja 15 min kattilasuojan laukeamisen jälkeen tulipesässä tapahtui kaasuräjähdyks. Kaikki tulipesän neljä kulmaa aukenivat useiden metrien matkalta. Syynä kaasuräjähdykseen oli, että kattilan kuivakeittosuoja oli laadittu niin, että se esti polttoilmapuhaltimien käytön tulipesän tuulettamiseksi. Räjähdyksestä selvittiin ilman henkilövahinkoja.

Soodakattilayhdistyksen keräämissä vaurioraporteissa ei yleensä ole kuvattu tarkasti, miten vuoto on kehittynyt, joten kovin selvää kuvaa siitä, miten nopeasti vuodot kasvavat ja miten nopeasti sekundäärisiä vaurioita syntyy, ei ole. Jonkinlainen käsitys on kuitenkin saatavissa tarkastelemalla muutamia yksittäistapauksia, joissa vuodon kehitys on suht tarkkaan tiedossa. Seuraavassa on kuvattu neljä tällaista tapausta.

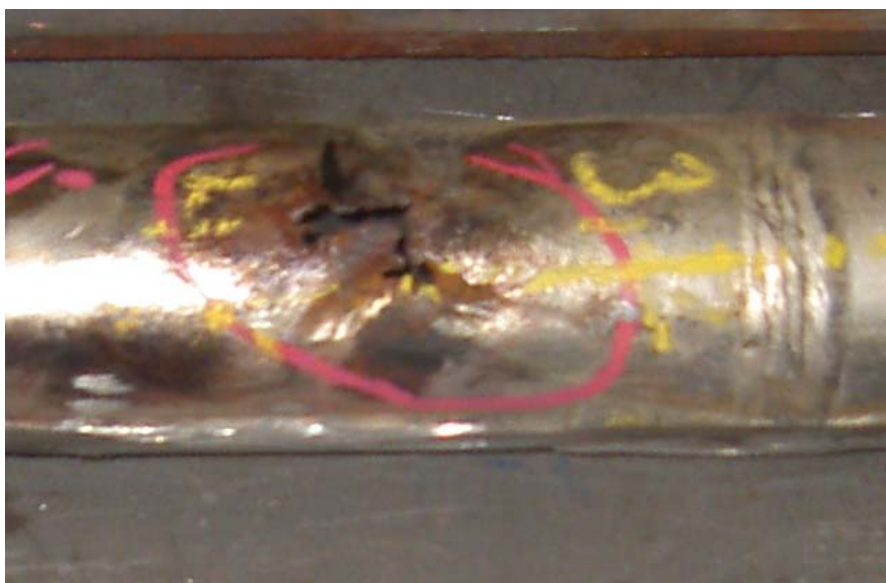
Ensimmäinen esimerkki on tulipesän seinäputken vuoto UPM Kaukaan soodakattilassa vuonna 2006. Kuvassa 8 on esitetty syöttövesi-höyryeron ja kattilaveden fosfaattipitoisuuden trendit. Kuva on Jukka Savolaisen esitelmästä vuoden 2007 Konemestaripäiviltä.



Kuva 8. Syöttövesi-höyryero ja kattilaveden fosfaattipitoisuus UPM Kaukaalla 4.2. – 6.3.2006

Kuvan 8 tekstin mukaan vuoto alkoi 25.2., jolloin ero kasvoi hyppäyksellisesti noin 3 kg/s. Kuvassa näkyy syöttövesi-höyryerossa pienempi muutos kuitenkin jo 6.2., jolloin syöttövesi-höyryero kasvoi noin 0,5 kg/s. Samaan aikaan myös kattilaveden fosfaattipitoisuus alkoi laskea, joten on todennäköistä, että muutos syöttövesi-höyryerossa on vuodon aikaansaama. Vuoto kasvoi hyvin hitaasti 25.2. saakka, jolloin syöttövesi-höyryeron trendissä näkyy selvä pumpsahdus. Tämän jälkeen vuoto kasvoi huomattavasti nopeammin, noin 0,7 kg/s vuorokaudessa, reilun viikon ajan kunnes se oli noin 10 kg/s. Tässä vaiheessa vuoto sai aikaan niin vakavan kiertohäiriön ko. seinäputkessa, että putki ylikuumeni ja repesi compound- ja hiiliteräspankin sauman yläpuolelta (mustalta osalta) 6.3.

Ensimmäisen vuodon aiheuttanut vaurio on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. UPM Kaukaan seinäputken alempi vaurio maaliskuussa 2006 (10 m pohjasta)

Ylikuumenemisen aiheuttama repeämä on puolestaan kuvassa 10.



Kuva 10. UPM Kaukaan tulipesän seinäputkivaurio 6.3.2006 (22 m pohjasta)

Seuraava teksti on lainaus Jukka Savolaisen esityksestä Konemestaripäivillä:

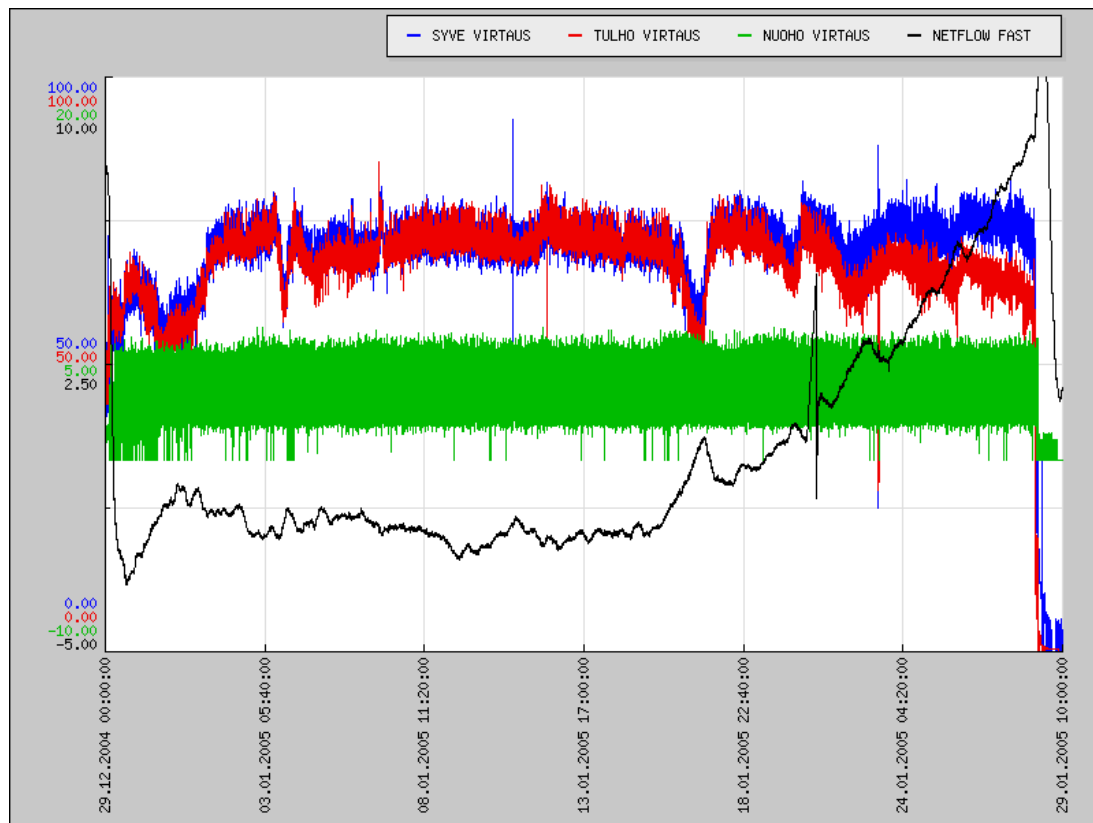
”Kattilassa oli havaittu kattilaveden fosfaattipitoisuuden laskua ja savukaasupuhaltimien likaantumista muutaman päivän ajan maaliskuun ensimmäisellä viikolla 2006.

Sunnuntaina 5.3.2006 kattilan vesi-höyrytaseen laskenta oli alkanut heitellä. Taselaskenta oli tuolloin reaaliaikainen. Nuohoushöyryn virtausmuutokset ja lieriön pinnansäätö-heilahtelut aiheuttavat taselaskentaan häiriötä niin, että hetkellinen tasearvo heiluu huomattavasti. Tämän vuoksi laskennan hälytysraja oli 10 kg/s. Tämä oli alkanut hälytellä sunnuntaina 5.3.2006 ja asiaa alettiin tutkia. Vuotoa ei oltu ehditty varmistaa, vaikka viimeiset tuntikeskiarvotkin osoittivat (jälkeenpäin tutkittuna) jo 10 kg/s:n eroa.

Yöllä n. 00:55 kattilan vesipinta hävisi lieriöstä ja kattila pysähtyi alapintalukituksesta. Vesipintaa yritettiin ensin saada takaisin syöttövedellä lisäämällä, mutta vesi-höyry-taseen eron kasvettua yli 100 kg/s:n ja kun kattilan tulipesästä alkoi kuulua jymähtelyä, tehtiin pikapysäytys ja pikatyhjennys. Kattila tyhjentyi suunnitellusti noin 20 minuutissa päälaskuputkien pikatyhjennysputkien tasolle eli n. 2,5 metriin (pohjasta) asti. Kattilalta ei valvomoon asti kuulunut enää jymähtelyä. Kattilahuoneessa liikkumisesta pidätyttiin 10 tuntia pikapysäytyksestä.”

Putken repeämisestä selvittiin Kaukaalla ilman tulipesäräjähdystä, joka olisi aiheuttanut merkittäviä vaurioita.

Toinen esimerkki vuodon kehittymisestä on Stora Enson Veitsiluodon tehtaalta tammikuusta 2005. Kuvassa 11 on esitetty syöttövesi-höyryeron, syöttöveden, höyryn ja nuohoushöyryn trendit 29.12.2004 – 29.1.2005.



Kuva 11. Syöttöveden, höyryn, nuohoushöyryn ja syöttövesi-höyryeron trendit Stora Enson Veitsiluodon tehtaän soodakattilassa 29.12.2004 – 29.1.2005

Syöttövesi-höyryeron trendin perusteella arvioiden vuoto alkoi 15. - 16.1., jolloin ero kasvoi noin 1,0 kg/s verran. Vuoto kasvoi 18. – 24.1. noin 0,8 kg/s vuorokaudessa, jonka jälkeen kasvu nopeutui ollen loppujakson noin 1,1 kg/s vuorokaudessa. Ennen alasajo vuoto oli noin 10 kg/s.

Vuoto paikannettiin 27.1. ekonomaiseriin tuhkan kosteuden perusteella, ja tämän jälkeen tehtiin päätös kattilan ajamisesta alas. Vuoto sijaitsi aivan ekonomaiserin yläosassa, joten tarvittiin huomattavan suuri vuoto, jotta edes osa vedestä selvisi haihtumatta tuhkakuljettimille saakka.

Kolmas esimerkki on suuresta vuodosta tulipesän seinäputkessa aasialaisessa soodakattilassa vuonna 2014, kuva 12.



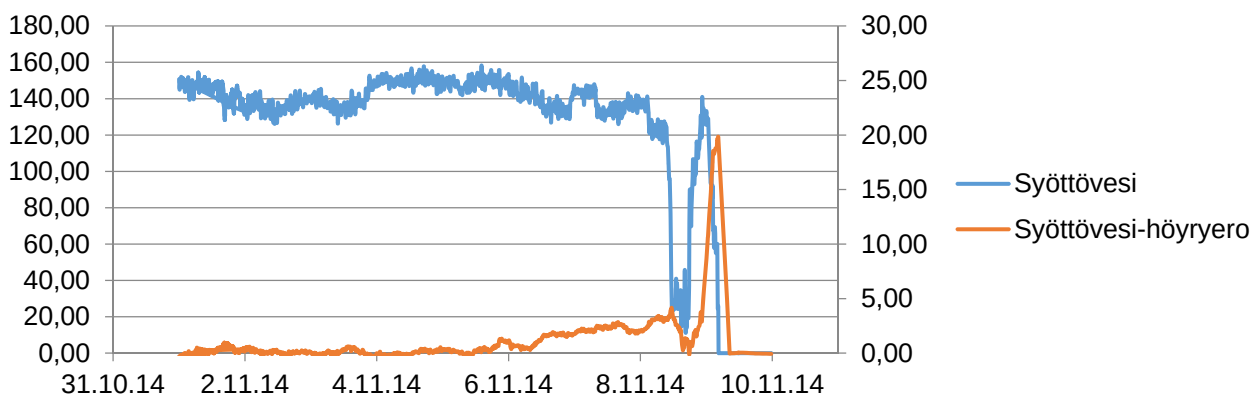
Kuva 12. Suuri vuoto kattilan seinäputkessa aasialaisessa soodakattilassa 2014

Seinäputkesta oli revennyt pala, kuten kuvasta 13 näkyy.



Kuva 13. Lähikuva vaurioituneesta seinäputkesta

Vaikka kyse on putken repeämästä, on todennäköistä, että tässäkin tapauksessa repeämistä edelsi hitaasti kasvanut pieni vuoto. Tähän viittaa syöttövesi-höyryeron trendi vuotoa edeltäneeltä jaksolta, kuva 14.



Kuva 14. Syöttövesivirtaus (kg/s) ja syöttövesi-höyryero (kg/s) 31.10. – 10.11.2014 aasialaisessa soodakattilassa

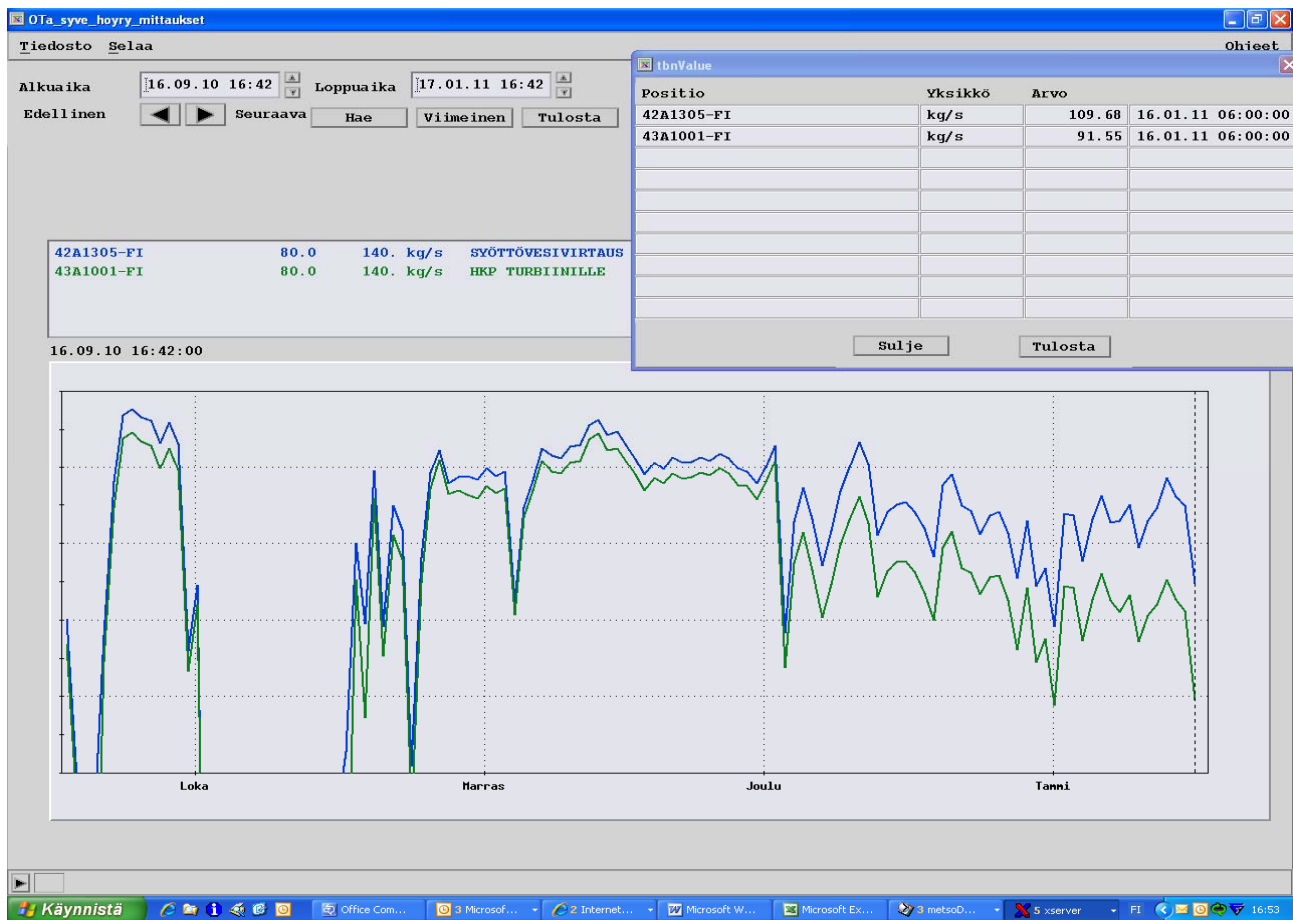
Syöttövesi-höyryeron mukaan kattilan seinäputkeen tuli pieni vuoto hieman ennen puoltapäivää 6.11., jolloin ero kasvoi noin 1,5 kg/s. Ero kasvoi kaksinkertaiseksi kahden seuraavan vuorokauden aikana. Kattilan kuorma laski 8.11. kun lipeän poltto katkaistiin noin kahdeksan tunnin ajaksi. Varsinainen repeämä tapahtui neljä tuntia sen jälkeen kun lipeän poltto oli aloitettu uudelleen ja kattila oli taas täydessä kuormassa. Repeämän seurauksena syöttövesi-höyryero kasvoi arvosta 3,3 kg/s arvoon 20 kg/s. Kattilassa oli siten pieni vuoto 2,5 vuorokauden ajan ennen repeämää.

Neljäs esimerkki on verhoputken vaurio MF Rauman soodakattilassa tammikuussa 2011, kuva 15. Vauriota koskeva raportti on päivätty 17.2.2011.



Kuva 15. Verhoputkivuoto MF Rauman soodakattilassa 2011

Syöttövesi- ja höyrytrendit jaksolta 16.9.2010 – 16.1.2011 esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Syöttöveden ja höyryn trendit MF Rauman soodakattilassa 16.9.2010 – 16.1.2011.

Trendien perusteella näyttäisi syöttövesi-höyryero olleen Raumalla ennen joulukuuta 2010 noin 2,5 kg/s, mutta joulukuun alussa tapahtuneen kuormanpudotuksen yhteydessä ero näyttää pomsahtavan arvoon 6,4 kg/s eli kasvua on noin 4 kg/s verran. Tämän jälkeen vuoto kasvoi tasaisesti lähes 1,5 kk ajan olleen 16.1. noin 15,6 kg/s. Vuoto kasvoi noin 0,35 kg/s vuorokaudessa.

Raumalla vuoto havaittiin, kun verhoputken vuoto suuntautui verhojen läpivientiin ja muurauksen syöpyessä vuoto näkyi kattilan ulkopuolella. Vaurion aiheuttaja oli kattoon ja tulistimiin muodostunut suolakami, joka pudotessaan rikkoi elementtien 15 ja 16 putkia. Elementin 15 ylimmässä putkessa alapuolinen evä oli painunut putken sisään ja aiheuttanut vuodon. Vuotosuihku oli osunut viereiseen elementtiin 14 kuluttaen reiän toiseksi ylimpään putkeen.

Kun kattila ajettiin alas, tapahtui noin 1,5 tuntia öljytulien sammuttamisen jälkeen tulipesäräjähdyks, jonka seurauksena kattilan heikko nurkka aukesi. Valvomohenkilökunnan mukaan todennäköinen räjähdysten aiheuttaja oli tulistimista pudonnut kami, joka rikkoi jäähtyneen suolapedin kuoren niin, että vesi ja kuuma sula pääsivät kosketuksiin. Tätä tukee se, että tulipesäkameran kuvassa näkyi kirkkaampia "säkenöiviä palloja".

Vauriomekanismit, jotka saivat aikaan vuodot em. tapauksissa, olivat huomattavan erilaisia. Kaukaalla ensimmäisen vuodon syynä oli sisäpuolinen korroosio ja toisen ylikuumentumisen aiheuttama viruminen. Veitsiluodossa vuodon syynä oli todennäköisesti väsymisen ja korroosion aiheuttama särötyminen. Aasialaisessa soodakattilassa puolestaan syynä luultavasti oli, Kaukaan tapaan, sisäpuolinen korroosio, mutta Kaukaan tapauksesta poiketen korroosion aiheuttama

vetyhaurastuminen oli niin voimakasta, että putkesta repesi pala. Raumalla puolestaan vaurion aiheutti mekaaninen isku putkeen ja putken painuminen kasaan. Erilaisista perussyistä huolimatta kaikki vuodot alkoivat säröinä, joiden aikaan saama vuoto oli 0,5 - 2,5 kg/s, eli juuri samaa luokkaa kuin vuotokokeessa.

Kuten olettaa sopii, nopeuteen, jolla särö kasvoi, vaikutti em. tapauksissa putken kunto. Särön eteneminen ja vuodon kasvu olivat nopeimpia aasialaisessa soodakattilassa, jossa putkimateriaali oli heikentynyt sisäpuolisen korroosion takia eniten. Tällöinkin vuodon kasvuun suureen vuotoon saakka aikaa kului muutamia päiviä.

Em. tapausten valossa näyttäisi siltä, että ainoat vauriomekanismit, jotka voi saada aikaiseksi äkillisen suuren vuodon, on putken puhkeaminen ylikuumenemisen aiheuttaman virumisen tai korroosion tai mekaanisen kulumisen aiheuttaman seinämän ohentumisen takia.

Muissa tapauksissa, joita voidaan olettaa olevan suurin osa kaikista vuodoista, vuoto alkaa pienenä särönä ja kestää useita päiviä tai jopa viikkoja tai kuukausia, ennen kuin vuoto kasvaa suureksi vuodoksi tai saa aikaiseksi suuren vuodon ko. putken tai naapuriputken repeämisen takia.

Jonkinlainen käsitys siitä, miten suureen osaan vuodoista ja räjähdyksistä on mahdollista vaikuttaa kattiloiden tiiveydenvalvontaa tehostamalla, on saatavissa tarkastelemalla Tom Gracen tekemää yhteenvetoa Pohjois-Amerikassa 1970 – 93 tapahtuneista tulipesäräjähdysten syistä, taulukko 3.

Taulukko 3. Pohjois-Amerikassa vuosina 1970 – 93 tapahtuneiden soodakattilaräjähdysten aiheuttaneiden painerungon vuotojen syyt [2, 3]

Syy	Tapaukset	Osuus
Ylikuumeneminen – syy tuntematon/tukkeutuminen/matala pinta lieriössä	13	43 %
Puutteellinen hitsaus	7	23 %
Korroosio (irronnut pinnoite, jännityskorroosio, väsymiskorroosio, yms.)	5	17 %
Mekaaninen vaurio (suolakamin putoaminen tms.)	2	7 %
Pienen vuodon aiheuttama eroosio	1	3 %
Kylmän puolen korroosion aiheuttama murtuma	1	3 %
Nuohojen aiheuttama eroosio/korroosio	1	3 %

Suurin osa, ellei kaikki, puutteellisen hitsauksen, korroosion ja pienen vuodon aiheuttamasta eroosiosta seurannaista vuodoista alkoivat todennäköisesti pienestä säröstä. Lisäksi osa ylikuumenemisen tai mekaanisen vaurion aiheuttamista vuodoista on saattanut olla samanlaisia kuin Kaukaan 2006 seinäputkivaurio tai Rauman verhoputkivaurio, joissa molemmissa vuoto oli aluksi pieni. Voidaankin arvioida, että huomattava osuus, karkeasti arvioiden noin 50 %, 1970 – 93 tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä olisi voinut olla estettävissä tehokkaalla vuodonvalvonnalla.

Suomessa äkillisiä vuotoja ovat taulukossa 2 esitetyistä tapauksista Sunilassa, Kotkassa ja Imatralla tapahtuneet vuodot, kun taas muissa tapauksissa vauriot etenivät suhteellisen hitaasti. Tehokkaasta vuotojen valvonnasta olisi siten voinut olla apua noin 70 % vaarallisista vuodoista.

Edellä kuvatut arviot ovat suuntaa-antavia, mutta suunta on selvä: huomattava osa suurista vuodoista, joita soodakattiloissa on vuosien saatossa tapahtunut, olisi voitu estää, jos vuodot olisi havaittu jo siinä vaiheessa, kun ne olivat pieniä. Kaikkia suuria vuotoja ei kuitenkaan voida estää ennalta edes tehokkaalla tiiveydenvalvonnalla, joten myös niihin on syytä varautua. Tämän vuoksi on seuraavissa kappaleissa käsitelty sekä pieniin että suuriin vuotoihin varautumista.

4 Pienten vuotojen valvonta

Tulipesärajähdyksistä saadut kokemukset viittaavat siihen, että tulipesärajähdyksen riskiä voidaan pienentää merkittävästi havaitsemalla vuodot, jotka ovat säröjen aiheuttamia, niin että kattilan alasajo voidaan toteuttaa 1 – 2 vuorokauden kuluessa vuodon alusta. Tällöin kattila ehditään todennäköisesti ajaa alas tilanteessa, jossa tulipesään vuotaa vettä vielä suhteellisen vähän, ja tilanne on tällöin huomattavasti vähemmän vaarallinen kuin jos alasajoon jouduttaisiin tilanteessa, jossa vuoto on jo edennyt suureen vuotoon saakka.

Seuraava kysymys kuuluu: onko tämä mahdollista? Voidaanko soodakattilan tiiveyttä valvoa niin tarkasti, että säröjen aiheuttamat vesivuoto tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa ovat havaittavissa viimeistään vuorokauden kuluessa vuodon alusta?

Tähän kysymykseen haetaan vastausta tässä kappaleessa käymällä läpi kattiloiden tiiveydenvalvontaan kehitettyjä järjestelmiä ja niistä saatuja käyttökokemuksia.

4.1 Massataseen seurantaan perustuvat järjestelmät

Kattilan tiiveyden valvonta massataseen perusteella perustuu siihen yksinkertaiseen periaatteeseen, että tarpeeksi pitkällä aikajaksolla kattilaan syötetyn vesimäärän täytyy olla yhtä suuri kuin kattilasta poistuneen veden ja höyryn määrän, koska ainetta ei synny eikä häviä kattilassa. Sopivaa tarkastelujaksoa käytettäessä lieriön pinnan ja kattilan vesimäärän vaihtelut kumoavat toisensa, joten niitä ei tarvitse huomioida tasetarkastelussa. Mikäli tase osoittaa, että vettä kuitenkin häviää, on syytä epäillä vuotoa.

Vuotovirtaus saadaan massataseesta

$$\text{vuotovirtaus} = \text{syöttövesivirtaus} - \text{höyryvirtaus} - \text{nuohoushöyryvirtaus} - \text{ulospuhallus}$$

Taseeseen saattaa kuulua myös esim. ruiskutusvesivirtaus.

Määrittävät termit ovat yleensä syöttövesivirtaus ja höyryvirtaus, ja näin saatua vuotovirtausta kutsutaankin yleisesti syöttövesi-höyryeroksi.

Virtausmittaukset eivät yleensä ole absoluuttisen tarkkoja, joten em. yhtälön antama vuotovirtaus poikkeaa nollasta suodatuksen jälkeenkin usein silloinkin, kun kattila on tiivis. Ero voidaan sovittaa nolaksi käyttämällä sovitteena vuotovirtauksen pitkän ajan keskiarvoa.

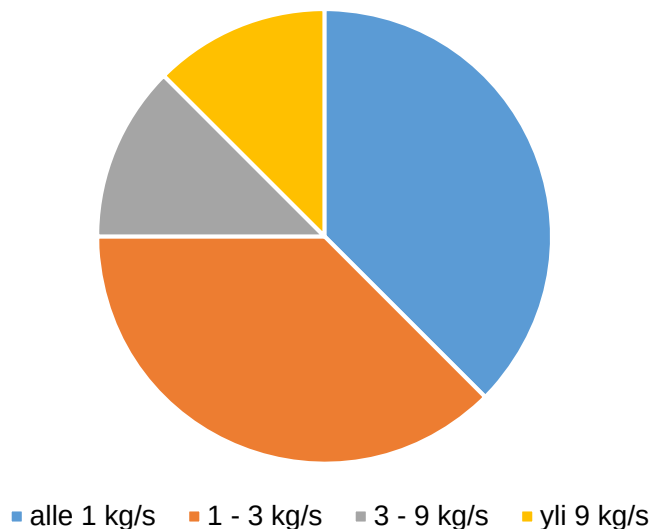
Koska vuotovirtaus lasketaan yhtälöstä, jossa ei yleensä ole mukana kattilan vesitilavuus, on vuotovirtauksella taipumus kasvaa kattilan kuorman pudotessa. Kuorman putoamisen seurauksena höyryntuotto kattilassa vähenee, jolloin höyryn määrä kattilassa kiertävässä virtauksessa pienenee. Tämän seurauksena lieriön pinta pyrkii laskemaan, ja pinnan säätö reagoi tähän lisäämällä syöttöveden virtausta. Syöttövesi-höyryero käy tässä tilanteessa normaalia suurempana, mutta palaa pian takaisin lähelle nollaa, kun kattilan kuorma tasaantuu, joten trendiä seuraamalla on helposti havaittavissa, että kyse ei ole vuodosta. Ajoittaiset hypähdykset ylöspäin ovat kuitenkin ei-toivottavia, sillä ne voivat aiheuttaa tarpeettomia hälytyksiä. Mikäli tällaisia hälytyksiä tapahtuu usein, kasvaa riski, että hälytys jää huomiotta myös silloin kun se aiheutuu todellisesta kattilavuodosta.

Kuorman muutosten aiheuttamaa syöttövesi-höyryeron huojuntaa voidaan hillitä huomioimalla laskennassa kuorman muutostilanteet ja/tai lisäämällä hälytyksiin viiveitä.

Syöttövesi-höyryeron laskentatapa vaihtelee tehtaittain. Yksinkertaisimmillaan laskenta on tehty käyttäen suoraan mittausdataa ja suodattamalla tulosta niin, että tulos vaihtelee esim. ± 5 kg/s verran. Lopputuloksena voi olla tällöin syöttövesi-höyryero, jonka suuruus normaalisti on keskimäärin $+ 8$ kg/s, mutta joka huojuu jatkuvasti välillä 3 kg/s – 12 kg/s. Suuren huojunnan takia hälytysraja joudutaan asettamaan korkealle, esim. arvoon $+18$ kg/s, joten hälytys aktivoituu vasta kun vuoto on yli 10 kg/s. Hälytys toimii tällöin käytännössä suuren kattilavuodon hälytyksenä. Syöttövesi-höyryero ei tällöin indikoi pientä vuotoa (trendimuutokset jäävät suurella todennäköisyydellä havaitsematta) eikä se siten auta suurten vuotojen ennaltaehkäisyssä.

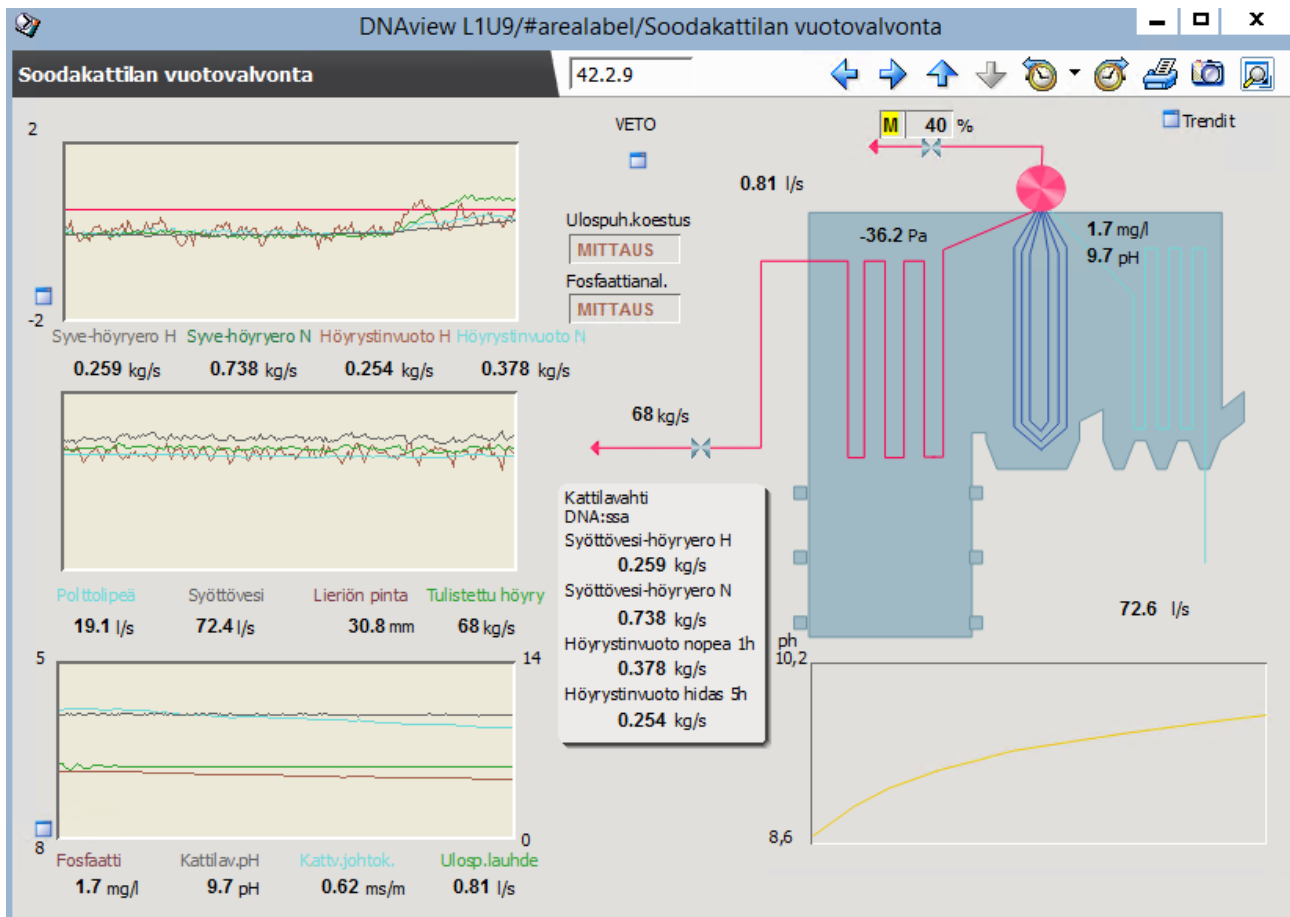
Osassa tehtaita syöttövesi-höyryeron laskenta on toteutettu niin, että ero on saatu asettumaan normaalitilanteessa lähelle 0 kg/s ja huojunta on niin vähäistä, että eron seurannan avulla voidaan havaita huomattavasti pienemmätkin vuodot.

Tehtaille lähetettyyn kyselyyn saatujen vastausten perusteella näin on tehty tätä nykyä suurimmassa osassa tehtaita. Vastausten mukaan 75% tehtaista syöttövesi-höyryeron seurannan avulla voidaan havaita vuodot, jotka ovat alle 1 kg/s tai $1 - 3$ kg/s, kuva 17.



Kuva 17. Syöttövesi-höyryeron avulla havaittavat vuodot Suomen soodakattiloilla

Esimerkiksi Veitsiluodon tehtaalla syöttövesi-höyryeron seuranta on järjestetty niin, että erosta saadaan hälytys, kun ero ylittää $0,5$ kg/s. Hälytyksen toiminta on testattavissa jäädyttämällä ulospuhalluksen arvo automaatiojärjestelmässä ja avaamalla ulospuhalluksen säätöventtiili, jolloin ulospuhalluksen lisäyksen tulisi näkyä syöttövesi-höyryeron kasvuna. Kuvassa 18 on esitetty näin toteutetun testin tulokset.



Kuva 18. Syöttövesi-höyryeron testaus Veitsiluodon soodakattilassa (tilanne testin päätyttyä)

Verrattuna tilanteeseen vuonna 2001 on syöttövesi-höyryeron käytössä tapahtunut selvää edistystä.

Syöttövesi-höyryeron seurannan tarkkuus on parantunut huomattavasti. Vuonna 2001 ainoastaan muutamalla tehtaalla arvioitiin seurannan avulla voitavan tunnistaa 1 – 2 kg/s suuruiset vuodot. Osuus oli vain noin 10 % kaikista kattiloista. Nyt tähän tarkkuuteen arvioitiin päästävän yhdeksässä kattilassa eli yli puolessa kattiloista.

Vuonna 2001 jatkuva syöttövesi-höyryeron seuranta oli käytössä 16:ssa kattilassa 22:sta kattilasta, mutta hälytyksiä käytössä oli vain kahdeksassa kattilassa, kun nyt Soodakattilayhdistyksen yhteyshenkilöille tehdyn kyselyn perusteella seuranta ja hälytykset olivat käytössä yhtä vaille kaikissa.

Syöttövesi-höyryeron seuranta on tehtailla laadittu joko tehtaan automaatiosta vastaavien tai Valmet Automaation toimesta.

Valmetin laatimia seurantoja oli käytössä Veitsiluodon, Rauman ja Äänekosken tehtailla. Hälytysrajat ko. seurannoissa olivat 0,5 – 1 kg/s. Kaikissa järjestelmissä on järjestetty myös mahdollisuus eron testaukseen.

Erinomaiseen erotustarkkuuteen päästään myös Joutsenon, Sunilan ja Varkauden kattiloissa, joissa tehtaan henkilökunnan arvion mukaan havaittavissa ovat vuodot, joiden koko on selvästi alle 1 kg/s. Sunilassa seuranta perustuu trendien säännölliseen läpikäyntiin lähes päivittäin. Varkaudessa erotustarkkuutta ylläpidetään virtausmittausten säännöllisellä kalibroinnilla.

4.2 Kattilan höyrystinosan tiiveyden valvonta kattilaveden laadun seurannan avulla

Kattilavesivuodon valvonta kattilaveden fosfaattipitoisuuden tai johtokyvyn alarajahälytysten avulla

Kun syöttöveteen lisätä merkkiainetta, joka ei kulkeudu höyryn mukana, voidaan kattilan höyrystinosan (tulipesän, verhojen ja keittopinnan) tiiveyttä valvoa seuraamalla ko. merkkiaineen pitoisuutta kattilavedessä. Käytännössä merkkiaine voi olla esim. fosfaatti, jonka pitoisuutta kattilavedessä voidaan seurata jatkuvatoimisella analysaattorilla ja laboratoriomäärityksin.

Kattilavuotojen valvonta voidaan toteuttaa hyvin yksinkertaisin menetelmin, kun merkkiainetta annostellaan kattilaan aina suhteessa ulospuhallusvirtaukseen. Tällöin merkkiaineen pitoisuus kattilavedessä on likimain vakio, kun kattilan höyrystinosa on tiivis. Vuodolla esim. keittopinnassa on tällöin samanlainen vaikutus kuin ulospuhalluksen lisäykselle, eli se johtaa merkkiaineen pitoisuuden laskuun kattilavedessä. Jos esimerkiksi kattilan höyrystinosaan tulee yhtä suuri vuoto kuin kattilan ulospuhallus, kun fosfaatin annostelu ja ulospuhallus on sovitettu niin, että fosfaattipitoisuus on 3 mg/l ja kattilaveden johtokyky on noin 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, laskee fosfaattipitoisuus vuodon seurauksena arvoon 1,5 mg/l ja johtokyky arvoon 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (johtokyky ei laske puoleen, koska johtokykyyn vaikuttaa myös syöttövesikemikaalien pitoisuus, joka ei muutu ulospuhalluksen lisäyksen tai vuodon seurauksena yhtä paljon kuin esim. fosfaatin pitoisuus).

Kun merkkiaineena käytetään fosfaattia ja fosfaatin pitoisuutta kattilavedessä seurataan jatkuvatoimisella analysaattorilla tai päivittäin tehtävillä määrityksellä, voidaan kattilaveden fosfaattipitoisuudelle asettaa alarajahälytys. Kun fosfaattipitoisuus laskee alarajaan, on syytä epäillä vuotoa kattilan höyrystinosassa, jos annostelu toimii normaalisti eikä ulospuhallusta on lisätty normaalia suuremmaksi. Tällöin fosfaattipitoisuuden lasku kattilavedessä kielii vuodosta kattilan höyrystimestä, kuten esim. kuvassa 8.

Edellä kuvatun menetelmän etuna on yksinkertaisuus: mitään varsinaista laskentaa ei tarvita, vaan vuodon tunnistukseen riittää yksin kattilaveden johtokyvyn tai fosfaattipitoisuuden seuranta.

Haittapuolia on useita:

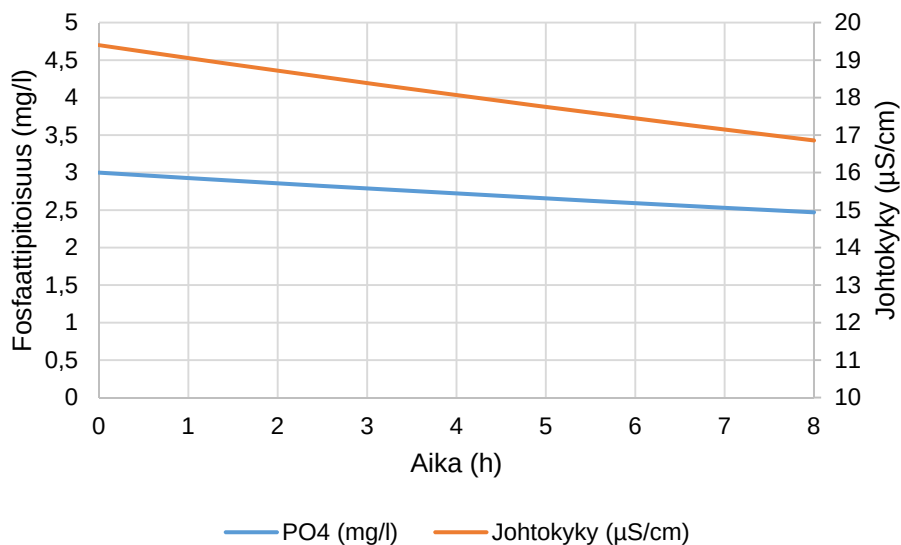
1. Kun vuoto on suuri, esim. luokkaa 5 – 10 kg/s, ja kattilaveden fosfaattipitoisuutta valvotaan pelkästään laboratoriomäärityksin, voi vuodon tunnistus viivästyä 1 – 3 vuorokautta. Viive voi pahimmillaan johtaa siihen, että vuotoa ei tunnisteta tai paikanneta vaaralliseen osaan kattilaa ennen kuin vuoto saa aikaan putken repeämän ja/tai tulipesäräjähdyksen.
2. Hälytys ei viittaa suoraan vuotoon. On siten mahdollista, että hälytystä ei tunnisteta merkiksi vuodosta, vaan tilanteeseen reagoidaan yksinomaan lisäämällä fosfaatin annostelua. Tällöin voi käydä niin, että vuotoa kattilassa aletaan epäillä vasta, kun kattilaveden fosfaattipitoisuutta ei saatu pidettyä hallinnassa edes maksimiannostelulla. Tähän voi kulua, tapauksesta riippuen, useita päiviä tai jopa viikkoja. Tänä aikana jo pienikin vuoto voi saada aikaan sekundäärisiä vaurioita läheisissä putkissa, ja johtaa siten putken repeämään ja siitä seuraavaan tulipesäräjähdykseen.
3. Hälytys alhaisesta kattilaveden fosfaattipitoisuudesta tai johtokyvystä ei anna viitteitä vuodon koosta, joten tuloksia on vaikea verrata esim. syöttövesi-höyryeron muutoksiin. Tämä vaikeuttaa tilannekuvan muodostamista ja lisää riskiä, että päätös kattilan alasajosta lykkääntyy niin, että vuoto etenee putken repeämään ja siitä seuraavaan räjähdykseen asti.

Kyselyyn saatujen vastausten perusteella kattilaveden fosfaattipitoisuuden alarajahälytystä hyödynnetään kattilan tiiveyden valvonnassa Oulun ja Wisan tehtailla.

Käynninaikainen tiiveyskoe

Kattilaveden laadun seurannan avulla voidaan varmistaa kattilan höyrystinosan tiveys normaalin käytön aikana. Varmistus on tehtävissä katkaisemalla fosfaatin annostelu ja sulkemalla ulospuhallus. Jos kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky pysyvät muuttumattomina (sen jälkeen kun em. toimenpiteiden aikaan ekonomaisereissa ollut, fosfaattipitoinen vesi on virrannut kattilaan), voidaan todeta kattilan höyrystinosan olevan tiivis. Jos taas fosfaattipitoisuus ja johtokyky laskevat tasaisesti fosfaatin annostelun lopetuksen ja ulospuhalluksen sulkemisen jälkeen, on kattilan höyrystinosassa vuoto.

Jos esimerkiksi kattilassa, jonka höyrystimen vesitilavuus on 300 m³ ja kattilaveden fosfaattipitoisuus tiiveyskokeen alussa on 3 mg/l ja johtokyky on 19,5 µS/cm, on 1 kg/s suuruinen vuoto tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa, laskevat kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky tiiveyskokeen aikana kuten kuvassa 19 on esitetty. Jos taas kattilan höyrystinosa on tiivis, pysyvät kattilaveden fosfaattipitoisuus ja johtokyky tiiveyskokeen aikana likimain vakioina.



Kuva 19. Kattilaveden fosfaattipitoisuuden ja johtokyvyn muutokset 1 kg/s suuruisen vuodon aikana, kun vuoto on tulipesässä, verhossa tai keittopinnassa ja ulospuhallus ja fosfaatin annostelu on katkaistu (kattilan vesitilavuus on 300 m³)

Tiiveyskokeen aikana kattilaveden silikaattipitoisuus nousee, joten mikäli ulospuhallus pidettäisiin kiinni hyvin pitkään, nousisi kattilaveden silikaattipitoisuus niin korkeaksi, että silikaattia alkaisi karata höyryyn ohjearvoja ylittäviä määriä. Tavallisesti kuitenkin riittää, että tiiveyskoe tehdään suhteellisen lyhyenä niin, että ulospuhallus on keskeytetty esim. 4 – 8 tuntia. Tämä aikana kattilaveden silikaattipitoisuus ei yleensä vielä nouse merkittävästi ja vaikka nousisikin, jää höyryyn kulkeutuvan silikaatin kokonaismäärä niin vähäiseksi, että sillä ei ole käytännön merkitystä esim. turbiinin likaantumiseen.

Edellä kuvattuun tapaan toteutettavan käynninaikaisen tiiveyskokeen etuna on yksinkertaisuus ja nopeus: tarvittavat toimenpiteet ovat helppoja toteuttaa ja tulos on nähtävissä nopeimmillaan muutamassa tunnissa.

Menettelyn ainoa heikkous on, että koetta ei voida tehdä tehtailla, joiden soodakattilassa kattilavesinäyte tulee ulospuhalluslinjasta, sillä ulospuhalluslinjan sulkeminen estää tällöin myös edustavan näytteen saamisen kattilavedestä.

Käytönaikainen tiiveyskoe ei ole käytössä vielä yhdelläkään tehtaalla.

Kattilavesivuodon seurantajärjestelmät

Kun syöttövedeen annosteltavan merkkiaineen annostelua ja pitoisuutta kattilavedessä seurataan reaaliaikaisesti, voidaan ko. merkkiaineelle laatia massatase, jossa ainoa tuntematon on kattilavesivuoto. Taseesta voidaan siten laskea (lähes) reaaliaikainen arvo kattilavesivuodolle.

Fosfaattianalysoija antaa kattilaveden fosfaattipitoisuudelle uuden arvon tavallisesti noin joka 15. minuutti, joten taselaskelma voidaan päivittää samassa tahdissa. Perättäisten mittausten sijaan tase voidaan laatia esim. tunnin tai muutaman tunnin jaksolle, jolloin huojunta tuloksissa on vähäisempää. Näin toimien voidaan laskenta toteuttaa niin, että laskettu vuotovirtaus seuraa todellista vuotoa esimerkiksi neljän tunnin viiveellä.

Tällä tavoin toteutetun kattilan höyrystinosan tiiveydenvalvonnan etuja pelkästään kattilaveden fosfaattipitoisuuden tai johtokyvyn alarajahälytysten perusteella tapahtuvaan valvontaan on:

- kattilavesivuoto voidaan määritellä huomattavasti tarkemmin kuin yksin alarajahälytysten perusteella, joten jo pienetkin vuodot tulevat havaituiksi
- laskenta huomioi muutokset merkkiaineen annostelussa ja kattilan ulospuhalluksessa, joten kattilavesivuotoa ei aleta epäillä esim. tilanteessa, jossa kattilaveden fosfaattipitoisuus laskee alarajaan annostelussa tapahtuvan häiriön tai ulospuhalluksen lisäyksen takia
- laskenta reagoi vuotoon huomattavasti alarajahälytyksiä nopeammin, joten riski, että vuoto ehtisi saada aikaan sekundäärisiä vaurioita ennen vuodon havaitsemista, pienenee
- kattilavesivuoto ilmoitetaan samoissa yksiköissä kuin syöttövesi-höyryero (kg/s, t/h), joten tulosten perusteella on helppo päätellä onko kyseessä vuoto ja jos on, onko vuoto kattilan höyrystinosassa vai muualla (ekoissa tai tulistimissa). Päätös kattilan alasajosta on siten helpommin tehtävissä. Samalla riski, että päätös alasajosta lykkääntyy niin, että pieni vuoto saa aikaan suuren, pienenee.

Kemikaalitaseen perusteella tapahtuvan kattilavesivuodon laskennan haasteita ovat suuret vuodot, joiden hallinta vaatii operaattorilta nopeita toimenpiteitä. Kemikaalitaseen perusteella tapahtuvaan laskentaan liittyy väistämättä viiveitä. Vuodon aiheuttama kattilaveden laimeneminen on havaittavissa vasta kun

- kun vuodon alun jälkeen kattilaveteen virrannut syöttövesi on sekoittunut koko kattilan vesitilavuuteen
- kun laimenneen veden näyte ehtii kattilavedestä analysoijalle
- kun merkkiaineen mittaava analysoija saa analysoitua uuden näytteen
- kun näytteitä on analysoitu riittävän monta peräkkäin, jotta on varmaa, että merkkiaineen pitoisuuden muutos on kattilaveden laimenemisen aiheuttamaa eikä johdu esim. analysoijan toimintahäiriöstä.

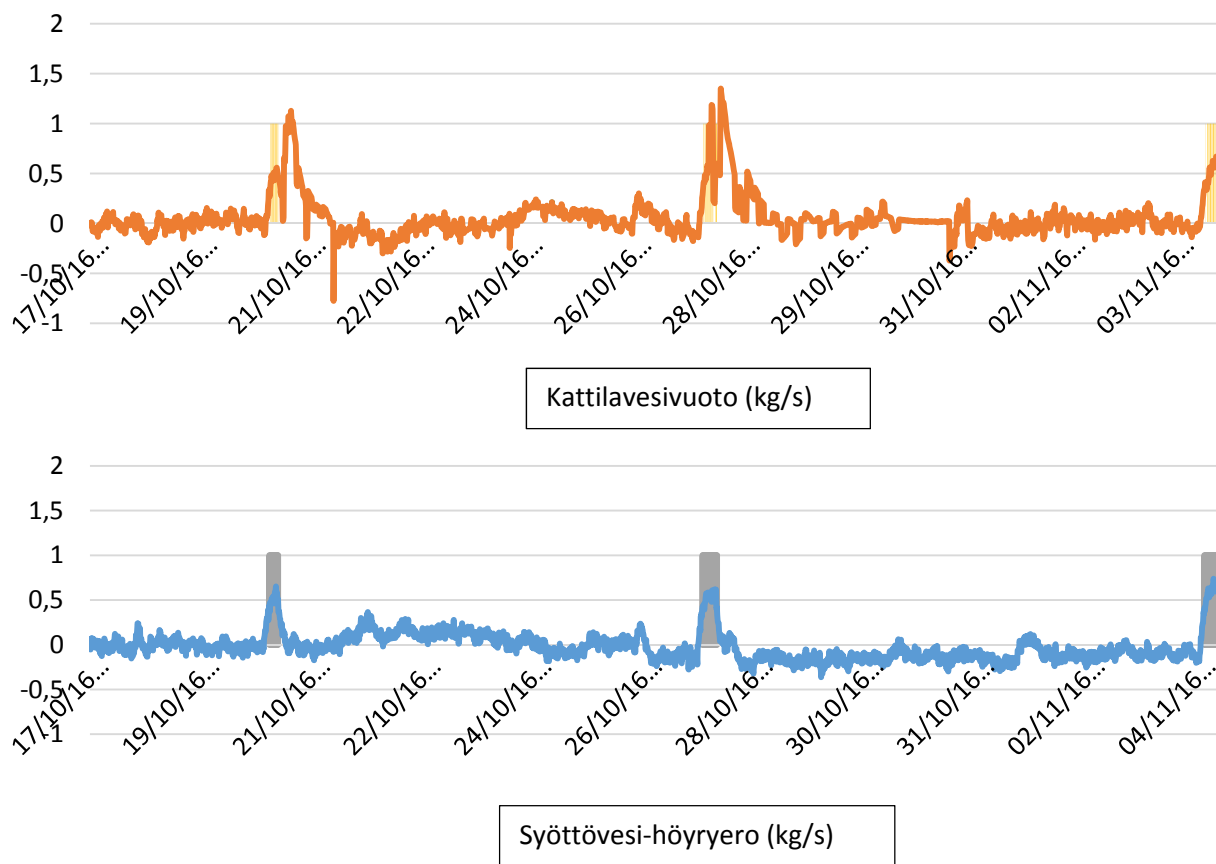
Käytännössä eniten viivettä aiheuttavat kattilaveden analysointi ja useamman kuin yhden näytteen analysointi. Esim. fosfaattianalysoija tekee uuden määrittelyn tavallisesti noin 15 minuutin välein. Kattilaveden laimeneminen kahden tai kolmen peräkkäisen näytteen perusteella vie siten vähintään 30 – 45 minuuttia. Viive on siten liian pitkä, jotta näin saadun kattilavesivuodon perustella voitaisiin tehdä päätöstä kattilan pikapysäytyksestä ja -tyhjennyksestä esim. tilanteessa, jossa keittopinnan putki katkeaa äkillisesti ja vuotovesi suihkuu suoraan tulipesään.

Kattilavesivuodon reaaliaikainen seuranta on tällä hetkellä käytössä neljällä suomalaisella tehtaalla: Joutsenossa, Veitsiluodossa, Raumalla ja Kaukaalla. Käytetyt hälytysrajat kattilavesivuodolle ovat Joutsenossa, Veitsiluodossa ja Raumalla 0,5 – 1 kg/s ja Kaukaalla 5 – 10 kg/s. Veitsiluodossa ja Raumalla kattilaveden vuodon laskenta on toteutettu Valmet Automaation toimesta. Joutsenossa ja Kaukaalla laskennat on toteutettu tehtaan toimesta. Kaikissa tapauksissa on merkkiaineena fosfaatti. Kaikki seurannat on otettu käyttöön vuoden 2001 jälkeen.

Vastaavia järjestelmiä on käytössä myös Suomen ulkopuolella. Tällaisia järjestelmiä toimittavat mm. Valmet Automaatio ja Pohjois-Amerikassa Nalco. Molemmissa järjestelmissä pyritään vuodot tunnistamaan sekä syöttövesi-höyryeroa että kattilaveden kemikaalitaseen perusteella.

Valmet Automaation Valmet Leak Detector käyttää merkkiaineena fosfaattia. Laskennassa tarvittavat mittaussuureet ovat annosteluliuksen virtaus, kattilaveden fosfaattipitoisuus ja ulospuhallusvirtaus. Fosfaattitaseen ohella Valmetin järjestelmässä on myös syöttövesi-höyryeron laskenta, joka on toteutettu niin, että normaalitilanteessa syöttövesi-höyryero on lähellä 0 kg/s ja normaali heilahtelu on sen verran vähäistä, että hälytysraja voidaan asettaa alhaiseksi.

Valmetin tiiveydenvalvontajärjestelmä on rakennettu niin, että valvonta voidaan testata ja koestaa normaalin käynnin aikana. Testi tehdään jäädyttämällä ulospuhallusvirtauksen arvo Valmetin vuodonlaskennassa ja avaamalla tämän jälkeen ulospuhallusvirtausta säättävä venttiili täysin auki. Virtauksen lisäyksen tulisi tällöin näkyä sekä syöttövesi-höyryeron että kattilavesivuodon kasvuna. Esimerkki näin toteutettujen testien tuloksesta on ao. kuvassa.



Kuva 20. Valmetin tiiveydenvalvontajärjestelmän kattilavesivuoto ja syöttövesi-höyryero Stora Enson Veitsiluodon tehtaan soodakattilassa 17.10. – 4.11.2016 (jaksolla kolme testiä, hälytykset merkitty vahvennettuina)

Samanlainen Valmetin järjestelmä on otettu käyttöön myös Maglajin tehtaalla Bosniassa. Järjestelmän valvomonäyttö testin aikana on esitetty kuvassa 21.



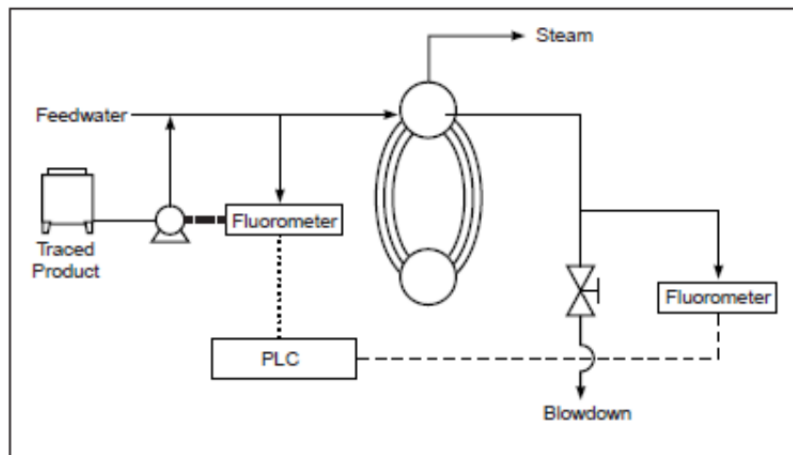
Kuva 21. Valmetin vuodonvalvontajärjestelmän näyttö Maglajin tehtaalla, vasemmalla puolella syöttövesi-höyryeron ja oikealla kattilavesivuodon trendit testin ajalta

Maglajin tehtaalle toimitetussa Valmetin vuodonvalvontajärjestelmässä on hälytysrajoiksi sekä vesi-höyryerolle että kattilavesivuodolle asetettu 2 t/h (= 0,56 kg/s).

Maglajin tehtaalla tiiveydenvalvonnan ja hälytysten toiminta testataan kuukausittain tehtävällä määräaikaistestillä, joka tehdään ulospuhallusta lisäämällä, kun ulospuhalluksen arvo on ensin jäädytetty Valmetin järjestelmässä.

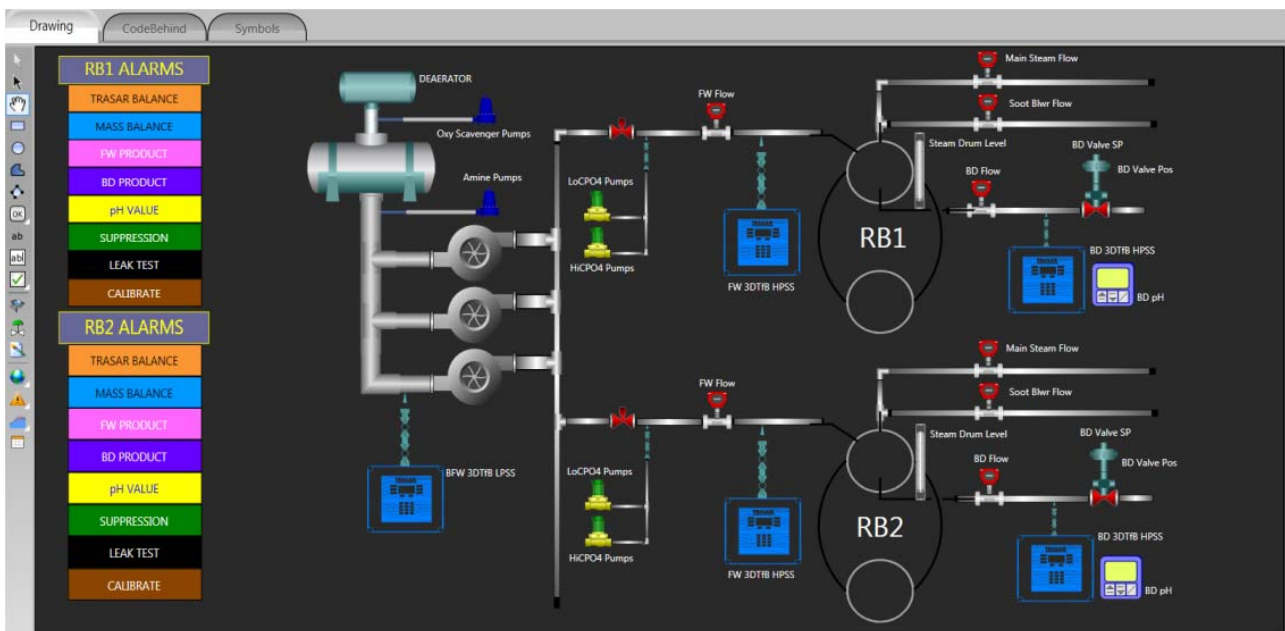
Nalcon toimittama "Recovery Boiler Leak Indicator"-järjestelmä esiteltiin jo vuonna 2001 laaditussa raportissa, ja järjestelmä on pysynyt sekä toimintaperiaatteiltaan että teknikaltaan samanlaisena. Vuonna 2001 järjestelmä oli käytössä kuudella tehtaalla Pohjois-Amerikassa. Nyt käytössä olevia järjestelmiä on Nalcon ilmoituksen mukaan 34 kappaletta. Uusia asennuksia on siten ollut keskimäärin kaksi kappaletta vuodessa. Nalco toimittaa järjestelmiä ainoastaan USA:han ja Kanadaan.

Nalcon järjestelmä perustuu oman merkkiaineen käyttöön ja analysointiin. Kattiloissa, joissa fosfaatti annostellaan suoraan lieriöön, merkkiaine annostellaan tavallisesti erillisellä annostelupumpulla syöttöveteen, ja merkkiaineen pitoisuutta mitataan sekä syöttövedestä että kattilavedestä erillisillä analysaattoreilla (ks kuva 22).



Kuva 22. Nalcon vuodonvalvontajärjestelmän rakenne ja käyttämät mittaukset kemikaalitaseen avulla tapahtuvan vuodonvalvonnan osalta

Merkkiaine voidaan ainakin osassa tapauksia annostella myös syöttöveteen annosteltavien kemikaalien mukana (kuva 23). Nalcon edustajan mukaan merkkiaine annostellaan yleensä kuitenkin erikseen, jos fosfaatti annostellaan ekojen jälkeen.



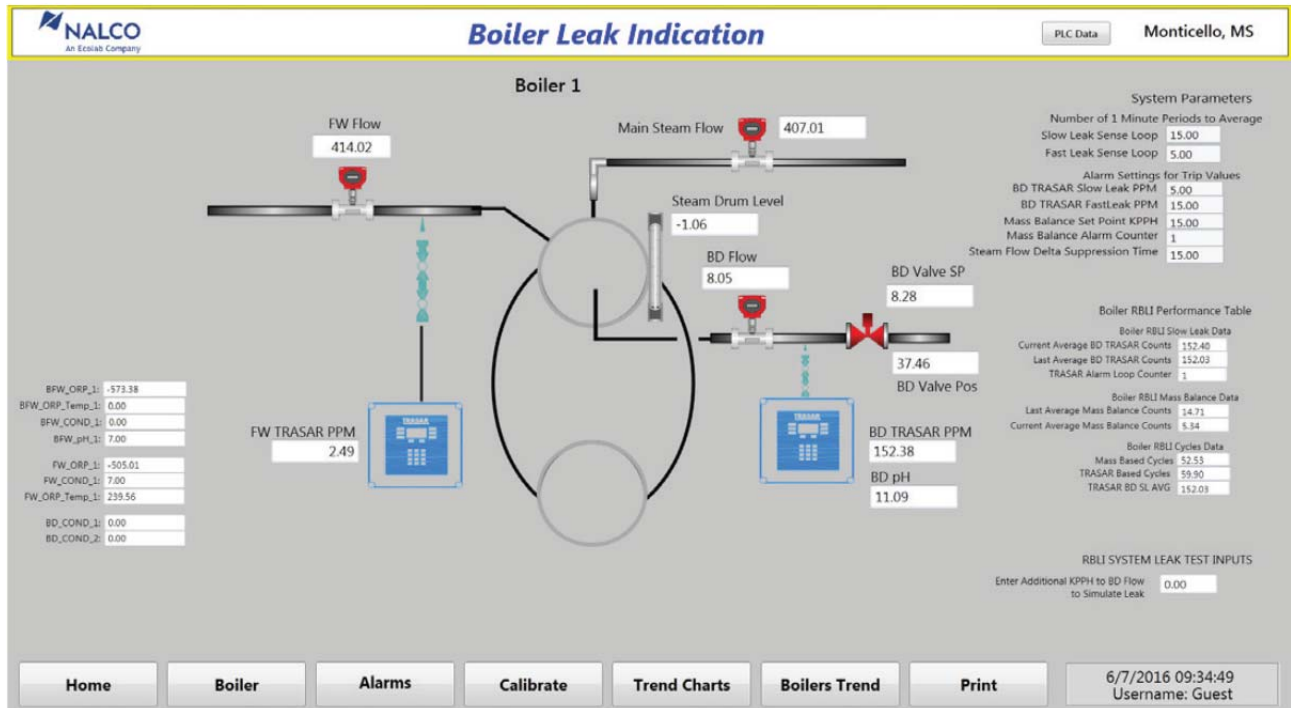
Kuva 23. Nalcon vuodonvalvontajärjestelmän toteutus kahdelle kattilalle, kun merkkiaine on lisätty syöttövesikemikaalien joukkoon (merkkiaineen pitoisuutta syöttövedessä ja kattilavedessä mitataan nyt yhteensä viidellä analysaattorilla)

Syöttöveteen annosteltavan kemikaalin perusteella tehtävän vuotojen valvonnan toteutusta on kuvattu Nalcon esitteessä seuraavasti:

”Ensimmäisellä fluorometrillä mitataan merkkiaineen pitoisuutta syöttövedessä, jolloin sen pitoisuutta syöttövedessä voidaan myös kontrolloida tarkasti. Toisella fluorometrillä mitataan merkkiaineen pitoisuutta ulospuhalluksessa. Virtausmittausten tulosten perusteella pidetään syöttöveden ja ulospuhalluksen suhdetta vakiona, ja merkkiaineen pitoisuutta ulospuhalluksessa valvotaan jatkuvasti. Merkkiaineen pitoisuuden lasku voidaan siten havaita. Laskunopeus analysoidaan statistisia menetelmiä käyttäen ja kun se todetaan merkittäväksi, järjestelmä hälyttää vuodosta kattilassa.”

Kuvauksen perusteella menetelmässä säädetään merkkiaineen annostelua ja ulospuhallusta niin, että merkkiaineetta menee koko ajan kattilaan sama määrä kuin sitä poistuu ulospuhalluksen mukana kattilasta ulos. Tilanne on tällöin sama, kun kattilaan annostellaan fosfaattia ja fosfaatin annostelupumpun tuotto ja ulospuhallusvirtaus pidetään muuttumattomina: kattilaveden fosfaattipitoisuus pysyttelee vakaana, jolloin fosfaattipitoisuuden lasku indikoi vuodosta kattilan höyrystinosassa.

Nalcon järjestelmässä ei vuotovirtausta lasketa, vaan vuoto havaitaan kattilaveden pitoisuuden laskun perusteella. Hälytysrajatkin on aseteltu kattilaveden kemikaalipitoisuuden perusteella, kuten kuvassa 24.



Kuva 24. Esimerkki Nalcon vuotojen valvontajärjestelmän valvomonäytöistä

Kuvan 24 esimerkki on Georgia-Pacificin Monticellon tehtaalla, jossa on kaksi soodakattilaa, joiden molempien kapasiteetti on 1100 tKA/vrk (2,5 Mlb/vrk).

Hälytysrajat asetetaan Nalcon järjestelmässä seuraavasti:

1. Pienet vuodot (vuodon koko 0,3 – 1,0 l/s, 5 – 15 gpm)

Merkkiaineen pitoisuudelle määritetään uusi arvo 15 minuutin välein, ja hälytys aktivoituu ensimmäisen kerran, kun seitsemästä peräkkäisestä arvosta kuusi on vähintään 0,35 mg/l verran edellistä pienempi. Toisen kerran hälytys aktivoituu, kun kahdeksasta peräkkäisesti arvosta seitsemän on vähintään 0,35 mg/l edellistä pienempi. Hälytyksen saantiin kuluu siten vähintään 1,5 tuntia vuodon alusta.

2. Suuret vuoto (vuoto on suurempi kuin 1,0 kg/s = 15 gpm)

Merkkiaineen pitoisuudelle määritetään uusi arvo 5 minuutin välein, ja hälytys aktivoituu kahdesta peräkkäisestä arvosta jotka ovat vähintään 10 mg/l verran edellistä pienempiä. Hälytyksen saantiin kuluu siten vähintään 15 min vuodon alusta.

3. Syöttövesi-höyryero

Syöttövesi-höyryerolle hälytysraja asetetaan tavallisesti käyttäen yksikköä KHHP (1000 lb tunnissa). Esimerkiksi kuvan 24 tapauksessa syöttövesi-höyryeron hälytysraja on 15 KPPH = 1,9 kg/s.

Tiedossa ei ole, miten suurissa soodakattiloissa Nalcon järjestelmiä on käytössä ja miten järjestelmän tarkkuus vaihtelee kattilan koon ja virtausten mukaan. Yhdysvalloissa soodakattilan ovat kuitenkin keskimäärin pieniä, keskipäsiteetti on 1300 tKA/vrk, joten voidaan olettaa, että suurin osa käytössä olevista Nalcon järjestelmistä on käytössä kattiloissa, jotka ovat suurinta osaa suomalaisia kattiloita pienempiä.

BLRBAC:n syys- ja kevätkokousten pöytäkirjoissa 2007 – 2017 on 70 vaurioraporttia vuodoista kattiloissa, joissa oli vaurion aikaan käytössä Nalcon tiiveydenvalvontajärjestelmä. Näistä 31:ssä vuoto havaittiin tai sen olemassaolo voitiin varmentaa Nalcon järjestelmän avulla. Suurin osa ko. tapauksista oli vuotoja ekoissa (26), tulistimissa (12) tai muissa ei-vaarallisissa osissa kattilaa (2). Osa kattilan höyrystinosan vuodoista suuntautui kattilahuoneeseen tai oli tulipesän ulkopuolelle.

Kun em. 70 vuototapauksen joukosta poistetaan sekä ekoissa, tulistimissa ja muissa ei-vaarallisissa osissa kattilaa olleet vuodot että ne höyrystinosan vuodot, joissa vuoto suuntautui kattilahuoneeseen, jäi jäljelle 19 vuototapausta. Näistä Nalcon järjestelmä tunnisti 12 (63 %).

Seitsemässä vuototapauksessa, joissa Nalcon järjestelmä ei reagoinut vuotoon, vuoto oli joko niin pieni, että se jäi alla hälytysrajan (yhdessä tapauksessa vuodon kooksi arvioitiin jälkeinpäin 0,3 kg/s, muissa kahdessa tapauksessa vuodon aiheuttaja oli pieni särö tai kaksi pientä pistemäistä syöpymää) tai hyvin suuri ja äkillinen aiheuttaen välittömästi kattilasuojan laukeamisen (neljä tapausta).

Pienet vuodot, joita Nalcon järjestelmä ei havainnut, havaittiin vasta alasajon jälkeen joko vesipainekokeessa tai veden virratessa sulakouruun tunti alasajon jälkeen. Kahdessa tapauksessa alasajon syynä oli ylimääräinen kosteus tai höyry kattilahuoneessa, ja yhdessä alasajo tehtiin tehtaan tuotannon rajoittamiseksi.

Nalcon järjestelmä tunnisti siis 12 vuotoa, joissa vuoto oli tulipesässä, verhoissa tai keittopinnassa ja vesi vuosi tulipesään tai savukaasukanavaan. Näistä 10 tapauksessa ensimmäinen indikaatio vuodosta tuli Nalcon järjestelmästä. Kahdessa tapauksessa vuodon havaitsi operaattori joko keittopinnan tuhkan kosteuden tai kattilahuoneeseen tulleen kosteuden perusteella (vuoto alkoi kattilan katon yläpuolella mutta myöhemmin vettä tippui myös katon läpi tulipesään).

Vuonna 2001 myös Hercules toimitti kattilan kemikaalitaseen seurantaan perustuvia vuodonvalvontajärjestelmiä, joita tuolloin oli käytössä kymmenessä soodakattilassa Pohjois-Amerikassa. Yritystestien myötä ko. järjestelmien toimittaja on vaihtunut ja on nykyisin Solenis, jolla on toimintaa myös Suomessa. Yrityksen Suomen edustajilla oli käytössä ainoastaan yksi järjestelmää kuvaava esite, jossa laitteisto esiteltiin lähinnä kemikaaliannostelulaitteistona. Kattilavuotojen valvontaan esitteessä ainoastaan viitataan kerran todeten, että sellaiseenkin laitteistoa voidaan käyttää. Toimittajalta ei ollut saatavissa yksityiskohtaisempaa aineistoa järjestelmästä.

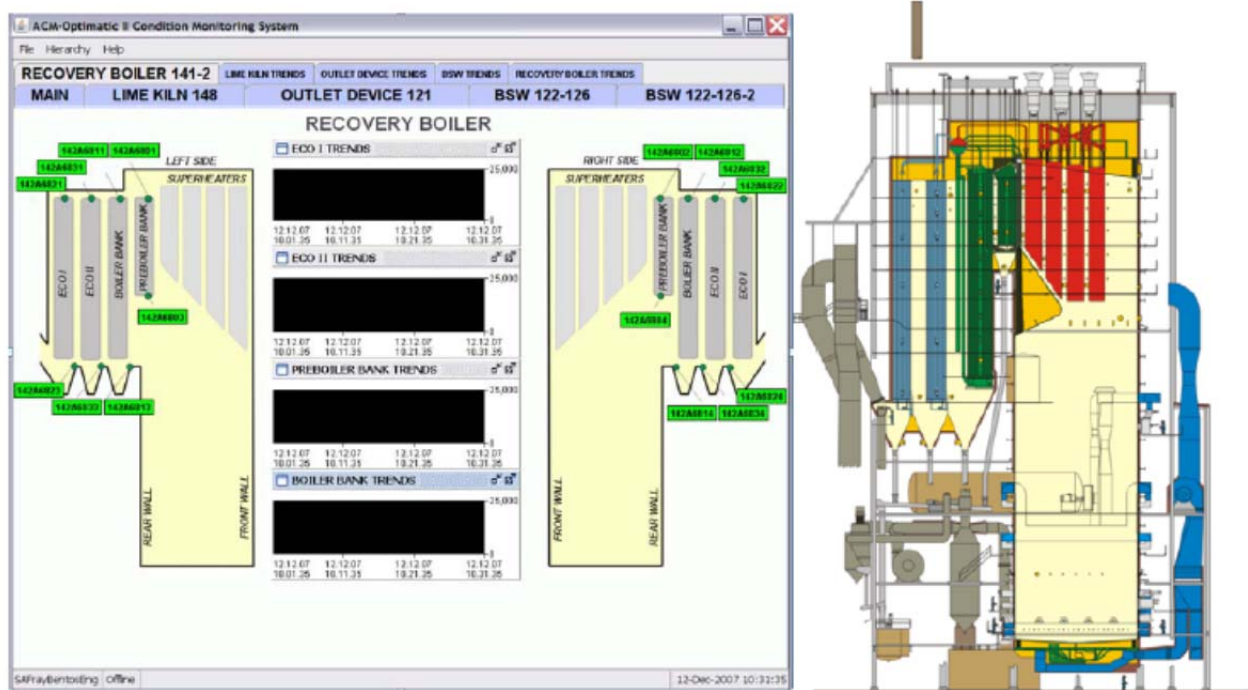
4.3 Akustisen emission seurantaan perustuvat järjestelmät

Vuonna 2001 akustisen emission seuranta oli käytössä Raumalla, Kotkassa, Veitsiluodossa, Varkaudessa, Kemissä, Uimaharjussa, Joutsenossa ja Kaskisissa. Akustisen emission seurantajärjestelmien toimittaja oli tuolloin Acutest, joka sittemmin siirtyi osaksi Andritzia.

Tällä hetkellä akustisen emission seurantaan perustuvia menetelmiä ei kyselyyn saatujen vastausten perusteella ole enää käytössä yhdelläkään tehtaalla Suomessa.

Andritzin mukaan akustisen emission seurantajärjestelmiä on asennettu 18 soodakattilaan 20 vuoden aikana [4].

Kuvassa 25 on esitetty esimerkki akustisen emission järjestelmästä Fray Bentosin tehtaalta Uruguaysta. Akustiset anturit on asennettu ekojen ja keittopinnan jakotukkien päihin.

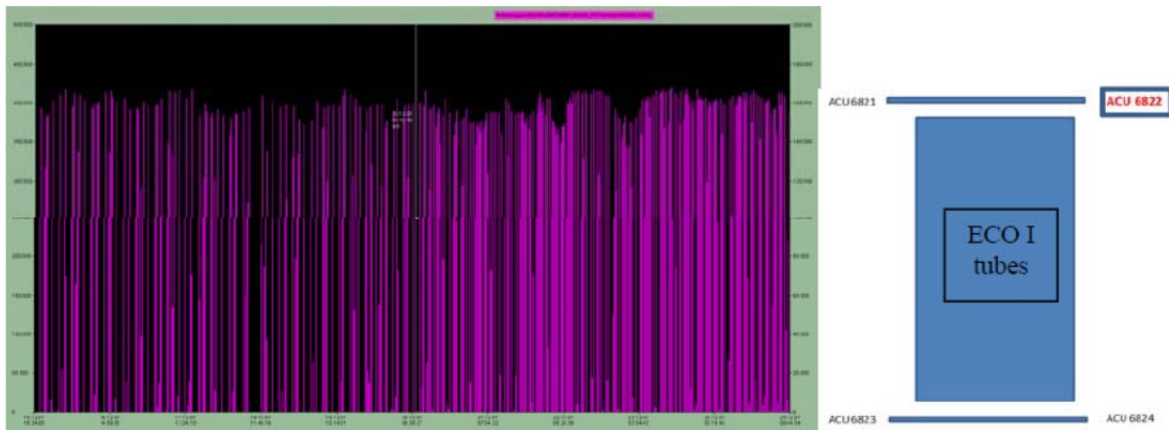


Kuva 25. Andritzin akustisen emission seurantajärjestelmän näyttökuva ja kattilakuva Fray Bentosin tehtaalta Uruguaysta [4]

Akustisen emission antureilla on voitu todeta ekonomaiserivuotoja. Seuraavassa on esitetty tarkemmin kaksi tällaista tapausta [4].

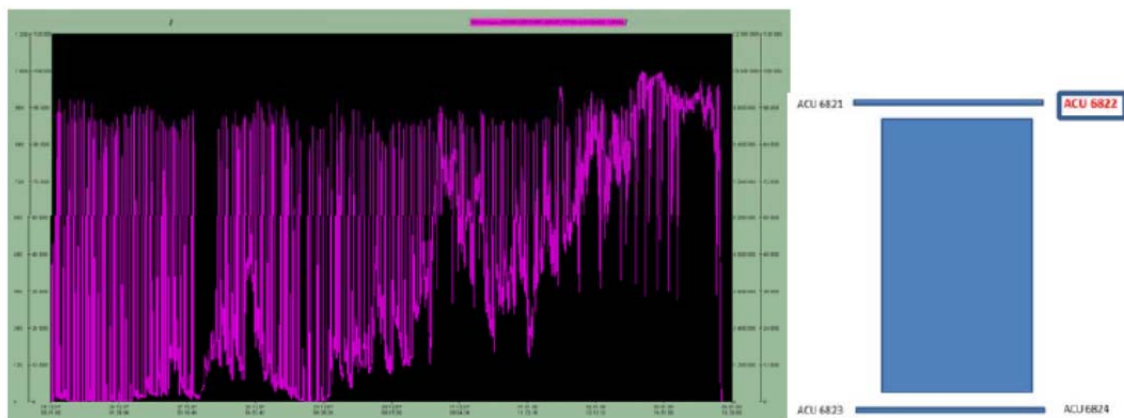
Tapaus 1. Vuoto 1-ekonomaiserissa 2007

Andritzin mukaan akustinen emissio indikoi ko. tapauksessa vauriosta viisi vuorokautta ennen varsinaisen vuodon alkua ja 15 vuorokautta ennen kuin vuoto oli havaittavissa tuhkan kosteutena. Ko. anturin signaalien amplitudi kasvoi jo joulukuun 20. päivästä lähtien, ks. kuva 26. Signaalitaso ei tuolloin kuitenkaan ollut jatkuvasti korkea, joten kyse ei ollut vuodosta.



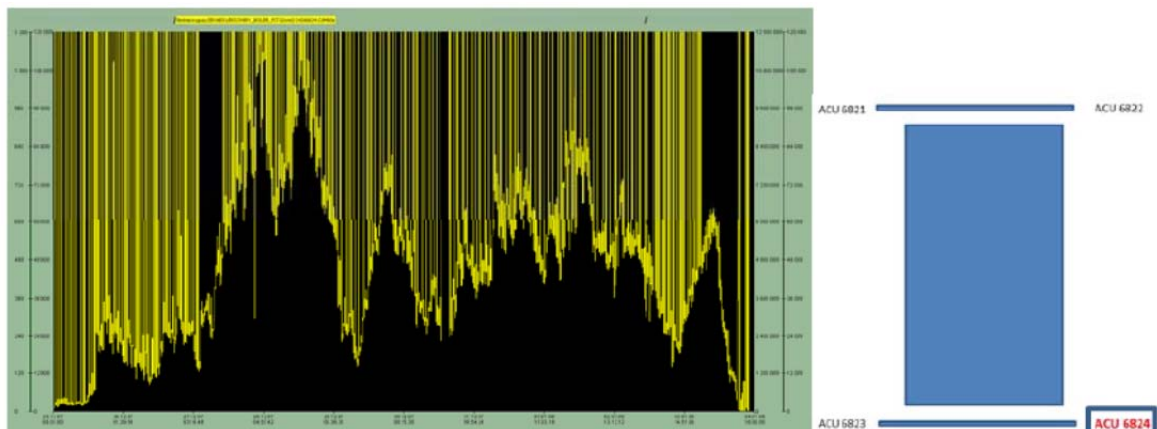
Kuva 26. Ekonomaiserin yläjakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 15.12. – 25.12.

Jatkuvasti koholle signaalitaso jäi 26.12. lähtien, kuva 27., indikoiden vuodon alkamisesta.

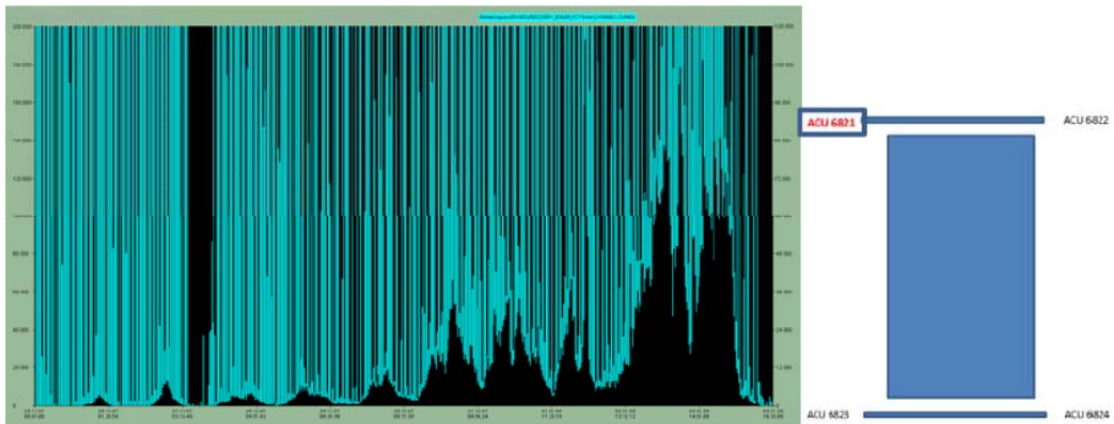


Kuva 27. Ekonomaiserin yläjakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)

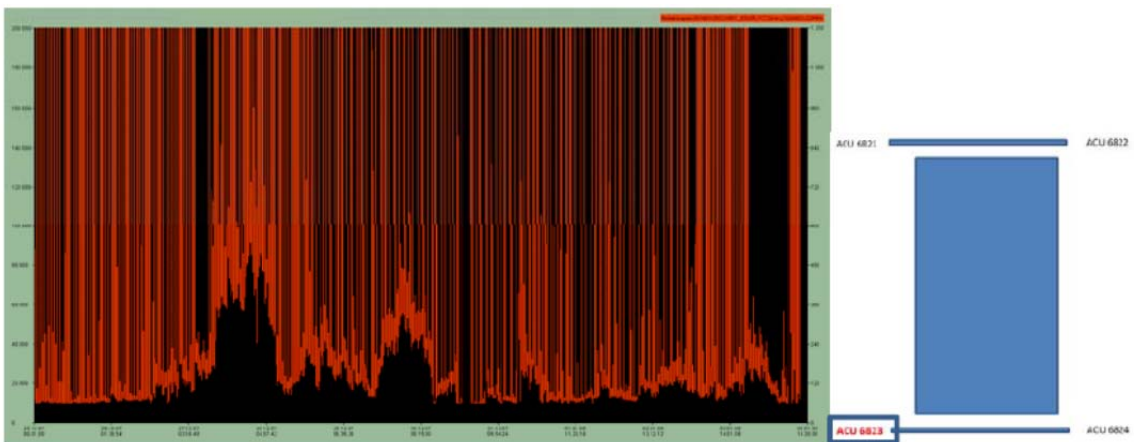
Vuodon aiheuttama akustinen emissio oli havaittavissa myös muilla antureilla, mutta niiden signaalitaso oli matalampi, joten tuloksista voitiin päätellä, että vuoto on lähinnä yläjakotukin oikeanpuoleista anturia.



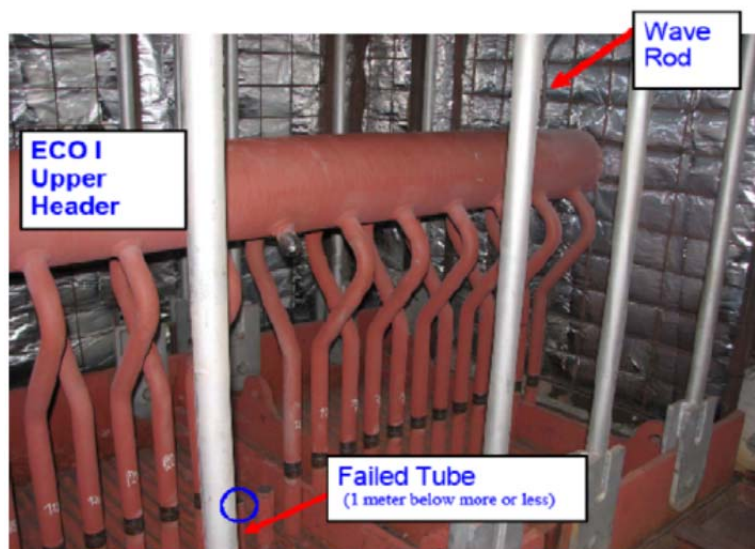
Kuva 28. Kuva B. Ekonomaiserin alajakotukin oikeanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)



Kuva 29. Ekonomaiserin yläjakotukin vasemmanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)



Kuva 30. Kuva B. Ekonomaiserin alajakotukin vasemmanpuoleisen päädyn akustisen emission anturin näyttämä 25.12. – 4.1. (alasajoon saakka)

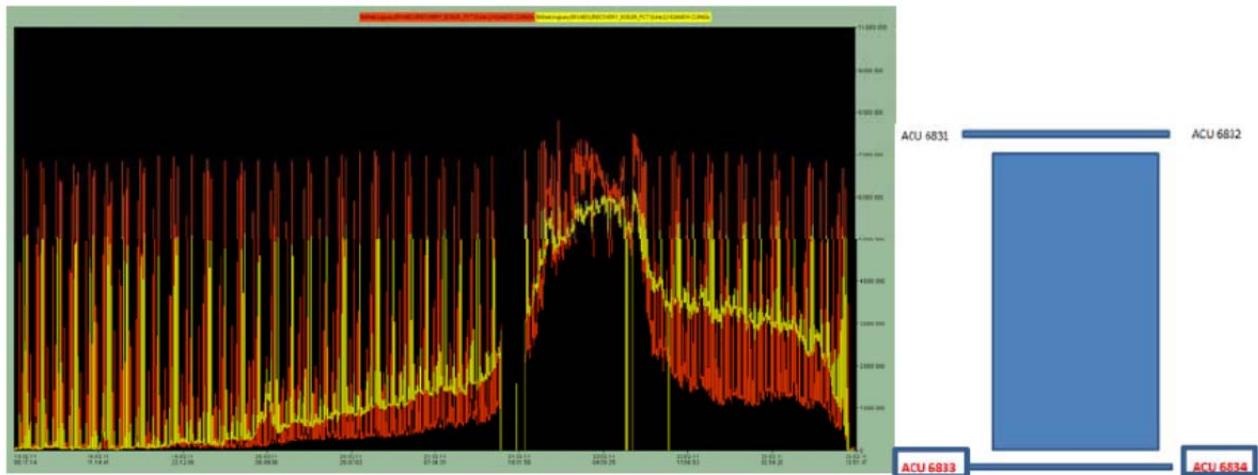


Kuva 31. Vuotanut putki 1-ekonomaiserissa

Vuotanut putki löytyi läheltä yläjakotukia ja oikealta puolelta, kuten antureiden näyttämistä oli pääteltävissä. Koska vuoto oli suhteellisen ylhäällä, ei vuoto näkynyt alkuvaiheessa kosteutena tuhassa, koska vuotovesi haihtui savukaasuihin vuodolle ollessa pieni.

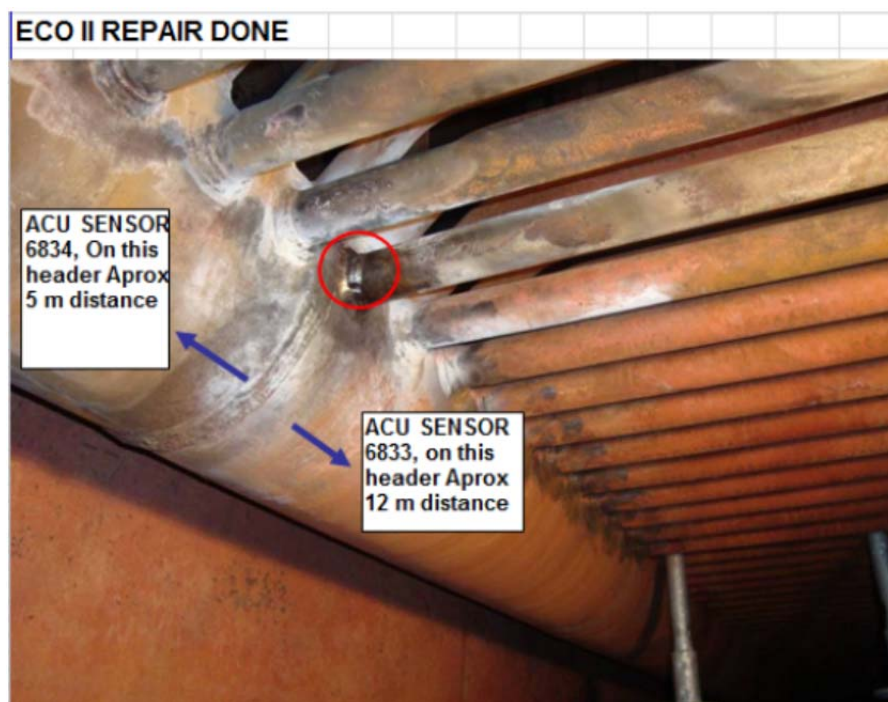
Tapaus 2. Vuoto 2-ekonomaisierissa helmikuussa 2011

Akustisen emission järjestelmän 2-ekon alajakotukin antureiden signaalitasoissa havaittiin 11.2. muutoksia, joiden perusteella tehdasta varoitettiin tulevasta vuodosta ekossa. Vuoto havaittiin yhdeksän päivää myöhemmin jatkuvasti koholla olleiden signaalien perusteella (ks kuva 32) ja päivä myöhemmin tuhkan kosteuden perusteella.



Kuva 32. Eko-2:n alajakotukin akustisen emission antureiden signaalit 19. – 23.2.2011

Yläjakotukin antureiden signaalitasoissa ei ollut havaittavissa yhtäjaksoista korkeaa signaalia, joten vuodon voitiin päätellä olevan lähellä alajakotukin antureita. Vuoto paikantui alajakotukkiin, ks. kuva alla.

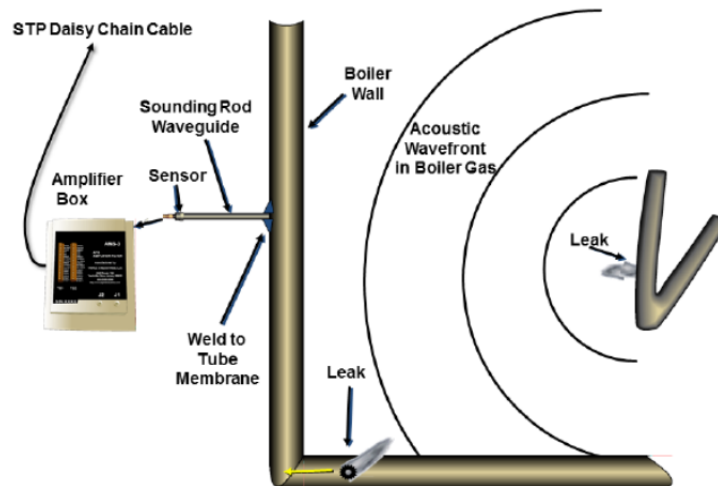


Kuva 33. Eko-2:n alajakotukki vuodon korjauksen jälkeen

Alajakotukin antureiden avulla on voitu havaita myös tyhjennyslinjan venttiilivuotoja. Ko. tapauksissa vuoto on ollut havaittavissa ainoastaan alajakotukin antureilla.

Vuonna 2001 Pohjois-Amerikassa on käytössä Triple 5:n toimittamia akustisen emission seurantajärjestelmiä. Järjestelmiä oli tuolloin käytössä 13 kattilassa. Nyt Triple 5:n järjestelmiä on käytössä Pohjois-Amerikassa 16 kattilassa. Antureita on käytössä 16 - 48 kpl per kattila. Yhteensä antureita on käytössä 481 kpl, eli keskimäärin 30 kpl per kattila.

Triple 5:n anturit ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin Andritzin anturit, eli anturit on kiinnitetty metallitankoon, jonka toinen pää hitsataan kattilan painerunkoon. Antureiden mittaama taajuusalue on 2 – 11 kHz.



Kuva 34. Triple 5:n antureiden asennus

BLRBAC:n kevät- ja syyskokousten pöytäkirjoissa 2007 – 2017 oli 25 vaurioraporttia, joissa mainittiin vuodon tapahtuneen soodakattilassa, jossa oli käytössä Triple 5:n järjestelmä. Vuoto voitiin tunnistaa tai varmistaa akustisen emission perusteella 13 tapauksessa, eli noin puolessa kaikista tapauksista.

Kun tarkastellaan vuotojen tunnistusta vuodon paikan suhteen, olivat tulokset seuraavat:

- ekovuodot: 8 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 4 kpl
- keittopintavuodot: 1 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 0 kpl
- tulipesävuodot: 6 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 2 kpl
- verhovuodot: 6 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 4 kpl
- tulistinvuodot: 4 kpl, akustisen emission avulla tunnistettuja tai varmistettuja 3 kpl

Luotettavimmin akustisen emission seurannan avulla näyttäisi siis löytyvät vuodot, jotka ovat verhoissa, ekoissa tai tulistimissa. Tähän viittaa sekin, että toimittajalta saadussa materiaalissa on esitelty tapaus, jossa järjestelmä on tunnistanut vuodon ekoissa.

Suurin osa ko. vuodoista oli ei-kriittisiä, eli vuotoihin ei liittynyt tulipesäräjähdyksen vaaraa. Vaarallisia vuotoja, joissa vettä vuosi tulipesään tai keittopinnalta, oli kahdeksan. Näistä akustisen emission avulla tunnistettiin tai paikannettiin neljä, eli tasan puolet. Merkille pantavaa on, että kaikissa neljässä tapauksessa, joissa kriittinen vuoto tunnistettiin akustisen emission avulla, ensimmäinen merkki vuodosta saatiin juuri akustisen emission järjestelmästä. Kolmessa tapauksessa kyse oli verhoputkivuodosta ja yhdessä seinäputkivuodosta.

Neljässä tapauksessa akustisen emission järjestelmä ei reagoinut kriittiseen vuotoon. Kaksi vuodoista oli verhoputkessa, yksi keittopinnassa ja yksi tulipesän seinäputkessa.

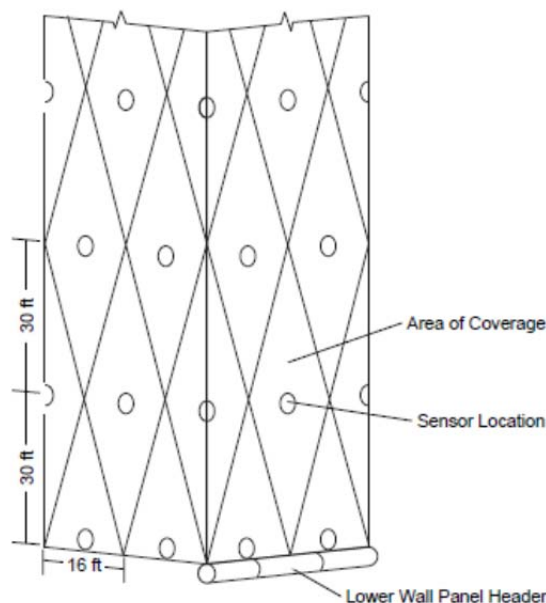
Keittopintavuodon löysi operaattori sattumalta tarkastaessaan savukaasukanavan tukkeutumia. Yksi verhoputkivuodoista oli suuri ja äkillinen aiheuttaen kattilasuojan laukeamisen, ja toisen löysi operaattori sattumalta tarkastaessaan kattilaa tulistimien puhdistamiseksi tehdyn lipeänpolttokatkon aikana.

Yhdessä tapauksessa vuodon syynä oli pohjaputken ylikuumenemisen aiheuttama vaurio, jonka seurauksena putkeen tuli kolme pistemäistä reikää. Vuoto sai aikaan paineiskuja tulipesässä, ja operaattori reagoi kolmanteen tössähdykseen tekemällä pikapysäytyksen. Kattilaveden johtokyky ja fosfaattipitoisuus olivat alkaneet laskea jo kuusi tuntia ennen pikapysäytystä, joten vuodot olisivat olleet todettavissa jo aiemmin syöttövesi-höyryeron ja kemikaalitaseen seurannan avulla, jos nämä menetelmät olisivat olleet ko. kattilassa käytössä.

BLRBAC:n vaurioraporteissa ei ole mainittu, oliko vuotojen lähellä Triple 5:n antureita eli oliko edes periaatteessa mahdollista, että järjestelmä olisi voinut havaita vuodot. Ko. tapausten perusteella ei siten voida arvioida akustisen emission soveltuvuutta vuotojen tunnistukseen puoleen eikä toiseen.

Tietävästi kattavimmin akustisen emission soveltuvuutta soodakattiloiden tiiveyden valvontaan on selvittänyt B&W, joka tutki ja kokeili sekä ilmaa kuuntelevien että painerunkoon liitettyjen antureiden soveltuvuutta soodakattiloihin 1980 ja 90-luvuilla [5]. Suurin osa kokeista tehtiin painerunkoon liitetyillä antureilla. Selvityksissä ja kokeissa päädyttiin seuraaviin johtopäätöksiin:

- vuotosignaalit olivat kuultavissa tulipesän seinien jakotukkeihin asennetuilla antureilla ainoastaan lyhyeltä etäisyydeltä
- tulipesän seinäputkien tiiveyttä voidaan valvoa akustisen emission antureilla, kun anturit on asennettu sivusuunnassa korkeintaan 4,8 m ja korkeussuunnassa korkeintaan 10 m välein ao. kuvan tapaan
- on mahdollista, että pohjaputkien vuodot tuottavat akustista emissiota jaksoittaisina purkauksina yhtäjaksoisen "sihinän" sijaan, joten tavanomainen vuotojen tunnistustekniikka ei luultavasti sovellu pohjaputkien vuotojen tunnistukseen



Kuva 35. B&W:n suositus akustisen emission antureiden sijoittamisesta tulipesän seiniin [5]

B&W:n raportissa mainitaan, että 1000 tKA/vrk soodakattilassa, jossa pohjan ala on 12 m x 10 m ja tulipesän korkeus on 36 m, tarvittaisiin antureita neljään tasoon, kahdeksan kappaletta kussakin tasossa, eli yhteensä 32 kpl. Suuressa soodakattilassa, jonka pohjan ala on esim. 14 m x 14 m ja korkeus 60 m, antureita tarvittaisiin vastaavasti 72 kpl.

5 Suurten vuotojen valvonta

Suuret, äkilliset vuodot tulipesän tai keittopinnan alueella ovat – onneksi – suhteellisen harvinaisia. Esimerkiksi pohjoisamerikkalaisissa soodakattiloissa, joissa oli käytössä Nalcon tiiveydenvalvontajärjestelmä, tapahtui vuosina 2007 – 2017 yhteensä 19 vuotoa, joissa vettä saattoi päästä tulipesään. Näistä 15:ssä kyse oli pienestä vuodosta ja ainoastaan neljässä tapauksessa kyse oli putken äkillisestä repeämisestä.

Suuria äkillisiä vuotojakin siis kuitenkin esiintyy, ja muuallakin kuin Pohjois-Amerikassa. Suomessa tapahtuneita suuria äkillisiä vuotoja on esitetty ao. taulukossa.

Taulukko 4. Äkillisiä suuria kattilavuotoja Suomessa 2000 - 2016

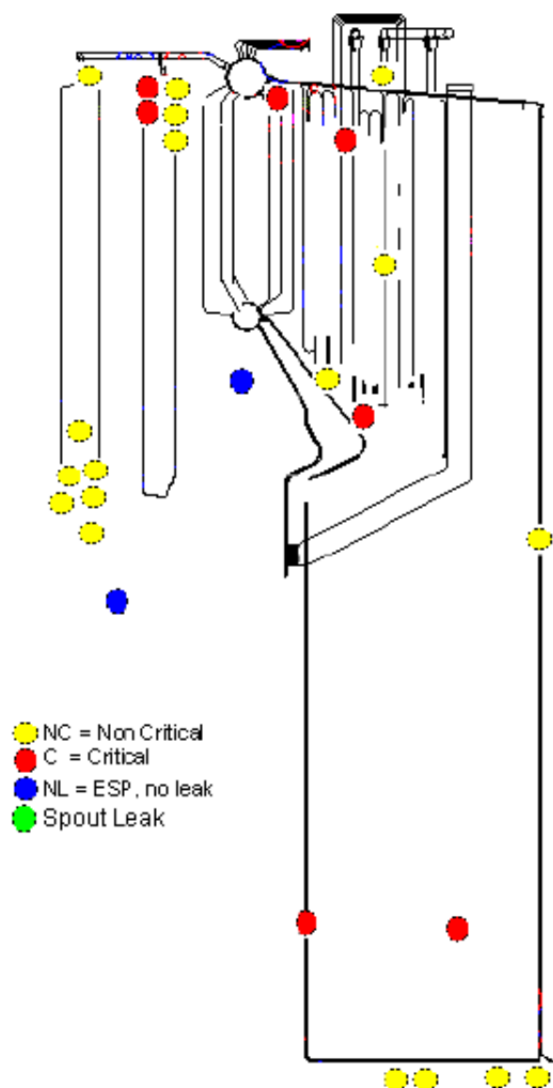
Tehdas	Ajankohta	Vuoto	Alasajo ja tehdyt suojaustoimet
MF Kaskinen	10/2000	Verhoputken vuoto	Normaali alasajo
Kotkamills	4/2001	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys
UPM Kaukas	1/2005	Keittopinnan putken repeämä	Kattilasuoja
UPM Kaukas	3/2006	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys Pikatyhjennys
MF Kemi	2/2008	Tulistinputken katko	Pikapysäytys
Stora Enso Imatra (SK5)	8/2011	Seinäputken repeämä	Kattilasuoja Pikapysäytys
Stora Enso Veitsiluoto	4/2014	Kattoputken repeämä	Pikapysäytys
Stora Enso Imatra (SK5)	4/2016	Tulistinputken katko	Normaali alasajo 10 päivää myöhemmin

Taulukossa 4 on kolme seinäputkivuotoa ja yksi verhoputkivuoto, joissa vettä pääsi varmuudella tulipesään, ja yksi keittopinnan putken repeämä, josta vettä olisi voinut päästä tulipesään (näin ei nyt onneksi käynyt, repeämä oli nokan takana). Viidestä tapauksesta ainoastaan yhdessä operaattorit tekivät sekä pikapysäytyksen että pikatyhjennyksen.

Suomessa kynnys pikatyhjennyksen tekemiseen on ollut perinteisesti korkea, kuten em. tapauksetkin osoittavat. Pikatyhjennyksiä on tehty niin harvoin, että Soodakattilayhdistyksen tietokonnasta on vaikea löytää tapauksia, joissa pikatyhjennys olisi tehty. Haku pikatyhjennyksellä antaa ainoastaan kolme tapausta, joista kaksi on mahdollisesti väärin luokiteltu. Kaukaan seinäputken repeämä 2006 ei ole yksikään ko. tapauksista. Ainoa luotettavalta vaikuttava pikatyhjennystapaus, jonka haku antaa, on sekin Kaukaalta, on verhoputkivaurio vuodelta 1991.

Pohjois-Amerikassa pikatyhjennyksiä tehdään huomattavasti useammin. BLRBAC:n pöytäkirjojen mukaan vuosina 2010 – 2017 Pohjois-Amerikassa tehtiin 135 pikatyhjennystä. Syksyllä 2017 Pohjois-Amerikassa on käytössä 188 soodakattilaa. Olettaen, että pikatyhjennyksiä tehdään kaikissa kattiloissa likimain samaa tahtia, tarkoittaisi se, että pikatyhjennyksiä tehdään keskimäärin yhdeksän vuoden välien jokaisessa kattilassa.

BLRBAC pitää myös kirjaa siitä, ovatko pikatyhjennykset tehty aiheesta ja tarvetilanteesta. Aiheellisenä pidetään pikatyhjennystä, joka tehdään kun kattilassa on vuoto, josta vettä pääsee tulipesään. Jokainen vuoto arvioidaan erikseen ja arvio vedenpääsystä tulipesään tehdään vuodon sijainnin ja suunnan perusteella. Näin ollen myös esim. ekonomaiservuoto voi olla kriittinen, jos vuoto on tarpeeksi ylhäällä ja suuntautuu tulipesän (ks. kuva 36).



Kuva 36. Esimerkki BLRBAC:n tekemästä kattilavuotojen luokittelusta (syksyn 2017 kokouspöytäkirjasta)

Vuodon koolla ei sen sijaan ole merkitystä. Myös esim. vesipainekokeessa havaitut vuodot luokitellaan kriittisiksi, jos niiden sijainnin ja suunnan perusteella vettä on voinut päästä tulipesään ennen kattilan alasajoa tai vettä olisi voinut päästä tulipesään, jos vuotoa ei olisi huomattu vesipainekokeessa.

BLRBAC:n tilastojen mukaan pikatyhjennys tehdään keskimäärin 72 %:ssa kriittisistä vuodoista, jotka on havaittu kattilan käytön aikana (eikä esim. vesipainekokeessa).

Jos Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannan haun tulokset pitävät paikkansa, on Suomessa tehty ainoastaan yksi pikatyhjennys 2000 – 2016. Kriittisiä vuotoja, joissa vettä pääsee tulipesään, tapahtuu kuitenkin huomattavasti useammin. Esim. Soodakattilayhdistyksen tietokannasta löytyy haulla "normaalikäyttö" ja "vesivuoto tulipesään" 15 tällaista vuotoa. Tällä perusteella pikatyhjennys on tehty Suomessa alle 10 % kriittisistä vuodoista.

Syitä siihen, että pikatyhjennyksiä tehdään Suomessa harvoin, voi olla useita. Yksi ainakin on huoli kattilan vaurioitumisesta pikatyhjennyksen seurauksena. Voisi olettaa, että jos pikatyhjennykset aiheuttaisivat kattilavaurioita, olisi aihe noussut keskustelun piiriin Pohjois-Amerikassa, onhan todennäköistä, että käytössä on kattiloita, joissa on tehtyä useitakin pikatyhjennyksiä. Näin ei ole

kuitenkaan käynyt, joten on luultavaa, että huoli kattilan vaurioitumisesta pikatyhjennyksen seurauksena on ylimitoitettu.

Toisaalta varsinkin tilanteessa, jossa kyse on suuresta vuodosta, josta vettä pääsee tulipesään, on vaurioriski konkreettinen ja käytännössä suureksi todettu. Suomalaisissa soodakattiloissa tapahtuneiden vahinkojen perusteella arvioiden tulipesäräjähdyksriski on noin 30 %, kun tulipesään pääsee vettä suuresta vuodosta eikä pikatyhjennystä tehdä. Samansuuruiseen arvioon oli aiemmin päätynyt myös Tom Grace BLRBAC:n vaurioraporttien perusteella.

Kokemukset Pohjois-Amerikasta tukevat olettamusta, että pikatyhjennyksellä voidaan estää tulipesäräjähdyksiä ja vähentää niiden voimakkuutta.

Gracen mukaan vuosina 1970 – 93 Pohjois-Amerikassa tapahtuneista tulipesäräjähdyksistä, joiden syynä oli vuoto kattilan painerungossa, 66 % tapauksista räjähdys tapahtui pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen jälkeen, ja kolmasosassa räjähdys tapahtui ilman, että kattilassa tehtiin pikapysäytystä ja -tyhjennystä. Vaurioiden vakavuudessa on huomattava ero: vakavia vaurioita aiheutui ainoastaan noin joka viidennessä räjähdyksessä, joka tapahtui pikapysäytyksen ja -tyhjennyksen jälkeen, kun taas puolessa niistä räjähdyksistä, jotka tapahtuivat ilman pikapysäytystä ja -tyhjennystä, vauriot olivat vakavia.

Toinen syy pikatyhjennyksen tekemättä jättämiseen on todennäköisesti se, että Suomessa pikatyhjennyksen teko vaatii erillistä päätöstä, kun taas Pohjois-Amerikassa pikatyhjennys seuraa automaattisesti pikapysäytyksestä.

Soodakattilayhdistyksen vauriotietokannan mukaan pikapysäytys on tehty Suomessa 11 kertaa 2000 – 2016. Tasaisella vauhdilla pikapysäytyksiä tehtiin siten kerran noin 26:tta käyttövuotta kohden. Tahti on edelleen harvempi kuin Pohjois-Amerikassa, jossa pikapysäytyksiä tehtiin keskimäärin kerran yhdeksässä käyttövuodessa, mutta ero on huomattavasti pienempi kuin pikatyhjennysten suhteen.

Koska pikatyhjennyksen teko vaatii erillisen päätöksen, vaikuttaa yleinen käytäntö olevan, että päätös pikatyhjennyksestä tehdään vasta kun on havaittu, että vettä pääsee jatkuvasti tulipesään ja aina sulan joukkoon saakka. Tämä edellyttää, että veden pääsy on joko nähtävissä tai kuultavissa. Hyvä esimerkki tästä on ainoa tiedossa oleva tapaus tältä vuosituhanelta, jossa pikatyhjennys on tehty. Vaurioraportin mukaan tapahtumat etenivät seuraavasti:

”Kattilan lipeäkuorma oli 51 kg(ka)/s, höyrykuorma 125 kg/s. Kattilan tulipesän ja ekojen paine-erot alkoivat heittelehtiä sekä lieriön pinta hälyttämään alarajaa n. klo 00.58. Syöttövesivirtaus kasvoi yli 40 kg/s, joten operaattori painoi kattilasuoja-painiketta klo 01.04 ts. teki pikapysäytyksen. Voimakkaan suhinan ja epänormaalin töminän seurauksena painoi operaattori myös pikatyhjennyksen klo 01.29.”

Luultavaa on, että ilman ”voimakasta suhinaa ja epänormaalia töminää” pikatyhjennys olisi tässäkin tapauksessa jäänyt tekemättä, koska näin on käynyt ilmeisesti kaikissa niissä tapauksissa, joissa vettä on päässyt tulipesään, mutta pikatyhjennystä ei ole tehty.

Käytäntöä ei voida pitää erityisesti turvallisuutta korostavana, sillä voimakas räjähdys voi tapahtua ilman, että sitä edeltäisi ”voimakas suhina ja epänormaali töminä”. Esimerkiksi Vallvikin räjähdyksessä vuonna 1998 Ruotsissa operaattori oli juuri ennen räjähdystä lipeäruiskuilla, ja Ruotsin soodakattilayhdistyksen kokouspöytäkirjan mukaan

”Operaattorin näkemyksen mukaan sen lyhyen aikaa, jonka hän oli lipeäruiskuilla, tulipesä oli täysin rauhallinen. Mikään ei viitannut siihen, että tulipesään on päässyt suuri määrä vettä, kuten on täytynyt tapahtua sen lyhyen ajan sisällä, mikä kului putken repeämisestä räjähdykseen. Mikään ei osoittanut, että tulipesässä oli putki revennyt”

Räjähdyks, joka tapahtui, oli kuitenkin hyvin voimakas. Operaattori pelastui, koska hän selvisi paineiskusta loukkaantumatta ja pääsi kattilahuoneesta ulos turvaan nopeasti.

Suomessa vastaavista tilanteista ollaan selvitty lähinnä hyvällä onnella. Useimmissa tapauksissa, joissa vettä on päässyt tulipesään, työskentelyä kattilahuoneessa on jatkettu senkin jälkeen, kun vuoto on tunnistettu, mahdollisesti juuri sen selvittämiseksi, kuuluuko tai näkykö merkkejä veden pääsystä sulan joukkoon ja onko siten tarpeen tehdä pikatyhjennys.

Käytännöstä on seurannut läheltä piti-tilanteita, joista onneksi ollaan selvitty ilman vakavia henkilövahinkoja.

Osaltaan em. toimintatapojen muodostumiseen on vaikuttanut luultavasti se, että operaattoreiden ei ole helppo havaita valvomosta käsin onko vuoto vaarallinen.

Erityisen vaikeaa tämä voi olla tilanteessa, jossa vuoto on niin suuri, että se aiheuttaa kattilasuojan laukeamisen, sillä kattilasuojan laukeamisen seurauksena aktivoituu niin suuri joukko hälytyksiä, että se vaikeuttaa varsinaisen alkusyy selvittämistä.

Esim. Vallvikissa ensimmäisen 15 minuutin aikana putken repeämisen jälkeen hälytyksiä tuli 432 kpl. Kotkassa puolestaan hälytyksiä tuli putken repeämisestä seuranneen 30 minuutin aikana lähes 200 kpl. Tämä on sama jakso, jolloin räjähdysriski on kaikkein suurin, ja välittömät toimenpiteet olisivat siten tarpeen.

Kun kattilasuoja on laadittu Soodakattilayhdistyksen Turva-automaatiosuosituksen mukaisesti, tapahtuu kattilasuojan lauetessa seuraavat seuraustoiminnot:

- lipeän syöttö kattilaan estetään
- apupolttoaineen syöttö pysähtyy
- hajukaasut käännetään pois kattilasta.

Kattilasuojan laukeaminen ei siten esim. katkaise syöttöveden pumppausta kattilaan tai käynnistä vaarahälytystä kattilahuoneessa, vaan niiden tekoon vaaditaan operaattorin toimenpiteitä. Operaattoreiden tulisi pystyä tekemään molemmat toimenpiteet vaaratilanteessa mahdollisimman pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen.

Valitettavan usein tässä ei onnistuta, vaan operaattorit eivät tunnista tilannetta oikein ja esim. yrittävät pitää lieriössä pintaa nopeuttamalla syöttöveden säätöventtiilin avautumista. Samalla jää huomiotta, että olosuhteet kattilahuoneessa saattavat olla hyvin vaaralliset, ja työskentelyä kattilahuoneessa jatketaan normaaliin tapaan. Harvinaista ei ole myöskään se, että tilannekuvan selvittämiseksi osa operaattoreista lähtee tekemään kattilahuonekierrosta pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen.

Tällaisessa tilanteessa on henkilövahinkojen vaara ilmeinen. Valitettavasti ainakaan kaikilla tehtailla tilanne ei ole tässä suhteessa parantunut merkittävästi sitten Äänekoskella vuonna 1965 tapahtuneen räjähdysten: esim. Bosnian Maglajissa 2016 operaattorit menivät kattilasuojan lauettua kattilahuoneeseen pian kattilasuojan laukeamisen jälkeen ja olivat tarkastamassa kattilaa juuri kun tulipesässä räjähti.

Tämän puutteen on tunnistanut myös BLRBAC, jonka ohjeessa "Recommended Good Practise Safe Firing of Black Liquor in Recovery Boilers" [6] todetaan:

“Vaikka kattilan käyttö keskeytyy todennäköisesti korkean tulipesän paineen tai matalan lieriön pinnan takia, jos operaattori ei puutu asiaan, syöttöveden säätöventtiili ohjautuu täysin auki lieriön pinnan säädön pyrkimässä jatkuvasti palauttamaan lieriön pinnan mahdollista siten vuodon jatkumisen. BLRBAC:n tekemä vaurioraporttien katsaus osoittaa, että operaattorit eivät aina tunnista suurta vuotoa matalan lieriön

pinnan ja korkean tulipesän paineen aiheuttajiksi eivätkä he siten aina tee pikapysäytystä ja -tyhjennystä¹.

Tästä johtuen BLRBAC suosittaa suojauslogiikkaan lisäystä, joka sulkee syöttöveden säätöventtiiliin ja kääntää säätöventtiiliin ohjauksen tämän jälkeen käsiohjaukselle, kun kattilasuoja laukeaa sekä korkean tulipesän paineen että lieriön matalan pinnan takia ja

- korkean tulipesän paineen raja-arvo tulee arvioida. Harkitse yhteyden ottoa kattilatoimittajaan ja vakuutusyhtiöön mikäli mitään viiveitä otetaan käyttöön.
- lieriön matalan pinnan raja-arvo tulee arvioida. Harkitse yhteyden ottoa kattilatoimittajaan ja vakuutusyhtiöön mikäli mitään viiveitä otetaan käyttöön.

Kun molemmat em. lukitusehdot tulevat voimaan korkeintaan 45 sekunnin viiveellä, syöttöveden säätöventtiili tulee ohjautua kiinni ja ohjaus tulee sen jälkeen kääntyä manuaaliseksi. Lisäksi hälytysnäytöille tulee tulostua viesti, että molemmat em. lukitusehdot ovat aktivoituneet ja tämä voi olla merkki suuresta vuodosta kattilassa.”

Suomessa vastaavaa suositusta suojauslogiikan muuttamiseksi ei ole tehty.

BLRBAC:n suositukseen koskien hälytysviestin lisäämisestä ko. tilanteessa voi suhtautua skeptisesti, sillä ilmeinen vaara on, että sekin jää operaattoreilta huomaamatta todellisessa tilanteessa. Tämän vuoksi tulisi selvittää, millä tavoin hälytys on ilmaistava, että se varmasti tulee havaituksi. Samalla tulisi harkita, olisiko syytä varmistaa vaarahälytyksen teko mahdollisimman nopeasti ko. tilanteessa siten, että vaarahälytys käynnistyisi automaattisesti.

Suuren vuodon hallinnan haasteet havaittiin konkreettisella tavalla myös Zellstoffin Pölsin tehtaalla Itävallassa 2014, kun kattilan tulipesän seinäputkeen repesi noin 2,5 cm² suuruinen reikä kattilan ajaessa normaalia kuormaa [7].

Putken repeämisen jälkeen syöttöveden virtaus nousi 2,5 minuutissa 80 t/h (22 kg/s) (virtaus oli 320 t/h ennen repeämistä ja enimmillään 400 t/h repeämisen jälkeen). Samaan aikaan höyryvirtaus laski 50 t/h (14 kg/s). Putken repeäminen sai myös aikaan tulipesän paineen nousun 1000 Pa (10 mbar) verran. Operaattori reagoi häiriöön pysäyttämällä lipeän syötön tulipesään ja jatkamalla tulipesän tuuletusta (kaikki puhaltimet olivat päällä) ja syöttöveden pumppausta tulipesään, Kiertomies otti lipeäruiskut pois käytöstä ja huomasi samalla, että tulipesän pohja näytti tummalta. Kiertomiehen mukaan olosuhteet tulipesässä olivat rauhalliset, mitään ylimääristä ääntä ei kuulunut. Kun kiertomies palasi valvomoon noin 30 min seinäputken repeämisen jälkeen, tapahtui tulipesässä voimakas räjähdys. Mahdollista on, että räjähdysten sai tässä vaiheessa aikaiseksi tulistimista tippunut suolakami.

Operaattori ei siis Pölsissäkään tunnistanut tilannetta vaaralliseksi, koska tulipesässä kaikki vaikutti rauhalliselta eikä mitään selviä merkkejä ("suhinaa ja töminää") veden pääsystä tulipesään ollut kuultavissa tai nähtävissä.

Pölsissä operaattori pystyi havaitsemaan oleelliset oireet, korkean tulipesän paineen, syöttövesi-höyryeron kasvun ja lieriön pinnan laskun heti vuodon alun yhteydessä, joten tarpeelliset tiedot tilanteen analysointiin olivat käytettävissä.

Oikeiden johtopäätösten teko jäi silti tekemättä, ja esim. syöttövesipumppuja ei pysäytetty eikä vaarahälytystä tai pikatyhjennystä tehty.

¹ BLRBAC:n suosituksen mukaan pikapysäytys (ESP, Emergency Shutdown Procedure) käynnistää automaattisesti myös pikatyhjennyksen, ilman erillistä napin painallusta.

Pölsin tapauksessa tärkeimpiä syitä siihen, että operaattori ei kyennyt ko. tilanteessa toimimaan oikein, oli luultavasti kaksi:

1. harjoituksen puute
2. erityisesti kattilavuotoja koskevien hälytysten puute.

Vakavat kattilavuodot ovat – onneksi – niin harvinaisia, että kyse on todennäköisesti ainutkertaisesta tilanteesta vuorossa olevalle operaattorille. Useimmilla operaattoreilla ei ole kokemusta edes vaarattomista vuodoista, joten rutiinia erottaa vaaraton ja vaarallinen vuoto ei ole voinut kertyä käytännön myötä.

Pölsissä tätä puutetta on pyritty korjaamaan hankkimalla uuden kattilan hankinnan yhteydessä tehtaalla soodakattilasimulaattori ja edellyttämällä, että sekä uudet että jo työssä olevat operaattorit harjoittelevat erilaisten käyttö- ja häiriötilanteiden hallintaa vuosittain. Työssä olevien operaattoreiden vuosittaiseen koulutusohjelmaan kuuluu simulaattoriharjoittelua kahden vuoron verran vuosittain. Koulutusvaiheessa olevat operaattorikokelaat harjoittelevat jokaisen simulaattorille tehdystä 32 ajo- ja häiriötilanteesta vähintään kolme kertaa korkeintaan 14 kk kestäväen koulutuksen aikana (kenttähoitajan koulutus on kokonaisuudessaan 650 tuntia enimmillään 8 kk aikana ja operaattorin 420 tuntia enimmillään 6 kk aikana). Häiriötilanteiden joukossa on kolme vuototilannetta, jotka kuvaavat suurta vuotoa kattilan höyrystinosassa, tulistimissa ja ekoissa.

Pölsissä oli räjähdysen aikaan käytössä tavanomainen kattilan automaatio- ja suojausjärjestelmä, jossa on kyllä omat hälytyksensä useille oireille, jotka liittyvät suureen kattilavuotoon, kuten tulipesän paineelle, lieriön pinnalle ja korkealle syöttövesi-höyryerolle, mutta ko. hälytyksiä ei oltu järjestetty tai esitetty niin, että niiden liittyminen erityisesti kattilavuotoihin olisi ollut ilmeistä.

Tämän puutteen korjaamiseksi on Pölsissä valvomoon lisätty oma, pelkästään vuotojen tunnistamiseen tarkoitettu näyttö, johon on koottu 10 tärkeimmät parametrin arvot ja trendit sekä vuotoja koskevat hälytykset. Hälytyksiä on mm.

- suuresta syöttövesi-höyryerosta (hälytys, kun ero $> 20 \text{ t/h} = 5,5 \text{ kg/s}$)
- nopeasta lieriön paineen laskusta (hälytys, kun muutos $> 0,4 \text{ bar}$ minuutissa)
- savukaasupuhaltimien kierrosluvun nopeasta kasvusta (hälytys, kun kierrokset kasvavat $> 4 \%$ minuutissa)

Hälytysrajat on aseteltu 2014 tapahtuneen vuodon yhteydessä saatujen kokemusten pohjalta.

Hälytykset on esitetty ko. näytöllä niin, että operaattorin on helppo havaita niiden aktivoituminen. Koska ko. näyttö on varattu ainoastaan kattilavuotojen havaitsemiseen tarkoitetuille hälytyksille ja suureille, on operaattorin helppo tunnistaa häiriön syy hälytysten aktivoituessa.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Soodakattilan tiiveydenvalvonnalle haasteita asettavat sekä pienet, vähitellen kasvavat vuodot että suuret, äkilliset repeämät. Pieniä vuotoja syntyy mm. väsymisen ja hitsausvirheiden seurauksena, kun taas repeämiä saa aikaan esim. putkien oheneminen korroosion vaikutuksesta ja ylikuumeneminen kiertohäiriön tai pinnan säädön häiriön takia. Erilaiset vauriomekanismit voivat vaikuttaa myös samanaikaisesti esim. niin, että väsymisen tai hitsausvirheen aiheuttama pieni vuoto saa aikaan korroosiota ja kulumista ympäröivissä putkissa. Lopputuloksena voi tällöin olla suuri vuoto putken repeämisen seurauksena.

Lähes kaikki tiedossa olevat voimakkaat tulipesäräjähdykset, joiden aiheuttajana on ollut vuoto kattilan painerungossa, ovat aiheutuneet suurista vuodoista, joissa vettä on virrannut tulipesään putken repeämisen seurauksena tyypillisesti kymmeniä kiloja sekunnissa. Osassa tällaisia räjähdyksiä putken repeämää on edeltänyt särön tai pistemäisen syöpymän aiheuttama pieni vuoto, joka on voinut olla kattilassa viikkoja tai jopa kuukausia ennen putken repeämistä.

Soodakattiloiden tiiveydenvalvonnassa käytetään edelleen järjestelmiä, jotka perustuvat syöttövesi-höyryeron, kemikaalitaseen ja/tai akustisen emission seurantaan.

Verrattuna vuoteen 2001 käytetään Suomessa aiempaa useammalla tehtaalla syöttövesi-höyryeron ja kemikaalitaseen seurantaan perustuvia järjestelmiä, kun taas akustisen emission seurantajärjestelmistä on luovuttu kokonaan. Akustisen emission seurantaan perustuvia järjestelmiä, joita toimittavat mm. Andritz and Triple-5, on käytössä edelleen Suomen ulkopuolella.

Sekä Suomesta että Pohjois-Amerikasta saatujen kokemusten mukaan jo suhteellisen pienetkin vuodot voidaan tunnistaa syöttövesi-höyryeron perusteella, kun eron laskenta on toteutettu niin, että mittausvirheiden ja mittauksen aiheuttaman kohinan aiheuttamat virheet ovat eliminoitu.

Myös vuotojen paikannus vaaralliseen/vaarattomaan osaan kattilaa on mahdollista sekä kattilaveden kemikaalitaseen seurannan että akustisen emission perusteella, kun vuoto on tarpeeksi suuri (mutta ei niin suuri että se aiheuttaa nopeasti kattilasuojan laukeamisen) ja akustisen emission anturit ovat tarpeeksi lähellä vuotokohtaa. Akustisen emission seurannalla on joissakin tapauksissa voitu jopa ennakoida vuodon syntymistä.

Parhaimpaan tulokseen tiiveydenvalvonnassa päästäisiin käyttämällä sekä syöttövesi-höyryeron, kattilaveden kemikaalitaseen että akustisen emission seurantaa samanaikaisesti. Tällaisilla järjestelmillä olisi mahdollista järjestää soodakattiloiden tiiveydenvalvonta niin, että pienet vuodot tulevat luotettavasti havaittua ja paikannettua jo siinä vaiheessa, kun riski, että vuoto aiheuttaisi sulavesiräjähdyksen, on pieni. Näin olisi voitu estää todennäköisesti suuri osa, mahdollisesti jopa yli puolet, tulipesäräjähdyksistä, joiden aiheuttajana on ollut painerungon vuoto.

Osa soodakattiloissa tapahtuneista vuodoista on aiheutunut putken äkillisestä repeämisestä paikallisen korroosion ja/tai ylikuumenemisen takia. Mikäli vuoto on riittävän suuri (ja kattila on riittävän pieni), aiheuttaa vuoto kattilasuojan laukeamisen tulipesän korkean paineen tai lieriön matalan pinnan takia. Toisinaan myös operaattori laukaisee ko. tilanteessa pikapysäytyksen ennen kuin kattilan suojausjärjestelmä ehtii laukaista kattilasuojan.

Aina ei käyttöhenkilökunta ole kuitenkaan tunnistanut tällaista tilannetta vaaralliseksi edes silloin, kun vettä on vuotanut suoraan tulipesään. Tämän vuoksi käyttöhenkilökunta ei aina ole ryhtynyt tarpeellisiin suojaustoimenpiteisiin, vaan esim. työskentelyä kattilahuoneessa on saatettu jatkaa vielä kattilasuojan laukeamisen jälkeenkin. Tällaisen virheen seurauksena yksi operaattori kuoli bosnialaisella tehtaalla 2016. Kokemukset Suomessa tapahtuneista vaarallisista vuodoista

viittaavat siihen, että henkilövahinkojen riskiä ei tällaisissa tilanteissa ole luotettavasti eliminoitu myöskään täräytyslaitteilla.

Vaaratilanne saattaa syntyä kattilavuodon seurauksena myös silloin, kun vuoto on suuri, mutta sen aiheuttama tulipesän paineen nousu tai lieriön pinnan lasku ei riitä laukaisemaan kattilasuojaa. Näin voi käydä varsinkin uusissa, suurissa soodakattiloissa, joissa äkillisen vuodon vaikutus tulipesän paineeseen ja lieriön pintaan on huomattavasti vähäisempi kuin samankokoisen vuodon vaikutus esim. kattilassa, jonka kapasiteetti on 1000 – 1500 tKA/vrk.

Kattilan käytön jatkaminen tilanteessa, jossa tulipesään vuotaa vettä, pidentää aikaa, jona voimakas tulipesäräjähdys on mahdollinen ja lisää siten vahinkoriskiä. Koska vuodosta ei tällöin seuraa ainakaan automaattisesti myöskään vaarahälytystä, kasvaa samalla henkilövahinkojen vaara.

Suurten, äkillisten kattilavuotojen, joissa vettä pääsee tulipesään, varalta tulisi soodakattilat varustaa hälytys- ja suojausjärjestelmillä, jotka

- varoittavat operaattoreita ja kattilahuoneessa olevia vaaratilanteesta jo ennen kattilasuojan laukeamista
- laukaisevat automaattisen suojauksen, kun kattilaan tulee suuri, äkillinen vesivuoto

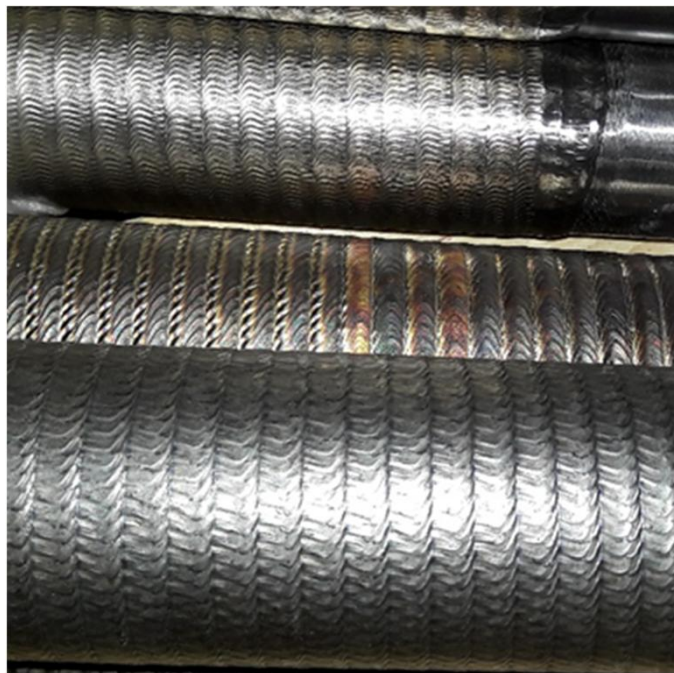
Järjestelmät tulisi suunnitella niin, että ne toimivat vuototilanteessa luotettavasti ja niin, että operaattorit voivat niiden avulla tunnistaa vaaratilanteen ja huolehtia, että alasajo tapahtuu turvallisesti.

Lähteet

1. Experiences with leak rate calculation methods for LBB application, Grebner, H., Kastner, W., Höfler, A., Mausner, G., Leak Before Break In Reactor Pipinf And Vessels, Specialist Meeting, Lyons, Ranska, 9. – 11.1.1995, NEA/CSNI//R(95)18, Vol II, Session 2: Issues In LBB Technology, 127 – 139.
2. Changing Perspectives on Recovery Boiler Explosions, Grace T., 30 Year Recovery Boiler Co-operation in Finland, Proceedings, s. 107 – 119, Soodakattilayhdistys 1994.
3. Recommended Good Practice Guidelines for Post-ESP Procedure for Black Liquor Recovery Boilers, The Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, October 2002.
4. Advanced Condition Diagnostic for Pulp and Paper Mills, Kari Aura, Steve Crotty, Andritz, esitelmä Tappi-seminaarissa
5. Recent Advances in the Application of Acoustic Leak Detection to Process Recovery Boilers, Koveceovich, J.J., Nuspl, S., Robertson, M., BR-1594, Tappi Engineering Conference, syyskuu 1995, Dallas, U.S.A.
6. Recommended Good Practice Safe Firing of Black Liquor in Black Liquor Recovery Boilers, The Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, April 2016.
7. Recovery Boiler Incident and Learned Lessons, Duer, W. Recovery Boiler Safety Forum, Stendal, 24.5.2016.

LIITE 3

**VTT: Hitsauspinnotettujen putkien käyttö soodakattiloissa – esitys
28.9.2017**



Hitsauspinnoitteet ja mikrorakennemuutokset vanhennushehkuksissa

28.9.2017 KTR

Materiaalit & vanhennuskokeet

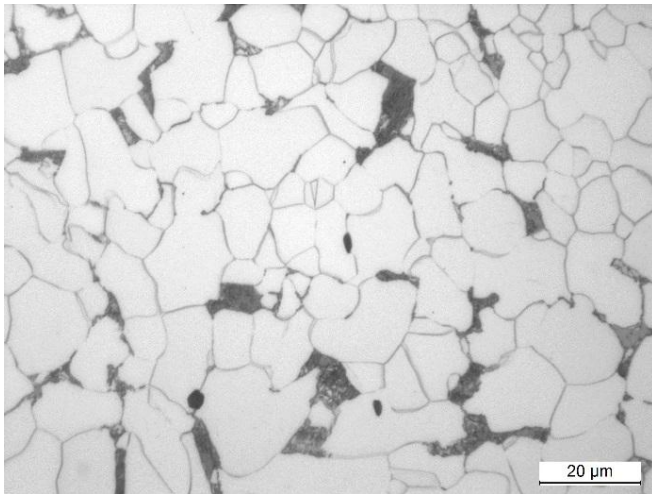
- Hitsauspinnoitteet:
 - AZZ: 625/825/309L, perusaine P235GH
 - Uhlig: 625/825/309L, perusaine 16Mo3
 - Areva: 309L, perusaine 7CrMoVTiB10-10
- Referenssit:
 - 304L kompond, perusaine St45.8
 - Sanicro 28 kompond, perusaine 10CrMo9-10
 - Sanicro 38 kompond, perusaine P265GH
- Vanhennushehkutukset
 - 600°C, 100 & 1000 h
 - 650°C, 10, 100 & 1000 h
 - 700°C, 10 & 100 h



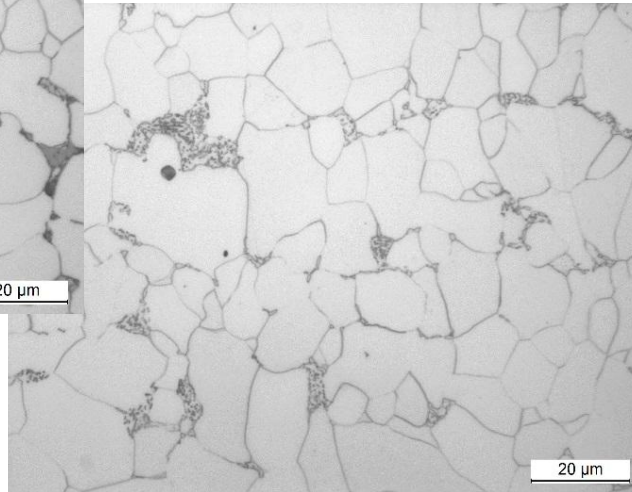
Mikrorakenteen luokittelu

- A Käyttämättömän teräksen mikrorakenne, ferriittiä ja perliittiä
- B Ensimmäiset merkit palloutumisesta
- C Huomattavaa palloutumista, mutta edelleen joitakin lamellaaria karbideja
- D palloutuminen täydellistä, mutta karbidit yhä entisillä perliittialueilla
- E Karbidit hajaantuneet, mutta edelleen havaittavissa vähäisiä merkkejä perliittialueista
- F Alkuperäiset perliittialueet hävinneet, osa karbideista kasvanut huomattavasti

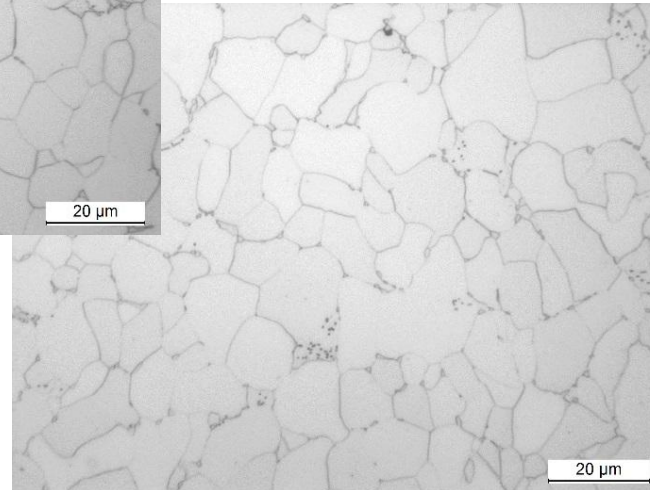
Pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset



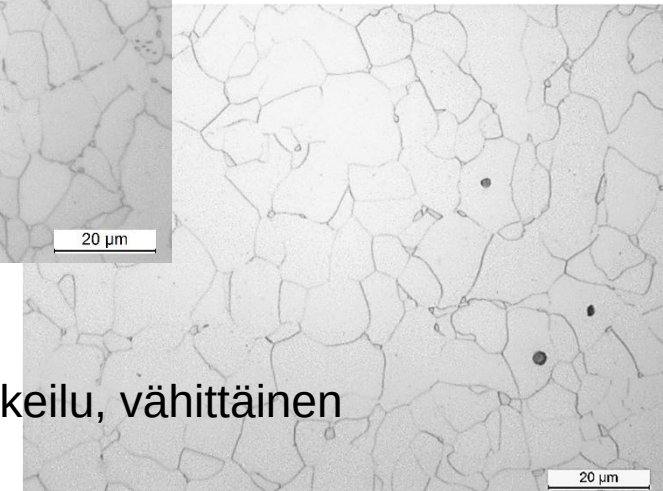
Toimitustila, aste A



650°C, 10 h, aste D

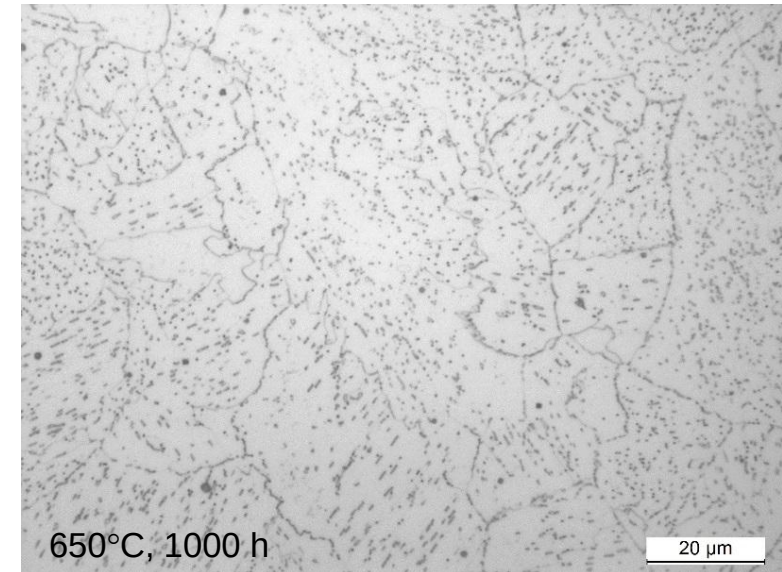
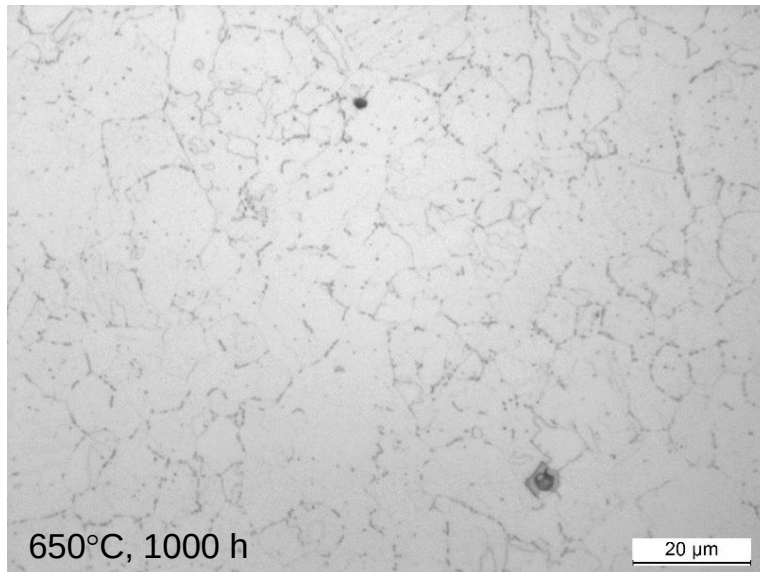
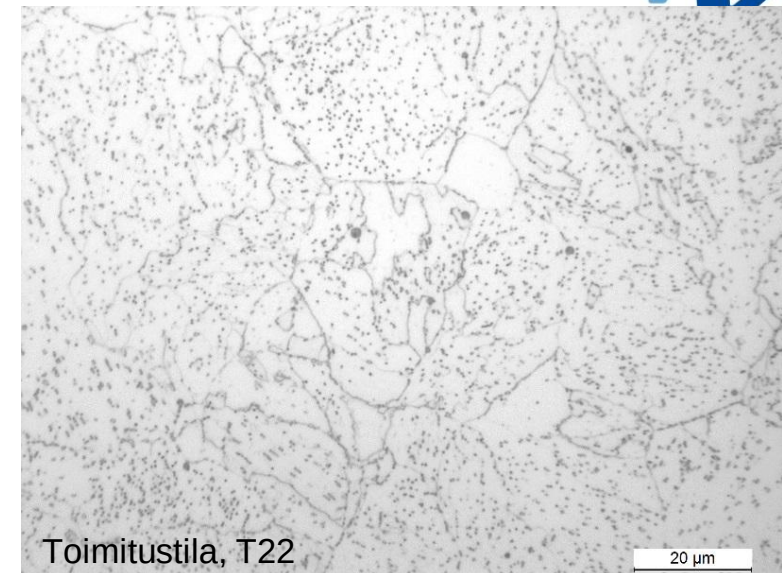
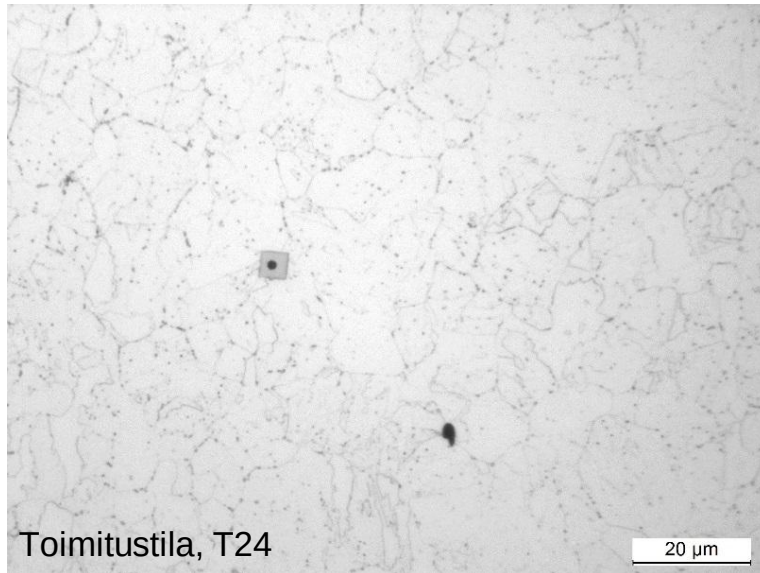


650°C, 100 h, E



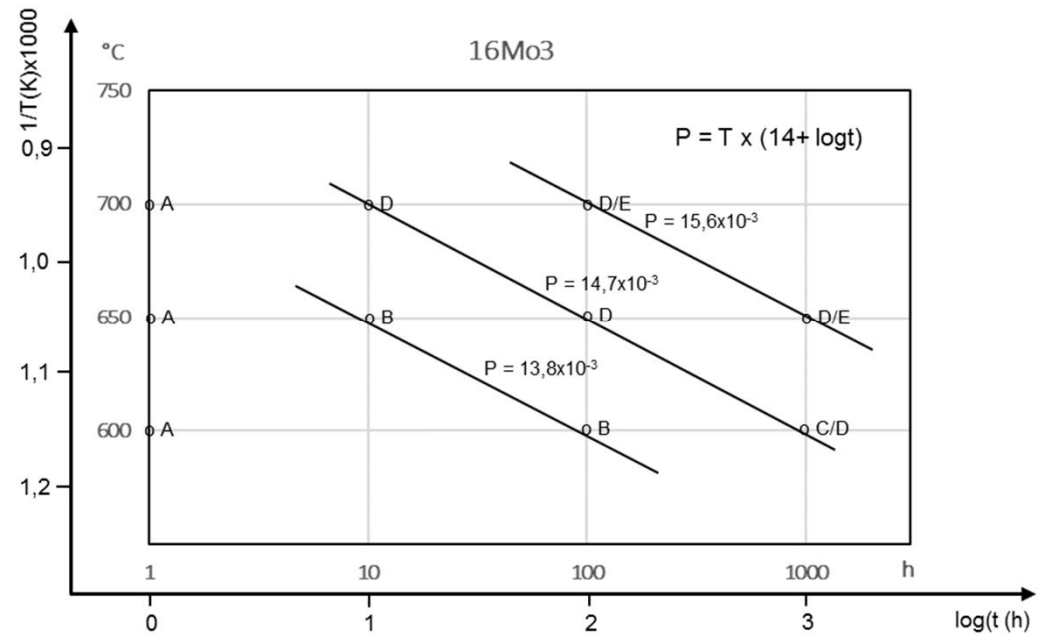
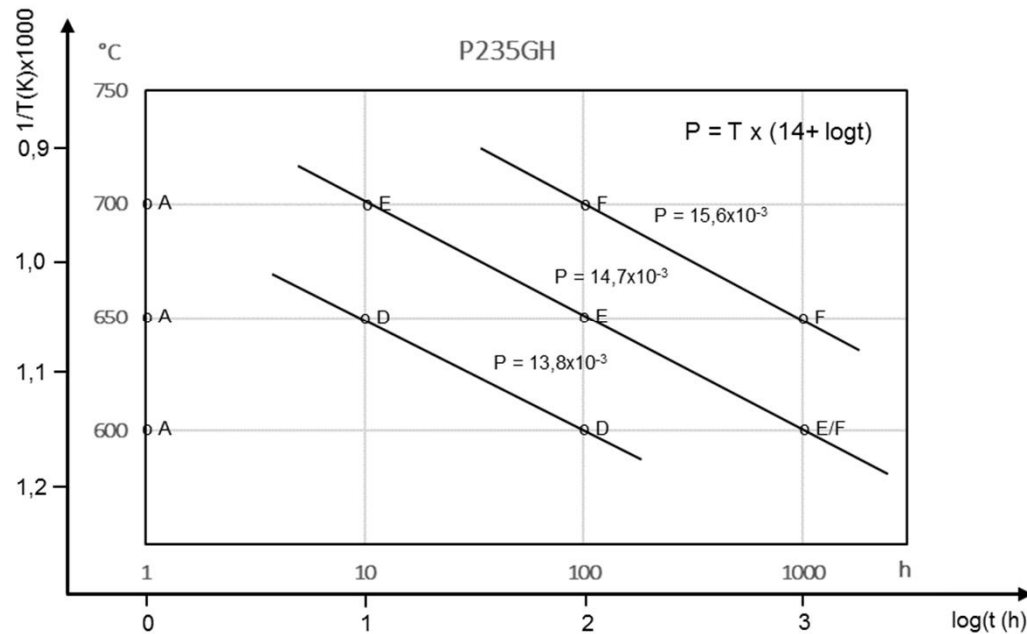
650°C, 1000 h, F

- Ferriittisperliittisen rakenteen perliittirakeiden karbidilamellien katkeilu, vähittäinen palloutuminen, karbidien karkeneminen raerajoille
 - P235GH, P265GH, St45.8
 - perliittisbainiittinen 16Mo3 vastaavalla tavalla



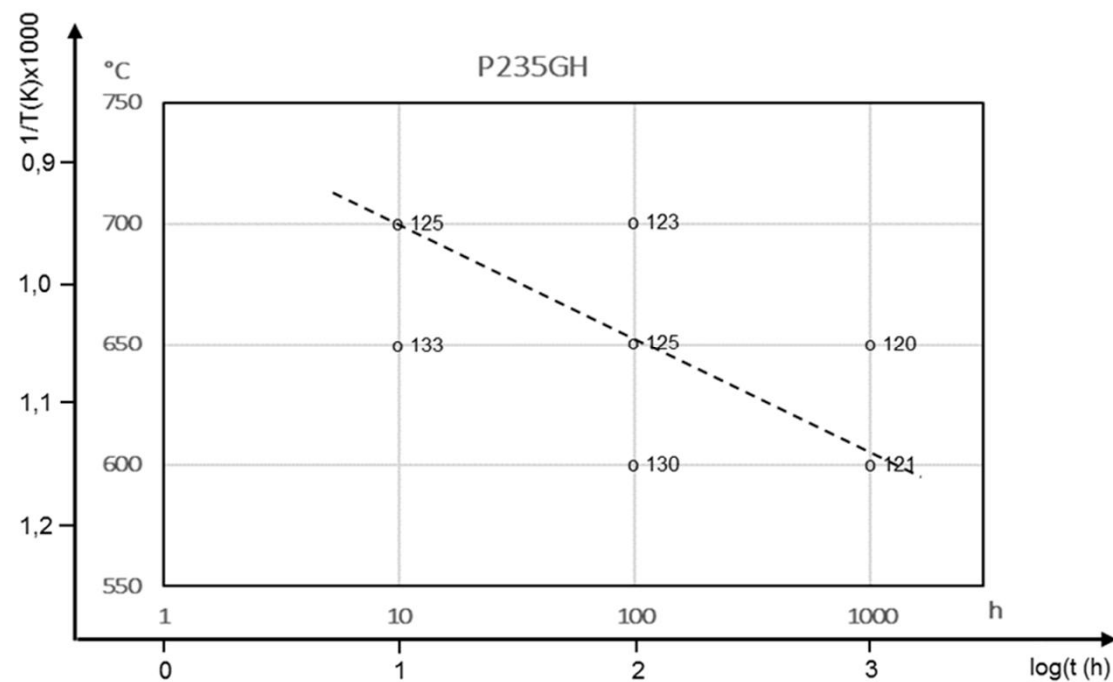
- 7CrMoVTiB10-10 & 10CrMo9-10 mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta, ferriittisillä alueilla oli havaittavissa karbidien muodostusta, hehkuksissa lähinnä karbidien kasvua

Mikrorakenteen t-T -riippuvuus



- P235GH hieman muita nopeammat muutokset, pienempi C-pitoisuus

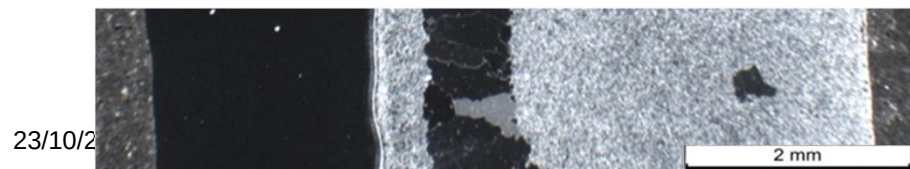
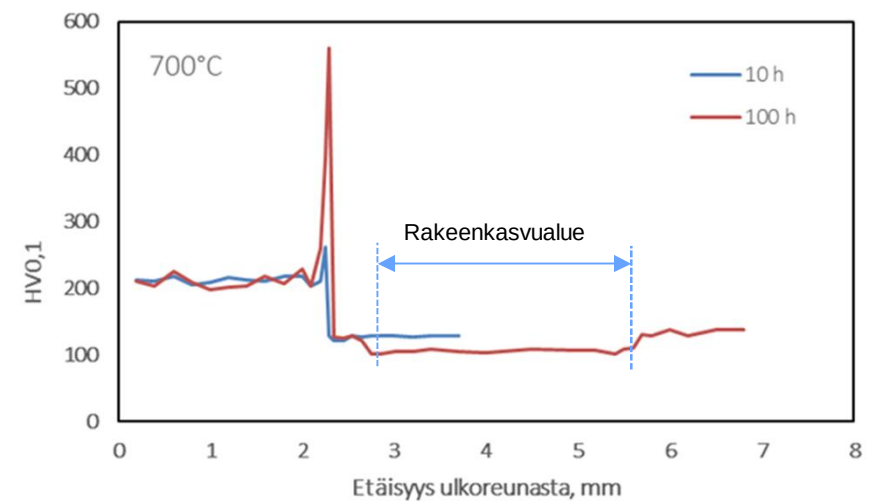
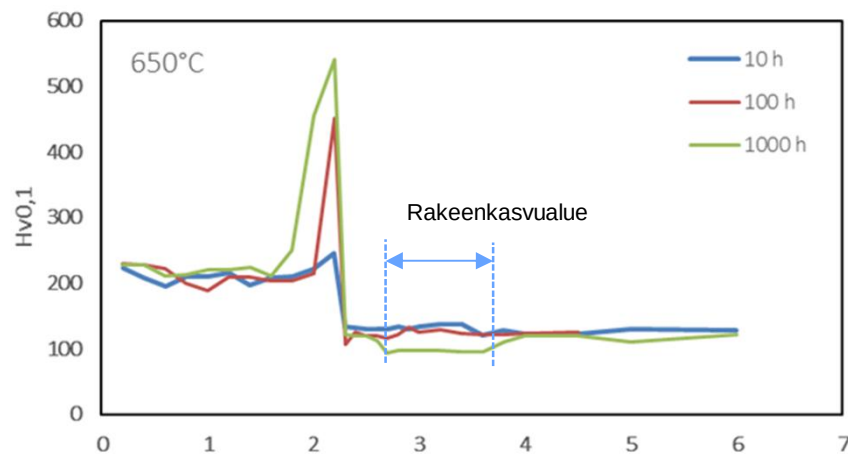
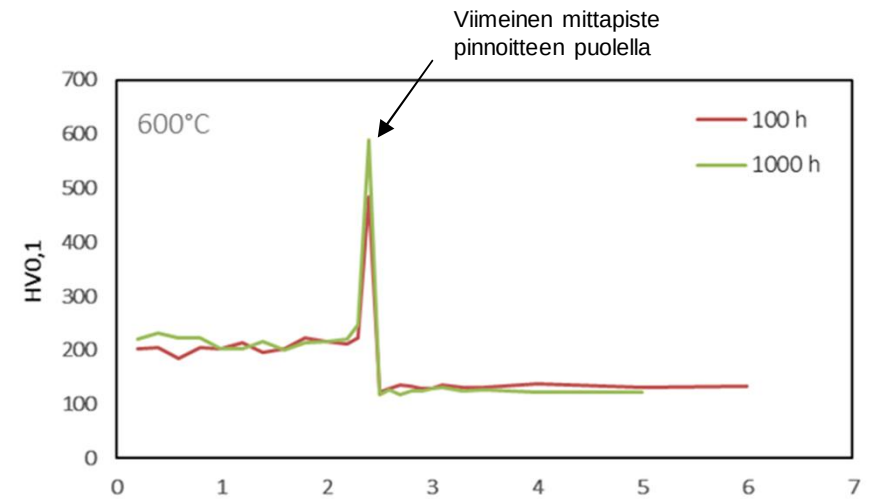
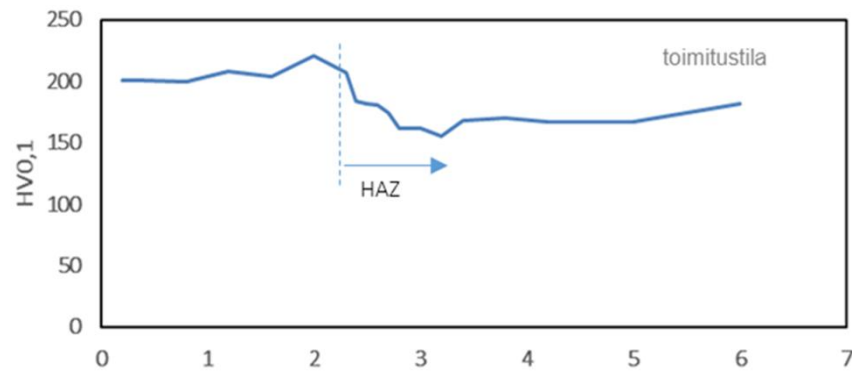
Kovuusmittaukset rajapinnan yli



- Mikrorakennemuutoksia vastaavasti t-T –riippuvuus löydettävissä

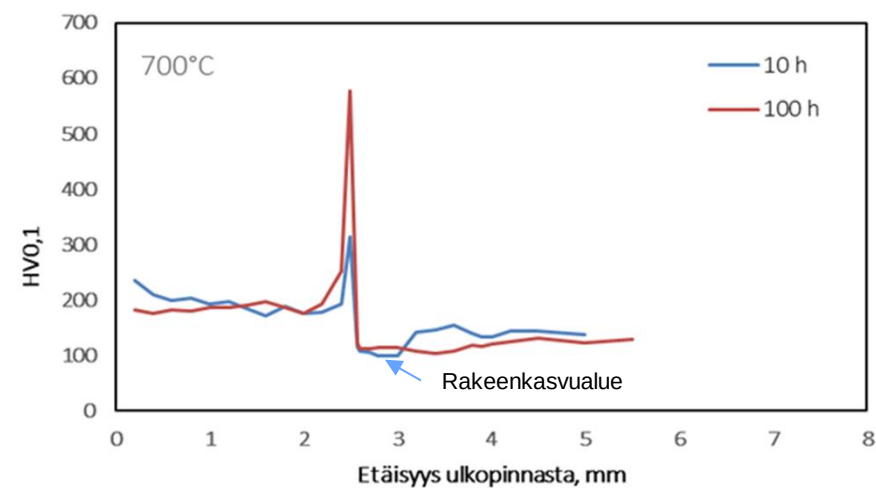
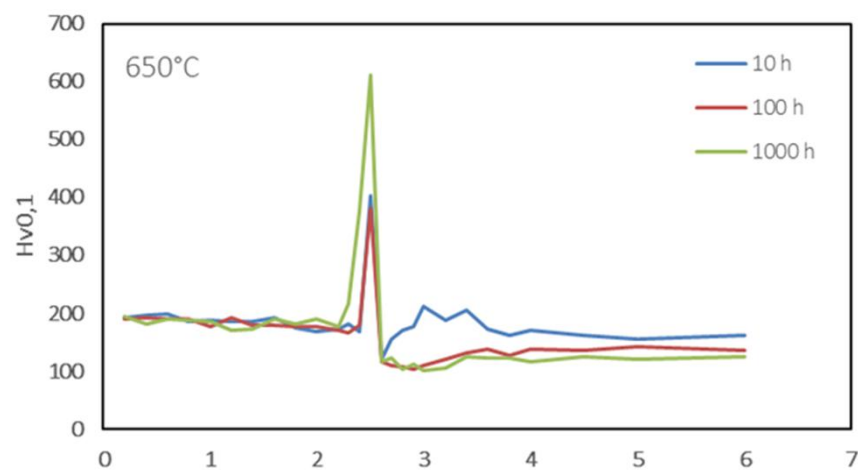
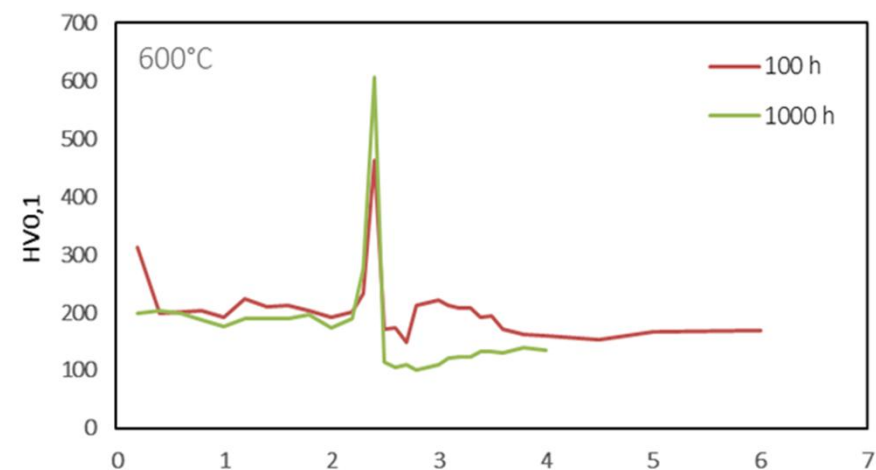
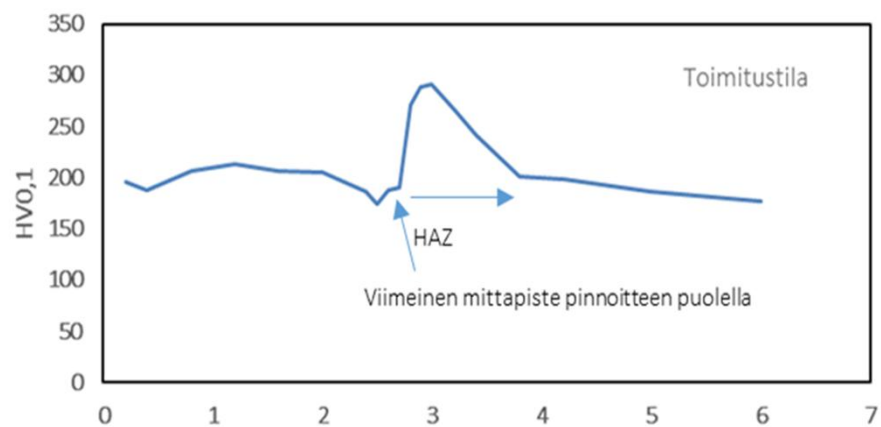
Mikrokovuus HV0,1

AZZ 309L-P235GH

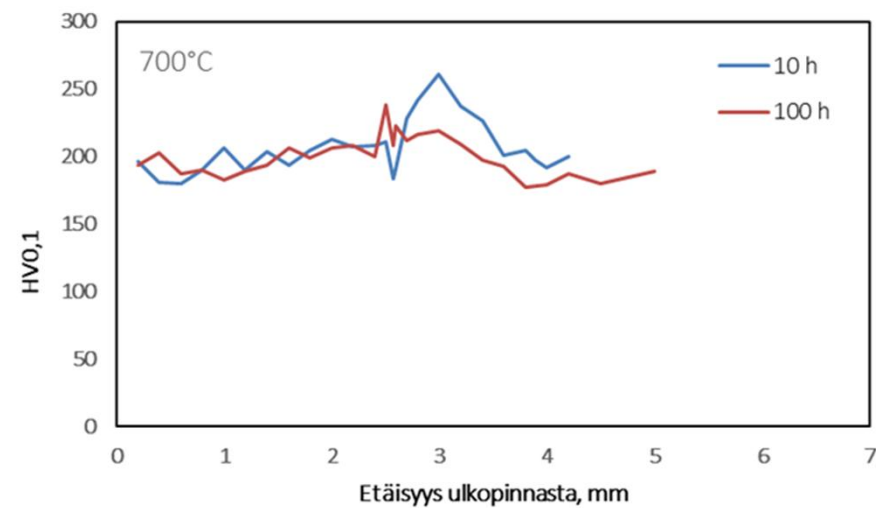
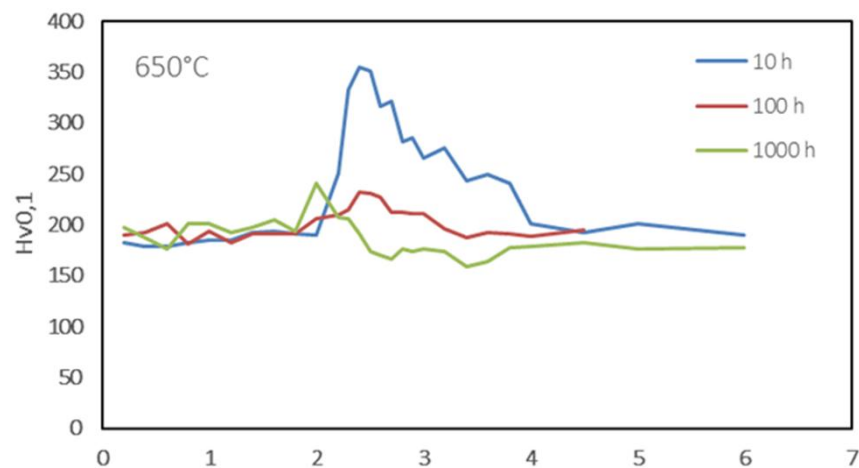
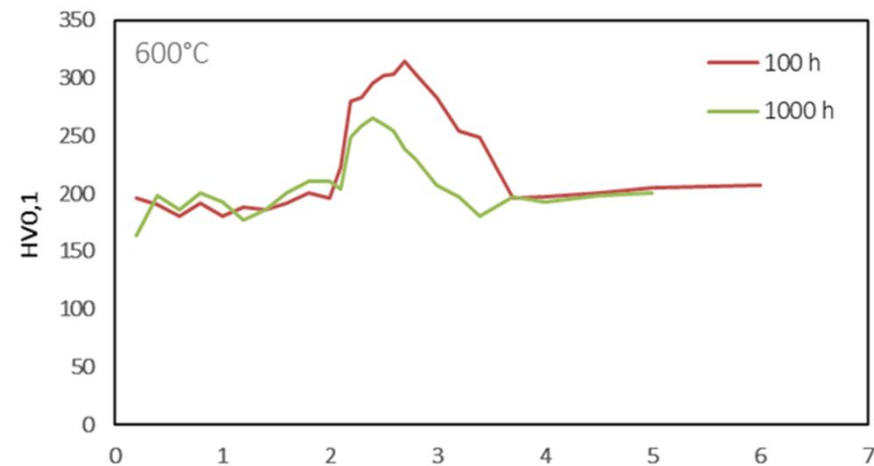
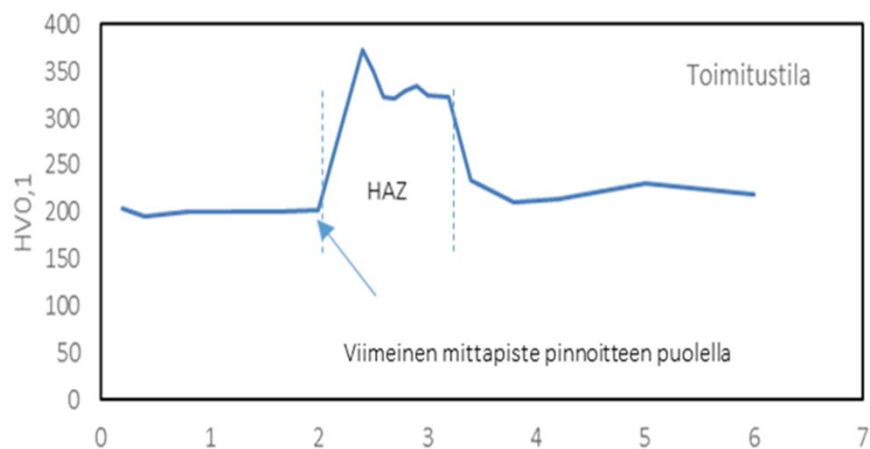


- Rakeenkasvu HAZissa, hiilenkato vyöhyke 8

Uhlig 309L-16Mo3

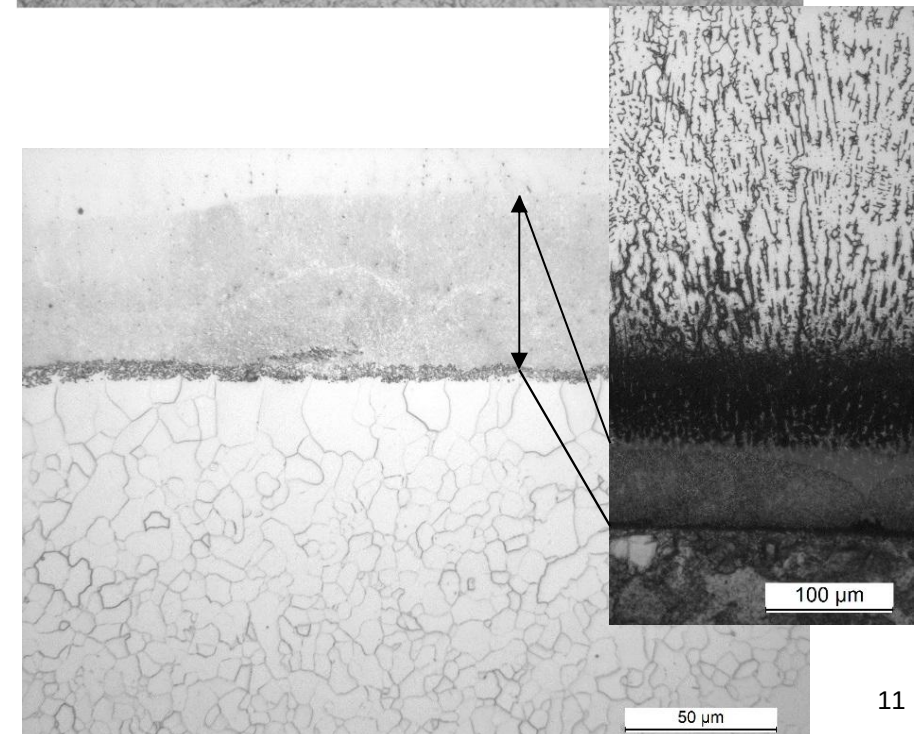
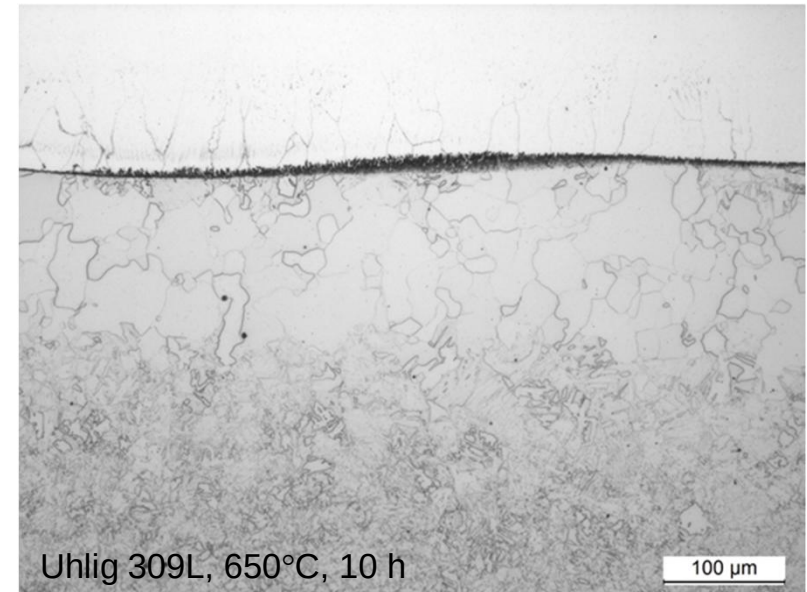


Areva 309L-T24



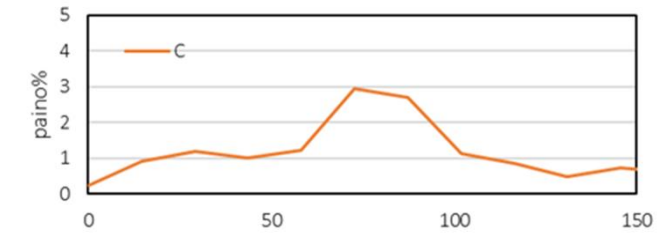
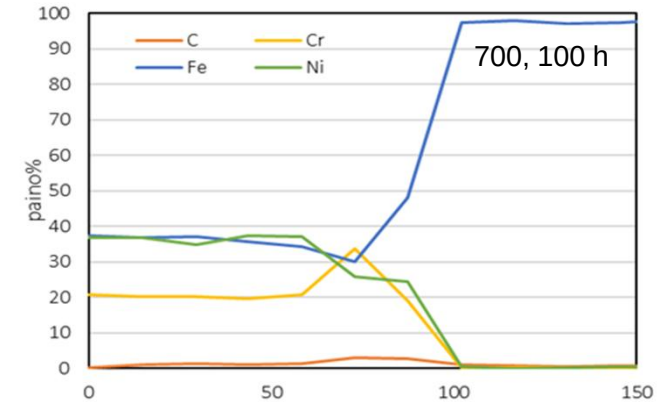
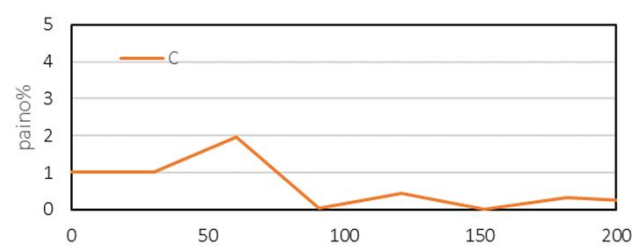
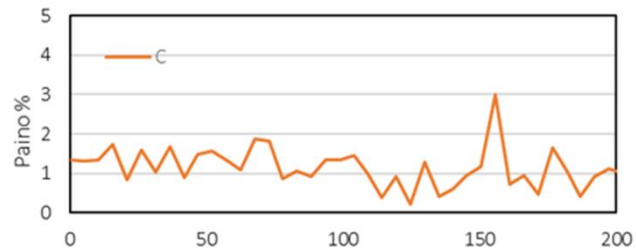
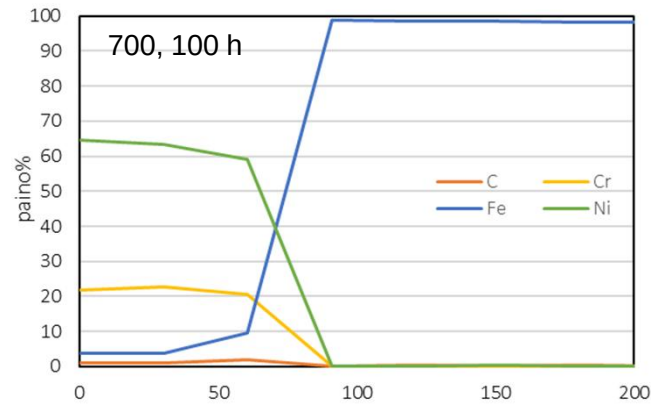
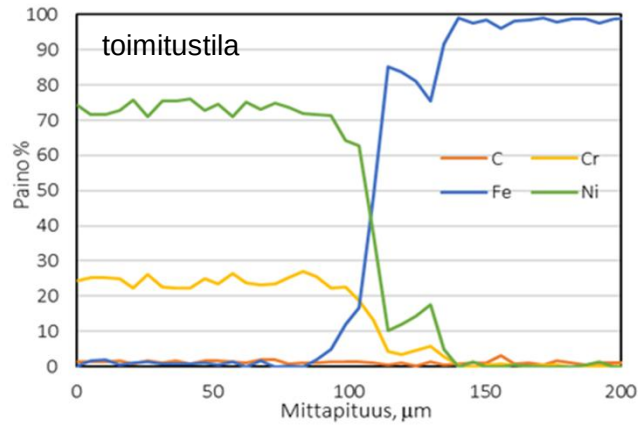
Hiilenkato, hiilettyminen

- Hiilen diffuusio pohjamateriaalista kohti rajapintaa
→ osassa näytteitä voimakkaasti hiilettynyt kerros rajapinnalla pohjamateriaalin puolella, erit. lyhyillä hehkutusajoilla
- Pinnoitteen voimakas hiilettyminen rajapinnan läheisyydessä



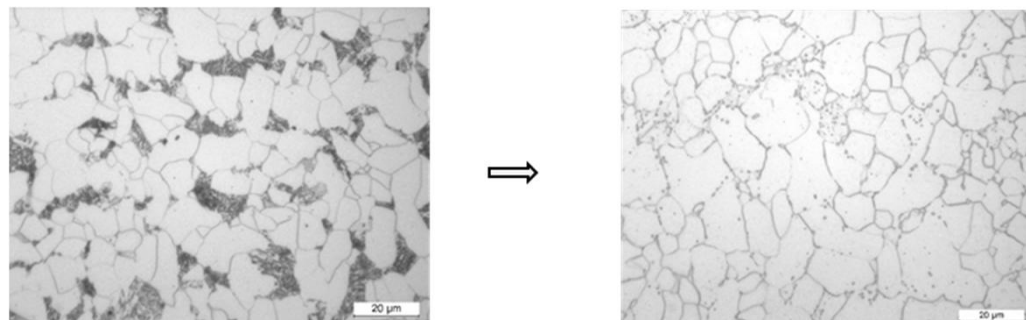
AZZ IN625

Sanicro 38

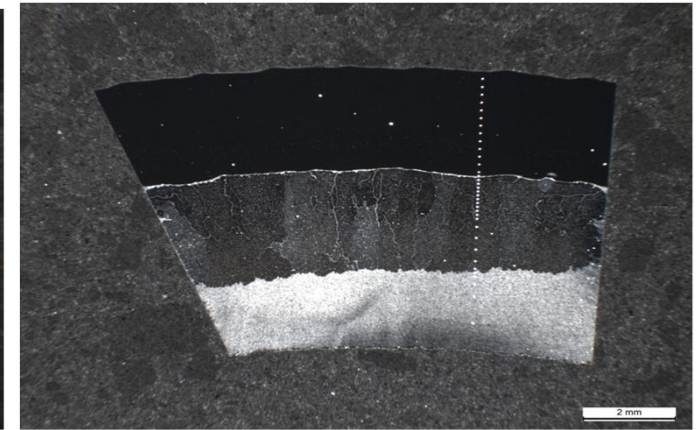
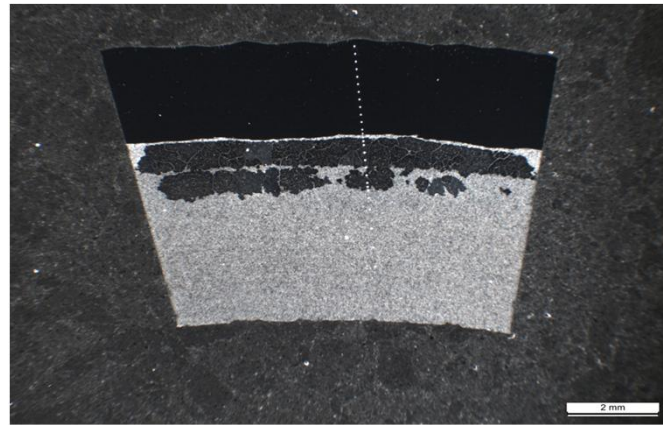
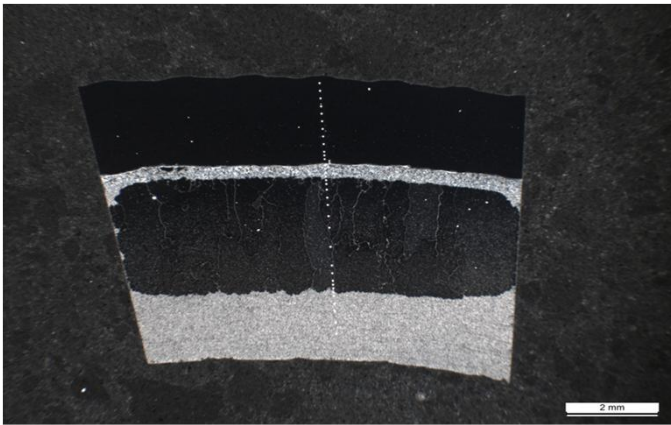


Yhteenveto

- Hiiliterästen mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperliittisen (P235GH, P265GH, St45.8) perliittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, pidemmällä ajanjaksolla ja/tai lämpötilan noustessa karbidien karmenemista
 - Vastaava muutos perliittisbainittisella pohjamateriaalilla 16Mo3
- 7CrMoVTiB10-10 mikrorakenne jo toimitustilassa hajaantunut, raerajakarbidit.
 - Vastaavan tyyppinen rakenne 10CrMo9-10
- Toimitustilaisten näytteiden HAZ-vyöhykkeellä havaitut kovuusvaihtelut tasoittuivat hehkutuksen aikana ja korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä muodostui pinnoitteen puolella lähelle rajapintaa → hiilen diffuusio pohjamateriaalista pinnoitteeseen



- Rajapinnan läheisyyteen pohjamateriaalin puolelle muodostuu matalampien kovuusarvojen vyöhyke
- Rakeenkasvua oli nähtävissä rajapinnalla perusaineen puolella sekä HAZ-vyöhykkeellä



AZZ 309L/IN625/IN825 - P235GH, 700°C 100h

- Mikrorakennemuutokset hitsauspinnoitteilla ja compound-putkilla saman tyyppisiä
- Jatko: Muokkauksen/taivutuksen vaikutusta pinnoitekerrokseen & rajapintaan, SCC

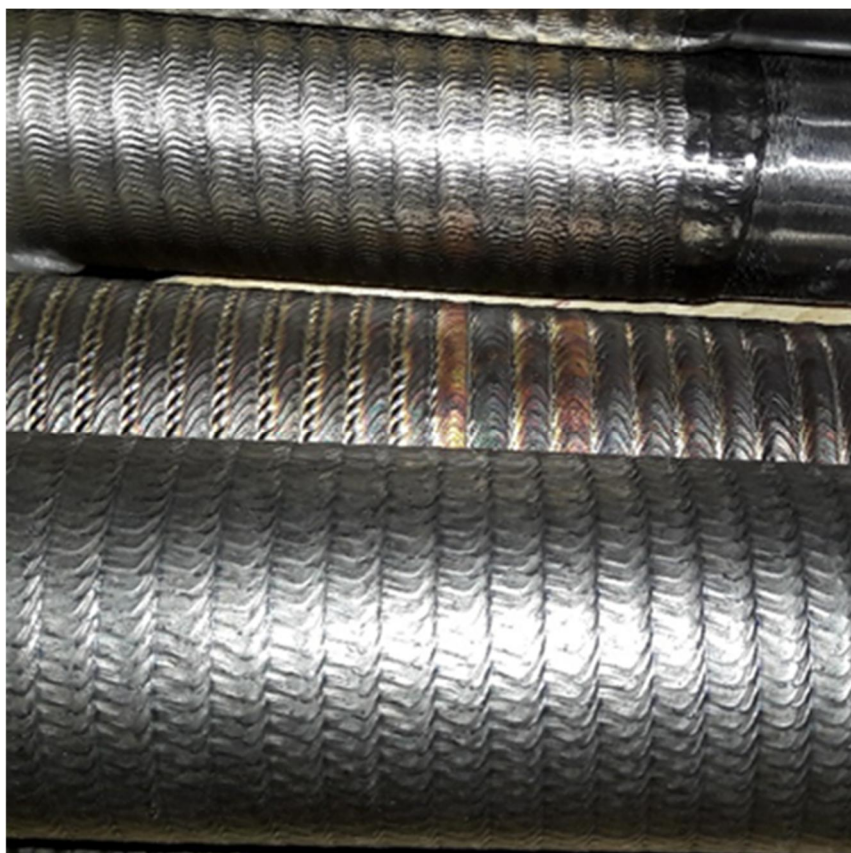
LIITE 4

**VTT: Hitsauspinnotettujen putkien käyttö soodakattiloissa – alustava
raportti 26.9.2017**



TUTKIMUSRAPORTTI

VTT-CR-03414-17-DRAFT



Hitsauspinnoitteet ja mikrorakennemuutokset vanhennushehkutuksissa

Kirjoittajat: Satu Tuurna

Luottamuksellisuus: luottamuksellinen

Raportin nimi Hitsauspinnoitteet ja mikrorakennemuutokset vanhennushehikutuksissa	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Suomen Soodakattilayhdistys ry c/o Pöyry Finland Oy Markus Nieminen PL 4 01621 Vantaa	Asiakkaan viite
Projektin nimi Hitsauspinnoitettujen putkien vanhennus	Projektin numero/lyhytnimi 151300
Raportin laatija(t) Satu Tuurna	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 30 + liitteet
Avainsanat hitsauspinnoite, vanheneminen, mikrorakennemuutos, lämpökäsittely	Raportin numero VTT-CR-03414-17
Tiivistelmä Korkeassa lämpötilassa toimivien komponenttien elinikää rajoittaa voimakkaasti käyttölämpötila. Kuitenkin usein korkean lämpötilan komponenttien lämpötilan mittaus on vaikeasti järjestettävissä. Tällöin lämpötilan arviointiin voidaan käyttää mikrorakenteissa käytön aikana tapahtuneita muutoksia. Pinnoitushitsatuille putkille tehtyjen vanhennushehikutusten tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpökuormituksia. Vanhennushehikutusten perusteella voidaan todeta, että hiiliteräksisten pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperiittisen rakenteen periittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, jota seuraa pidemmällä ajanjaksolla ja/tai lämpötilan noustessa karbidien karmeneminen. Vastaava muutos oli nähtävissä periittisbainittisella pohjamateriaalilla 16Mo3. Arevan toimittamien putkien pohjamateriaalissa 7CrMoVTiB10-10 oli jo toimitustilassa havaittavissa voimakasta karbidin muodostumista raerajoille. Samoin 10CrMo9-10:n (San28 komppoundin pohjamateriaali) mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta. Havaitut muutokset 10CrMo ja 7CrMoVTiB materiaaleilla oli lähinnä raerajakarbidien kasvu. Hiilen kulkeutuminen perusaineesta pinnoitteen puolella oli nähtävissä hiilenkatona mikrorakenteissa pohjamateriaalin puolella ja samanaikaisesti pinnoitteen hiiletymisenä rajapinnan pinnoitteen puolella. Pinnoitteiden rakeissa ei havaittu hiiletymisen lisäksi muita muutoksia.	
Luottamuksellisuus	Luottamuksellinen
Tampere 25.9.2017 Laatija Satu Tuurna Tiimivetäjä	Hyväksyjä Pekka Pohjanne Tutkimuspäällikkö
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 111, etunimi.sukunimi@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaaja 1 kpl VTT arkisto 1 kpl	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Koemateriaalit ja tutkimusmenetelmät.....	4
3. Vanhennushehkutusten tulokset	6
3.1 Mikrorakennemuutokset.....	6
3.2 Kovuusmittaukset	10
3.3 Hiilenkato rajapinnan yli ja pinnoitteen hiillettyminen rajapinnalla	25
4. Yhteenveto.....	29
Lähdeviitteet.....	30

Liite 1. Pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset hehkutusten jälkeen

Liite 2. Rajapintojen rakenne

Liite 3. Pinnoitteiden mikrorakenne hehkutusten jälkeen

Liite 4. EDX-analyysit pinnoite-perusainerajapinnan yli

1. Johdanto

Korkeissa lämpötiloissa toimivien komponenttien kunnon ja jäljellä olevan eliniän määrittämiseksi on tärkeä tuntea komponenttiin kohdistuva lämpökuormitus, lämpötilan ja ajan yhteisvaikutus. Komponenttien lämpötilan suora mittaus käyttöolosuhteissa on usein haastavaa, mutta sen arviointi jälkikäteen on usein mahdollista käytön aikaisten materiaaliomuutosten perusteella.

Niukkaseosteisissa tai seostamattomissa teräksissä, joiden mikrorakenne on toimitustilassa ferriittisperliittinen, mikrorakennemuutokset ilmenevät aluksi perliitin lamellien katkeiluna ja vähitellen etenevänä palloutumisena, jota seuraa palloutuneiden karbidien karmeneminen [1-3]. Rakennemuutoksia voidaan seurata mikroskooppitarkasteluin (optinen, SEM) sekä kovuusmittausten avulla. Compound- ja hitsauspinnoitetuissa putkissa, joissa hiiliteräksen pintaan on tuotu korroosiota kestävämpi kerros, tapahtuu pohjamateriaalien rakennemuutosten lisäksi muutoksia pinnoite-pohjarajapinnalla. Pohjamateriaalista diffundoituu hiiltä pinnoitteen puolella aiheuttaen pohjamateriaalissa hiilenkatoa ja vastaavasti korkeammin seostetun pinnoitteen hiilettymistä ja sen seurauksena herkistymistä.

Ferriittisperliittisen teräksen karbidirakenteen palloutuminen ja karmeneminen noudattavat kinetiikaltaan Arrheniuksen yhtälöä

$$k = Ae^{-E/T}, \quad (1)$$

missä k on reaktionopeus, A vakio, E aktivaatioenergia ja T lämpötila (K).

Yhtälön ollessa voimassa reaktionopeuden tai vastaavan tiettyyn muutokseen kuluvan ajan ja valitsevan lämpötilan riippuvuus on lineaarinen $1/T - \log t$ -koordinaatistossa. Eri asteisissa muutoksia kuvaavalle käyräparvelle on pyritty etsimään yleisempää riippuvuutta, jolloin ajan ja lämpötilan yhteisvaikutus voitaisiin esittää parametrimuodossa numeroarvona. Tämän tyyppisistä parametreista yleisimmin käytetty on Larson-Miller -parametri

$$P_{LM} = T \times (\log t + C), \quad (2)$$

missä P_{LM} on Larson-Miller parametri, T lämpötila (K), t aika (h) ja C vakio.

Aiemmin tehtyjen tutkimusten [4] mukaan tiettyyn mikrorakenteen muutokseen kuluva ajan ja metallin lämpötilan on DIN 17 175 -normin mukaisella teräksellä St 35.8, 10 CrMo 9 10 ja X 20 CrMoV 12 1 havaittu noudattavan hyvin Larson-Miller -parametrin mukaista riippuvuutta vakion C arvolla 14.

Hiili siirtyy compound- ja hitsauspinnoitetussa putkessa niukkaseosteisesta teräksestä rajapinnan yli seostetumpaan teräkseen diffundoitumalla. Diffuusion matka-aikariippuvuus noudattaa Fickin toista lakia [4], jonka mukaan tietylle pitoisuudelle

$$x^2 \approx D t, \quad (3)$$

missä x on diffuusiomatka, D diffuusiokerroin (vakio vakiolämpötilassa) sekä t aika [5].

Käytännössä compound- ja pinnoitehitsatuissa putkissa tapahtuu hiilen diffuusiota rajapinnan yli jo valmistusvaiheessa, jolloin hehkutuksen aikana tapahtuva diffuusio ei noudata Fickin lakia. Yhtälön (3) diffuusiokertoimen lämpötilariippuvuus on Arrheniuksen yhtälön kaltainen

$$D = D_0 e^{-Q/RT}, \quad (4)$$

missä D_0 on diffuusiovakio, Q aktivaatioenergia ja R yleinen kaasuvakio [5].

Diffuusionopeuden lämpötilariippuvuudesta johtuen diffuusion aiheuttamaan muutokseen kuluvan ajan ja metallin lämpötilan odotettu riippuvuus on $1/T - \log t$ -koordinaatistossa lineaarinen.

Raportti kokoaa hitsauspinnoitetuille putkille tehtyjen vanhennusheikutusten tulokset. Tuloksia voidaan hyödyntää selvitetessä mikrorakennemuutosten perusteella käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpörasituksia.

2. Koemateriaalit ja tutkimusmenetelmät

Vanhennuskokeisiin tilattiin hitsauspinnoitteita 309L, IN625 ja IN825 P265GH pohjaputkella kolmelta toimittajalta, AZZ, Uhlig sekä Areva. Toimitettujen pinnoitteiden pohjamateriaalit vaihtelivat kuitenkin seuraavasti; AZZ:n toimittamien putkinäytteiden pohjamateriaali oli P235GH, Uhligin 16Mo3 ja Arevan 7CrMoVTiB10-10. Yhteenvedo toimitetuista pinnoitteista sekä pohjamateriaaleista on esitetty Taulukossa 1. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty näyterenkaiden toimitetuista hitsauspinnoitteista sekä hitsauspinnoitteiden paksuus putken poikkileikkauksesta. Minimipaksuusvaatimus pinnoitteille oli 2 mm. Paksuusvaihtelut pinnoitteissa johtuvat pääosin spiraalituypisesta putken ympärikulkevasta pinnoitustavasta. Putkikohtaiset muutosvyöhykkeiden paksuudet on esitetty Taulukossa 2. Referenssimateriaaleina hitsauspinnoitetuille putkille heikutuksissa toimivat kompond-putket 304L, Sanicro 28 sekä Sanicro 38.

Taulukko 1. Koemateriaalit ja aineodistuksen mukainen koostumus (jäännös Fe)

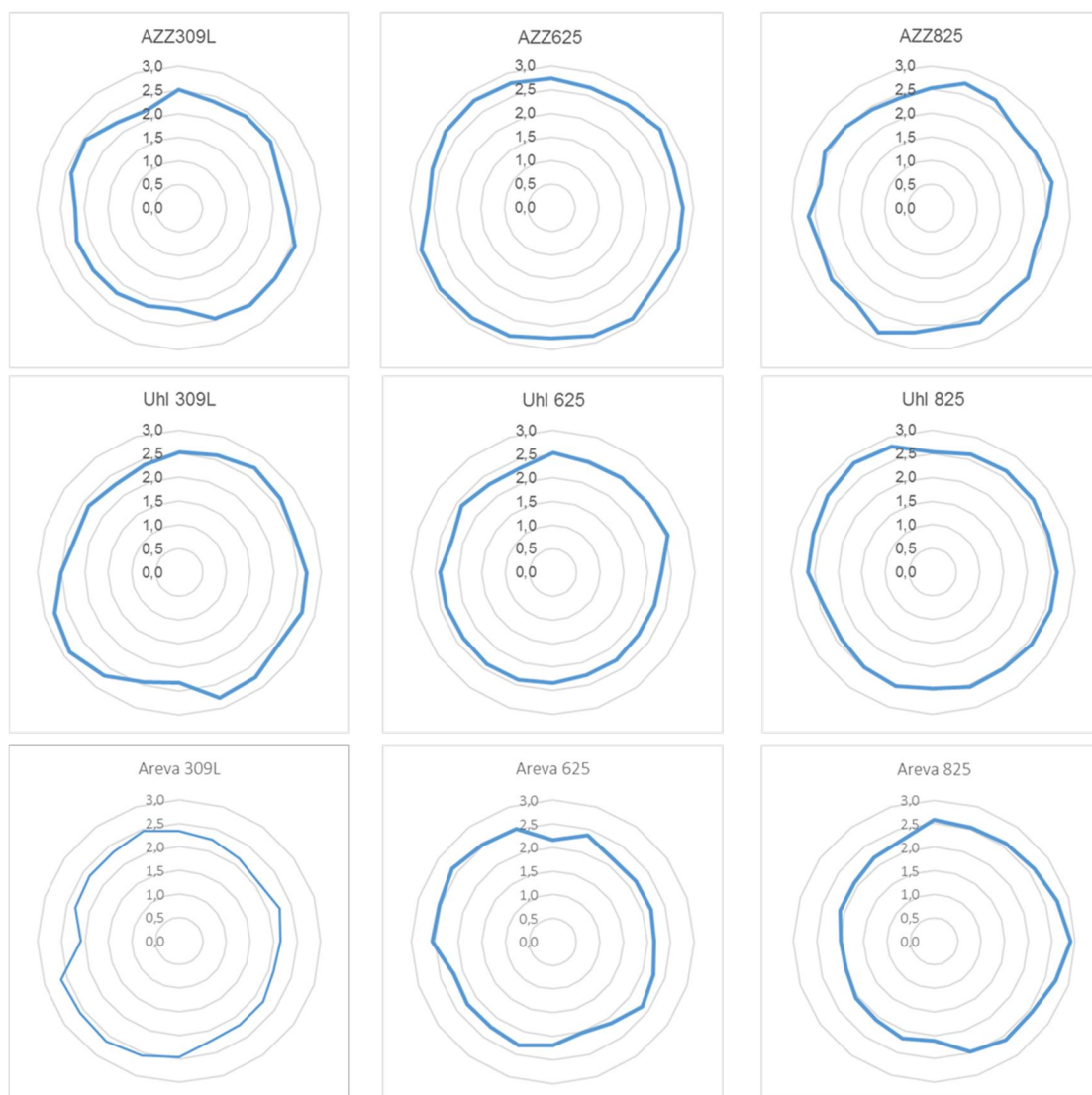
Materiaali	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb		Huom
309L*		0,45	1,96	23,1		13,1			AZZ, hitsaus- pinnoite
625*				23,7	8,3	65,2		0,2TiO, 15Al	
825*		0,2		21,6	2,8	36,1		1,8Cu, 0,7Ti	
P235GH**	0,16	0,35	0,6- 1,2	0,3	0,08	0,3	0,02		
309L, E309L	0,01	0,8	1,6	23,2	<0,1	13,5		0,1Cu	Uhlig, hitsaus- pinnoite, mat.tod mukainen koostumus
625, Thermanit	<0,1	<0,1	<0,1	22,1	8,8	64,5	3,5		
825, FM65	0,01	0,3	0,8	22,7	3,1	43,4		2,1Cu, 0,8Ti 0,22Co	
16Mo3	0,17	0,19	0,68	0,22	0,27	0,11			
309L, Ugitech	0,016	0,40	1,60	23,37	0,22	13,61		0,03Cu	Areva, hitsaus- pinnoite, mat.tod mukainen koostumus
625, Sanicro 60	0,013	0,07	0,03	22,34	9,11	64,3	3,53	0,2Ti	
825, Sanicro 41CU	0,009	0,15	0,77	23,0	2,99	42,9		1,07Ti 2,29Cu	
T24	0,07	0,26	0,55	2,44	0,96			0,24V 0,07Ti	
304L St45.8	0,009 0,19	0,44 0,29	1,17 0,69	18,4		10,36			kompond, mat.todistus
San28* T22	***	0,5 0,3	1,6 0,4	27,8 2,4	3,4 0,9	30,0		0,8Cu	kompond
San38* P265GH**	0,18	0,4 0,36	0,6 0,7	20,7	2,6	37,2		1,3Cu, 0,7Ti	kompond

*SEM analyysiin perustuva koostumus; **Normin mukainen koostumus

***Hiiltä EDX-kammiassa epäpuhtautena, pitoisuus jätetty huomioimatta



Kuva 1. Hitsauspinnoitetut näyteputket. Vasemmalta oikealle AZZ, Uhlig ja AREVA



Kuva 2. Toimitustilaisten hitsauspinnoitteiden paksuus putken poikkileikkauksen ympäri mitattuna [mm]

Taulukko 2. Toimitustilaisten hitsauspinnoitteiden muutosvyöhykkeiden paksuus pohjamateriaalissa [μm]

Materiaali	Hiilen kato	HAZ
309L AZZ	50-70	1400-1600
625 AZZ	<20	600-800
825 AZZ	10-40	700-900
309L Uhlig	~10	900-1200
625 Uhlig	~10	600-700
825 Uhlig	~10	700-900
309L Areva	<10	900-1300
304L	100-150	
San28	50-100	
San38	100	

Toimitetuista putkista irrotettiin näytepaloja (~25x25 mm), jotka hehkutettiin 600, 650 ja 700°C:ssa, Taulukko 3. Arevan toimittamista materiaaleista hehkutettiin vain 309L-pinnoitettu näytemateriaali. Vanhennettujen näytepalojen mikrorakenteet tutkittiin valomikroskoopin avulla, ja tulosten perusteella osaa näytteistä tarkasteltiin lisäksi pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). Lisäksi näytteistä mitattiin mikrokovuudet (HV 0,1) pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan ylitse. Tuloksia verrattiin ennen hehkutusta määritettyihin ominaisuuksiin.

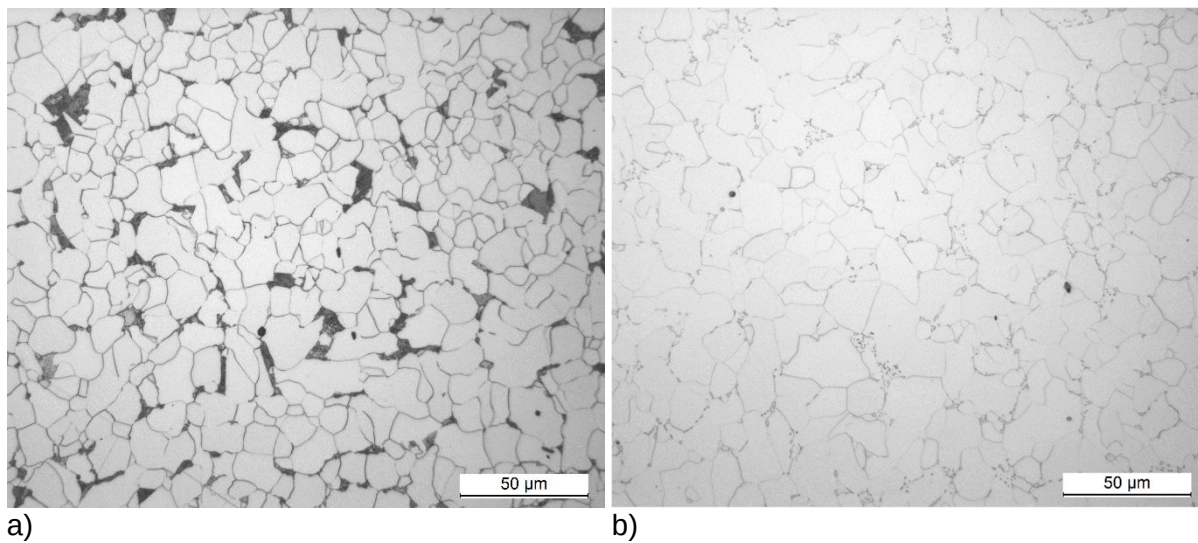
Taulukko 3. Koematriisi vanhennushehkutuksille

t/T	600°C	650°C	700°C
10 h		x	x
100 h	x	x	x
1000 h	x	x	

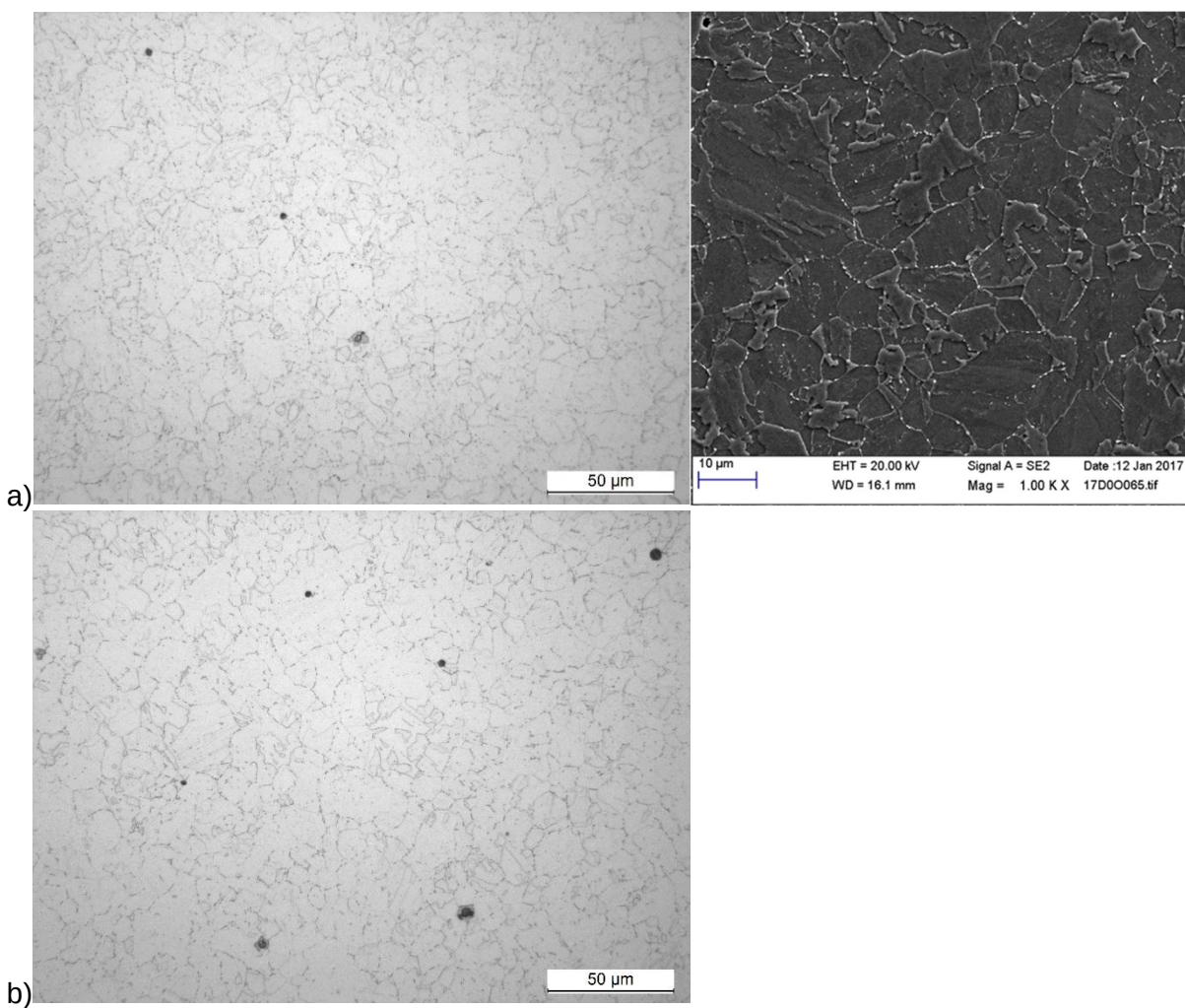
3. Vanhennushehkutusten tulokset

3.1 Mikrorakennemuutokset

Vanhennushehkutusten aikana teräksissä tapahtuneita mikrorakennemuutoksia kuvaavat optiset mikrorakennekuvat on esitetty Liitteessä 1. Hiiliteräksisten pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperliittisen rakenteen perliittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, jota seuraa karbidien karkeneminen (Kuva 3). Perliittisbainittiselle pohjamateriaalille 16Mo3 soveltuu vastaava luokittelu. 10CrMo9-10 (San28 komppoundin pohjamateriaali) mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta, ferriittisillä alueilla oli havaittavissa karbidien muodostusta (Liite 1, Kuva 33). Arevan toimittamien putkien pohjamateriaalissa 7CrMoVTiB10-10 oli myös toimitustilassa havaittavissa voimakasta karbidin muodostumista raerajoille (Kuva 4) ja suuria muutoksia mikrorakenteessa hehkutuksien aikana ei havaittu (Liite 1, Kuvat 17-24). Havaitut muutokset 10CrMo ja 7CrMoVTiB materiaaleilla oli lähinnä raerajakarbidien kasvu.



Kuva 3. Pohjamateriaalin P235GH mikrorakennemuutos; a) toimitustila ja b) 650°C/100 h

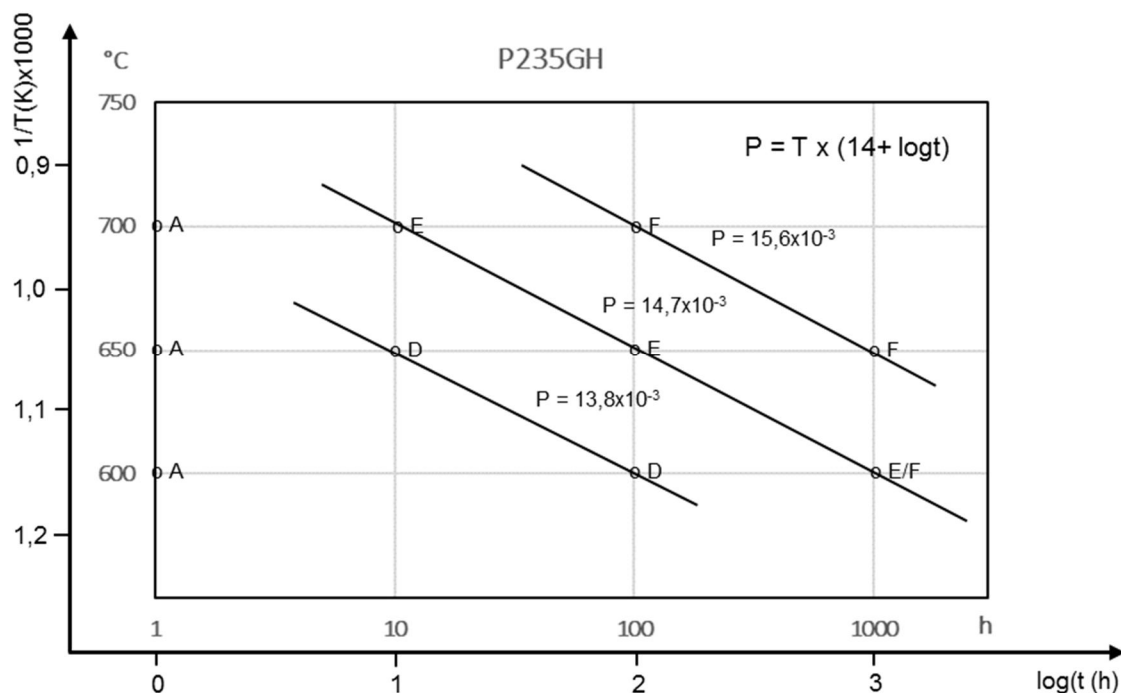


Kuva 4. Pohjamateriaalin 7CrMoVTiB10-10 mikrorakenne toimitustilassa sekä 650°C/1000 h vanhennuksen jälkeen

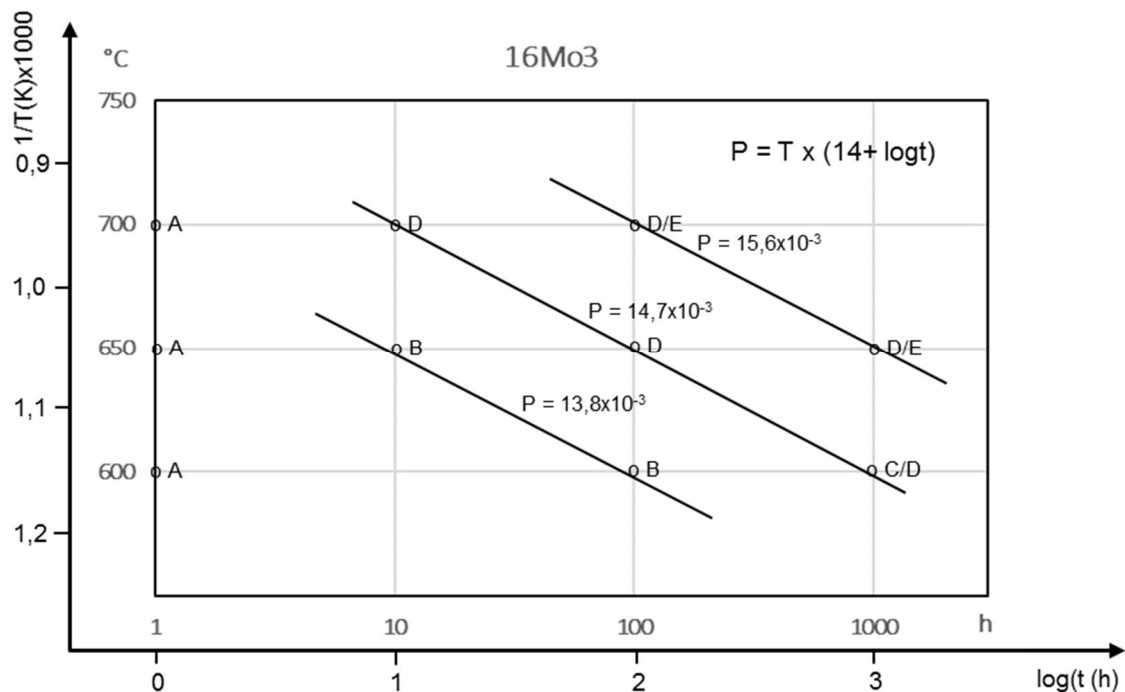
Hiiliterästen mikrorakenteessa tapahtuvien muutosten luokitteluun on käytetty seuraavaa ferriittisperiittisille teräksille soveltuvaa asteikkoa:

- A Käyttämättömän teräksen mikrorakenne, ferriittiä ja perliittiä
- B Ensimmäiset merkit palloutumisesta
- C Huomattavaa palloutumista, mutta edelleen joitakin lamellaaria karbideja
- D palloutuminen täydellistä, mutta karbidit yhä entisillä perliittialueilla
- E Karbidit hajaantuneet, mutta edelleen havaittavissa vähäisiä merkkejä perliittialueista
- F Alkuperäiset perliittialueet hävinneet, osa karbideista kasvanut huomattavasti

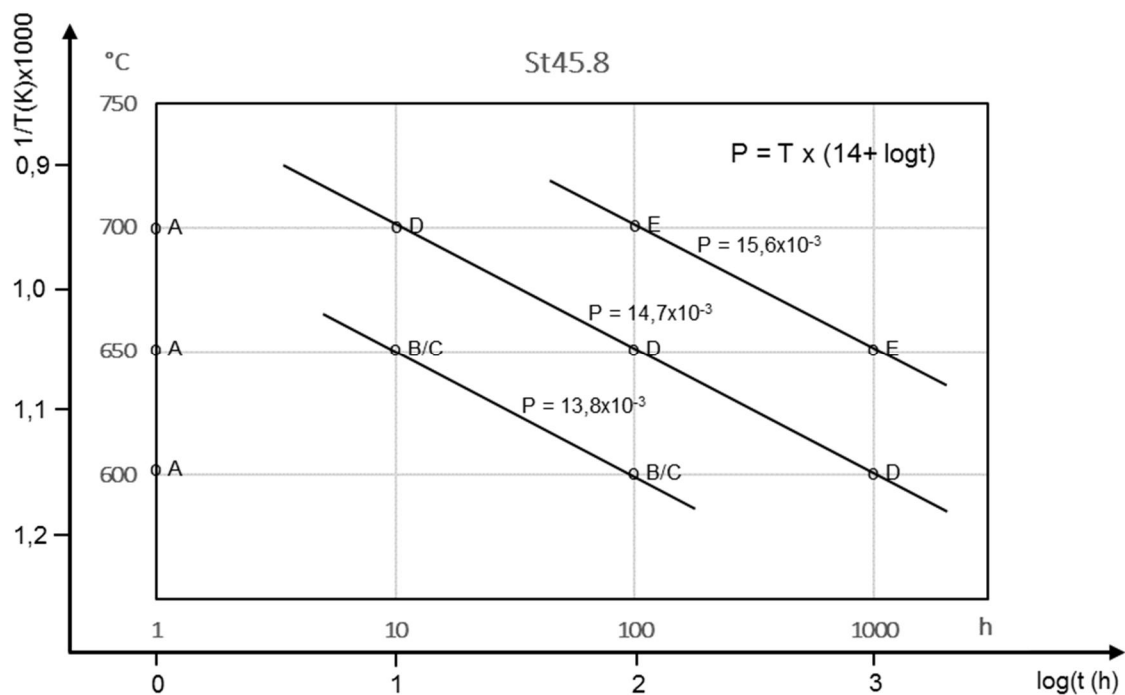
Mikrorakennetutkimusten tulokset materiaaleille P235GH, 16Mo3, St45.8 ja P265GH on esitetty Kuvissa 5-8 edellä esitetyn luokittelun mukaisesti aika-lämpötilariippuvuutena. Luokittelu perustuu valomikroskooppitutkimusten tuloksiin. Saman mikrorakennemuutoksen saavuttamiseksi tarvittavat T-t -yhdistelmät ovat kyseisessä koordinaatistossa suorilla, jotka toteuttavat LM-parametriyhtälön vakion C arvolla 14. Vertailtaessa tuloksia voidaan todeta, että teräksen P235GH mikrorakennemuutokset tapahtuvat hieman muita materiaaleja nopeammin vähäisemmästä hiilipitoisuudesta johtuen.



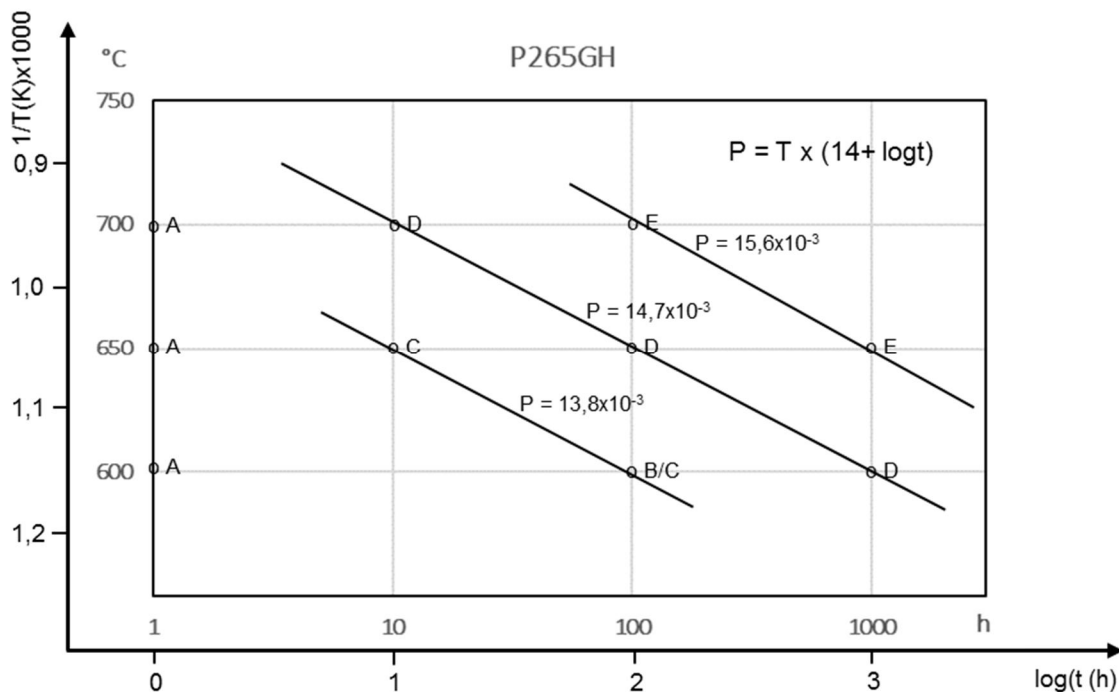
Kuva 5. Teräksen P235GH mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus



Kuva 6. Teräksen 16Mo3 mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus



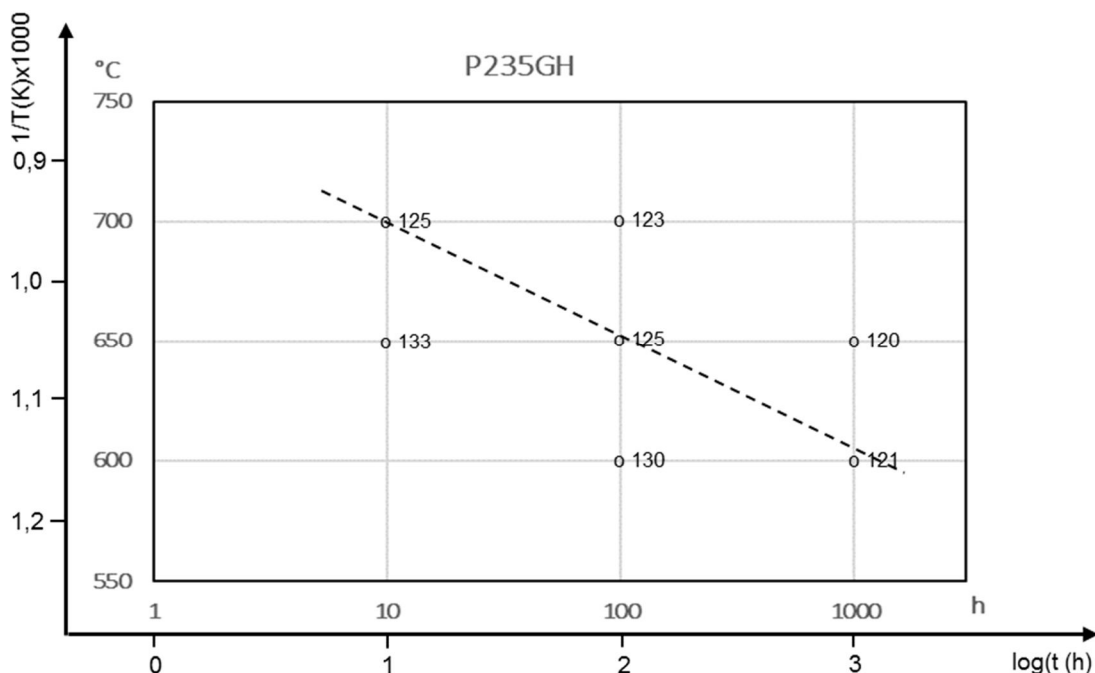
Kuva 7. Teräksen St45.8 (kompound 304L pohja) mikrorakennemuutosten t-T -riippuvuus



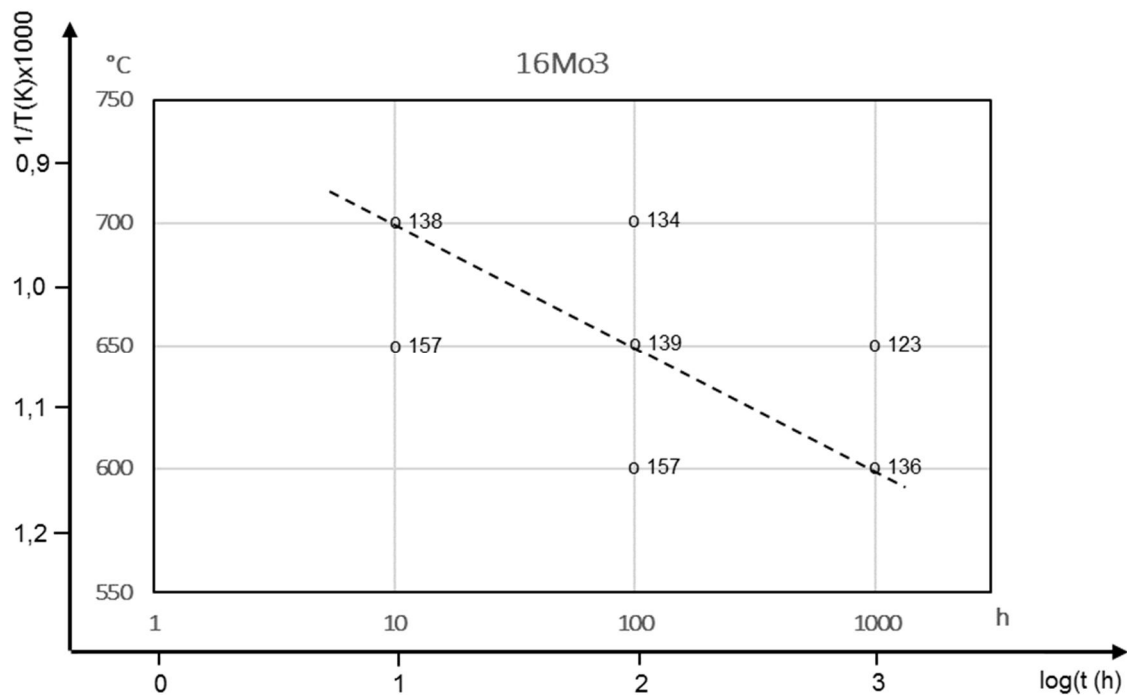
Kuva 8. Teräksen P265GH (komppound San 38 pohja) mikrorakennemuutosten t - T -riippuvuus

3.2 Kovuusmittaukset

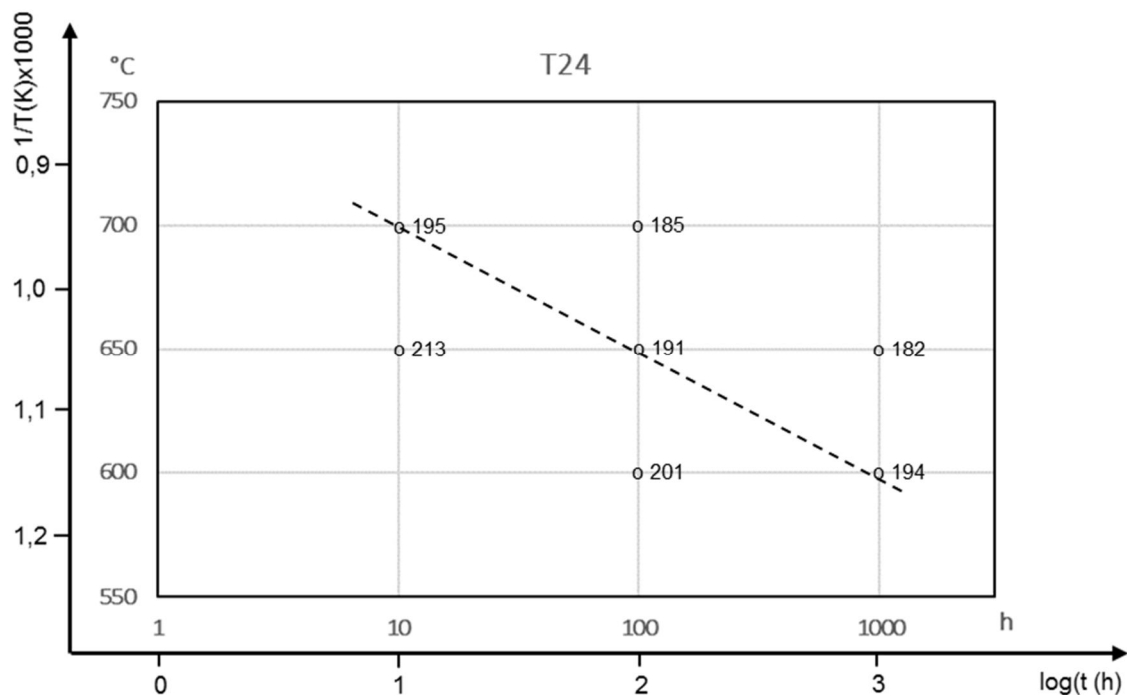
Mikrokovuusmittaustulokset (HV0,1) on esitetty $1/T - \log t$ -koordinaatistolla Kuvissa 9-14. Kuvista voidaan todeta lähes samaan kovuuteen johtavien aika-lämpötila -yhdistelmien olevan kyseisessä koordinaatistossa suorilla, joiden kulmakerroin on samaa luokkaa kuin samoihin mikrorakennemuutoksiin johtavia aika-lämpötila -yhdistelmiä kuvaavat suorat Kuvissa 5-8. Tuloksissa näkyvä kovuuksien hajonta johtuu pääsääntäisesti käytetystä pienestä voimasta mittauksien aikana (HV0,1). Kuvassa 15 on esitetty korrelaatio kovuustuloksille HV0,1 ja HV5 hehkutuksen 650°C/1000 h jälkeen.



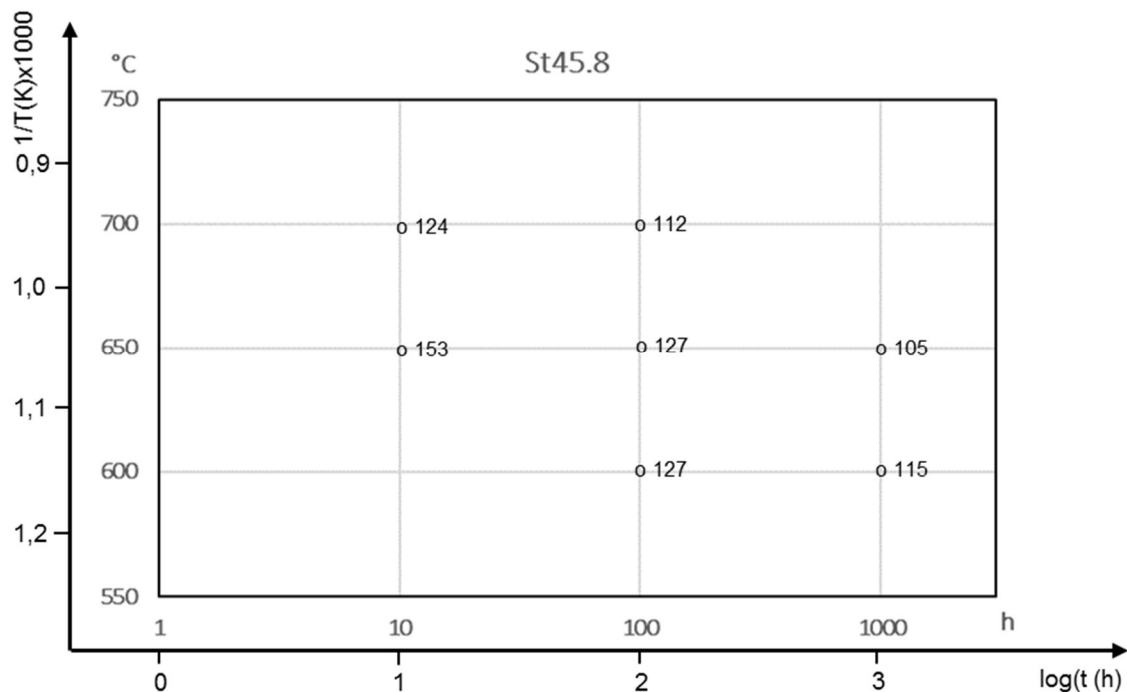
Kuva 9. Teräksen P235GH (AZZ:n toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuusmuutosten t - T -riippuvuus



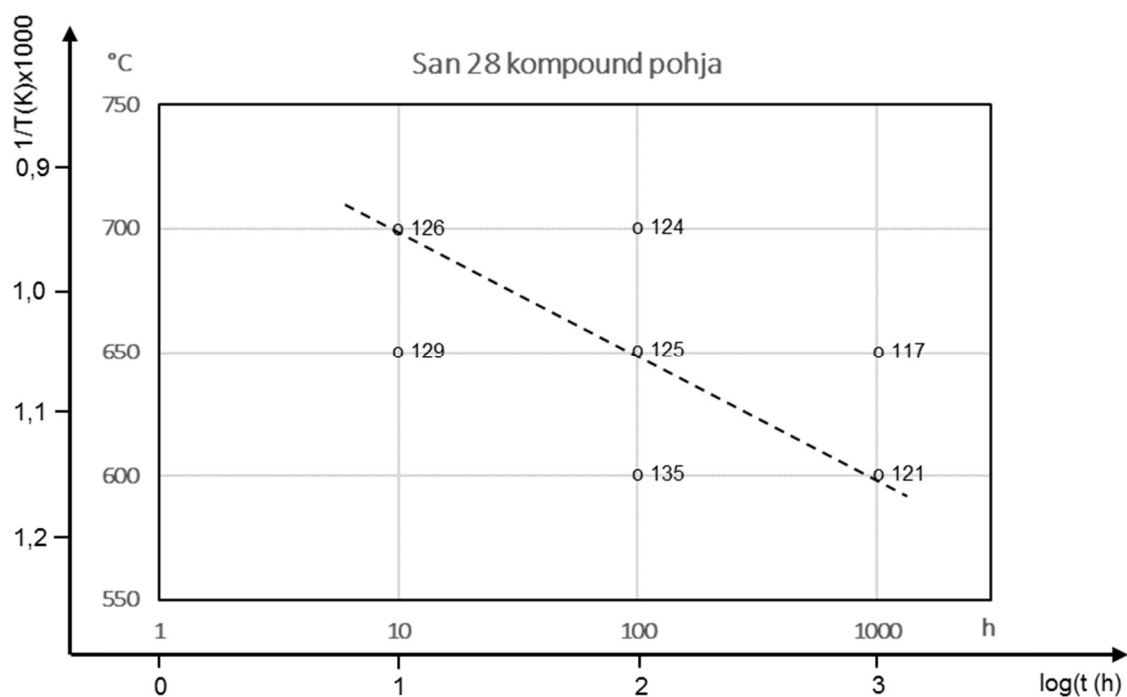
Kuva 10. Teräksen 16Mo3 (Uhligin toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuusmuutosten t - T -riippuvuus



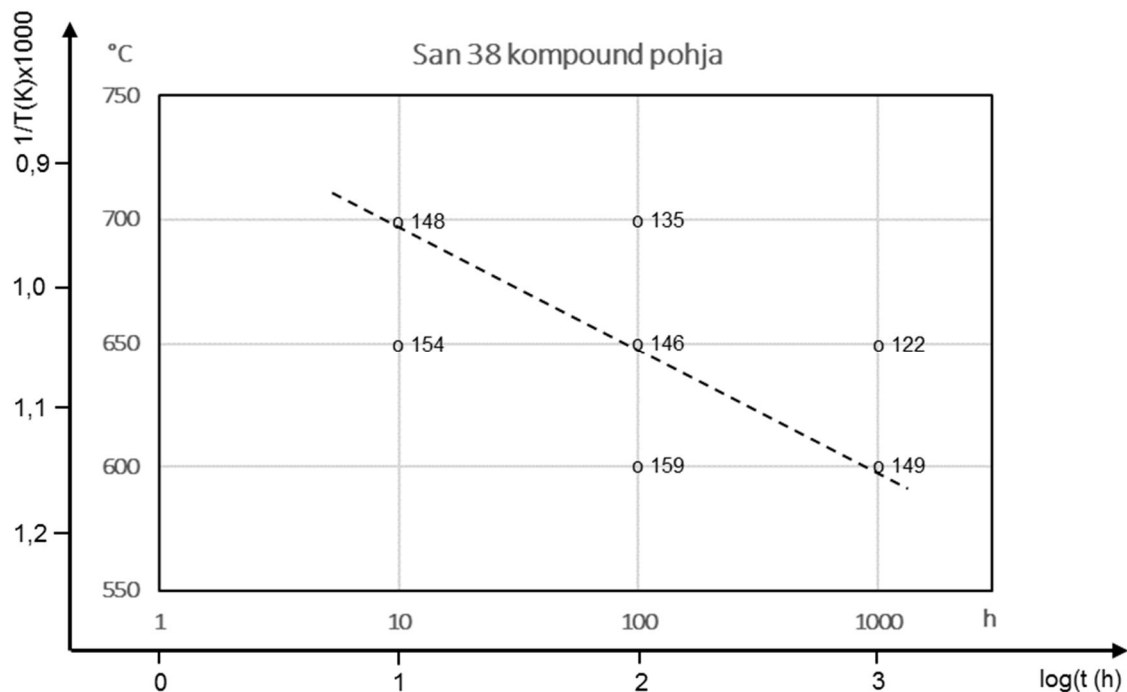
Kuva 11. Teräksen 7CrMoVTiB10-10 (Arevan toimittamien putkien pohjamateriaali) kovuusmuutosten t - T -riippuvuus



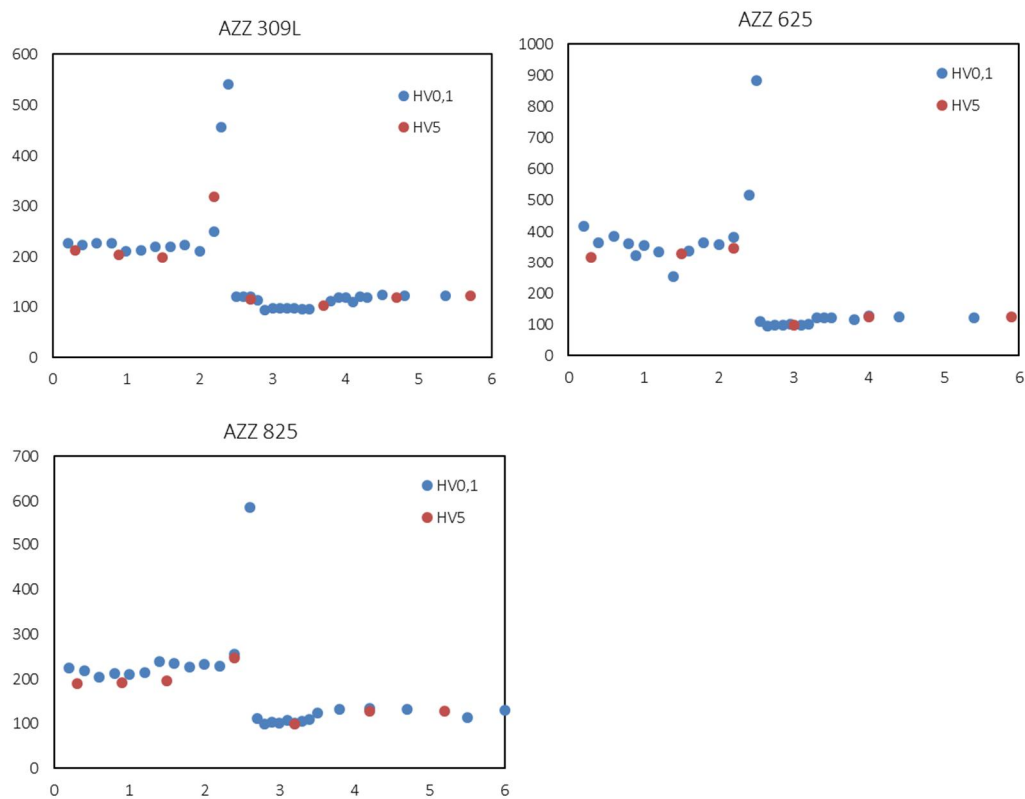
Kuva 12. Teräksen St45.8 (kompound 304L putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus

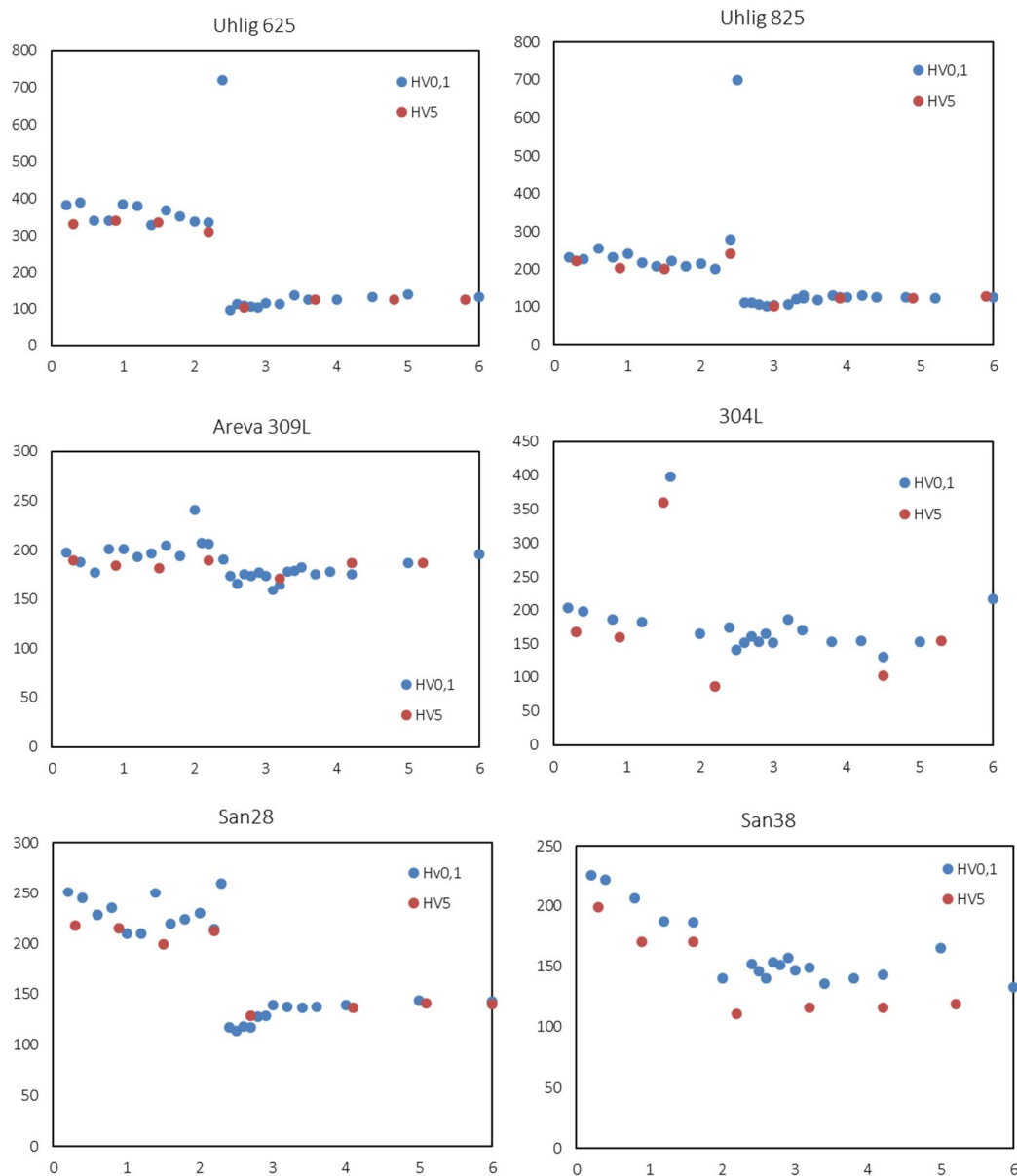


Kuva 13. Teräksen 10CrMo9-10 (San28 kompound putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t-T -riippuvuus



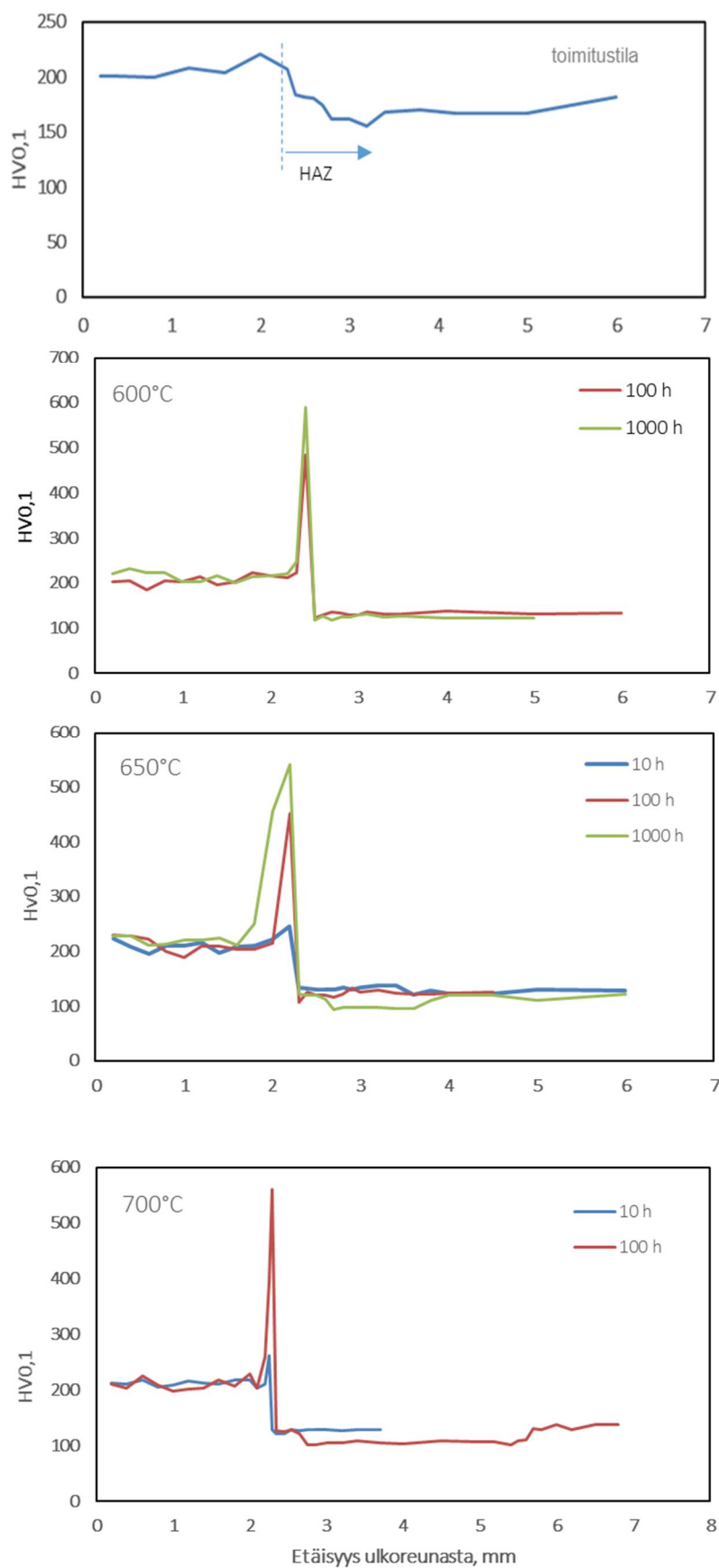
Kuva 14. Teräksen P265GH (San38 kompond putken pohjamateriaali) kovuusmuutosten t - T -riippuvuus



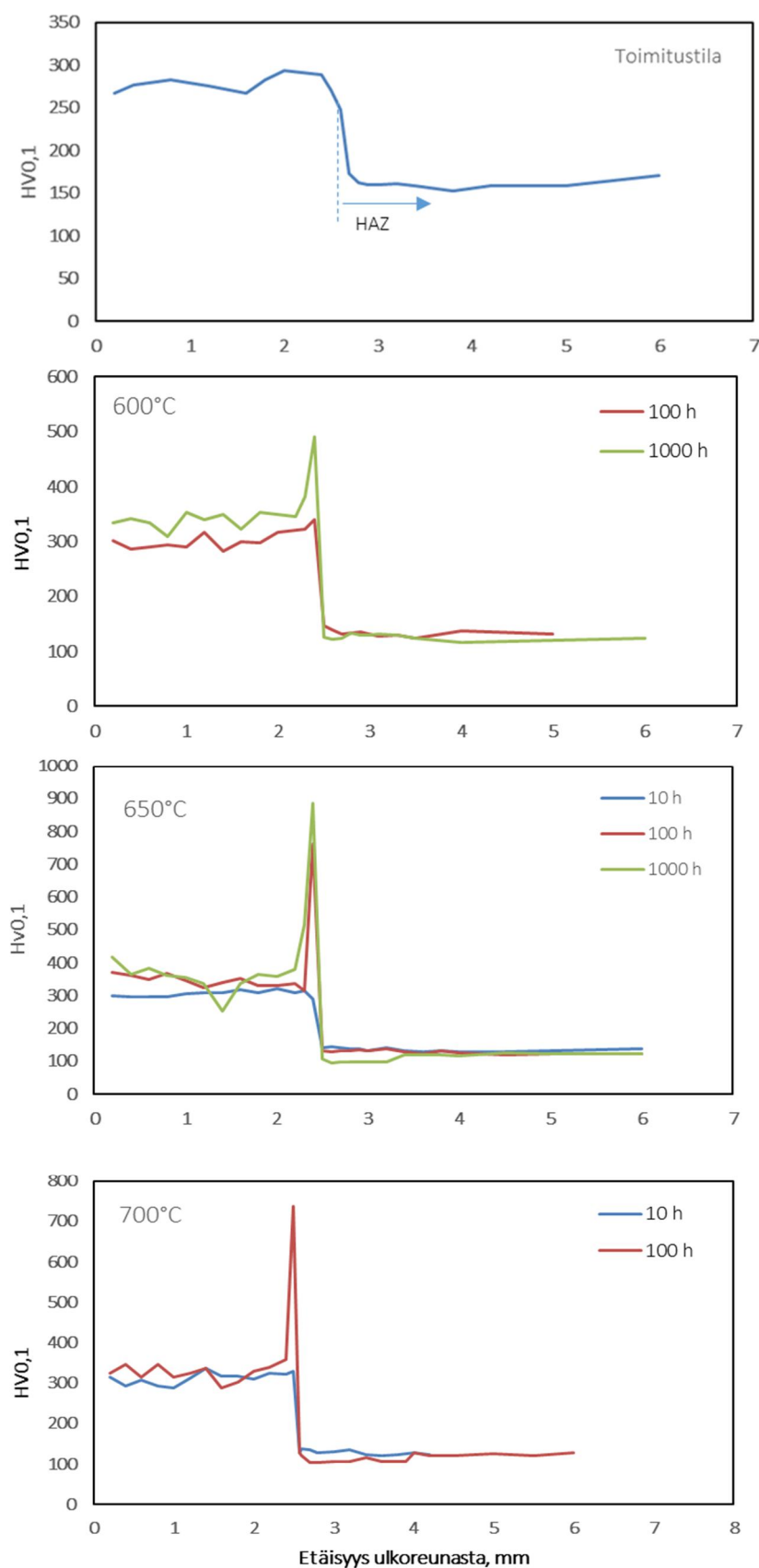


Kuva 15. Kovuustulokset pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli HV0,1 ja HV5 650°C/1000 h hehkutuksen jälkeen

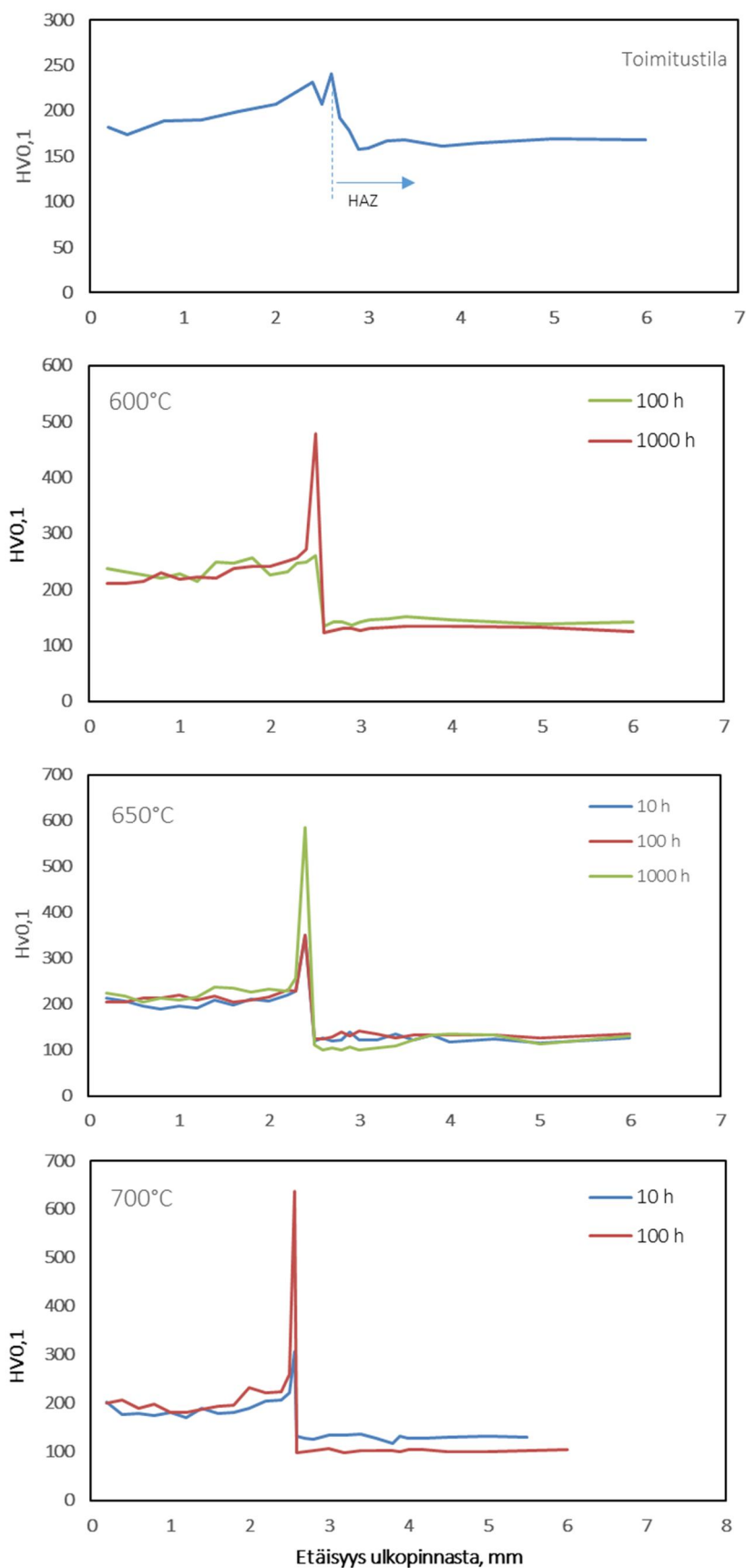
Mikrokovuustulokset pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli on esitetty Kuvissa 16-25. AZZ:n toimittamissa pinnoitteissa HAZ-alueen kovuus pohjamateriaalin puolella ei suuresti eroa pohjamateriaalin keskiarvokovuudesta. Uhligin 625-pinnoite käyttäytyy toimitustilaisena samoin. Uhligin 309L sekä 825 -pinnoitettujen putkien kovuusarvot nousevat HAZ-alueella (Kuvat 19 ja 21). Saman tyyppinen kovuuden nousu on nähtävissä Arevan toimittamassa 309L putkessa (Kuva 22). Ko. alueen kovuus tasoittui hehkutuksen aikana ja korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä muodostui pinnoitteen puolella lähelle rajapintaa, mikä selittyy hiilen diffuusiolla pohjamateriaalista pinnoitteeseen. Arevan 309L pinnoitetussa putkessa HAZ-alueen kovuus lähestyi pinnoitteen ja pohjamateriaalin kovuuksia lämpökäsittelyjen aikana ja rajapinnalle kasvava kovuuspiikki havaitaan vasta pitkällä hehkutusajoilla (Kuva 22). Pääsääntöisesti kuitenkin kaikkiin näytteisiin, niin pinnoitushitsattuihin kuin myös referenssinä olleisiin compound-näytteisiin, muodostuu vanhennushehkutusten aikana pinnoitteen puolelle lähellä rajapintaa kovuuspiikki hiilen diffundoituessa pohjamateriaalista pinnoitteen puolelle. Pidemmällä hehkutusajoilla rajapinnan läheisyyteen pohjamateriaalin puolelle muodostuu hieman matalampien kovuusarvojen vyöhyke hiilen diffuusiosta johtuen (esim Kuvat 19, 20 ja 21). Tämä alue näkyy mikrorakennekuvissa rakeenkasvualueena, Kuva 25.



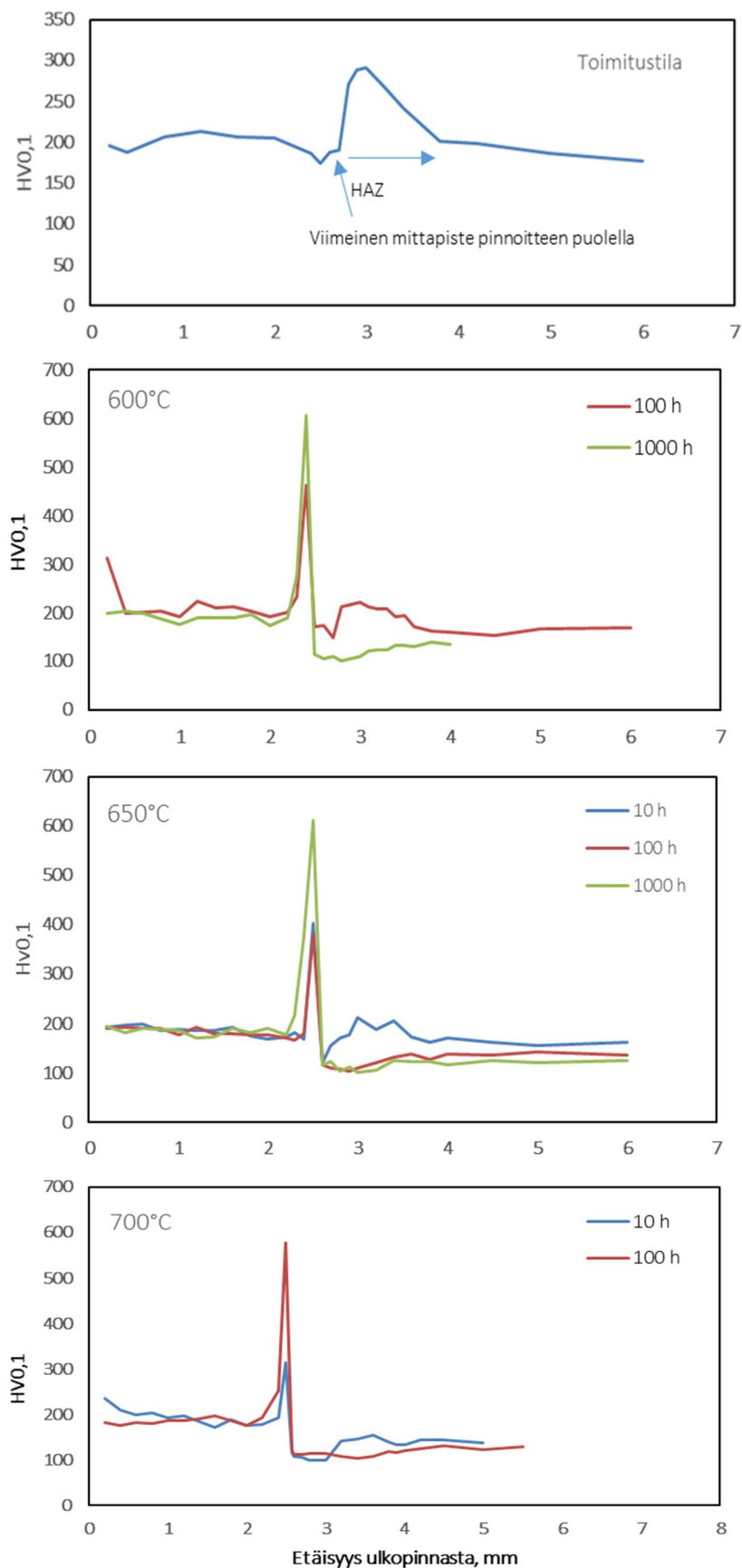
Kuva 16. Pinnoitteen 309L-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



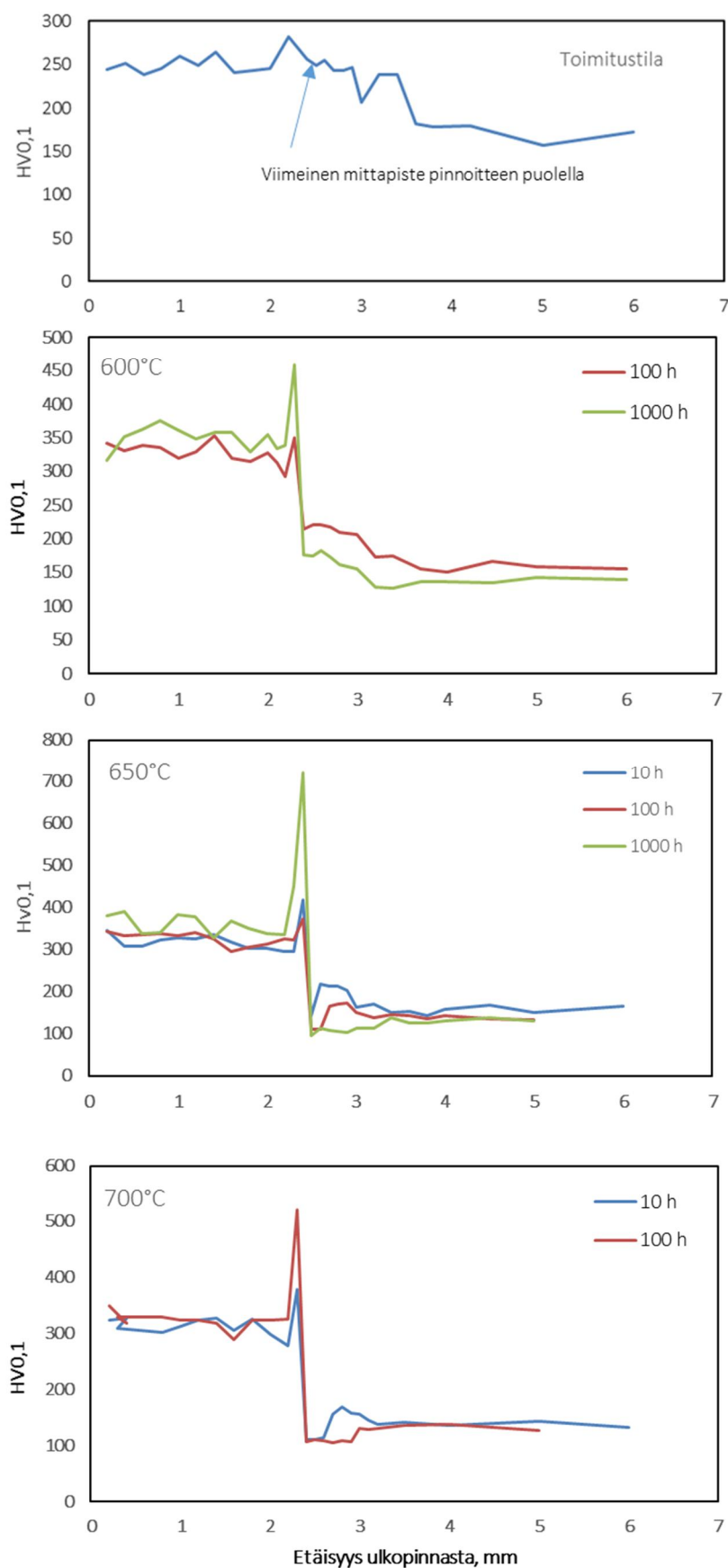
Kuva 17. Pinnoitteen 625-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



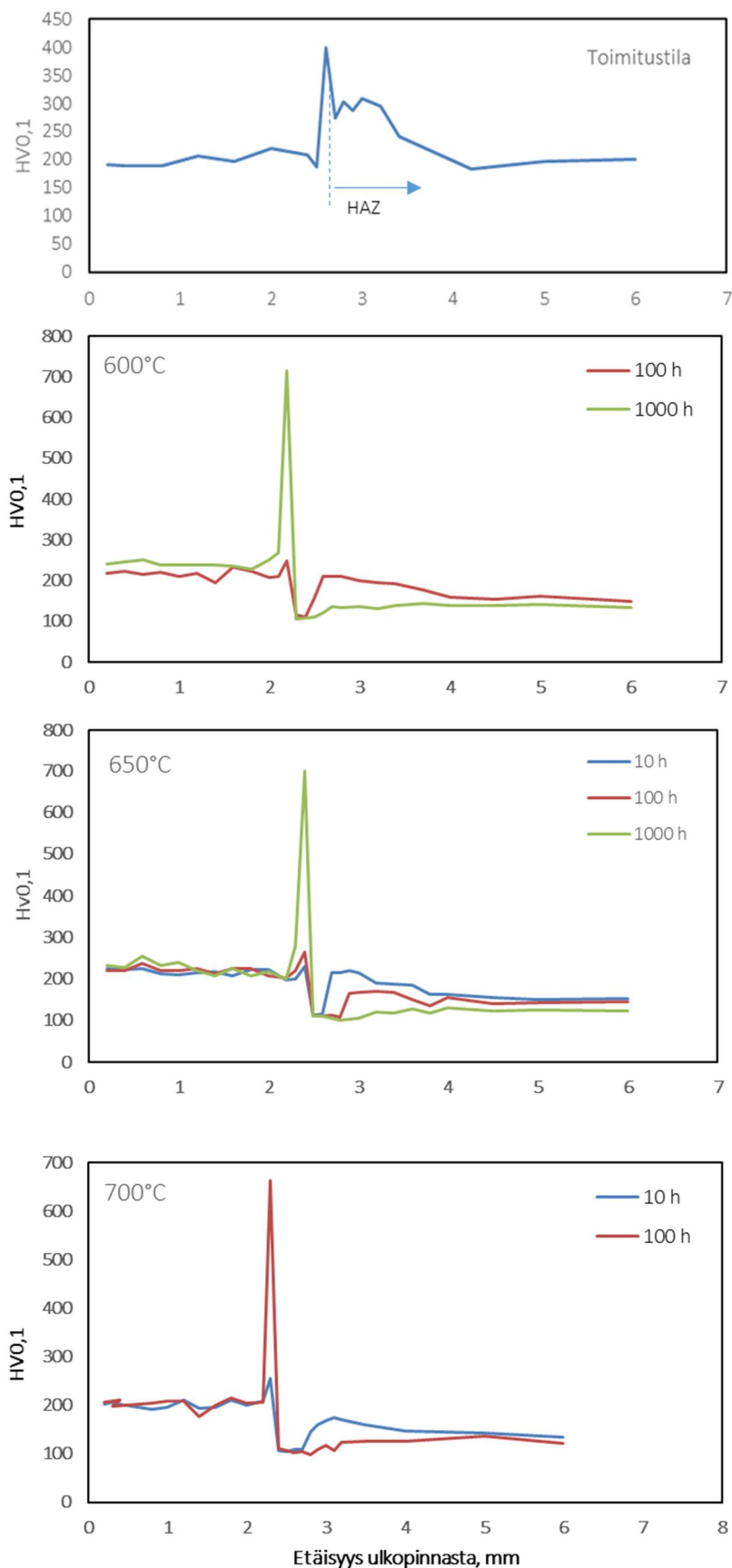
Kuva 18. Pinnoitteen 825-P235GH (AZZ) kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



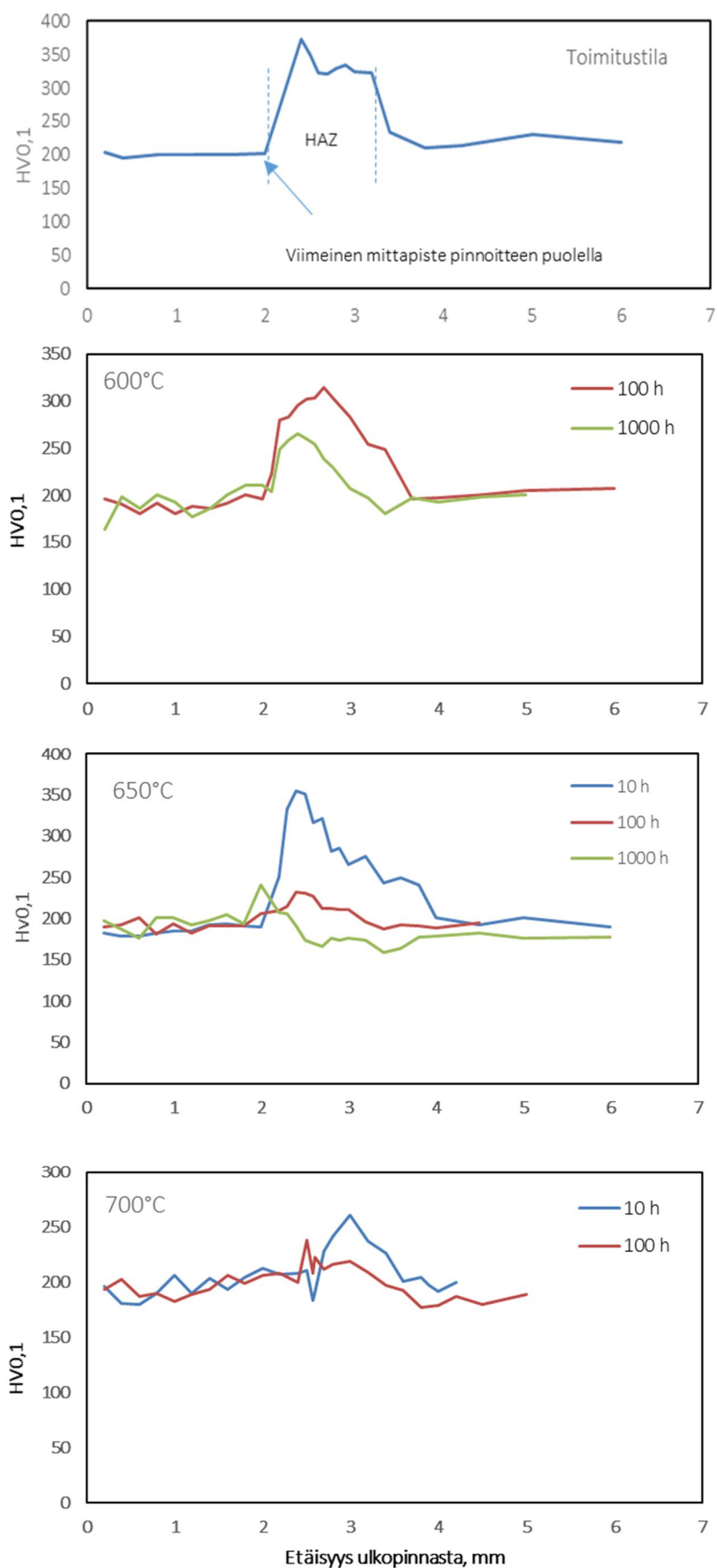
Kuva 19. Pinnoitteen 309L-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli. Hehkutetuissa näytteissä korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



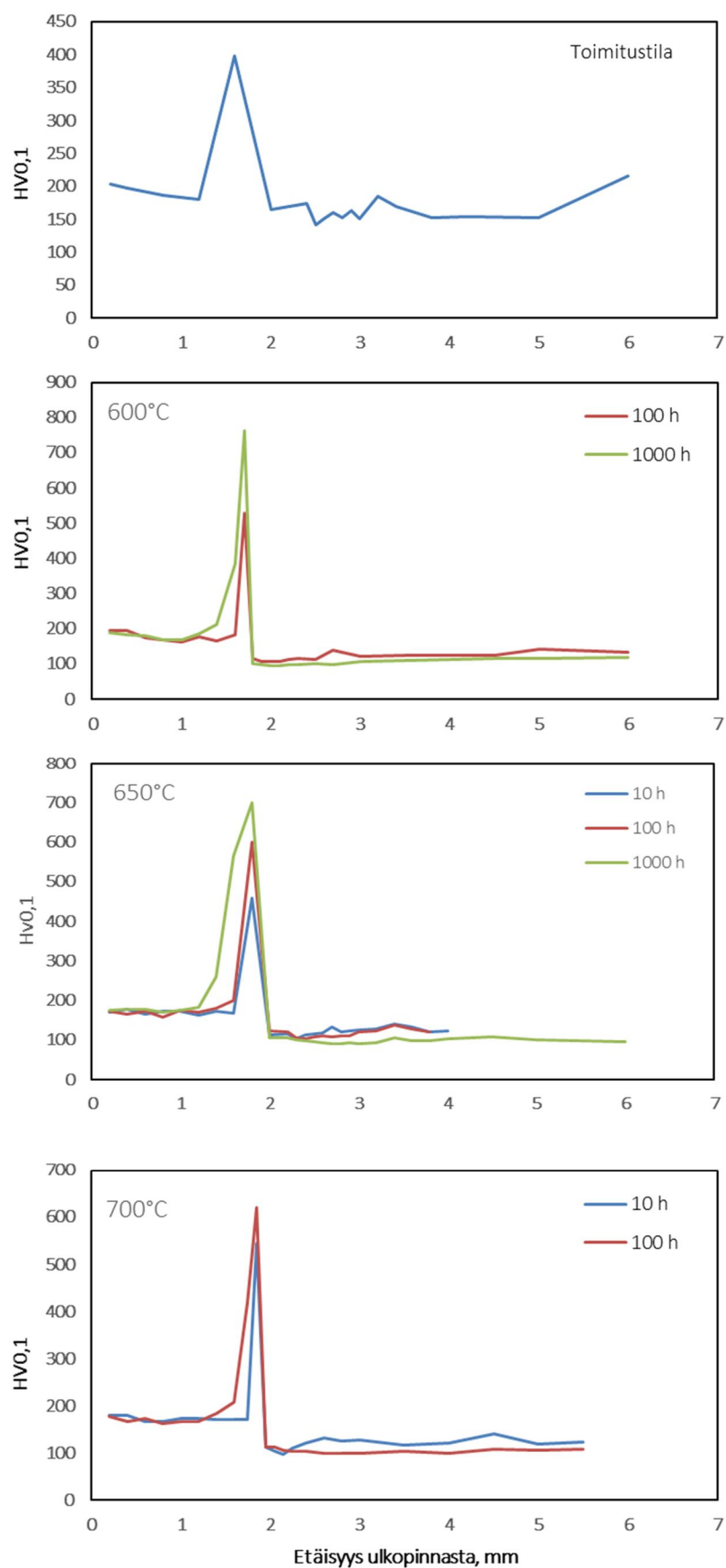
Kuva 20. Pinnoitteen 625-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli. Hehkutetuissa näytteissä korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



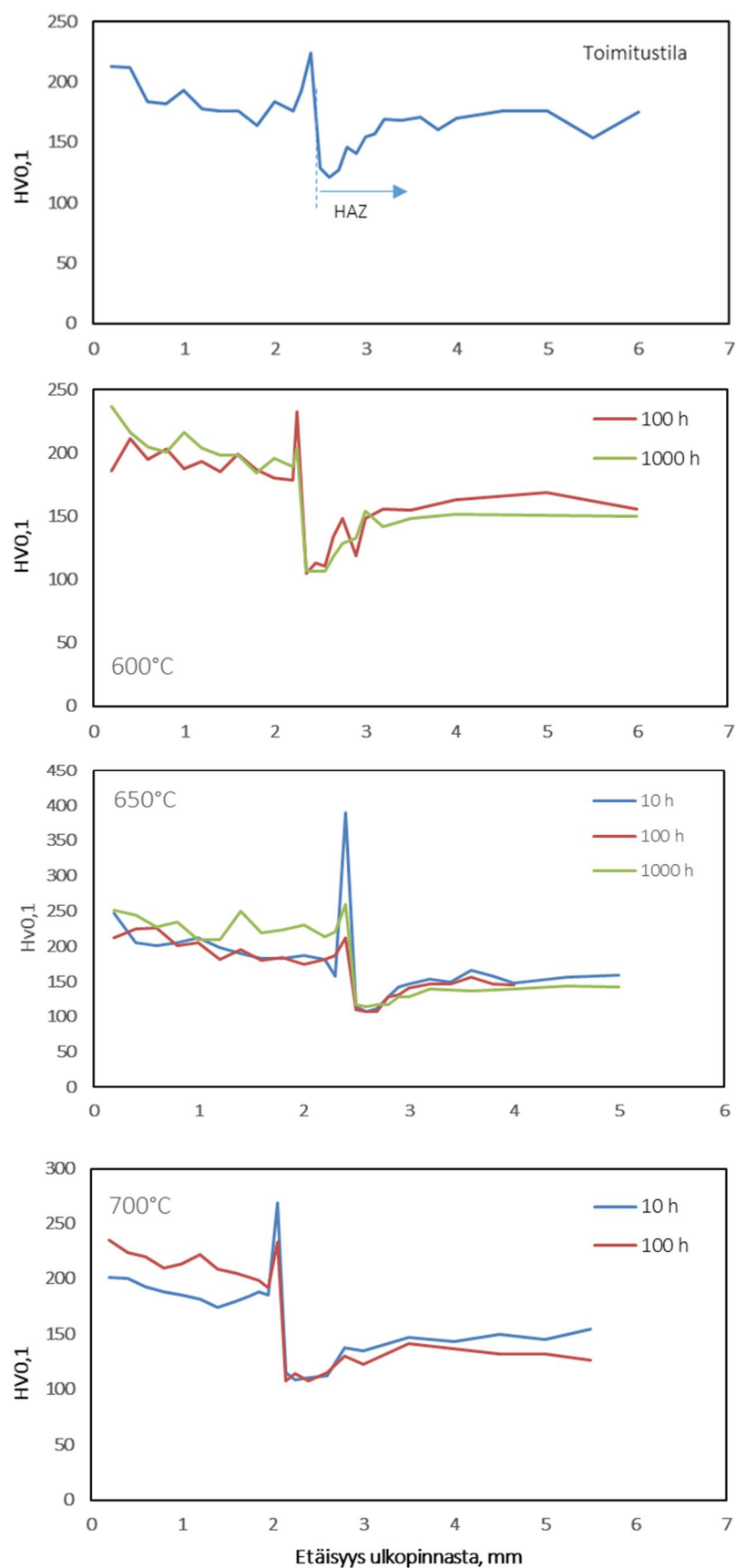
Kuva 21. Pinnoitteen 825-16Mo3 (Uhlig) kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



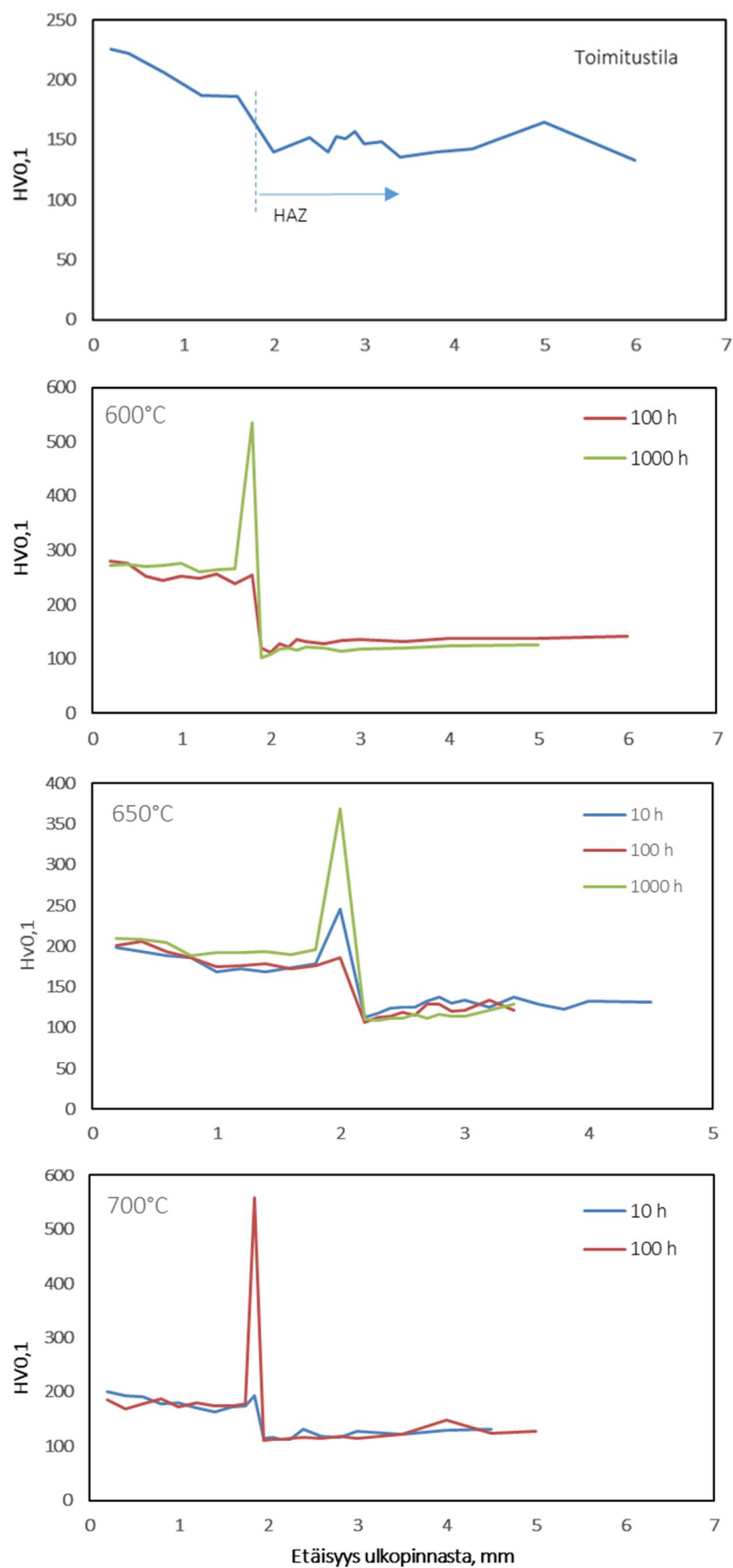
Kuva 22. Pinnoitteen 309L-T24 (Areva) kovuusmuutos rajapinnan yli



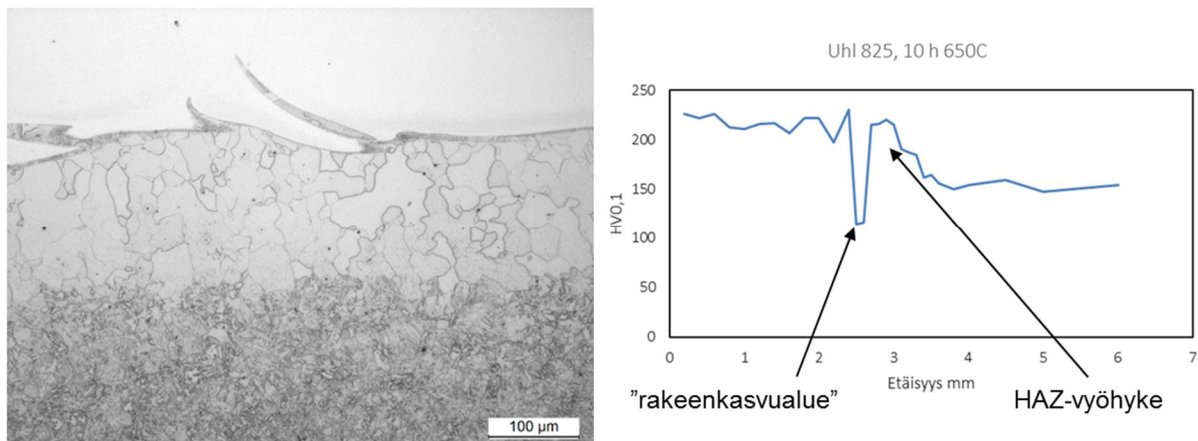
Kuva 23. 304L compound-putken kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



Kuva 24. Sanicro 28 compound-putken kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.



Kuva 25. Sanicro 38 compound-46putken kovuusmuutos rajapinnan yli. Korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä viimeinen mittapiste pinnoitteen puolella.

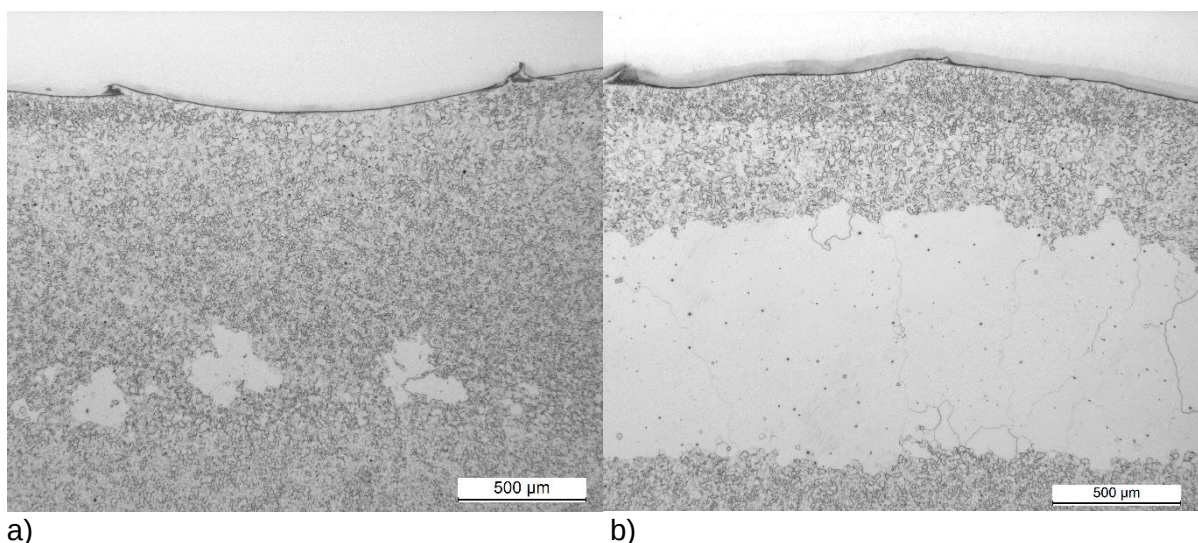


Kuva 26. 825-pinnoitteen mikrorakenne ja kovuuskäyrä rajapinnan läheisyydestä 10 h vanhennuksen jälkeen 650°C

3.3 Hiilenkato rajapinnan yli ja pinnoitteen hiilettyminen rajapinnalla

Vanhennushehkutettujen näytteiden poikkileikkauksista valomikroskoopilla mitatut hiilenkatosyvyyydet on esitetty Taulukossa 4 ja pinnoitteen hiiletymissyvyys Taulukossa 5. Liitteessä 4 on esitetty hehkutettujen näytteiden rajapintojen poikkileikkaukset. Hehkusajan pidentyessä ja/tai lämpötilan noustessa HAZ-alueen reuna-alueella alkaa tapahtua rakeenkasvua pohjamateriaalilla P235GH, Kuva 27. Rakeiden kasvuun on kohti rajapintaa. Vastaavanlaista havaittiin materiaalipareilla St45.8/304L ja 16Mo3/309L. Suurirakeisella alueella hiilenkatoa oli havaittavissa koko alueella. Näissä tapauksissa hiilenkato oli suurinta näytteissä lähellä rajapintaa tapauksissa, joissa rakeenkasvualue ulottui jo rajapinnalle. Uhligin 16Mo3 pohjamateriaalissa havaittiin kaikilla hitsauspinnoitteilla rajapinnan läheisyydessä rakeiden karkenemista hehkutusten aikana (esim. Kuva 42, Liite 2).

Pinnoitteiden hiilettyminen voidaan todeta rajapinnan läheisyydessä rakeiden sisäisiä karbideja sisältävän alueen paksuuden kasvuna. Lisäksi pinnoiterakenteissa on nähtävissä herkistymistä raerajoilla, joka johtuu osittain myös alkuperäisen rakenteen hiilipitoisuudesta. Tästä syystä rakenteen osittainen herkistyminen on jätetty pois mittauksista ja heikentää hiiletymissyvyyteen perustuvien johtopäätösten tekoa. Taulukon 5 tulokset perustuvat täysin herkistyneen vyöhykkeen, jossa kaikki raerajat voimakkaasti syöpyneet, syvyyteen.



Kuva 27. HAZ-alueen rakeenkasvua (AZZ 309L-P235GH) hehkutuksen aikana, a) 650°C, 100 h, b) 1000 h

*Taulukko 4. Hiilenkatosyvyys pohjamateriaalin rajapinnalla. *HAZiin muodostuva voimakas rakeenkasvua, jossa hiilenkatoa*

Lämpötila [°C]	Aika [t]	Hiilenkatosyvyys [μm]									
		AZZ			Areva	Uhlig			compound		
		309L	625	825		309L	625	825	304L	San28	San38
toim.til.		20	<20	10	-	~10	~10	~10	100-150	50-100	100
600	100	20	10	10	10	50-200	10-40	200	250	100	20-50
	1000	20-50	^a	10-20	20	300	10	300	280	270	50-70
650	10	20-40	<10	10-20	10-20	120*	10	100-150	150	120	50-70
	100	20-50 ^b	20	20-100, ^b	20	400	200	440	200-250	200	60-80
	1000	20-50 ^b	700*	750*	40	500	400-500	750	1200*	260	100-130
700	10	120	50-200	^a	100	550-700	280	350	350	300	100
	100	2800*	1200*	2100*	150	1000*	100-450	100-400	800-1000*	350	300

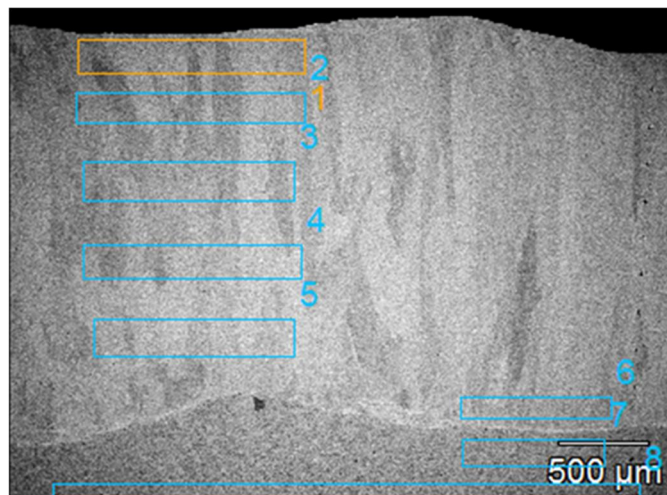
^ahiiliteräs hiillettynyt voimakkaasti rajapinnalta

^brakeen kasvu alkanut HAZ:n alarajalta

Taulukko 5. Pinnoitteen hiiletymissyvyys rajapinnalla hehkutuksen jälkeen

Lämpötila [°C]	Aika [t]	Pinnoitteen hiiletymissyvyys [μm]									
		AZZ			Areva	Uhlig			compound		
		309L	625	825		309L	625	825	304L	San28	San38
toim.til.		10-25	10-20	10-20	10-30	15-20	20-30	10-20	100-150	50-70	60
600	100	70-100	20-25	50-70	20-40	110-130	20	50-70	120-140	50-80	70-100
	1000	180-200	30-50	90-120	25-40	150-170	25	70-100	140-170	60-90	120-150
650	10	30-50	10-20	40-70	20-30	100	15-30	20	200	100	100
	100	70-100	20-25	50-80	20-40	100-120	40-60	25	120-150	50-80	100-120
	1000	150-200	100-150	100-150	15-20	200-250	150-200	100-200	250	130	150
700	10	70-100	20-30	20-40	50-70	90-110	20-30	50-70	200-230	60-90	100-140
	100	180-200	70-90	150-160	50-80	150-170	60-90	70-100	180-250	60-90	120-150

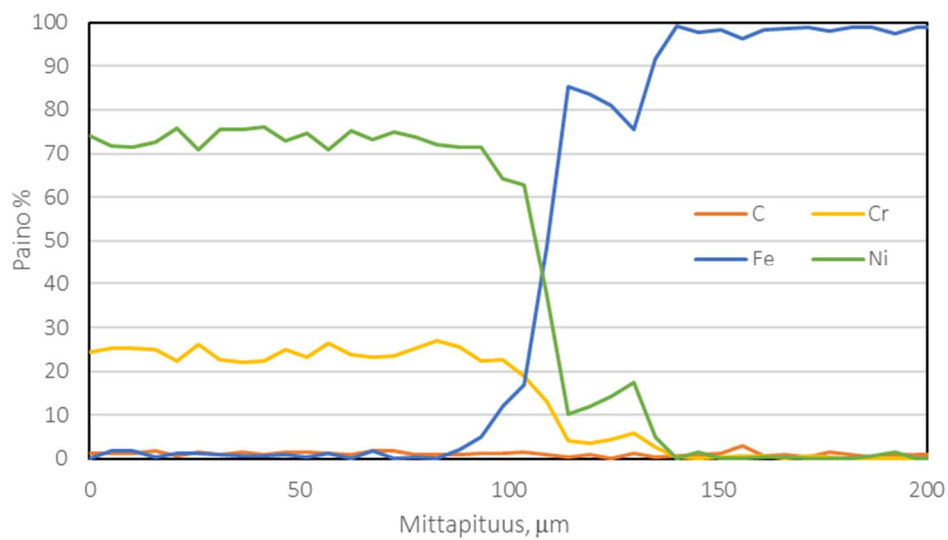
Hitsauspinnoitteiden rakenteissa ei vanhennusten aikana tapahtunut huomattavia muutoksia (Liite 3 ja 4) rajapintaa lukuun ottamatta. Kuvassa 28 on esitetty 309L pinnoitteen rakenne vanhennuksen jälkeen (1000 h/650°C). Suuria koostumusvaihteluita pinnoitteen paksuuden läpi ei ollut havaittavissa. Hiili on EDX-kammiossa epäpuhtautena, joten sen arvo analyyseissä on vain viitteellinen. Compound-putkien pinnoitteiden, 304L, Sanicro 28 ja Sanicro 38, rakenteissa havaittiin hehkutusten aikana karbidien kasvua raerajoille (Liite 3, Kuvat 22-30).



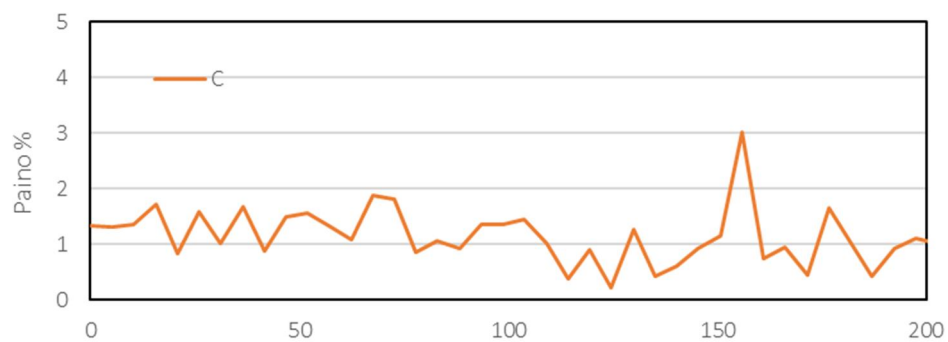
	C	Mg	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0.9		0.0	0.5	0.0	21.4	2.5	62.7	11.6	0.0	0.2
2	0.9		0.1	0.6	0.0	21.5	2.0	63.2	11.4	0.0	0.3
3	0.9		0.1	0.5	0.0	22.0	1.7	62.9	11.4	0.1	0.4
4	1.1	0.1	0.0	0.5	0.1	21.9	2.0	60.8	12.8	0.3	0.3
5	0.8		0.0	0.5	0.0	21.3	2.0	61.1	13.5	0.3	0.3
6	1.1		0.0	0.5	0.1	22.4	1.9	61.5	12.1	0.0	0.3
7	1.4		0.0	0.3	0.2	2.7	0.9	92.9	0.0	0.0	1.6
8	0.9		0.0	0.2	0.3	2.8	0.8	93.2	0.0	0.1	1.6

Kuva 28. 309L (Areva) hitsauspinnoitteen koostumus vanhennuksen (1000 h/650°C) jälkeen

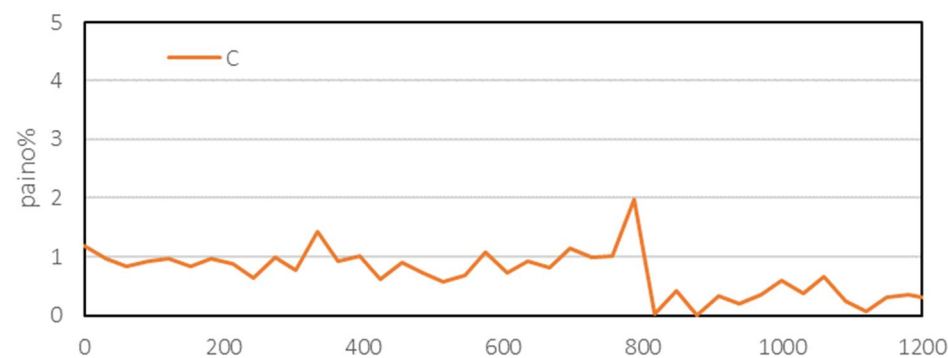
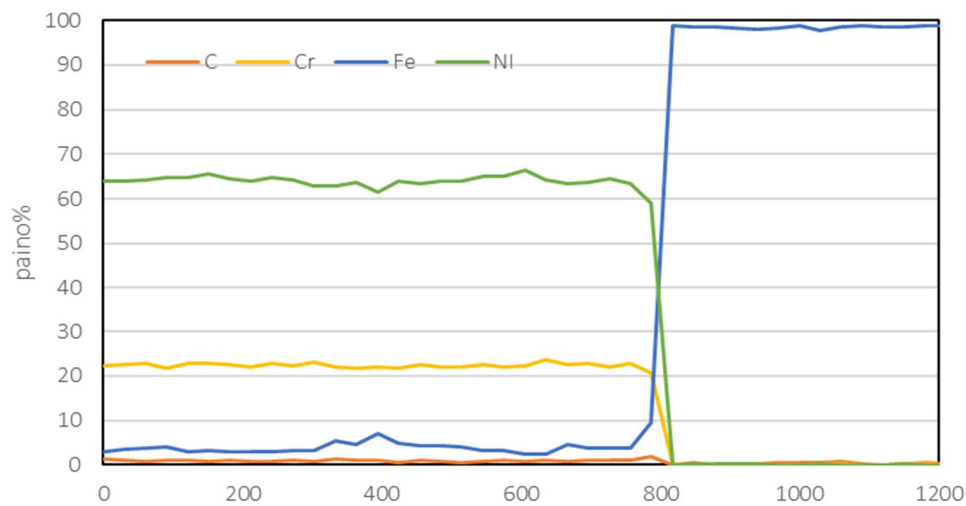
Vaikka EDX-analyysit antavat viitteellisen arvon hiilen pitoisuudelle, EDX-kuvaajista nähdään, että vanhennusten aikana hiili diffundoituu pohjamateriaalin puolelta pinnoitteeseen. Useissa analyyseissa nähtiin hiilen pitoisuudessa piikki lähellä rajapintaa pinnoitteen puolella. Kuvassa 29 on esimerkkinä EDX-analyysit AZZ:n toimittamasta 625-pinnoitteesta toimitustilaisesta sekä 700°C:ssa vanhennetusta näytteestä. Liitteessä 3 on esitetty EDX-analyysit rajapinnan ylitse toimitustilaisina sekä 650 ja 700°C hehkutusten jälkeen.



..



a)



b)

Kuva 29. AZZ625 hitsauspinnoitteen EDX-kuvaajat rajapinnan yli a) toimitustilainen sekä b) hehkutettu 100 h, 700°C

4. Yhteenveto

Korkeassa lämpötilassa toimivien komponenttien elinikää rajoittaa voimakkaasti käyttölämpötila. Kuitenkin usein korkean lämpötilan komponenttien lämpötilan mittaus on vaikeasti järjestettävissä. Tällöin lämpötilan arviointiin voidaan käyttää mikrorakenteessa käytön aikana tapahtuneita muutoksia.

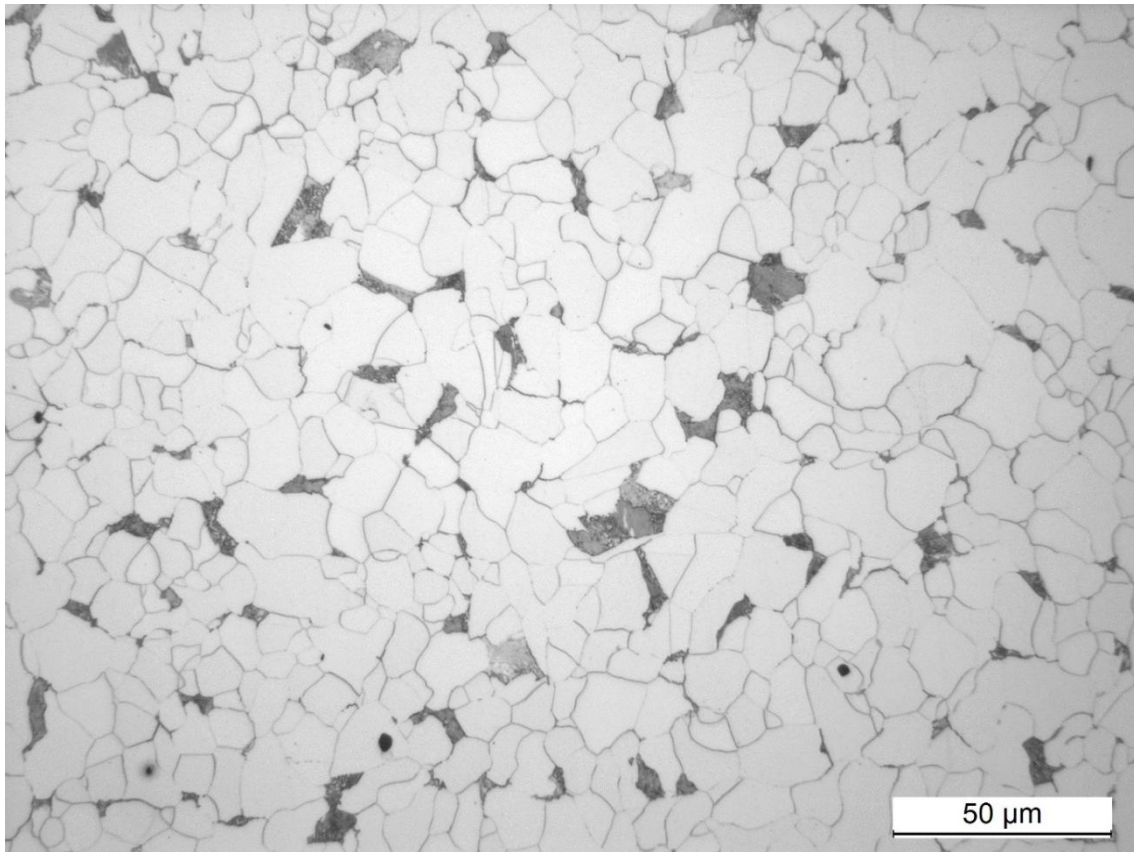
Vanhennuskokeissa tarkasteltiin hitsauspinnoitteita 309L, IN625 ja IN825 kolmelta toimittajalta, AZZ, Uhlig ja Areva. Referenssimateriaaleina hitsauspinnoitetuille putkille koehehkutuksissa toimivat compoundputket 304L, Sanicro 28 ja Sanicro 38. Vanhennushehkutuksia tehtiin lämpötiloissa 600, 650 ja 700°C kymmenestä tunnista tuhanteen tuntiin asti. Vanhennettujen näytepalojen mikrorakenteet tarkasteltiin valo- ja pyyhkäisyelektronimikroskopian avulla. Lisäksi näytteistä mitattiin mikrokovuudet (HV 0,1) pinnoite-pohjamateriaalirajapinnan yli. Pinnoitushitsatuille putkille tehtyjen vanhennushehkutusten tuloksia voidaan hyödyntää arvioitaessa käytössä olleisiin tai ylikuumentuneisiin komponentteihin kohdistuneita lämpökuormituksia.

Vanhennushehkutusten perusteella voidaan todeta, että hiiliteräksisten pohjamateriaalien mikrorakennemuutokset alkavat ferriittisperliittisen rakenteen perliittirakeiden karbidilamellien katkeiluna ja vähittäisenä palloutumisena, jota seuraa pidemmällä ajanjaksolla ja/tai lämpötilan noustessa karbidien karmeneminen. Vastaava muutos oli nähtävissä perliittisbainittisella pohjamateriaalilla 16Mo3. Arevan toimittamien putkien pohjamateriaalissa 7CrMoVTiB10-10 oli jo toimitustilassa havaittavissa voimakasta karbidin muodostumista raerajoille. Samoin 10CrMo9-10:n (San28 compoundin pohjamateriaali) mikrorakenne oli jo lähtötilassa hajaantunutta. Havaitut muutokset 10CrMo ja 7CrMoVTiB materiaaleilla oli lähinnä raerajakarbidien kasvu.

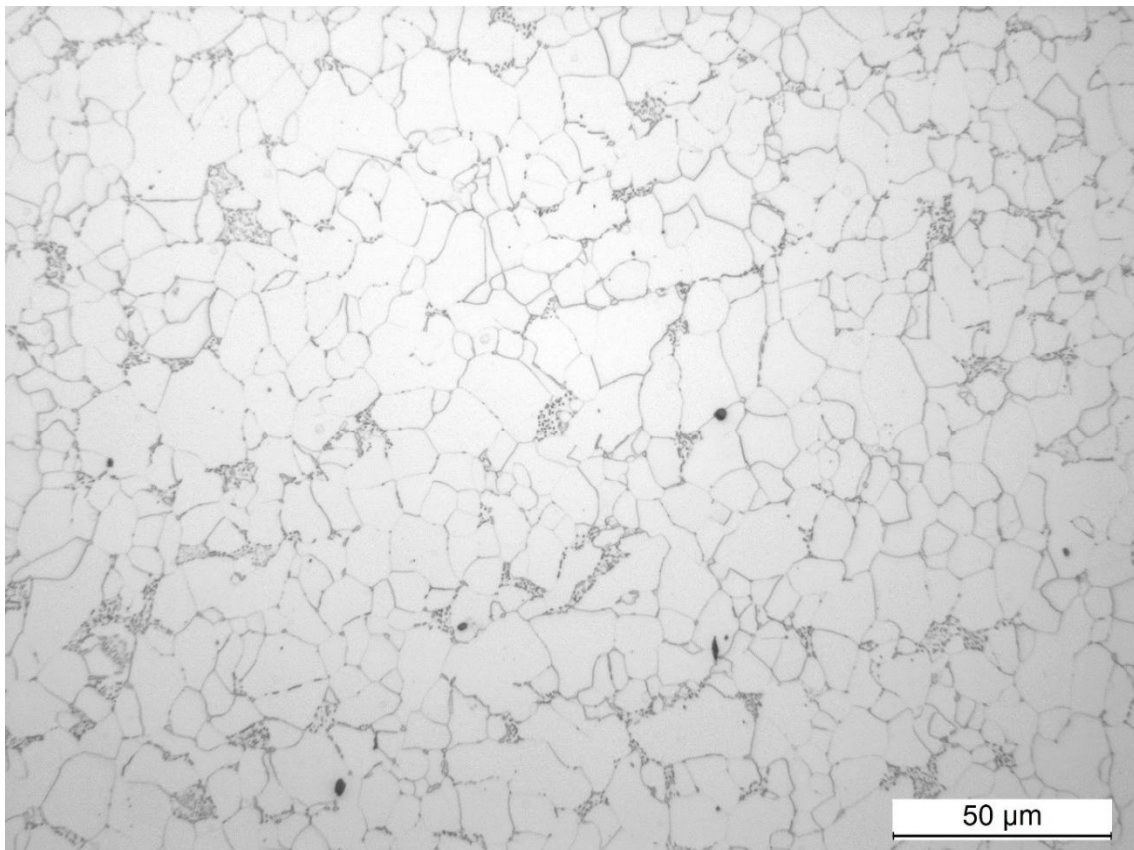
Toimitustilaisten näytteiden HAZ-vyöhykkeellä havaitut kovuusvaihtelut tasoittuivat hehkutuksen aikana ja korkein kovuusarvo hehkutetuissa näytteissä muodostui pinnoitteen puolella lähelle rajapintaa, mikä selittyy hiilen diffuusiolla pohjamateriaalista pinnoitteeseen. Pidemmällä hehkutusajoilla rajapinnan läheisyyteen pohjamateriaalin puolelle muodostuu hieman matalampien kovuusarvojen vyöhyke hiilen diffuusiosta johtuen. Rakeenkasvua oli nähtävissä rajapinnalla perusaineen puolella sekä HAZ-vyöhykkeellä. Rakeenkasvu heikentää pitkällä aikavälillä kuormaa kantavan pohjamateriaalin mekaanista kestävyyttä. Hiilen kulkeutuminen perusaineesta pinnoitteen puolella oli nähtävissä hiilenkatona mikrorakenteissa pohjamateriaalin puolella ja samanaikaisesti pinnoitteen hiilettymisenä rajapinnan pinnoitteen puolella.

Lähdeviitteet

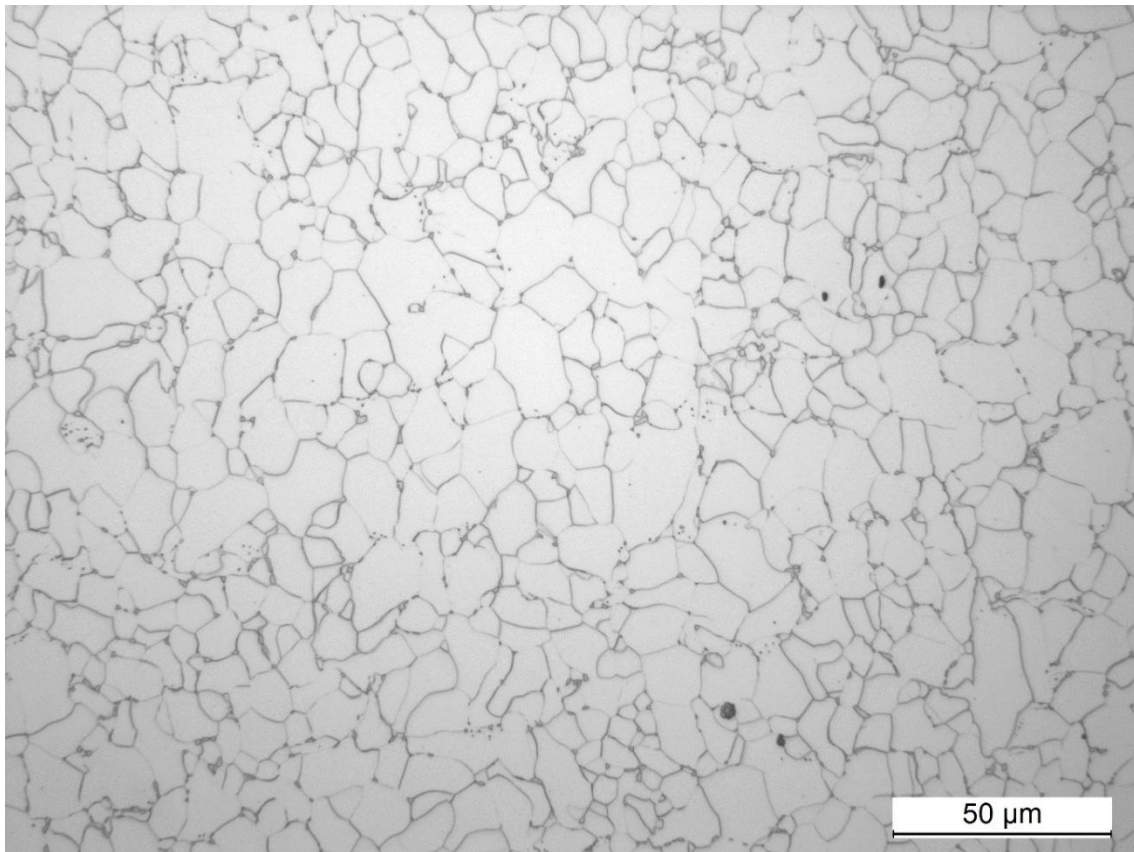
1. Toft, L.H. & Marsden, R.A. The structure and properties of 1% Cr-0.5% Mo steel after service in CEGB power stations. Structural processes in creep. ISI Spec. rep. No. 70, ISI London 1961, 276-294
2. Viswanathan, R. Damage mechanisms and the life assessment of high-temperature components. USA 1989, 183-263
3. Salonen, J. Compound-putken ja 15Mo3 -teräksen mikrorakennemuutokset pitkäaikaisessa hehkutuksessa. VTT Julkaisuja 810 (1995)
4. Salonen, J. Korkealämpötilaterästen mikrorakennemuutokset pitkäaikaisessa hehkutuksessa. VTT Julkaisuja 789 (1994)
5. Metals handbook. Desk Ed. American Society for Metals (1984) USA, s. 28.65-28.66



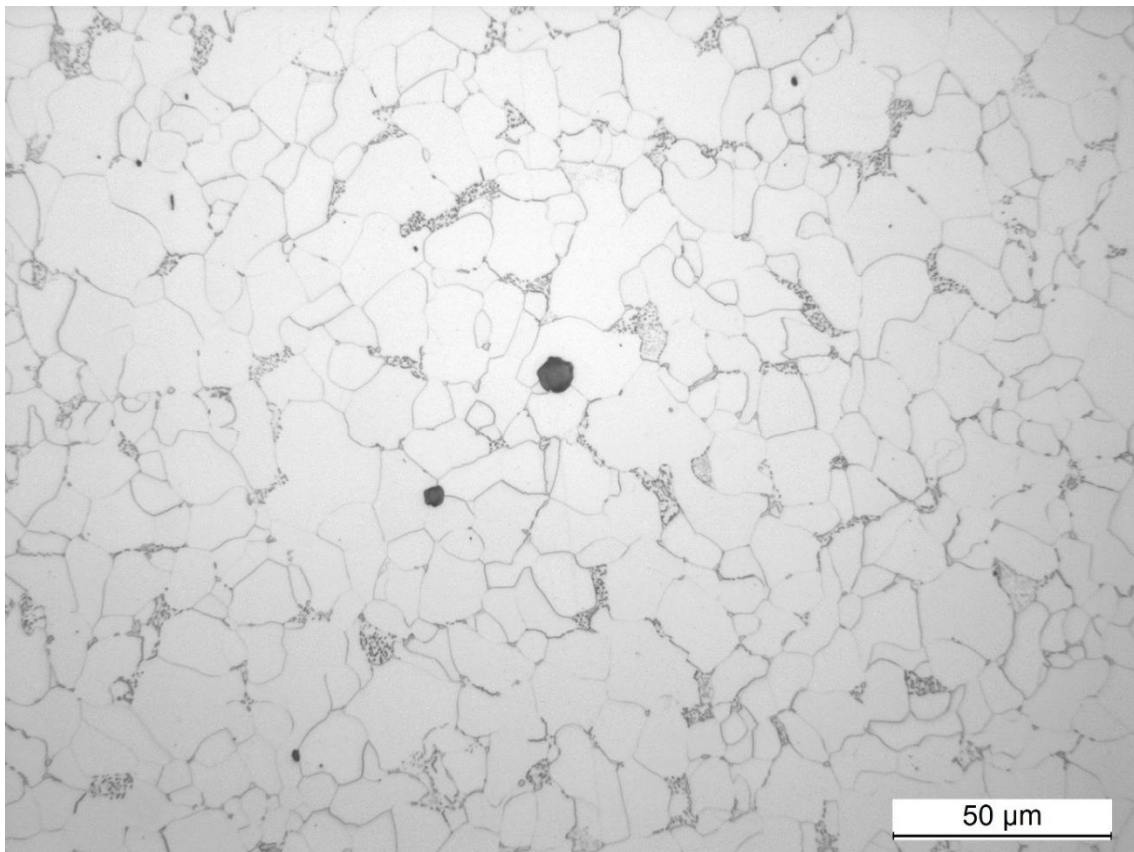
Kuva 1. Teräs P235GH, toimitustila, aste A



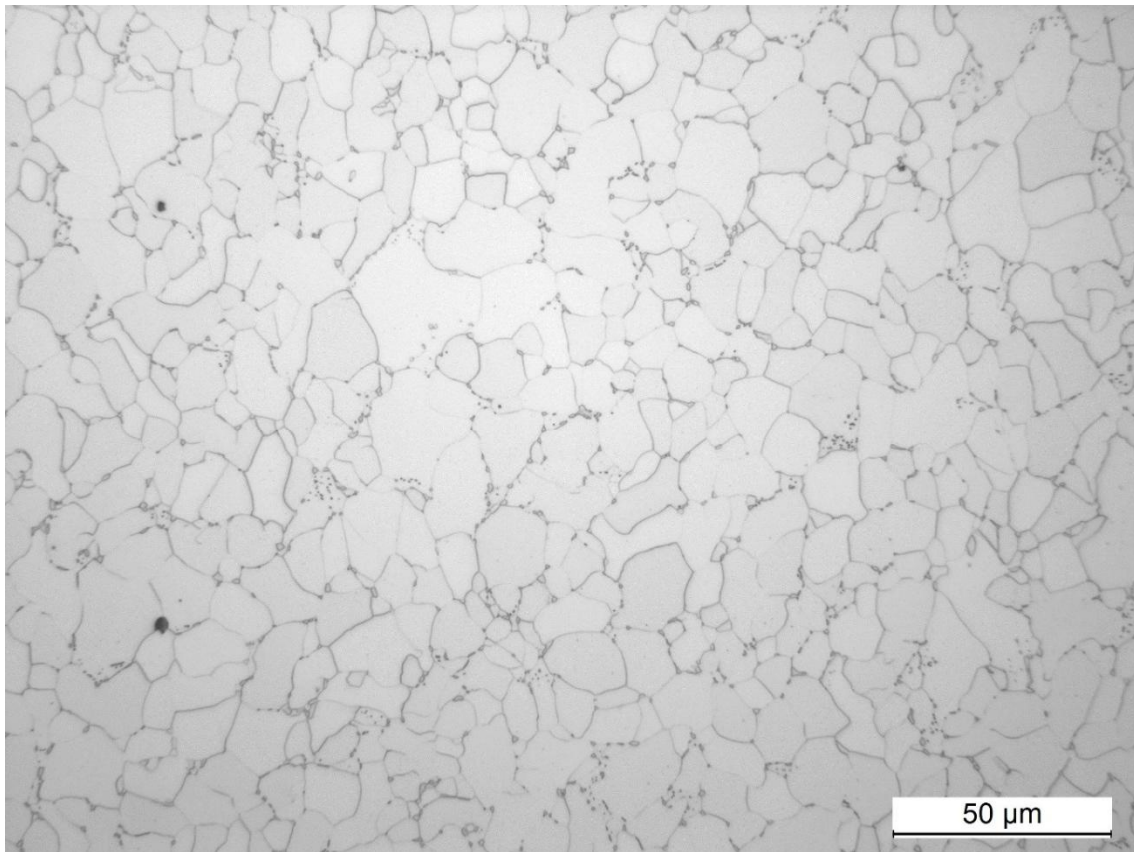
Kuva 2. Teräs P235GH, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D



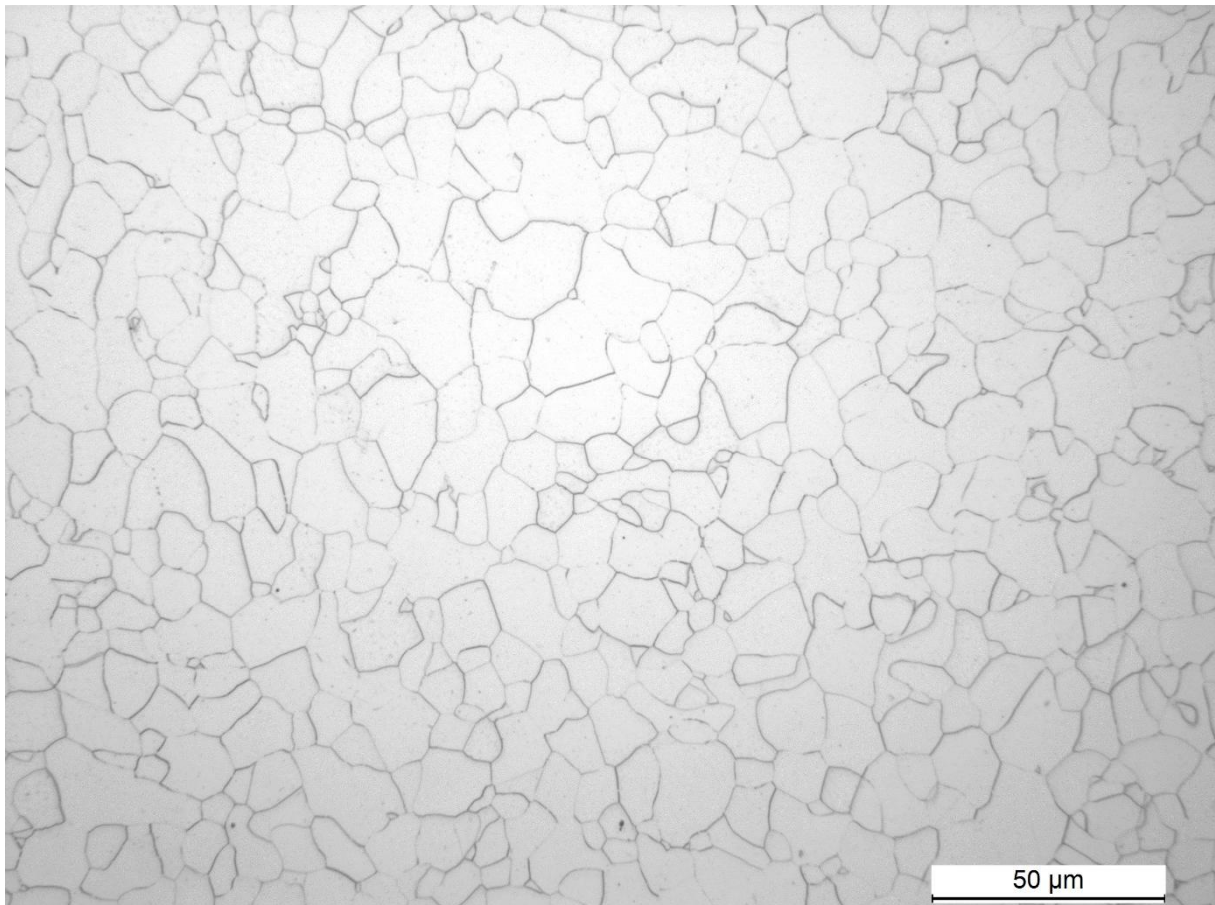
Kuva 3. Teräs P235GH, 600°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste E/F



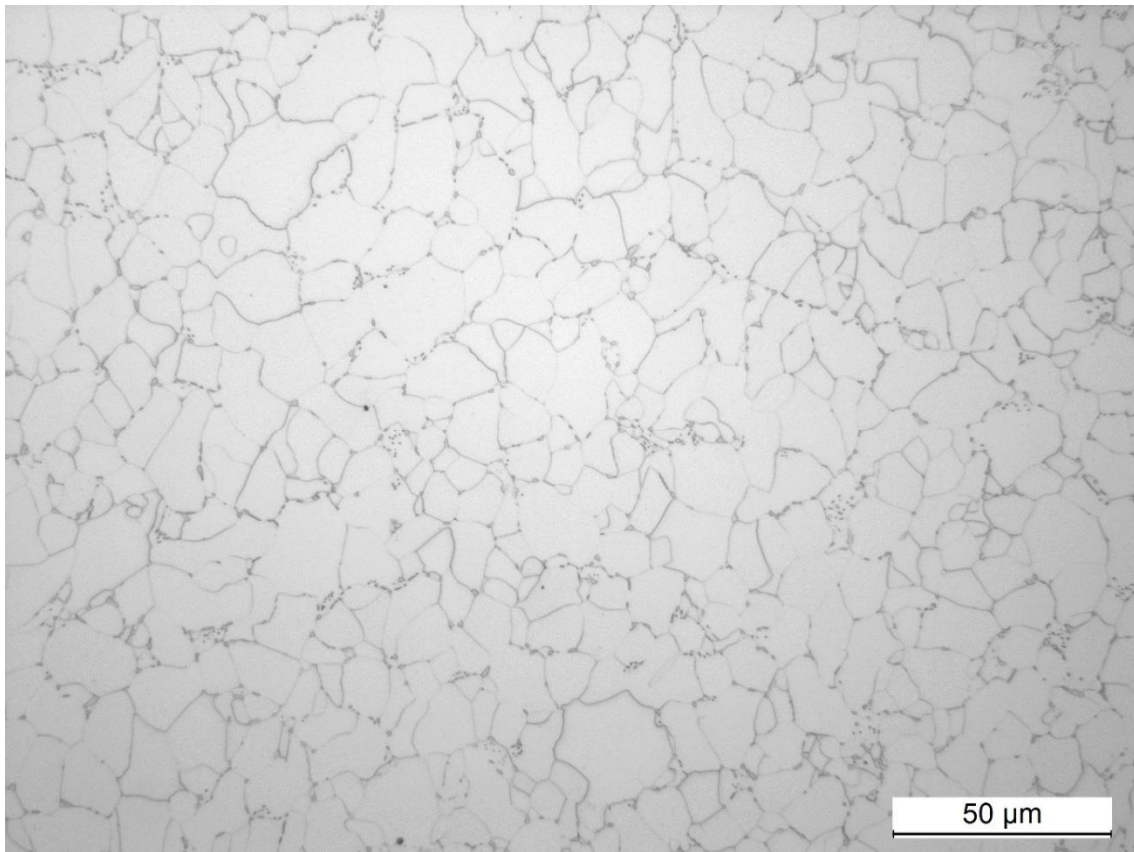
Kuva 4. Teräs P235GH, 650°C, 10 h, , P_{LM} (C=14), aste D



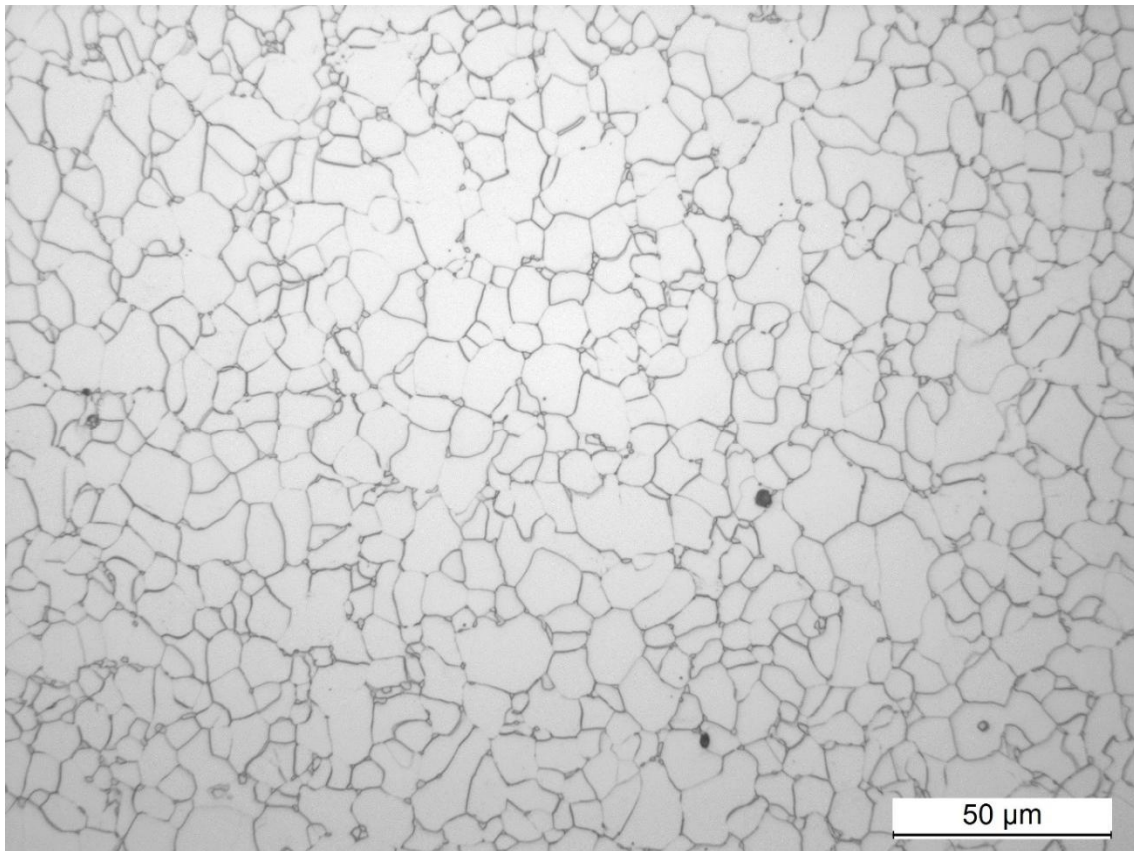
Kuva 5. Teräs P235GH, 650°C, 100 h, , P_{LM} (C=14), aste E



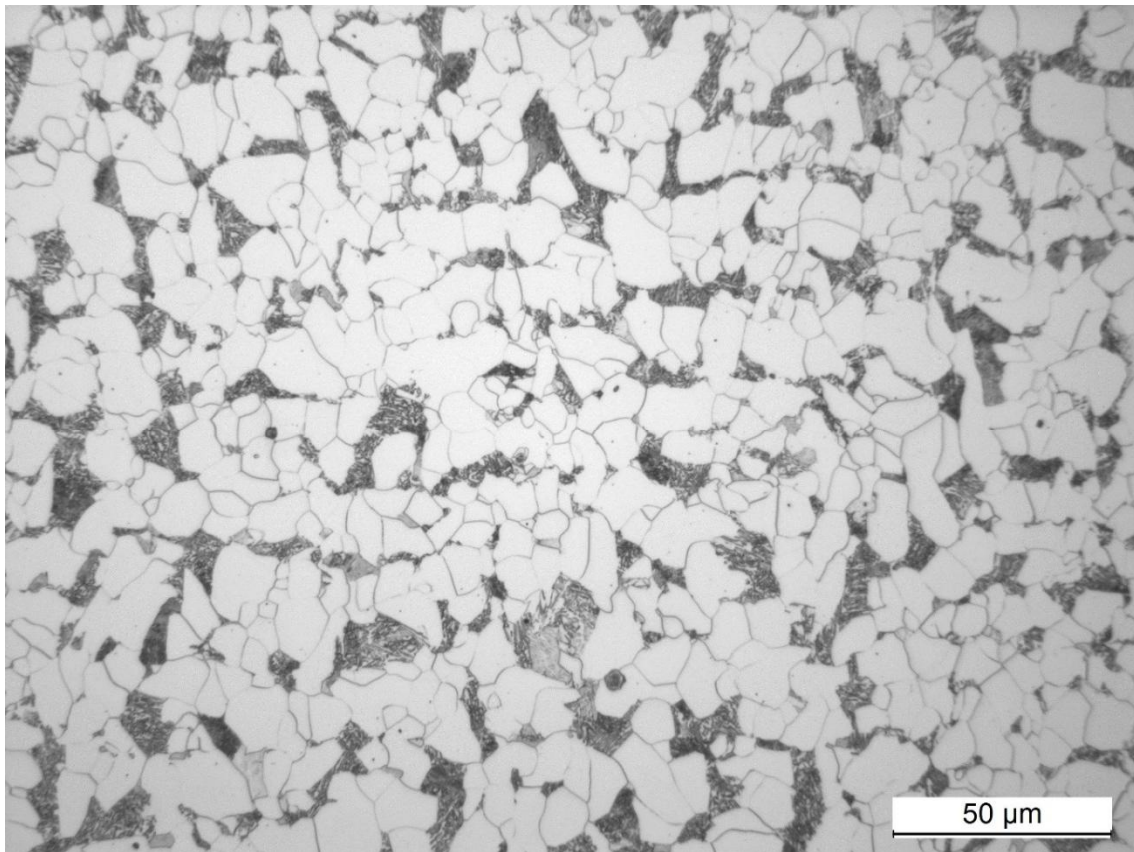
Kuva 6. Teräs P235GH, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste F



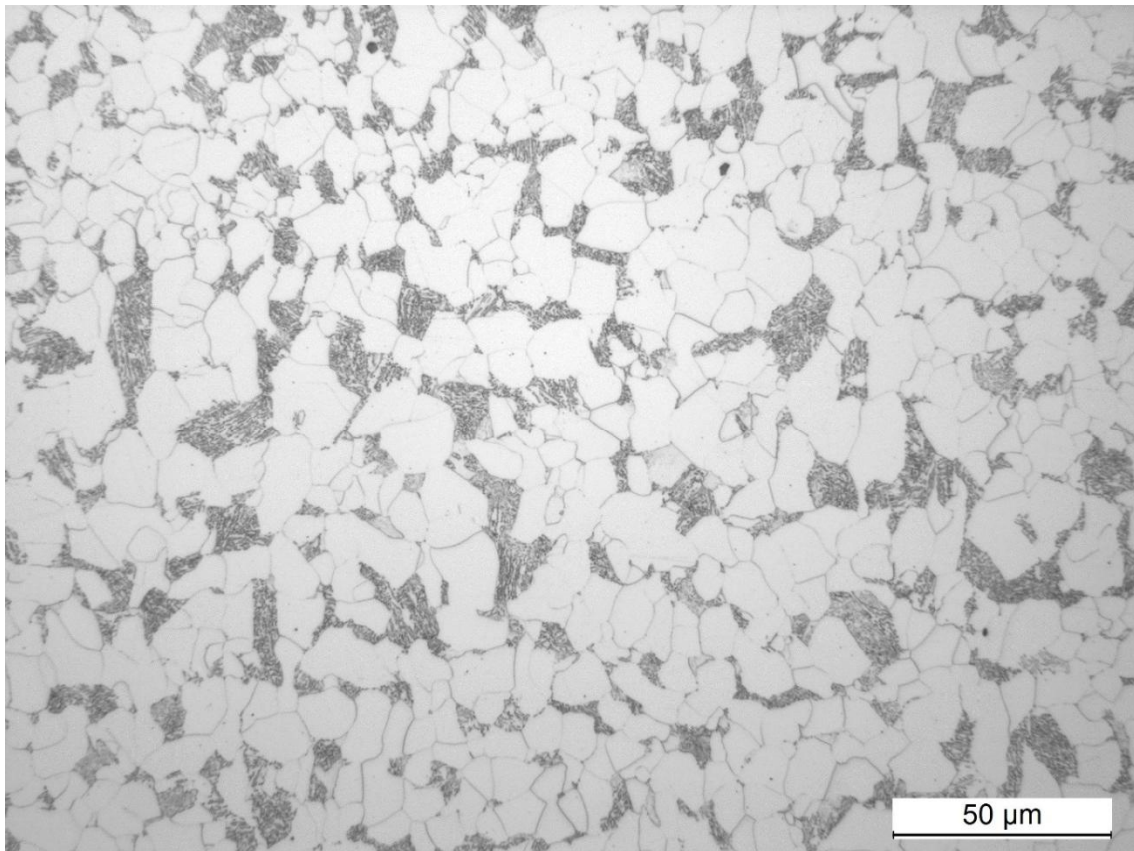
Kuva 7. Teräs P235GH, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste E



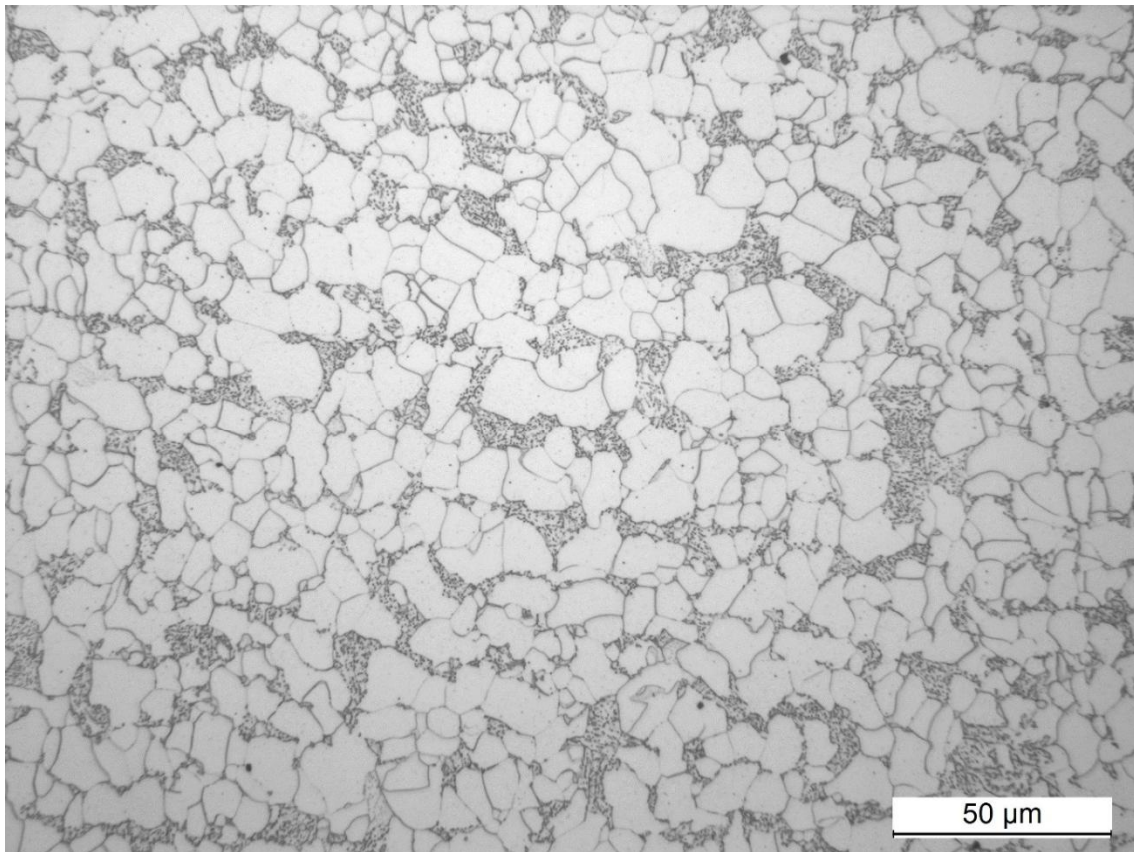
Kuva 8. Teräs P235GH, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste F



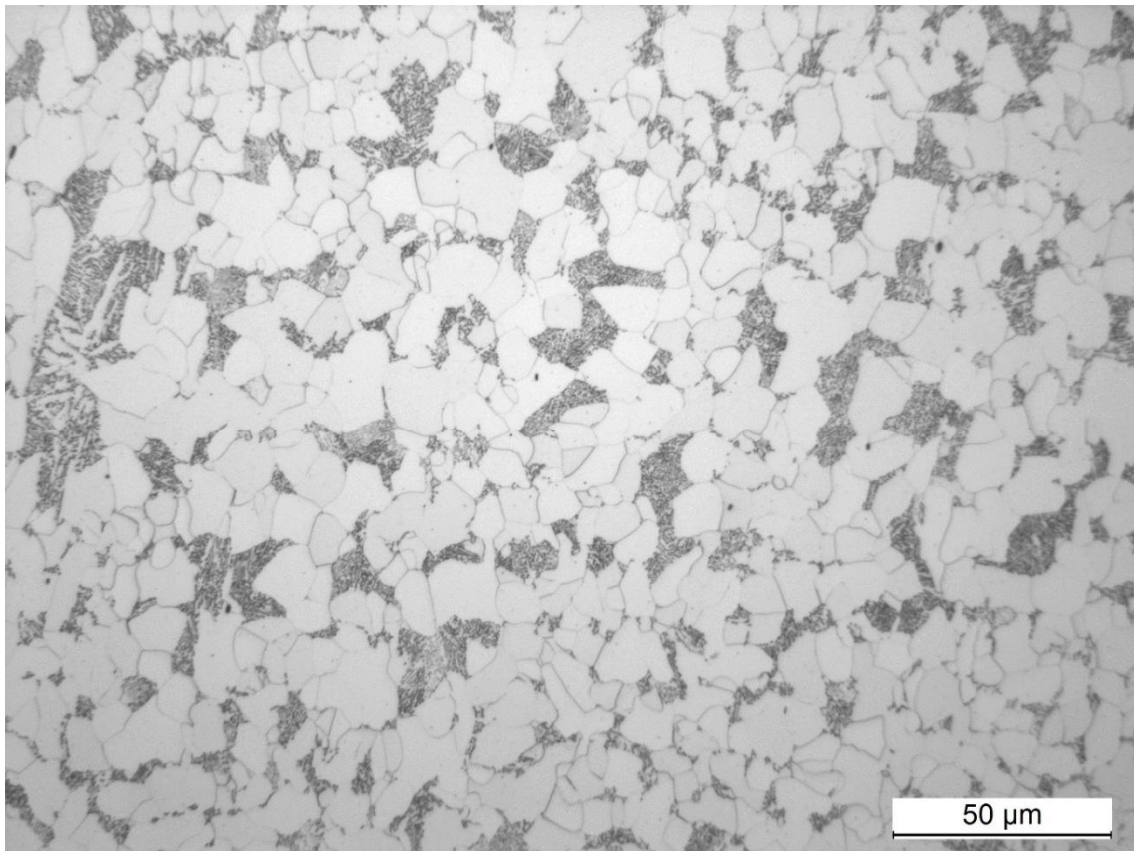
Kuva 9. Teräs 16Mo3, toimitustila, aste A



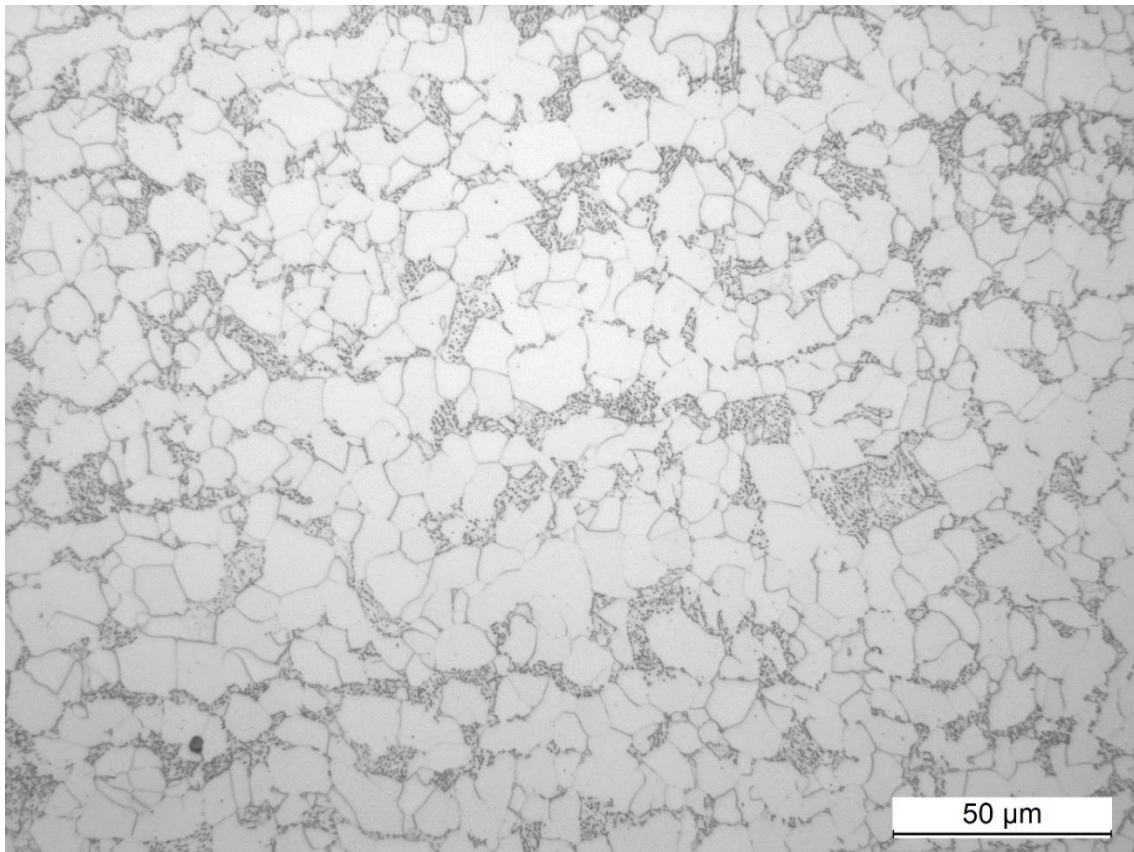
Kuva 10. Teräs 16Mo3, 600°C, 100 h, , $P_{LM} (C=14)$, aste B



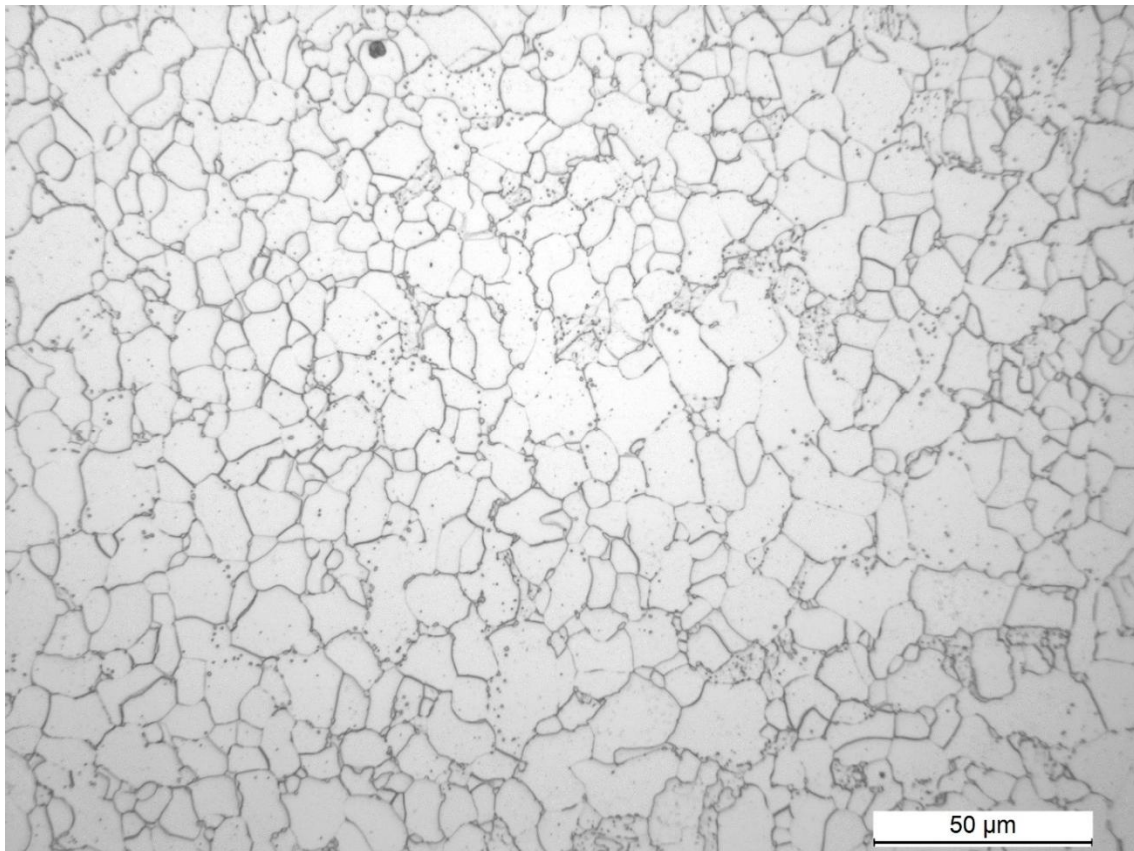
Kuva 11. Teräs 16Mo3, 600°C, 1000 h, , P_{LM} (C=14), aste C/D



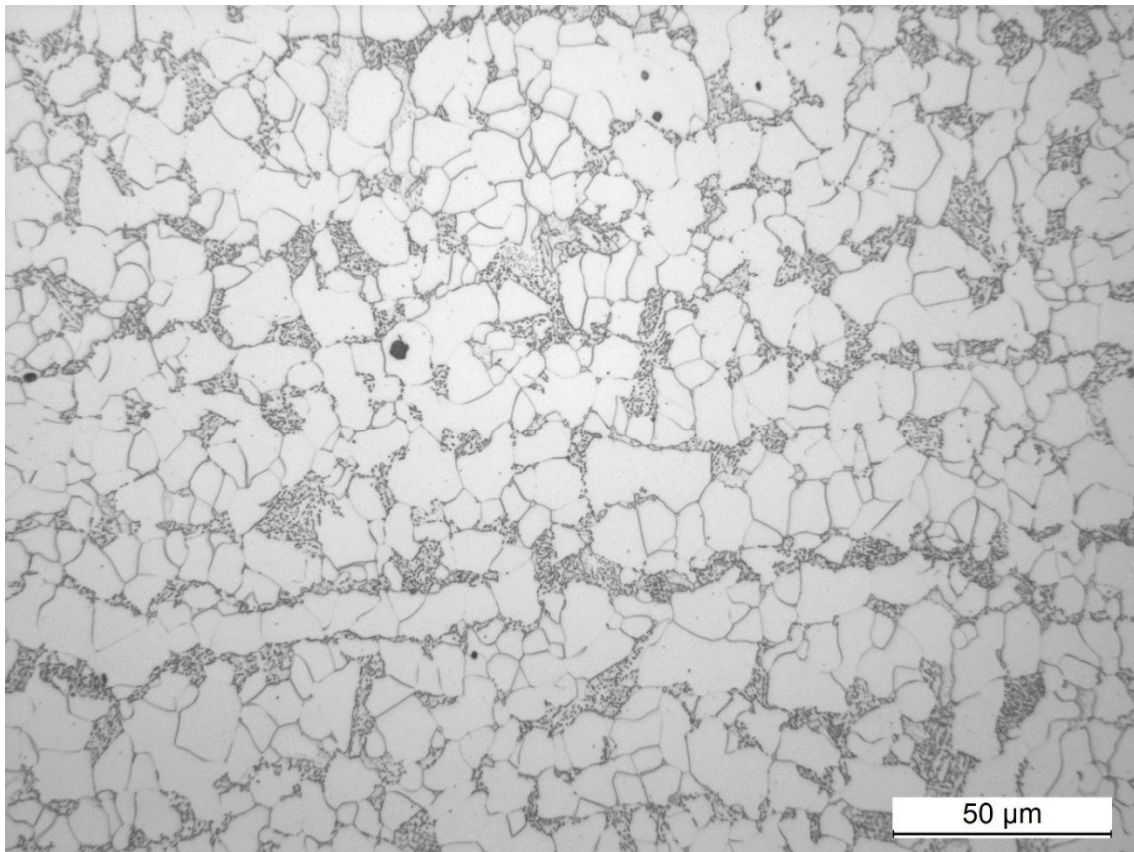
Kuva 12. Teräs 16Mo3, 650°C, 10 h, , P_{LM} (C=14), aste B



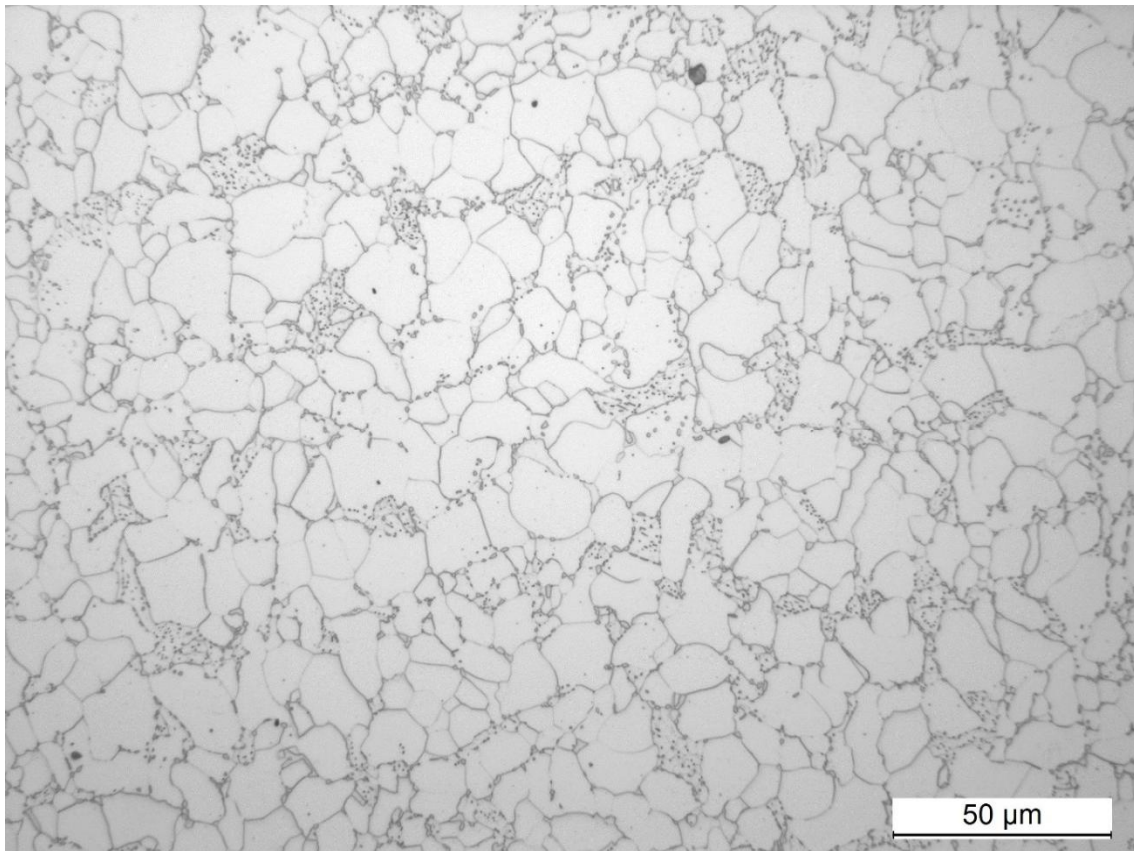
Kuva 13. Teräs 16Mo3, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D



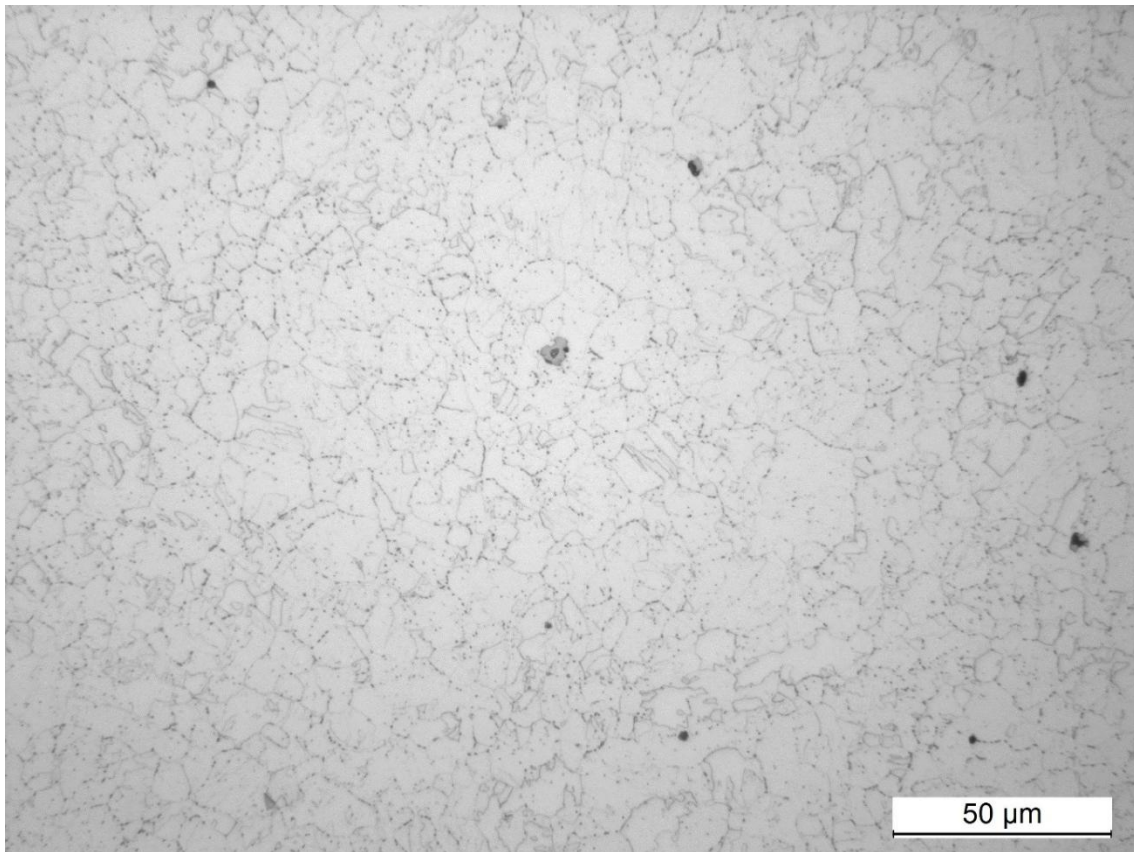
Kuva 14. Teräs 16Mo3, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste D/E



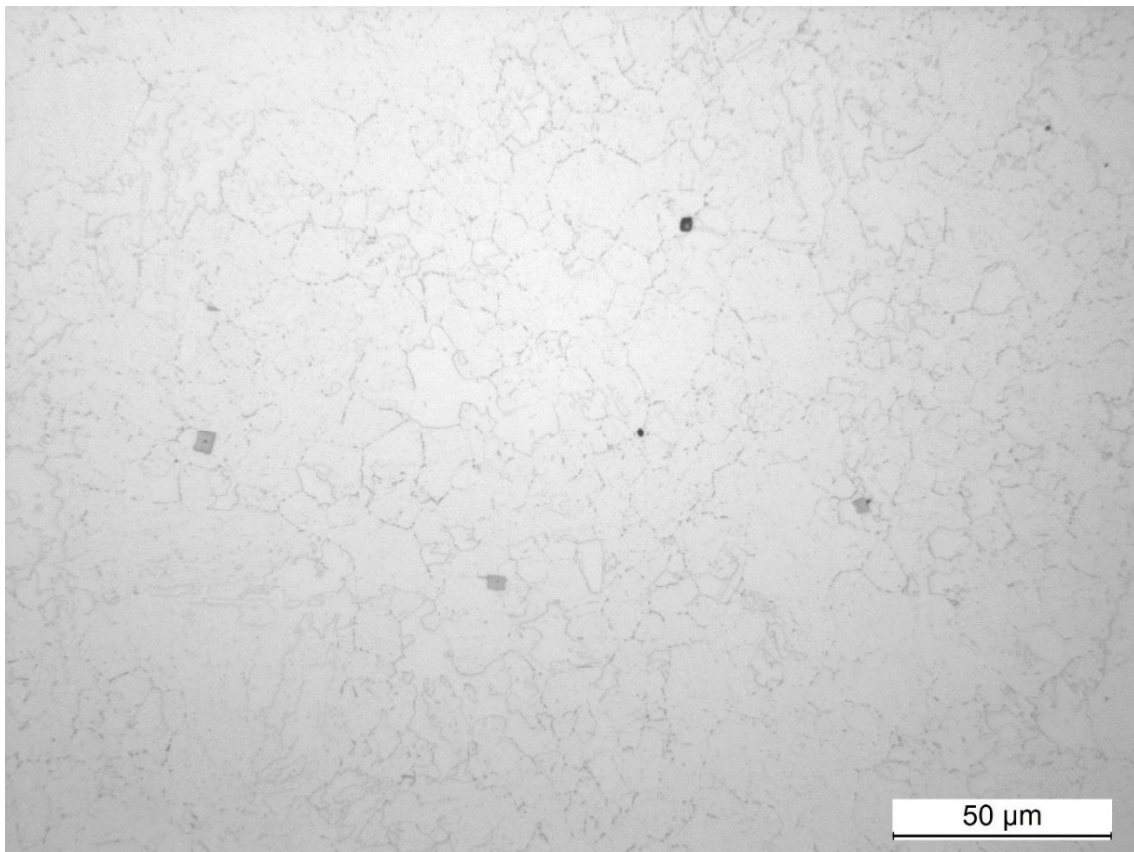
Kuva 15. Teräs 16Mo3, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste D



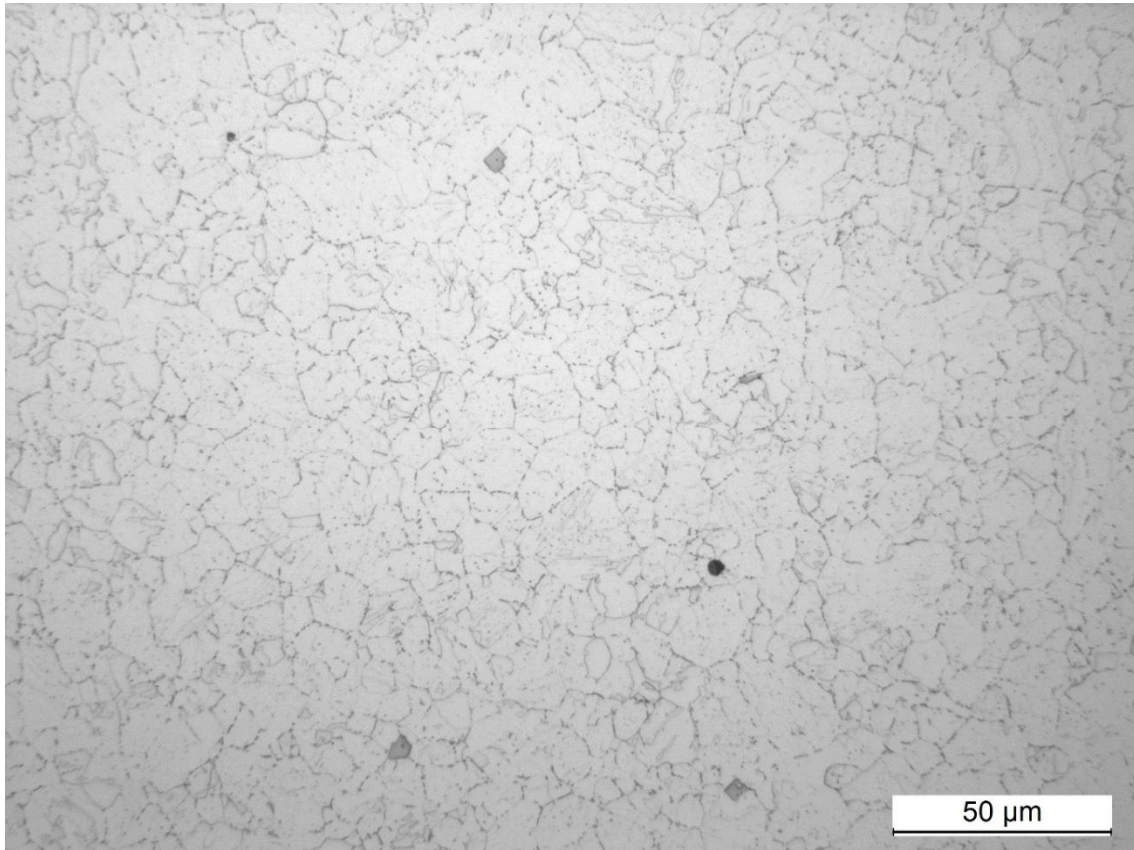
Kuva 16. Teräs 16Mo3, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D/E



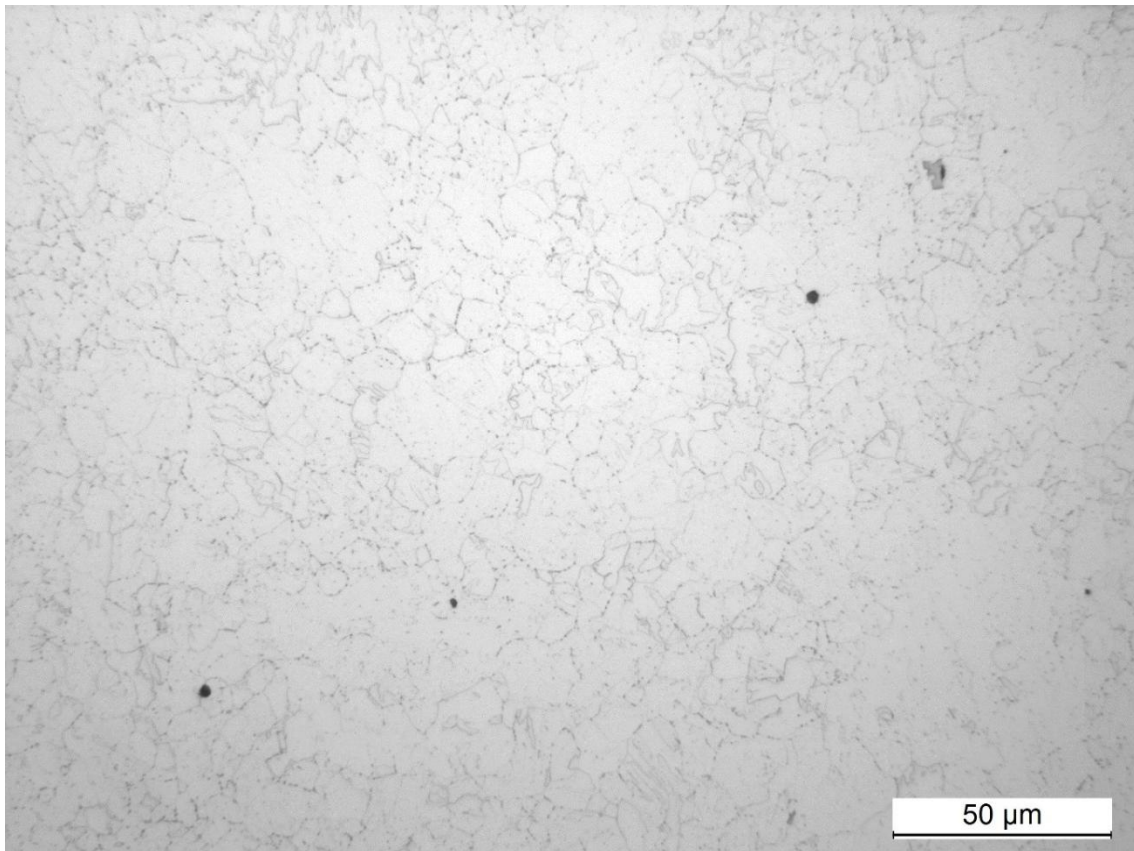
Kuva 17. Teräs 7CrMoVTiB10-10, toimitustila



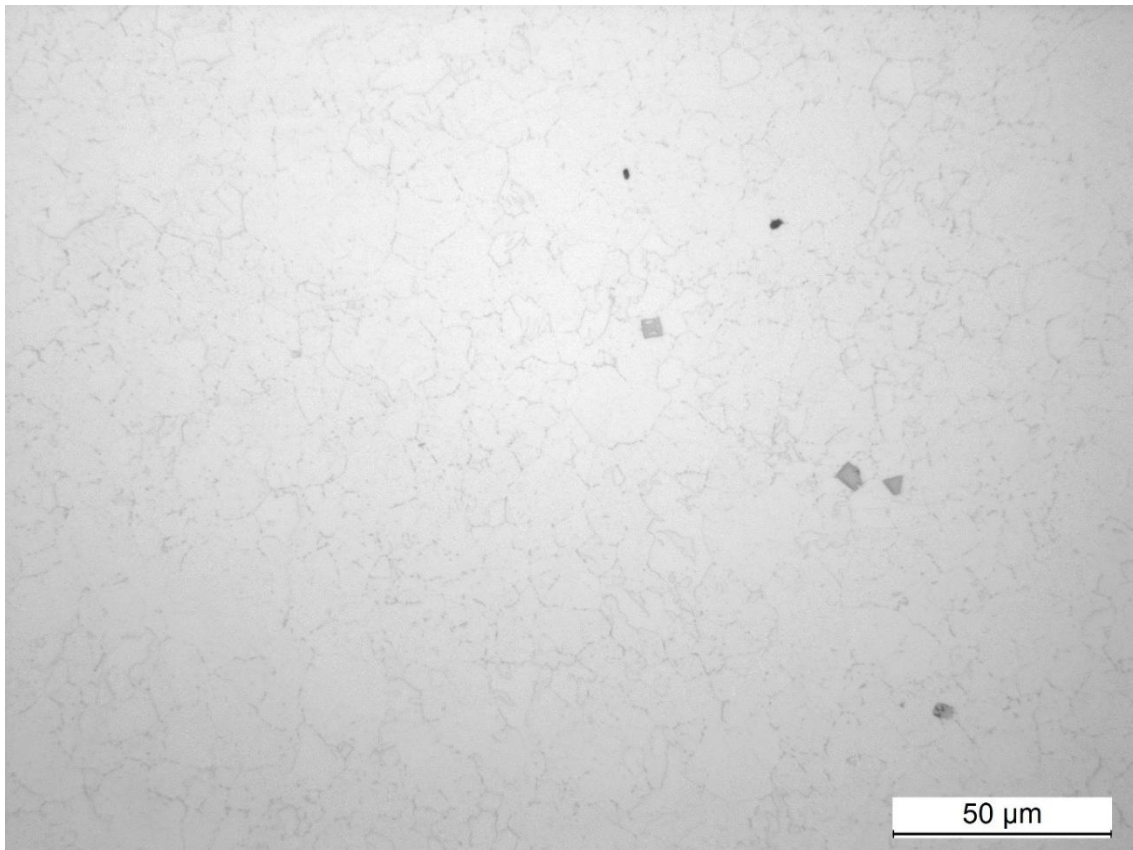
Kuva 18. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 600°C, 100 h



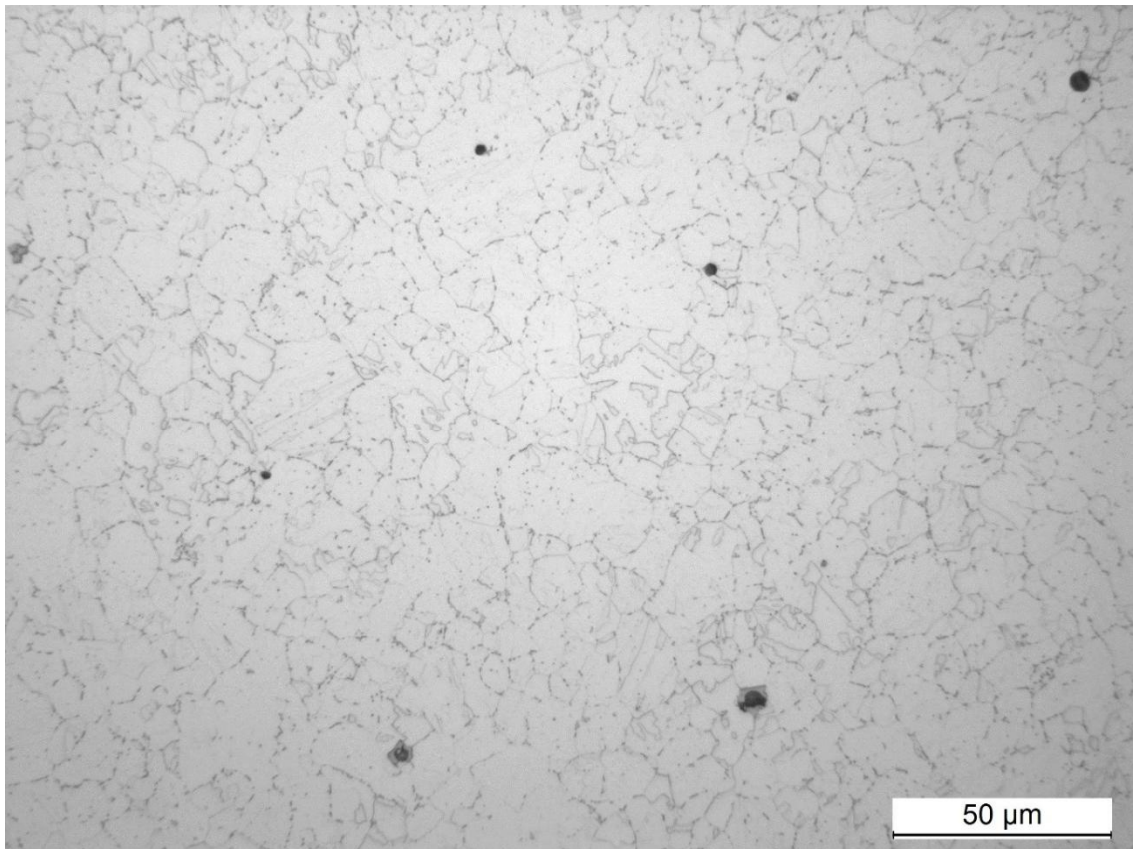
Kuva 19. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 600°C, 1000 h



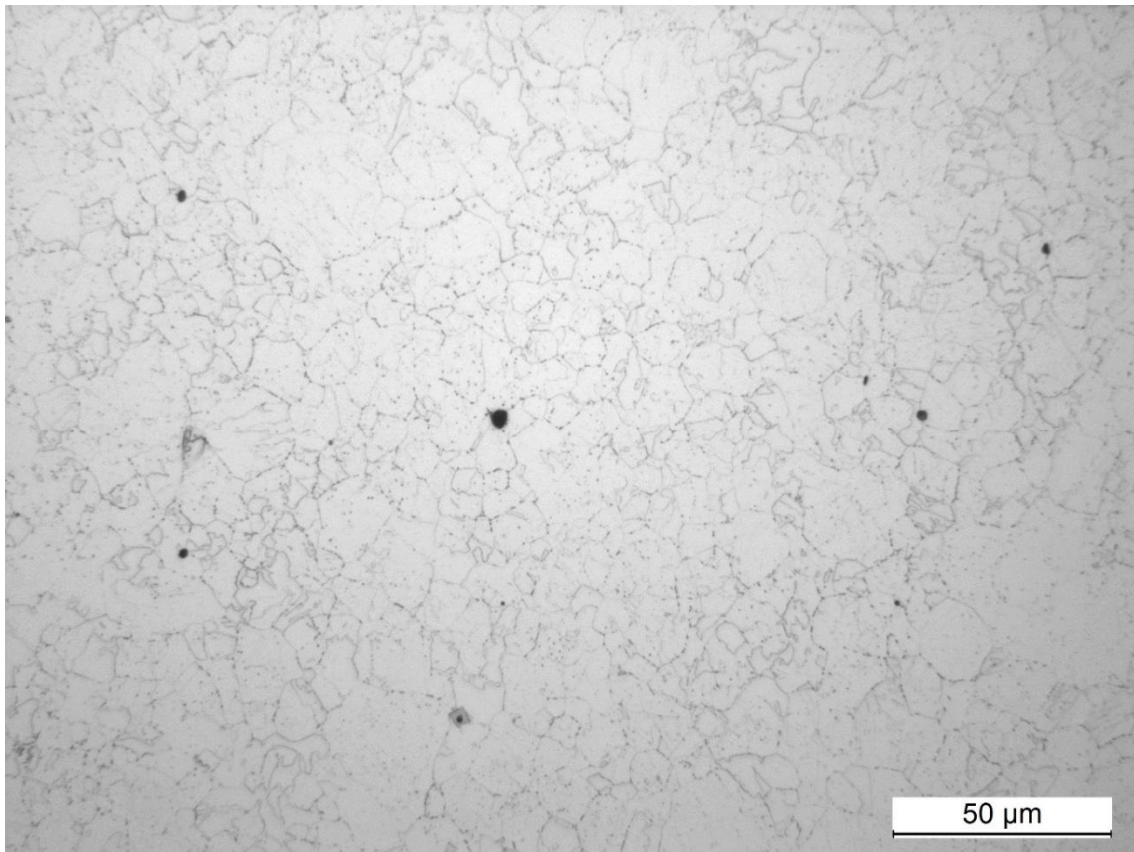
Kuva 20. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 10 h



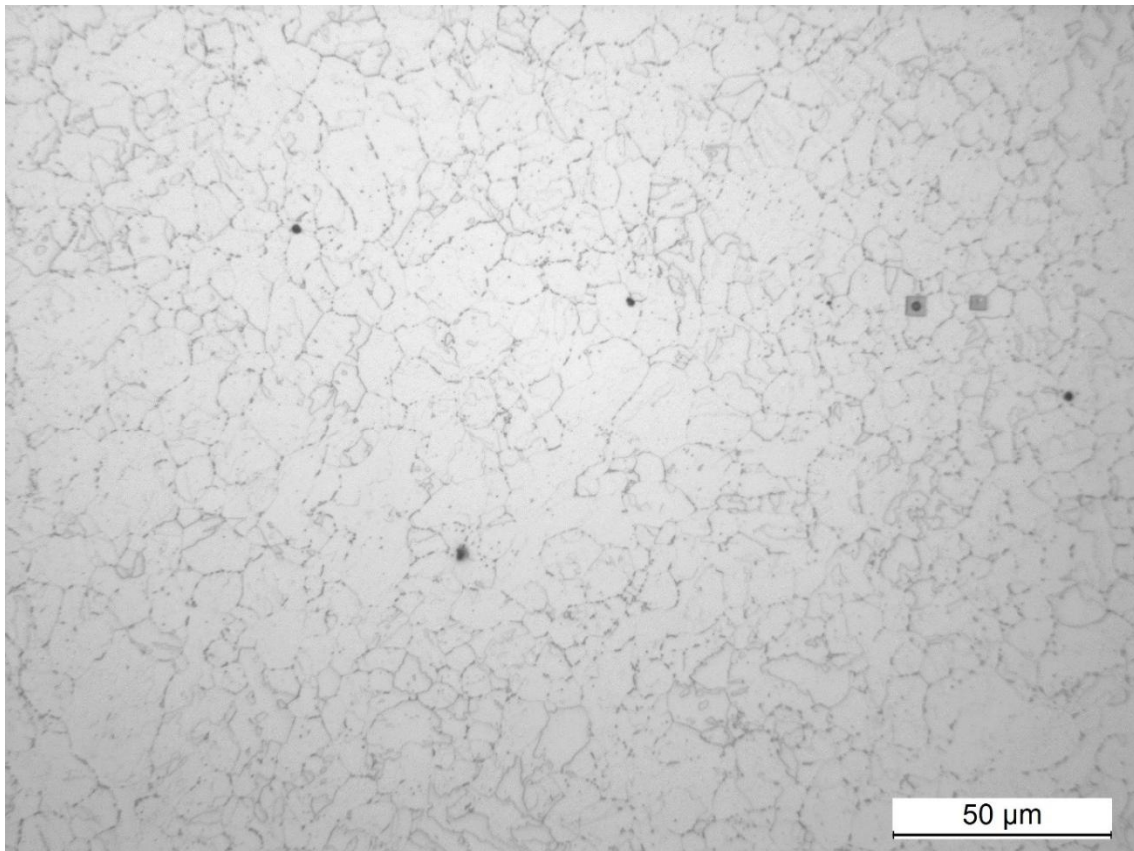
Kuva 21. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 100 h



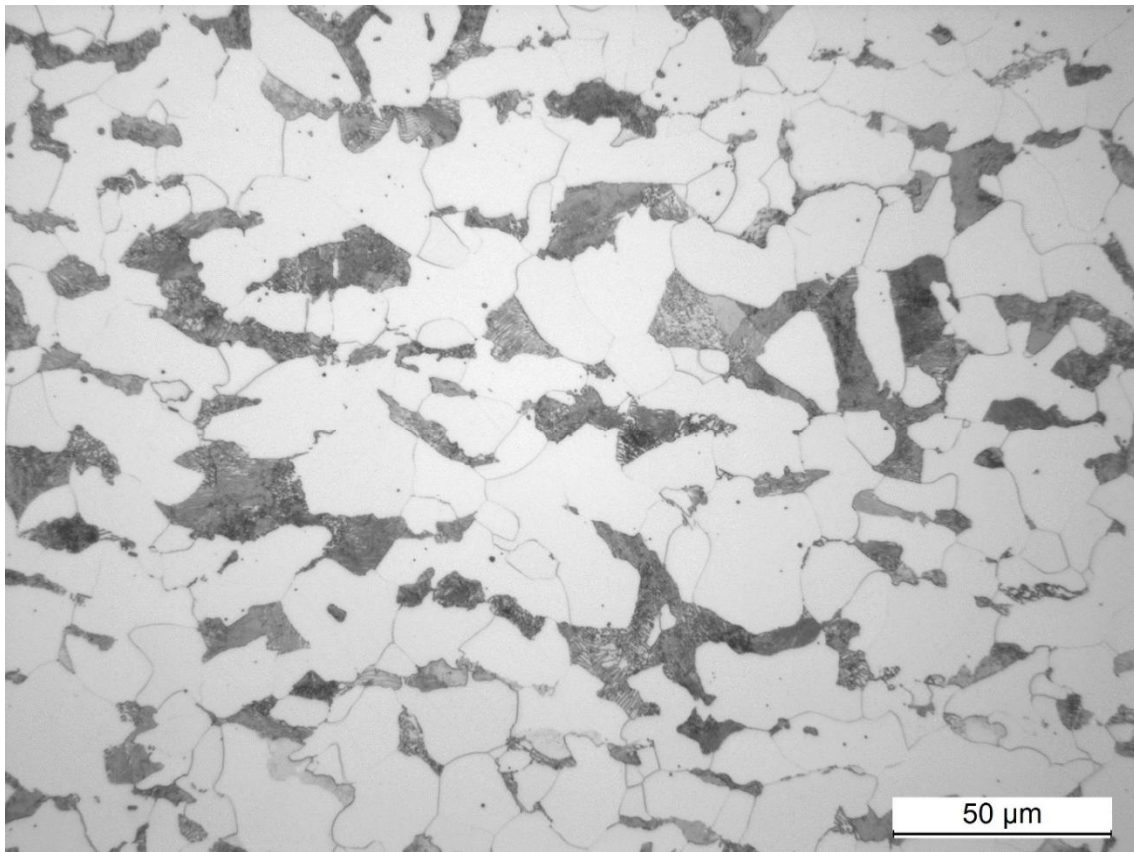
Kuva 22. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 650°C, 1000 h



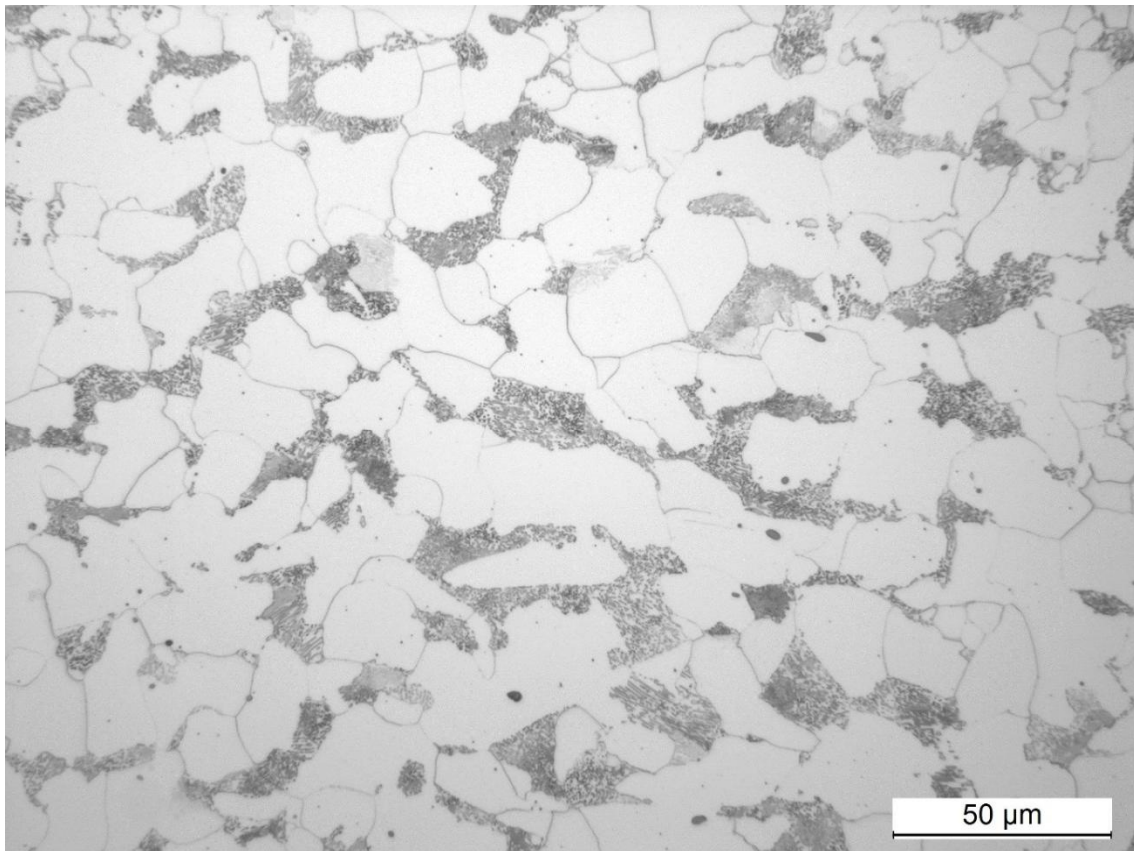
Kuva 23. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 700°C, 10 h



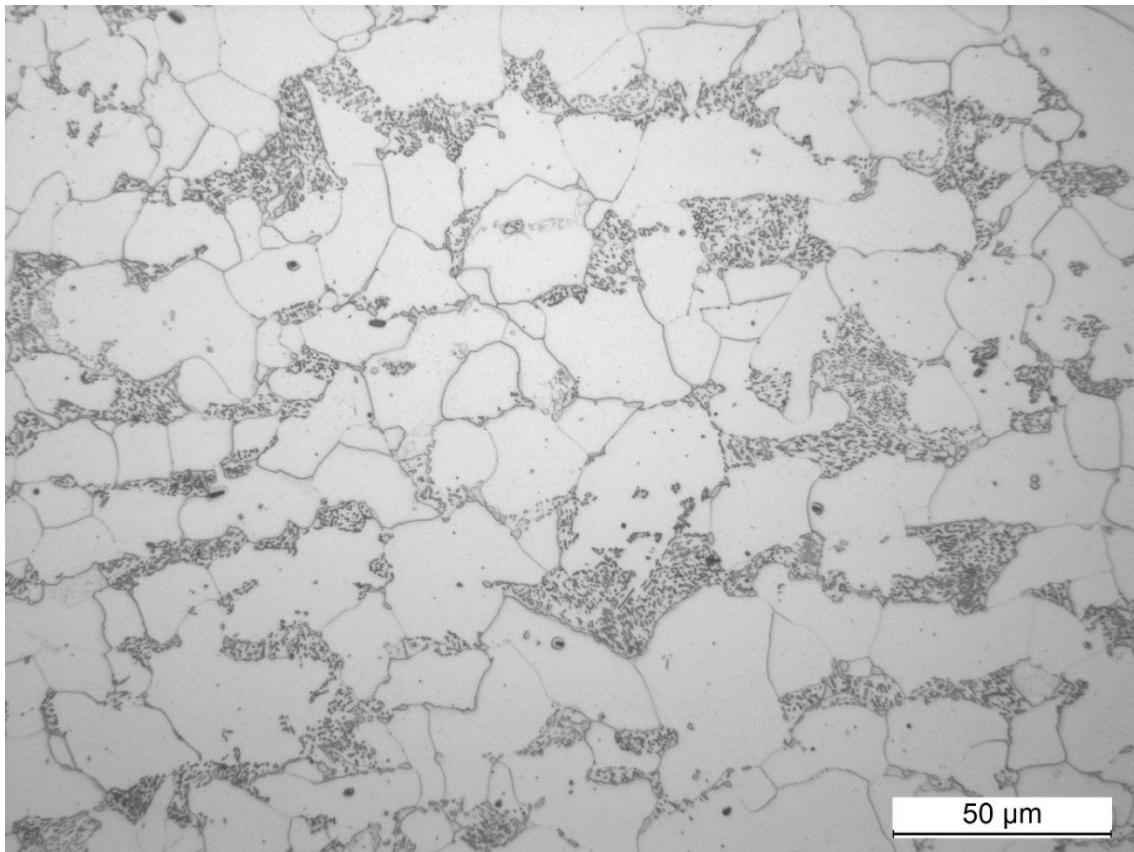
Kuva 24. Teräs 7CrMoVTiB10-10, 700°C, 100 h



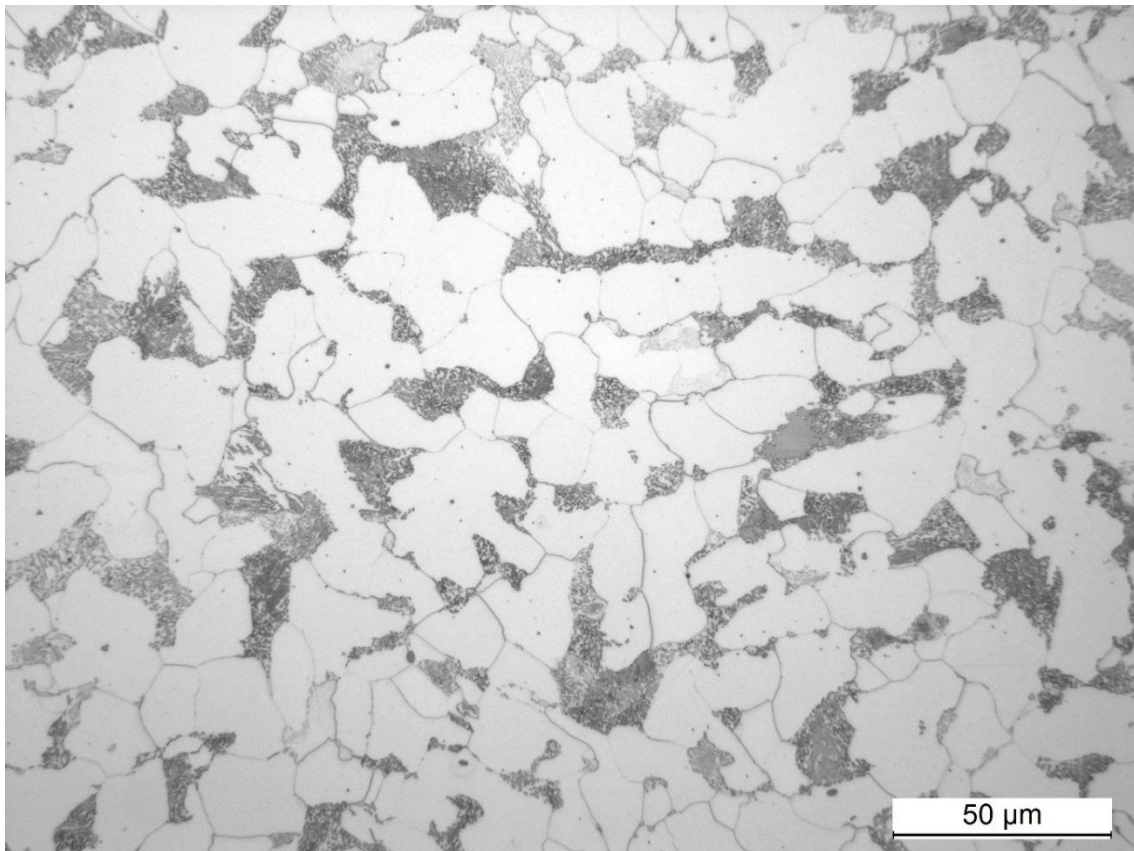
Kuva 25. St45.8, toimitustila, aste A



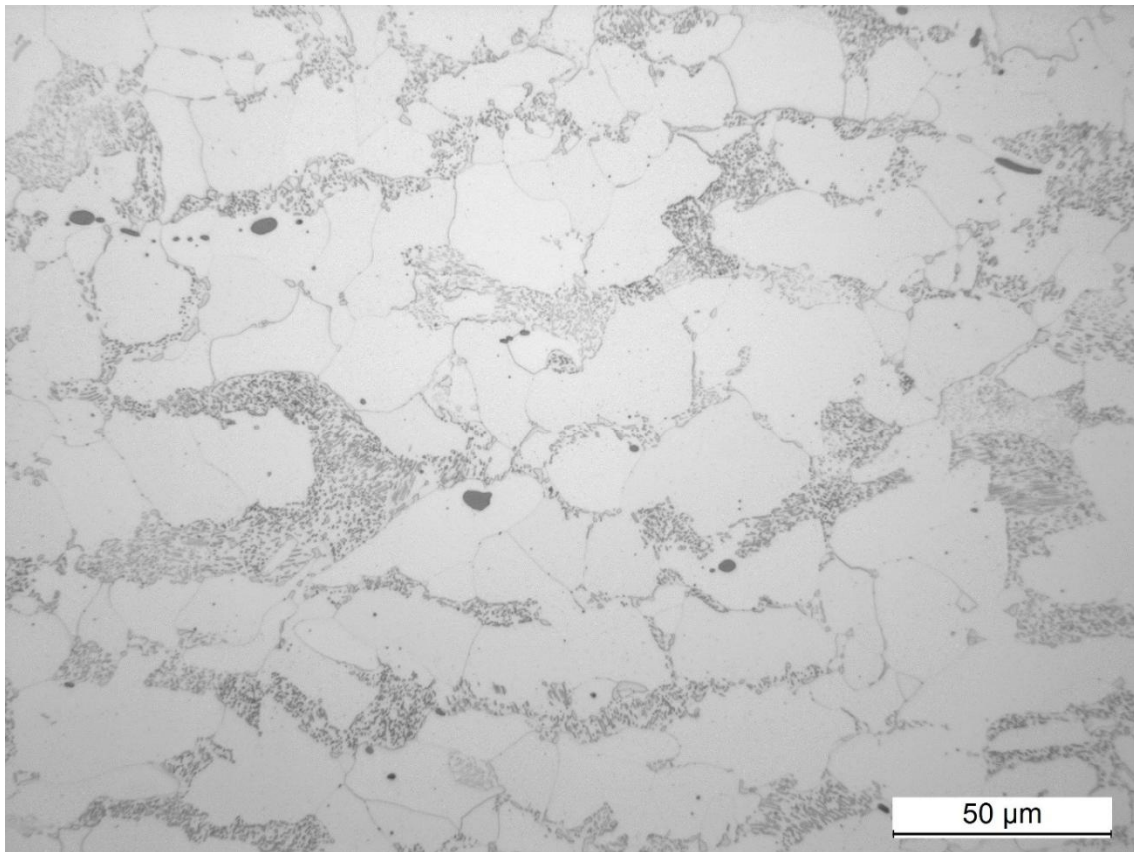
Kuva 26. St45.8, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste B/C



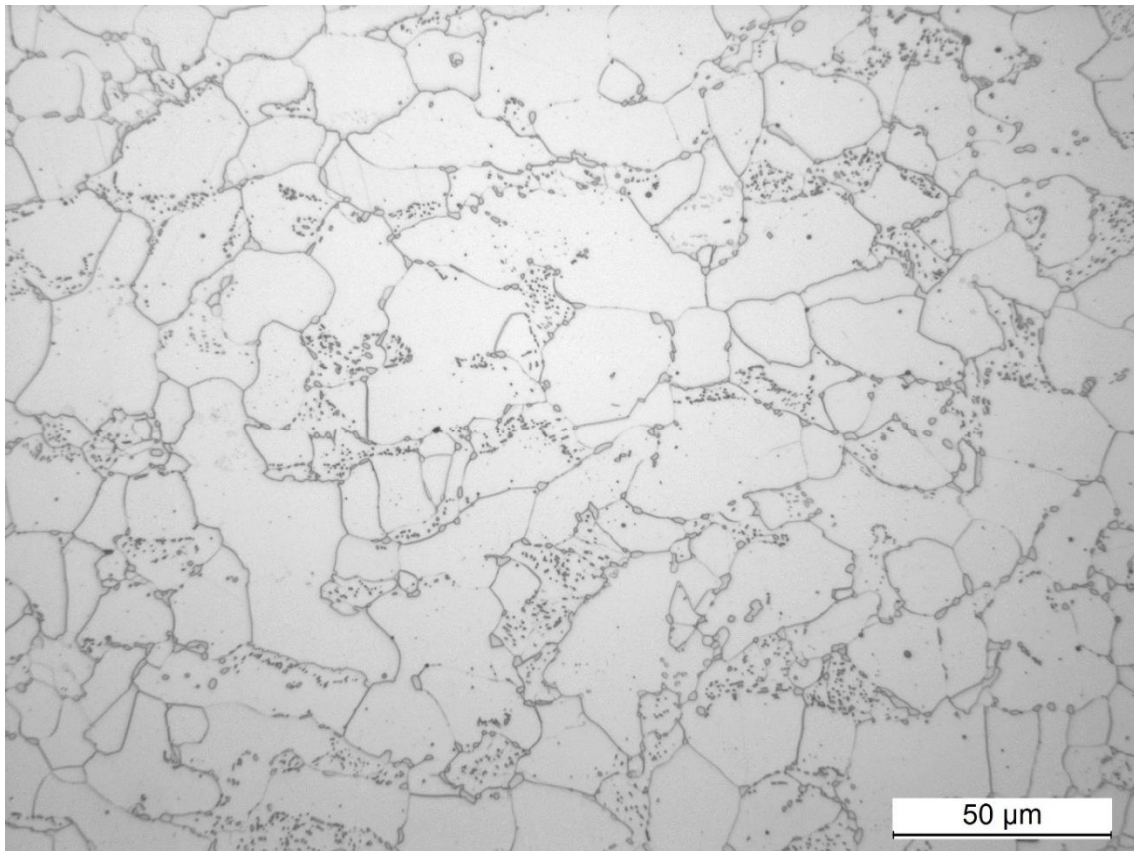
Kuva 27. St45.8, 600°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste D



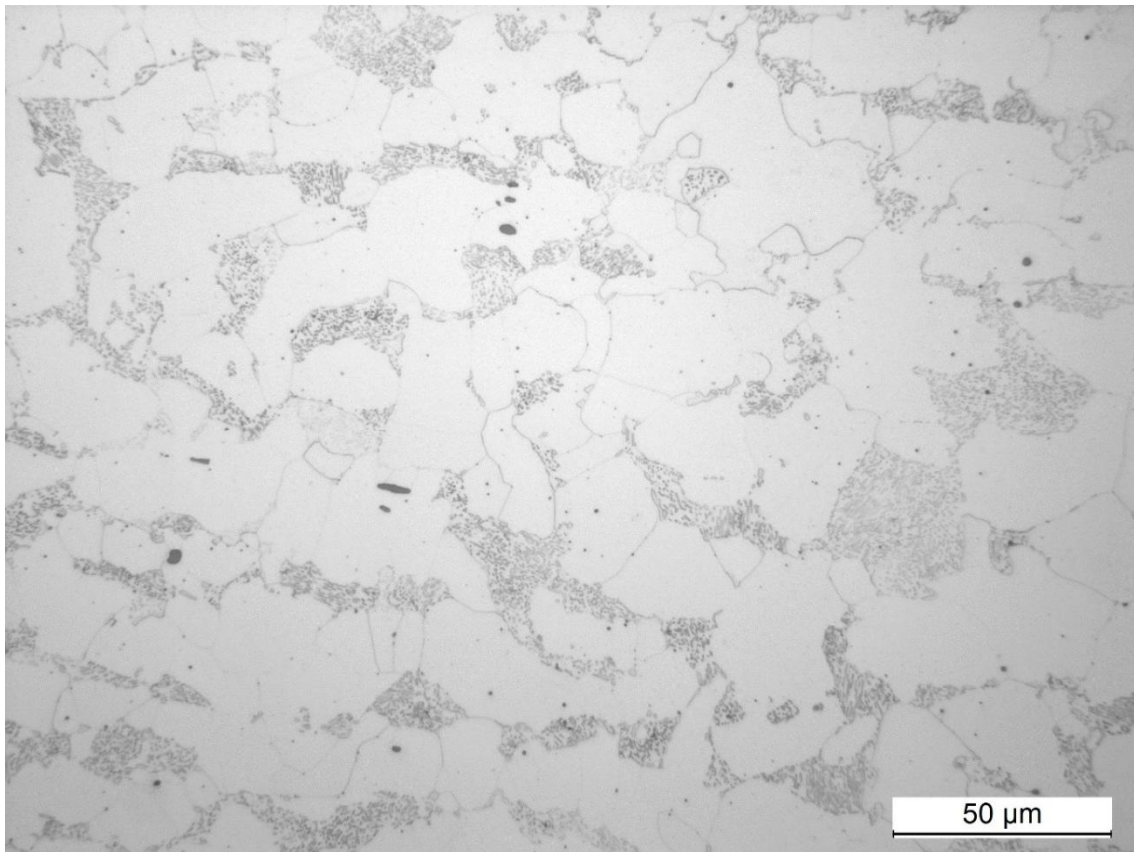
Kuva 28. St45.8, 650°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste B/C



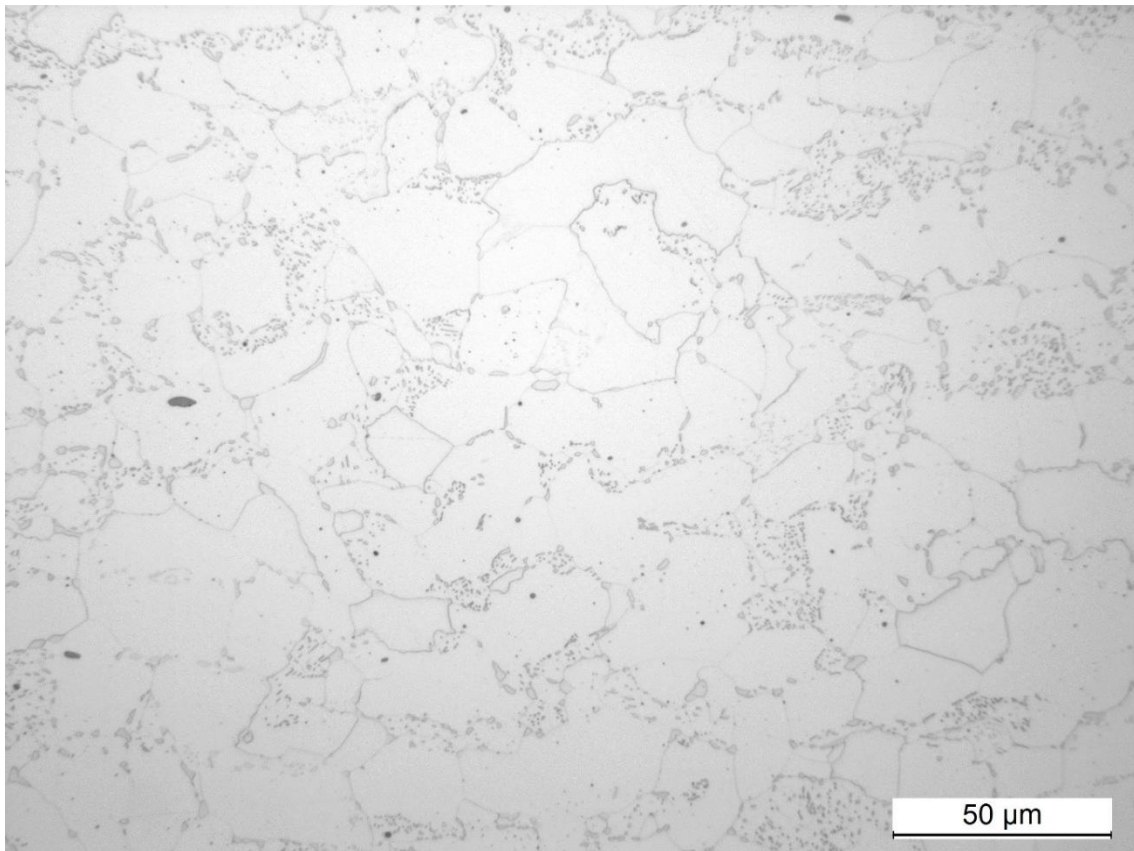
Kuva 29. St45.8, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste D



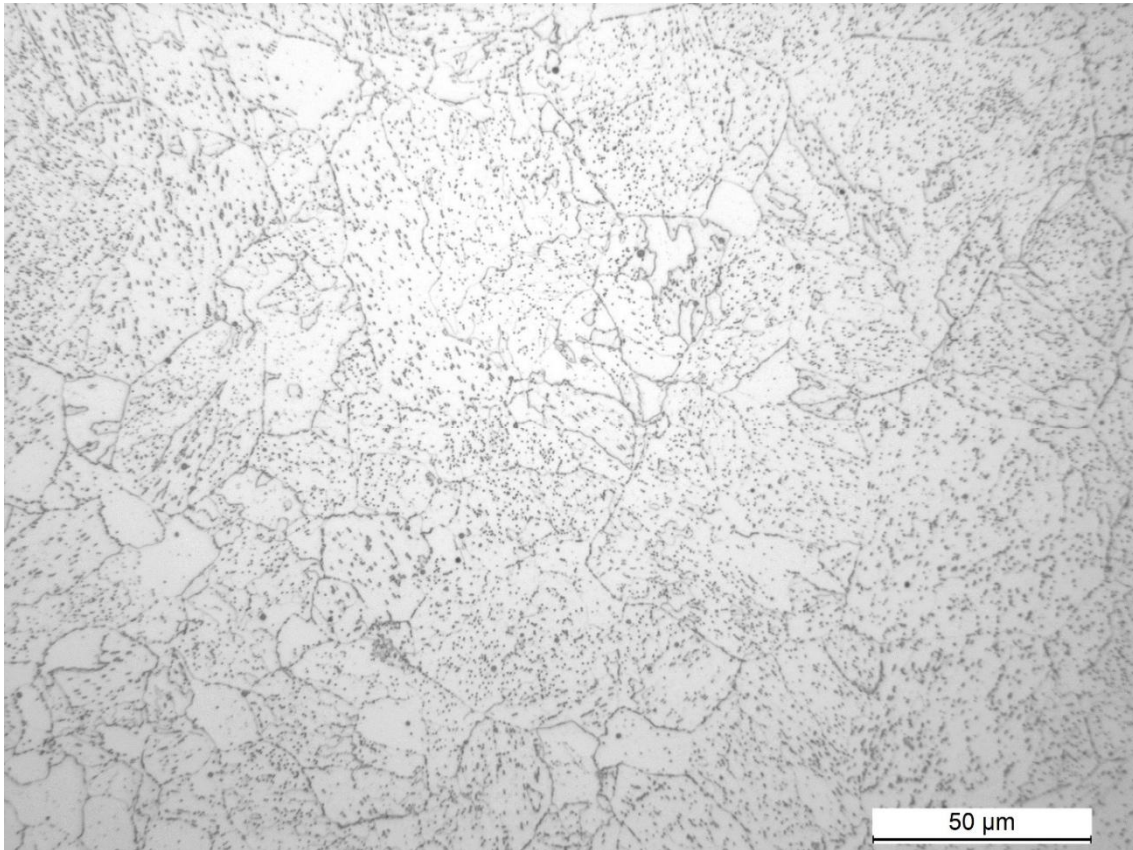
Kuva 30. St45.8, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), aste E



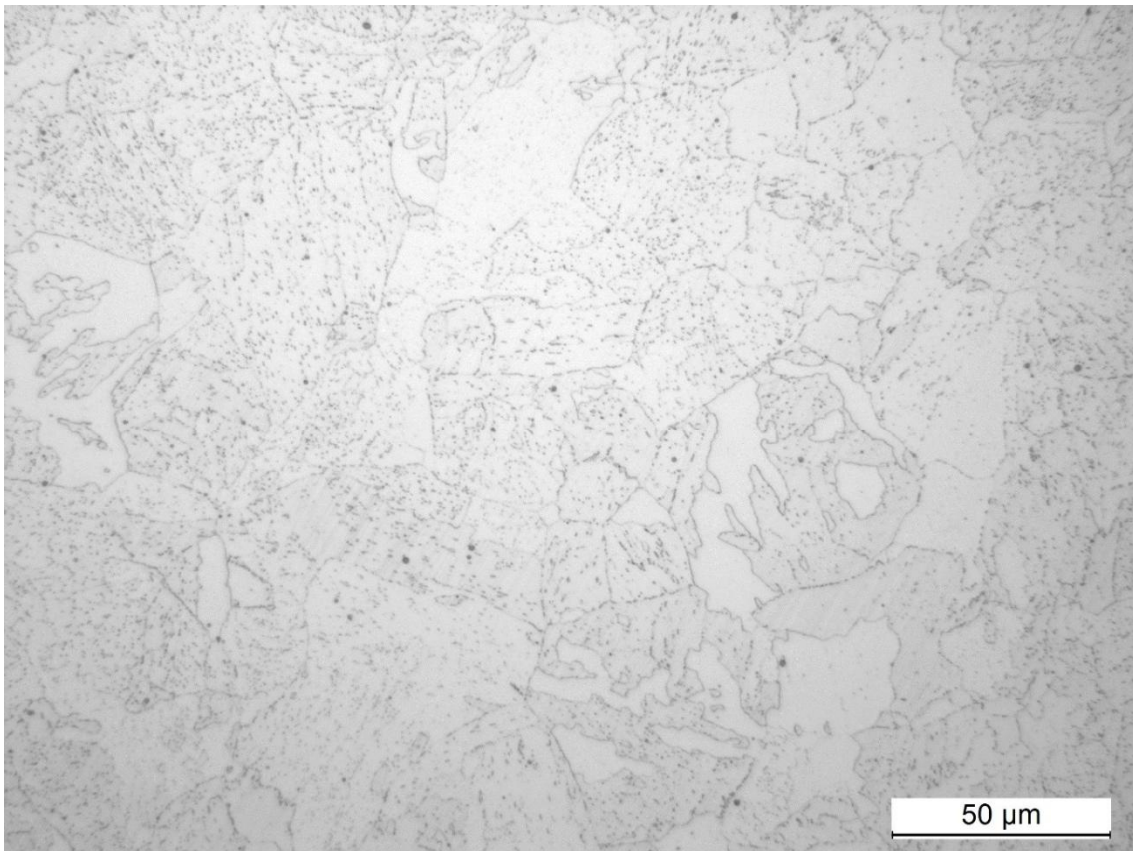
Kuva 31. St45.8, 700°C, 10 h, P_{LM} (C=14), aste D



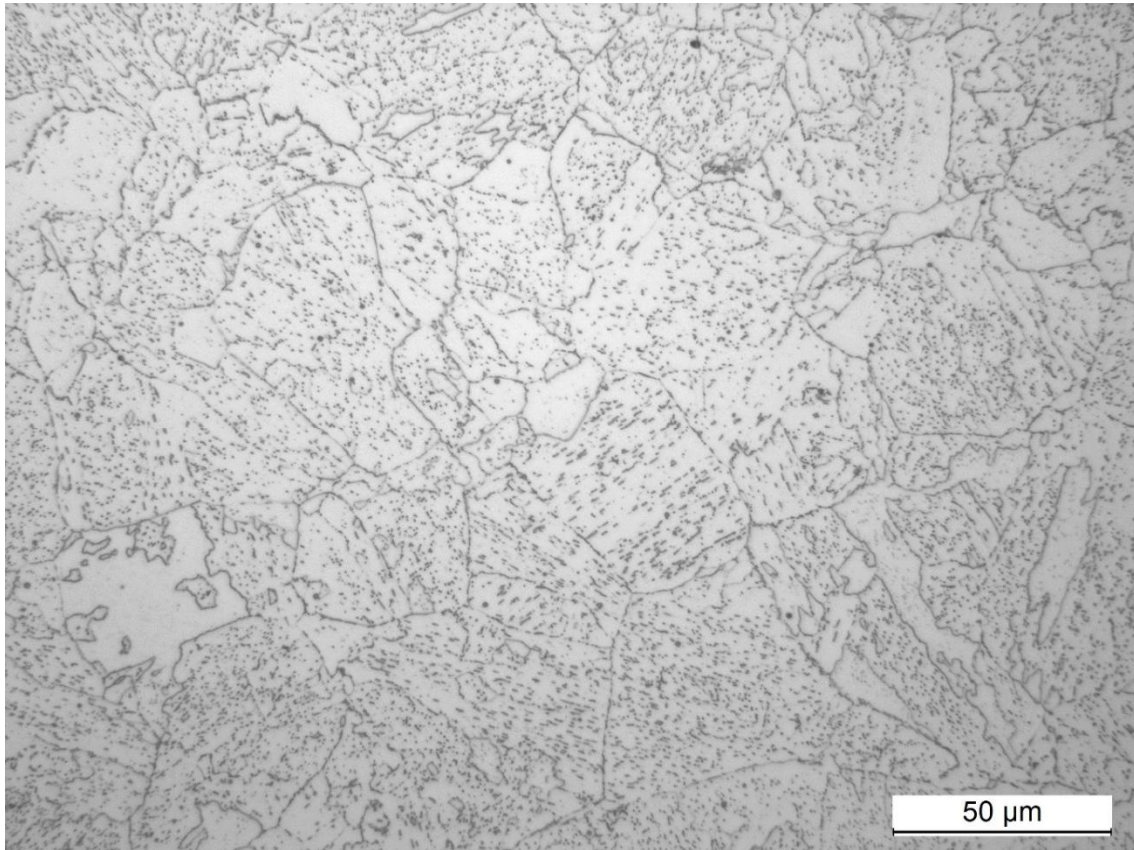
Kuva 32. St45.8, 700°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste E



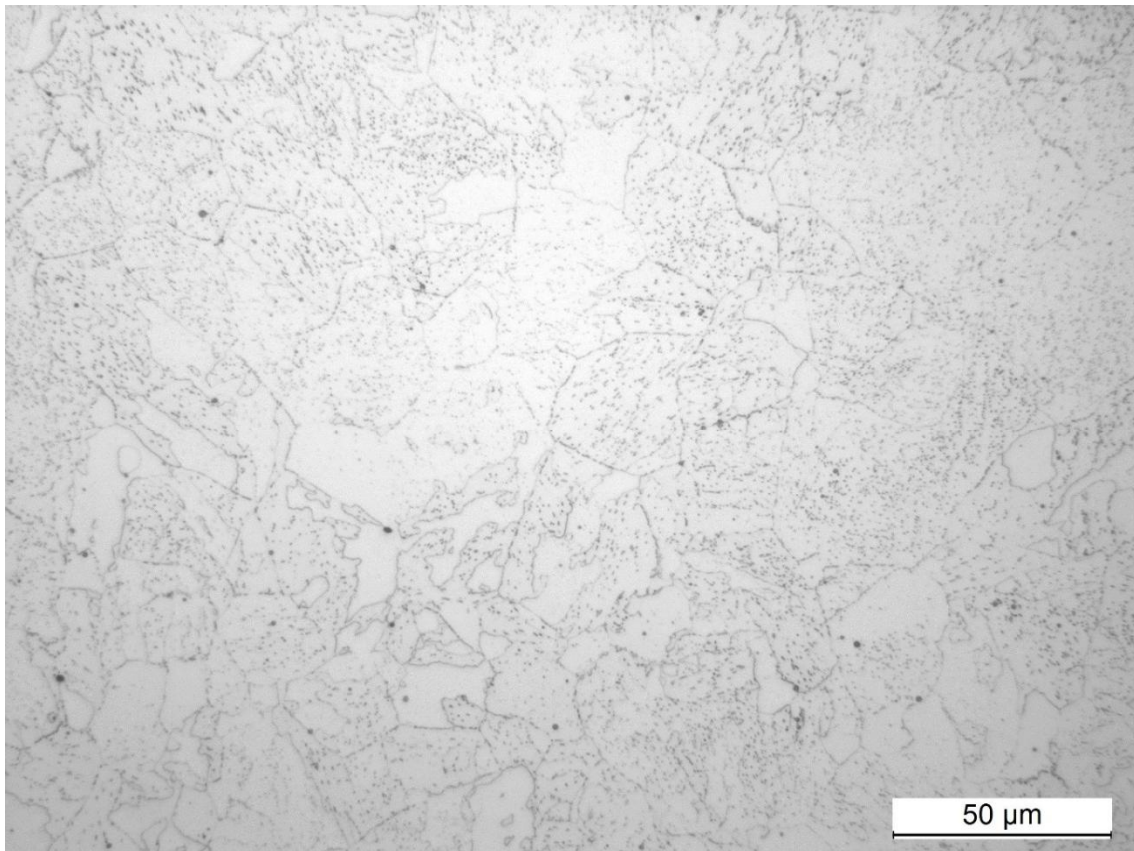
Kuva 33. T22, toimitustila



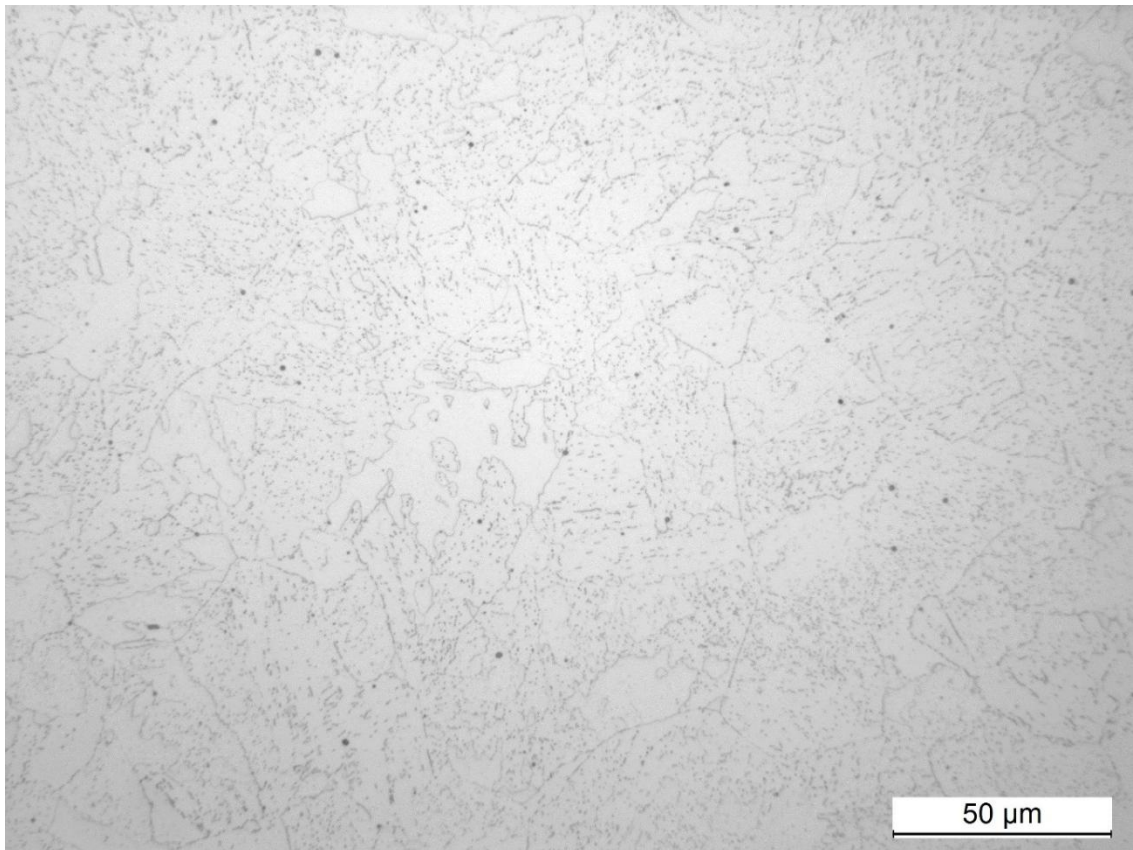
Kuva 34. T22, 600°C, 100 h



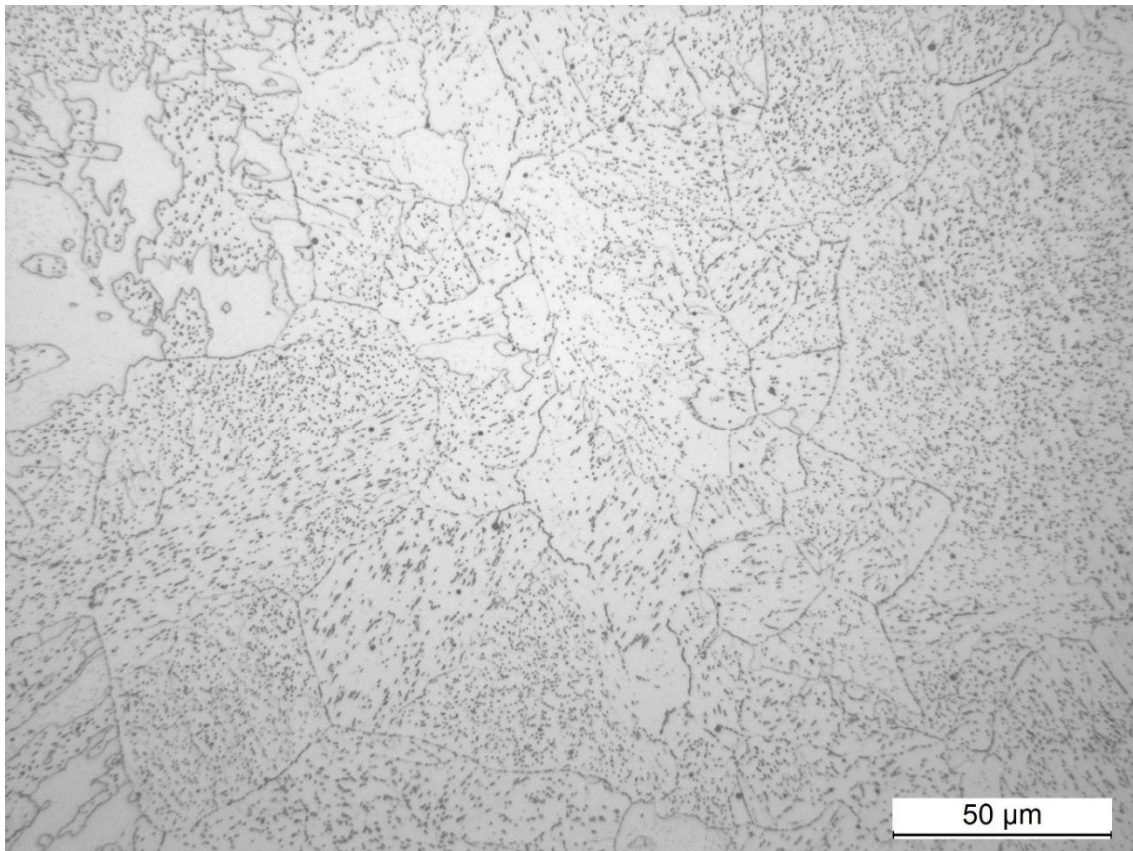
Kuva 35. T22, 600°C, 1000 h



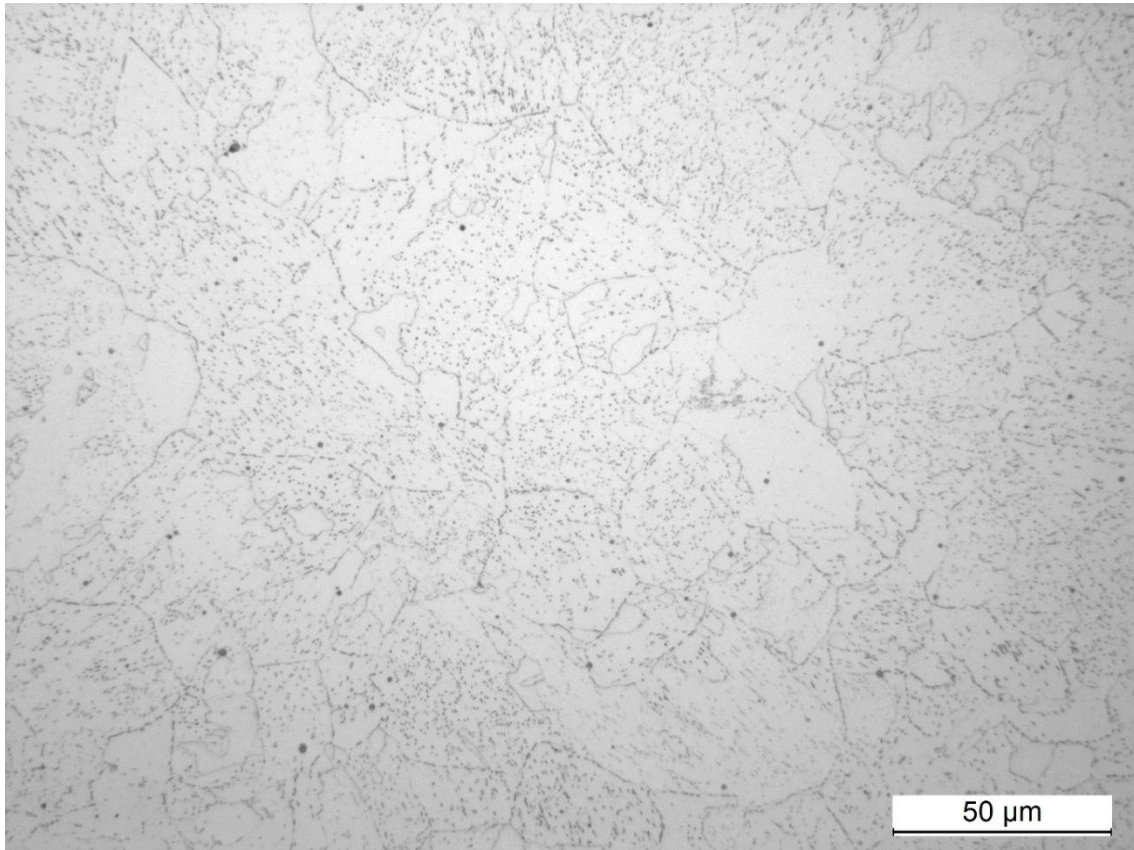
Kuva 36. T22, 650°C, 10 h



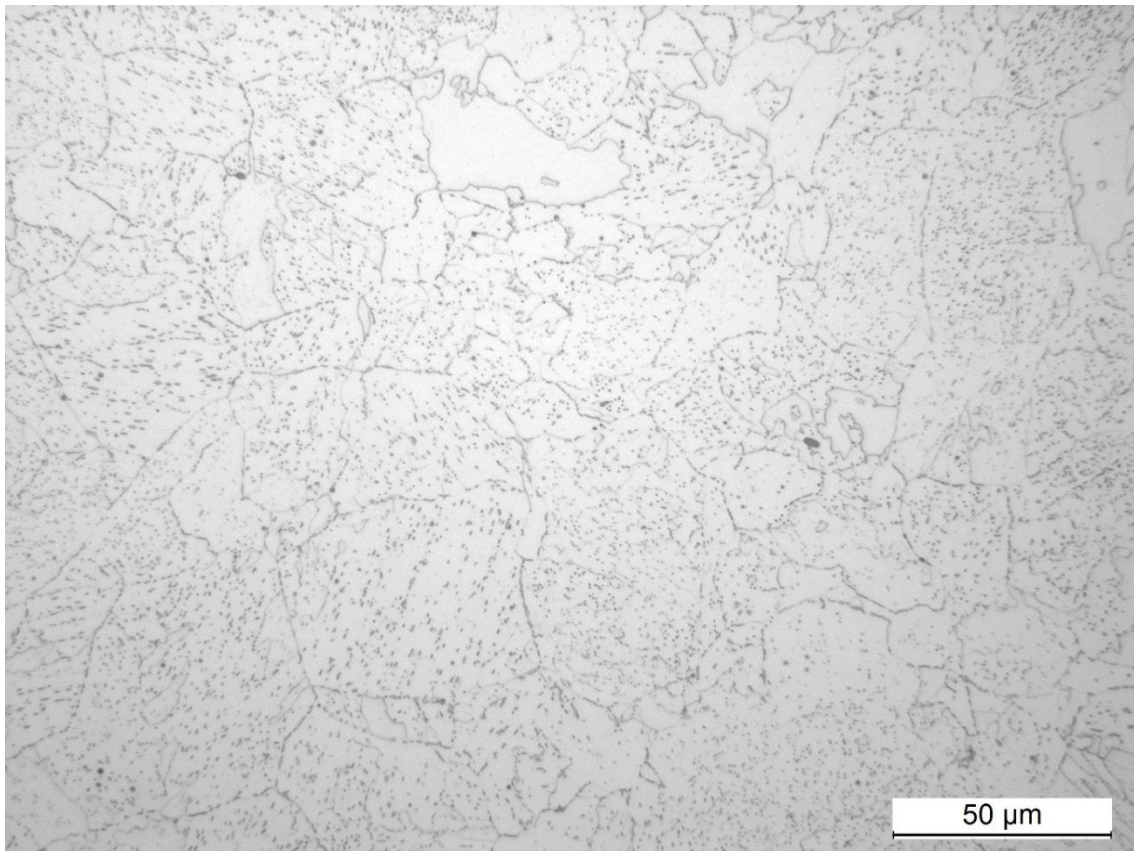
Kuva 37. T22, 650°C, 100 h



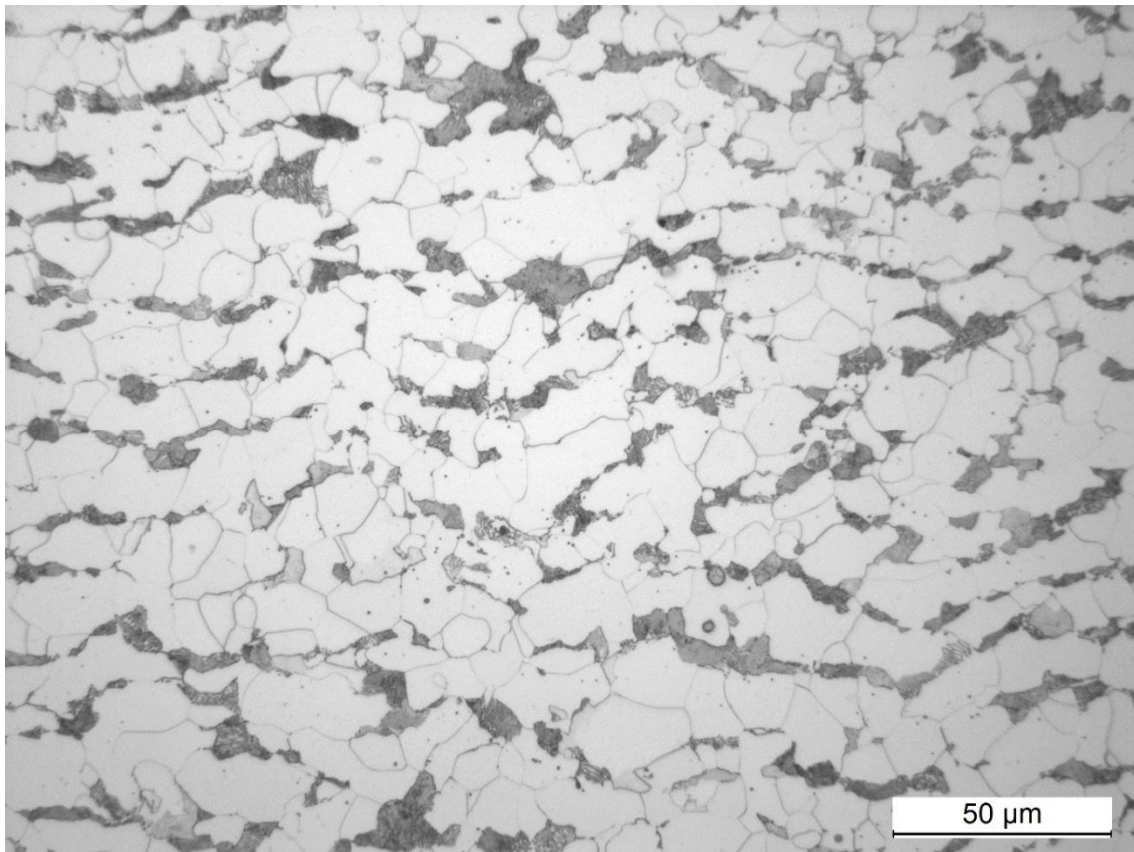
Kuva 38. T22, 650°C, 1000 h



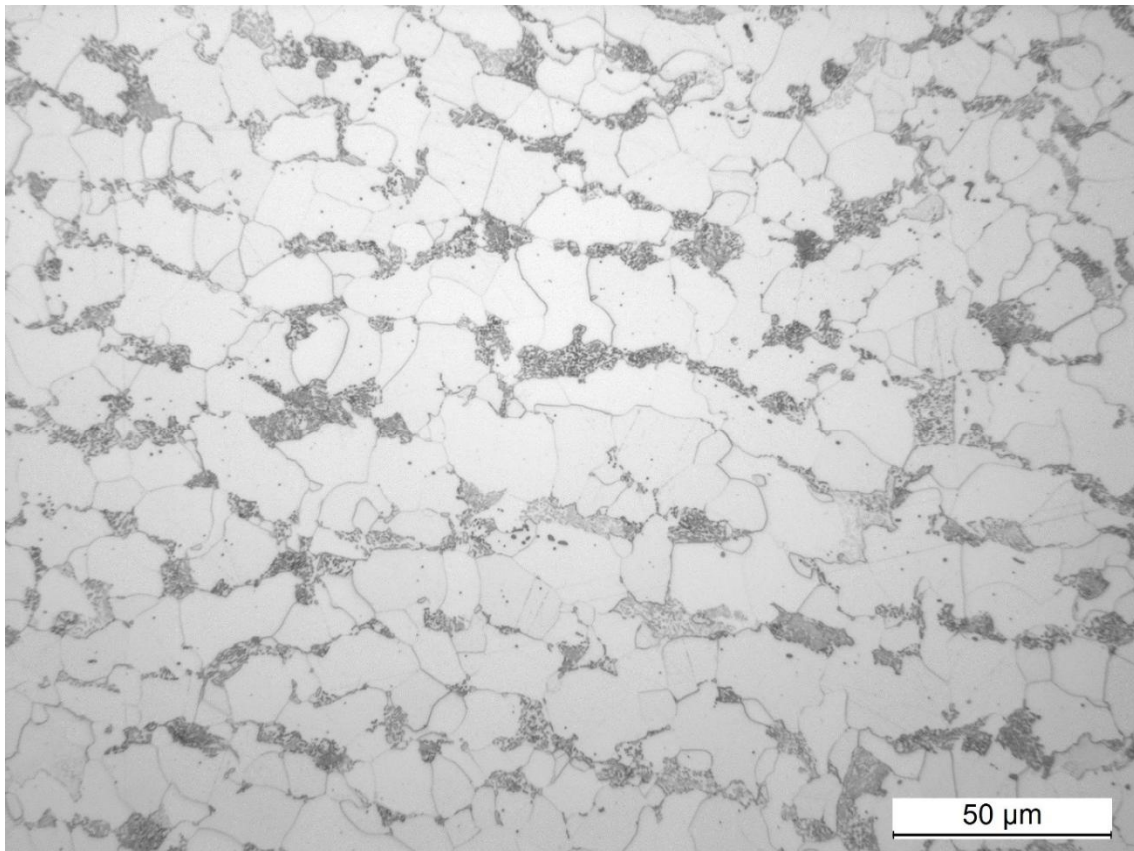
Kuva 39. T22, 700°C, 10 h



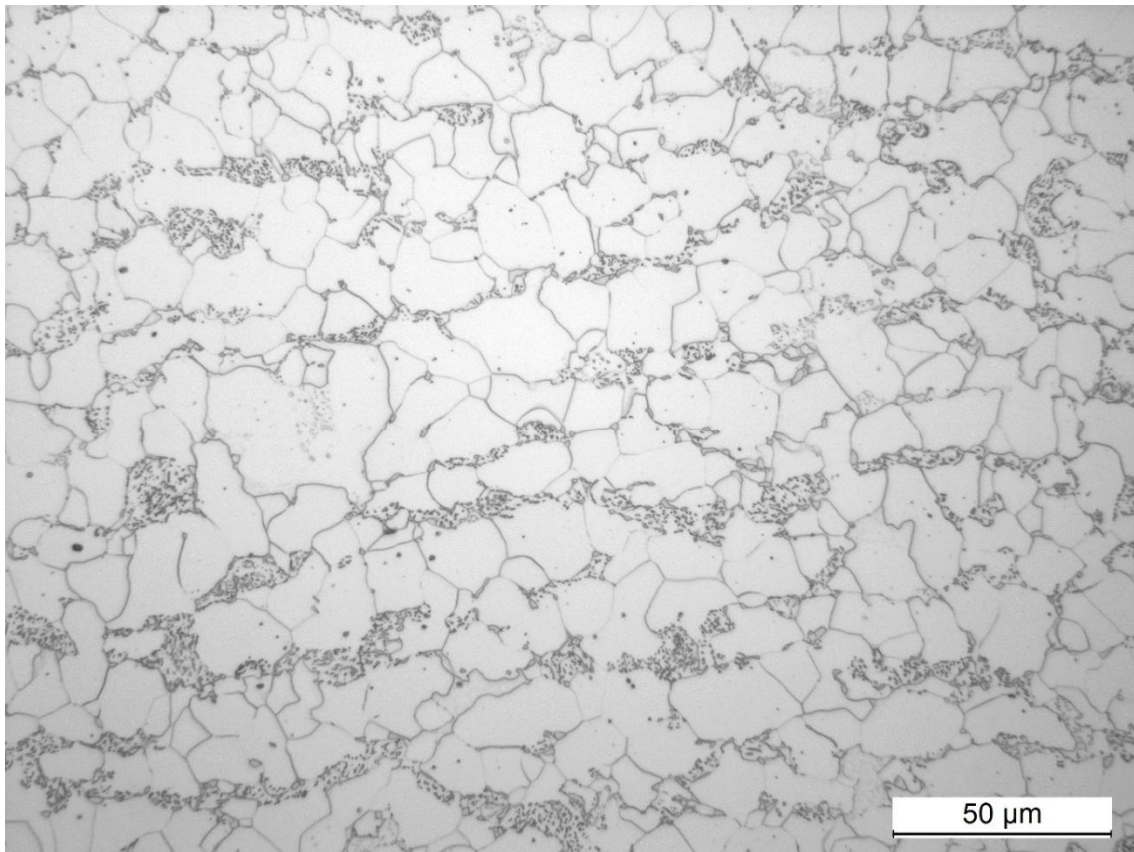
Kuva 40. T22, 700°C, 100 h



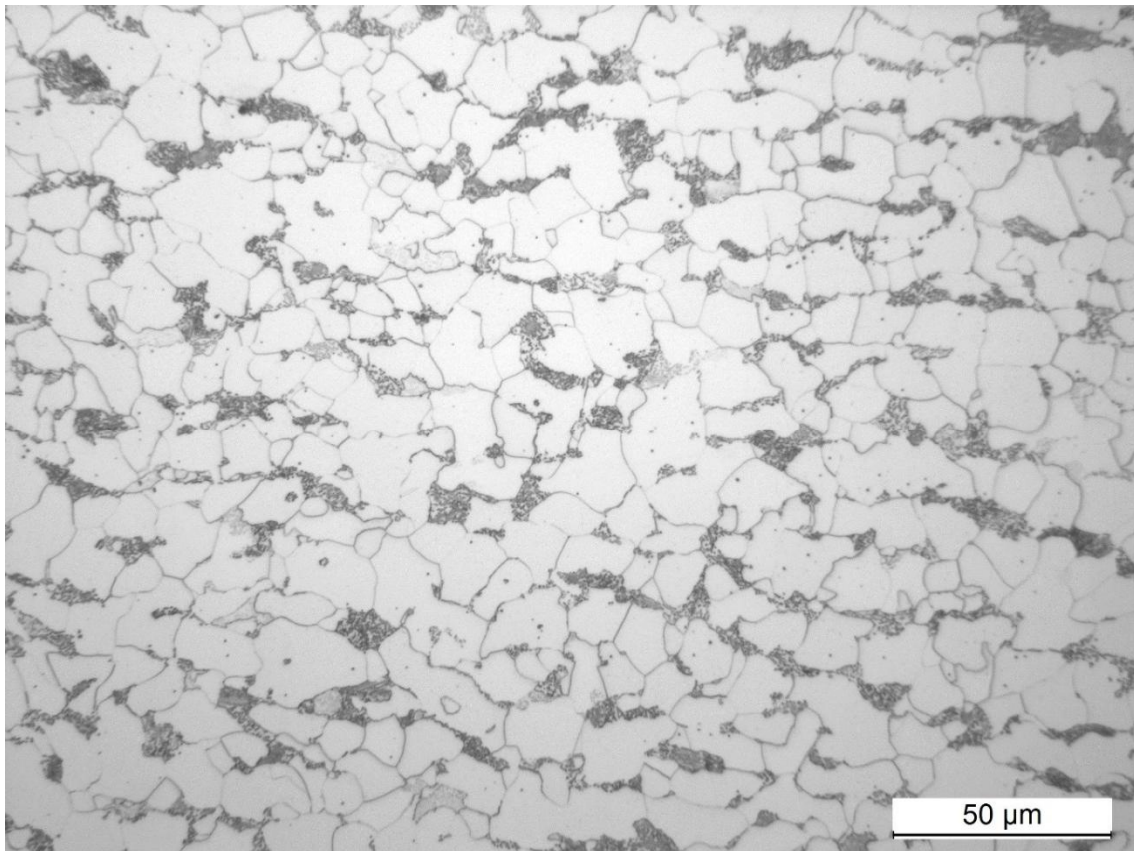
Kuva 41. P265GH, toimitustila, aste A



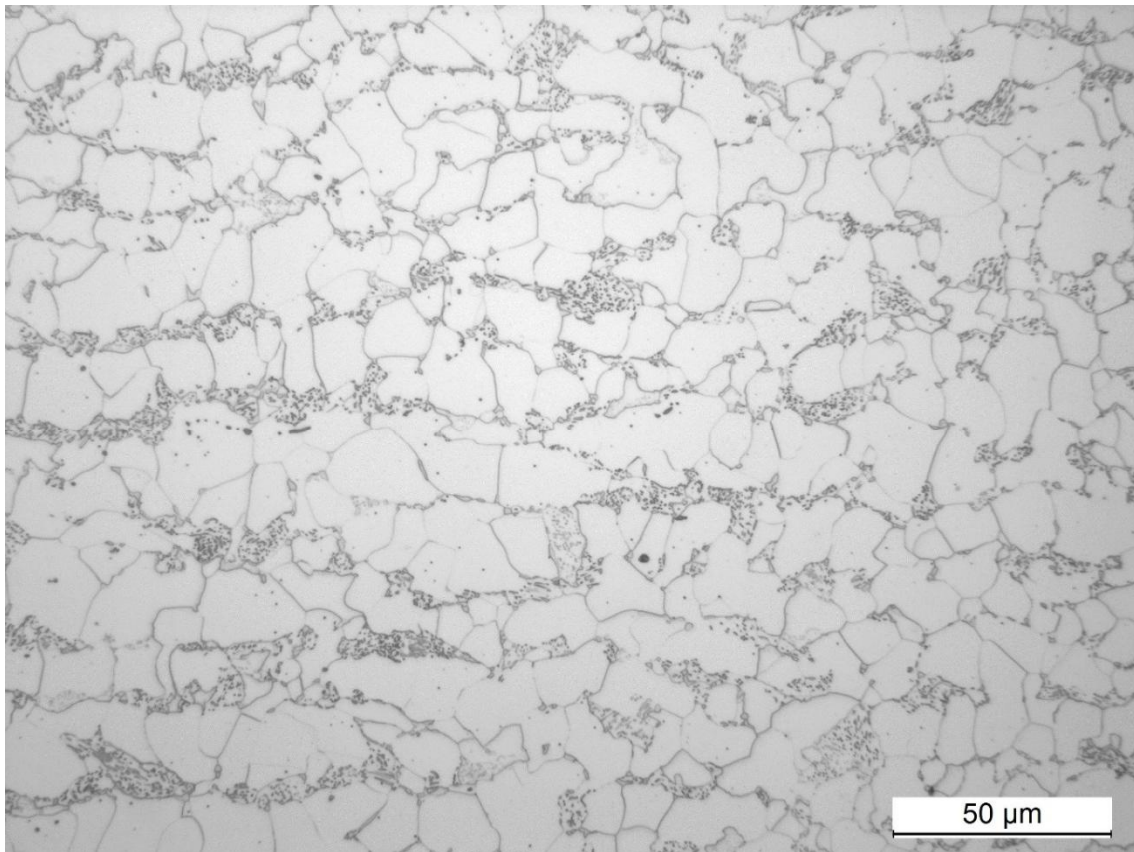
Kuva 42. P265GH, 600°C, 100 h, P_{LM} (C=14), aste B/C



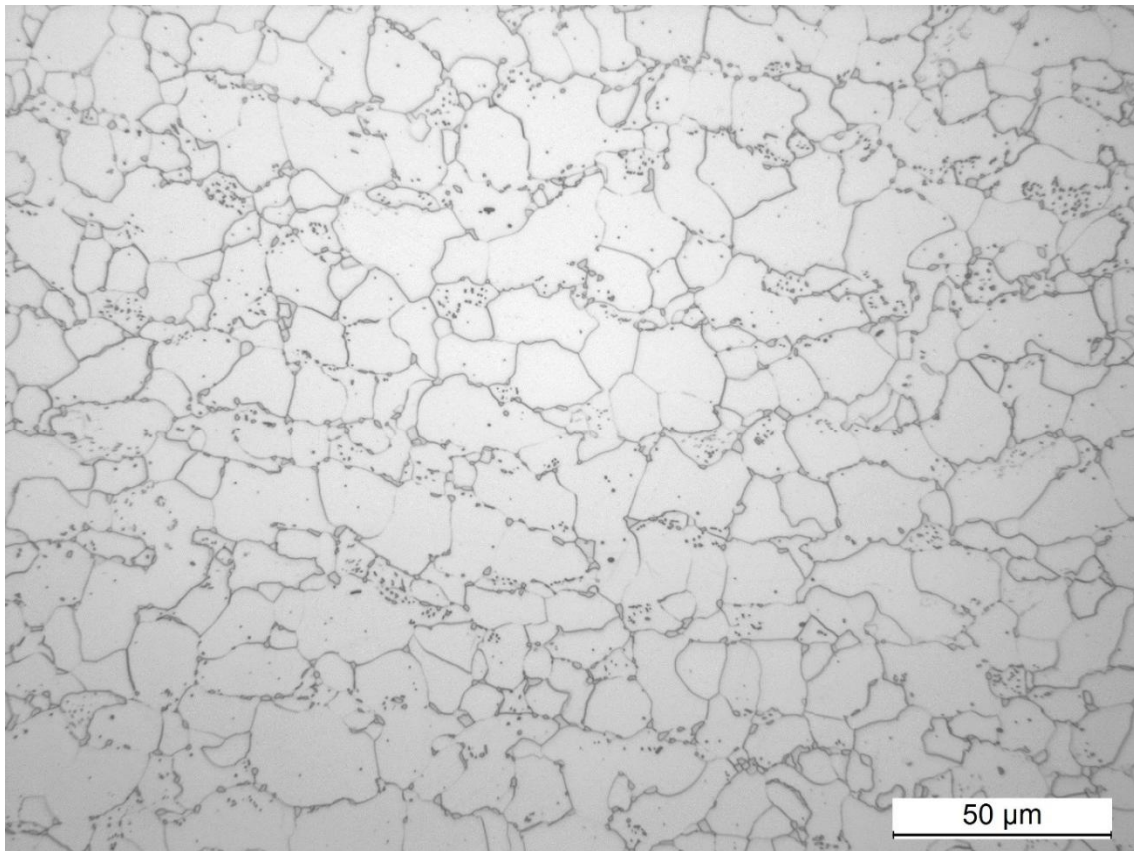
Kuva 43. P265GH, 600°C, 1000 h, PLM (C=14), aste D



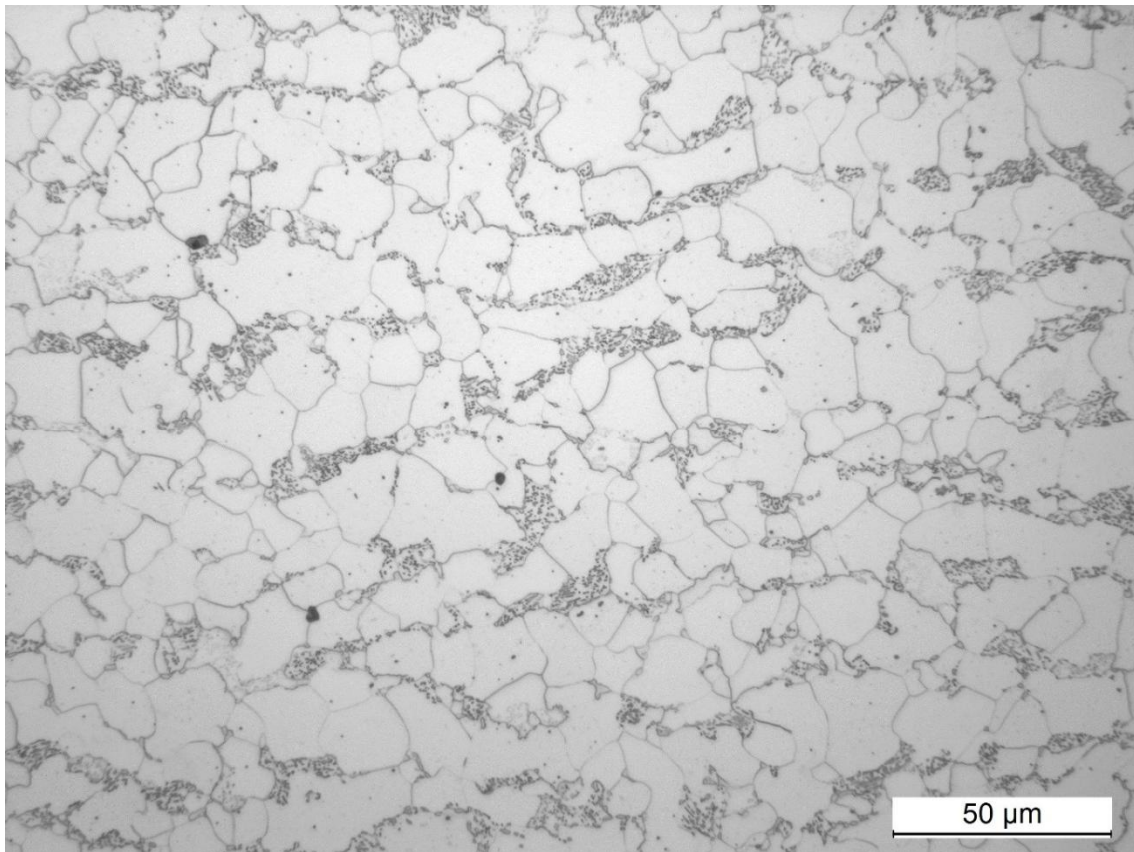
Kuva 44. P265GH, 650°C, 10 h, PLM (C=14), C



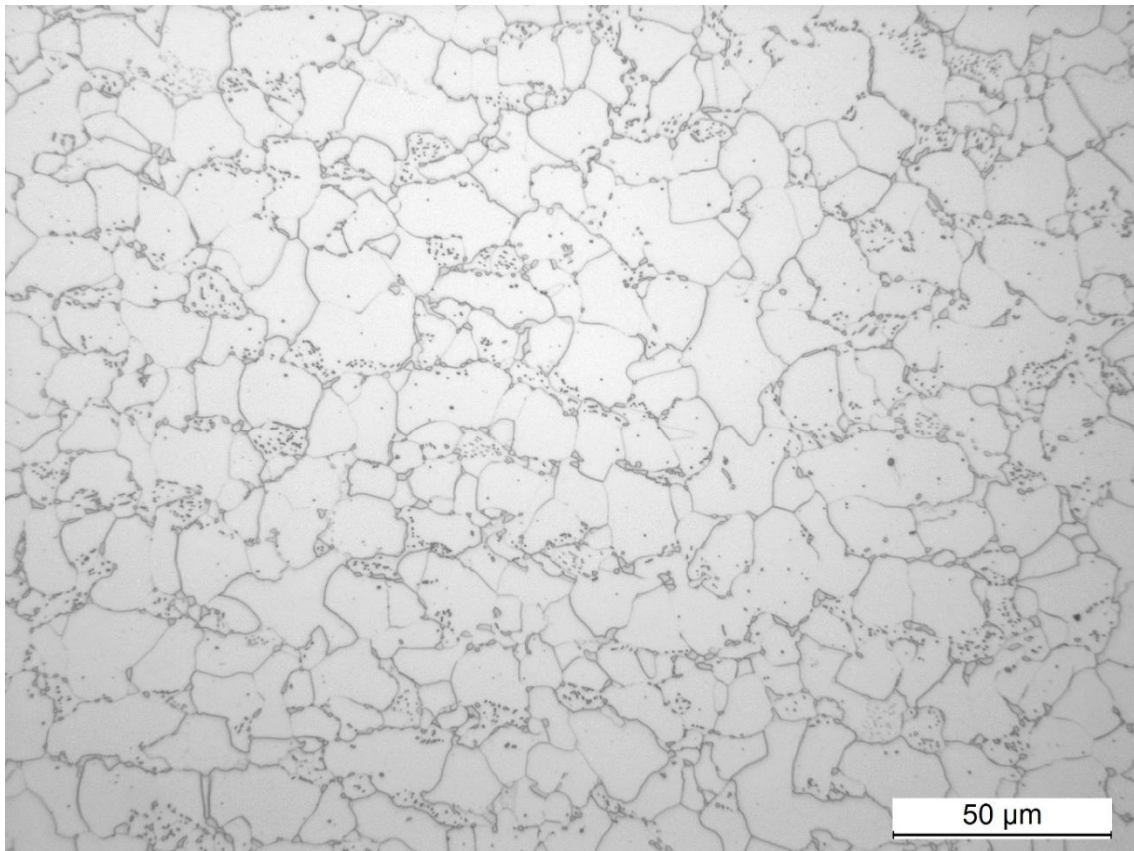
Kuva 45. P265GH, 650°C, 100 h, P_{LM} (C=14), D



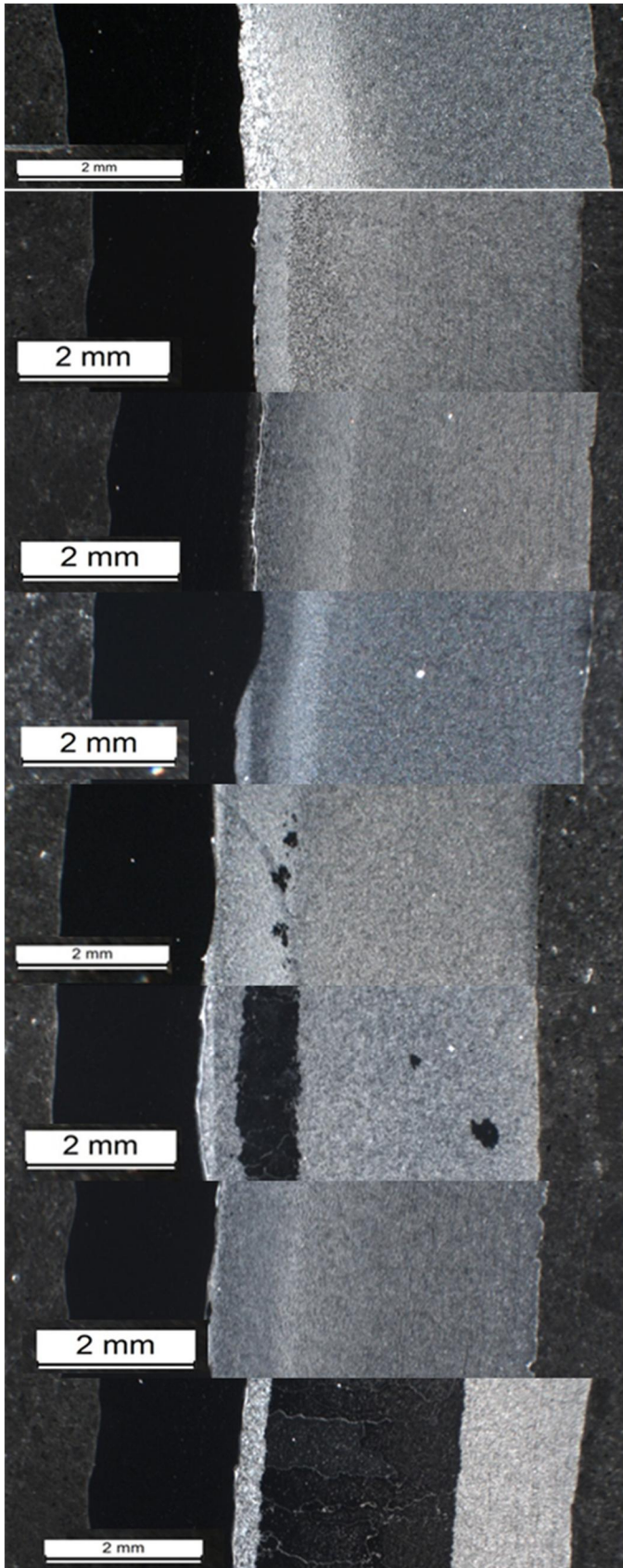
Kuva 46. P265GH, 650°C, 1000 h, P_{LM} (C=14), E



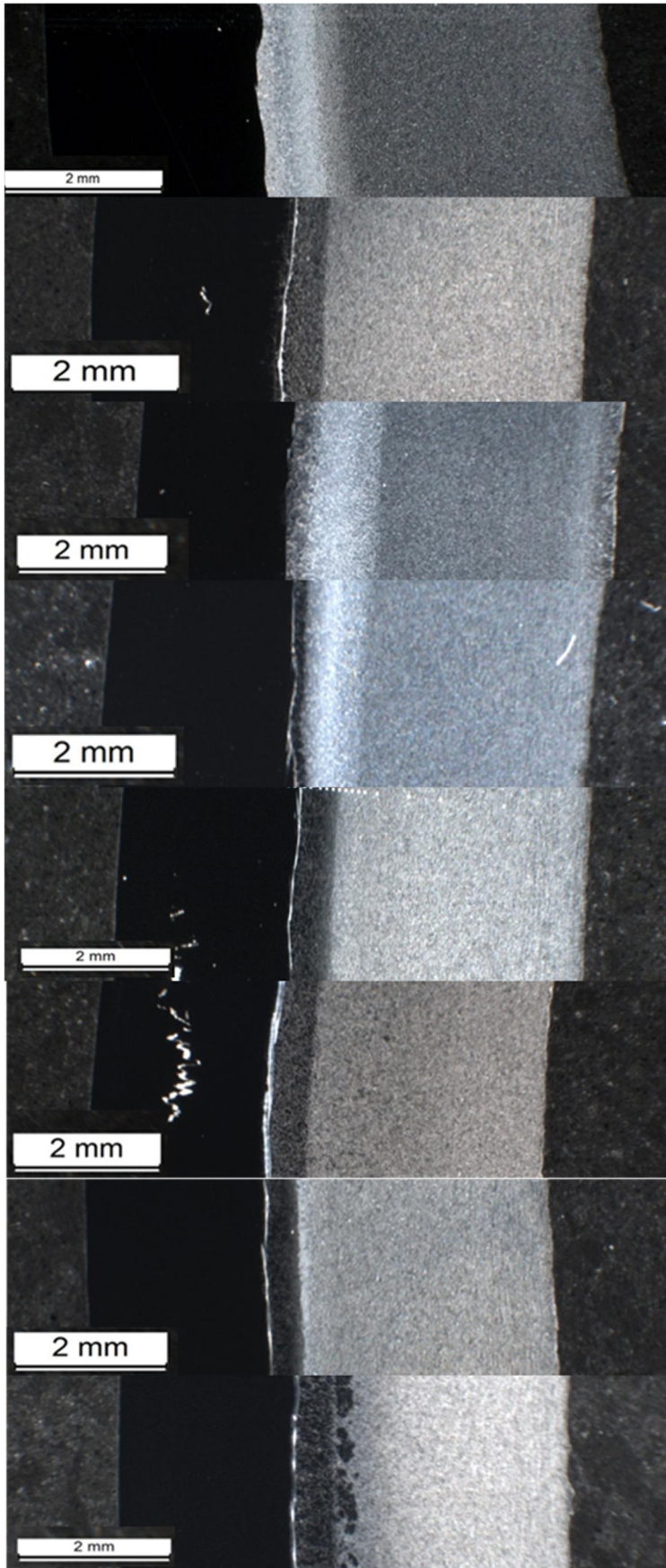
Kuva 47. P265GH, 700°C, 10 h, PLM (C=14), D



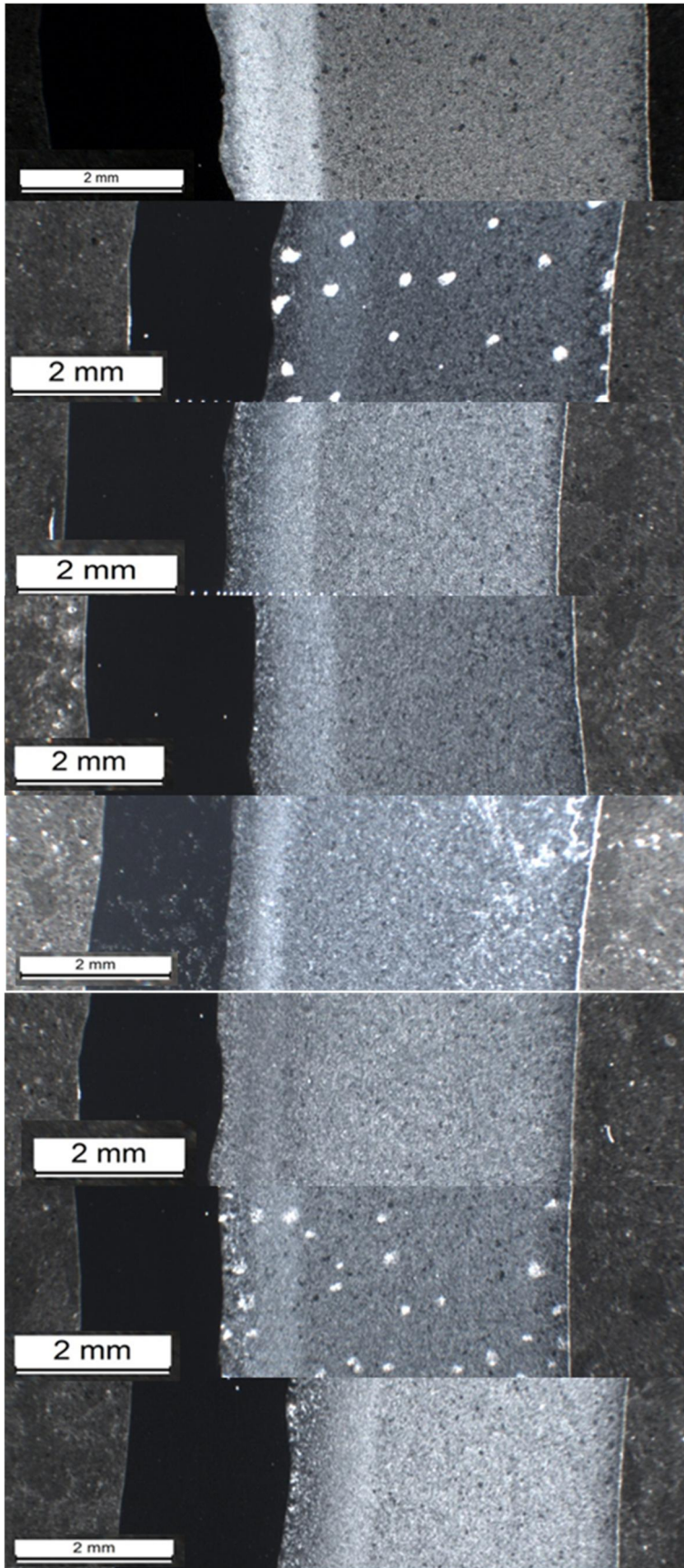
Kuva 48. P265GH, 700°C, 100 h, PLM (C=14), E



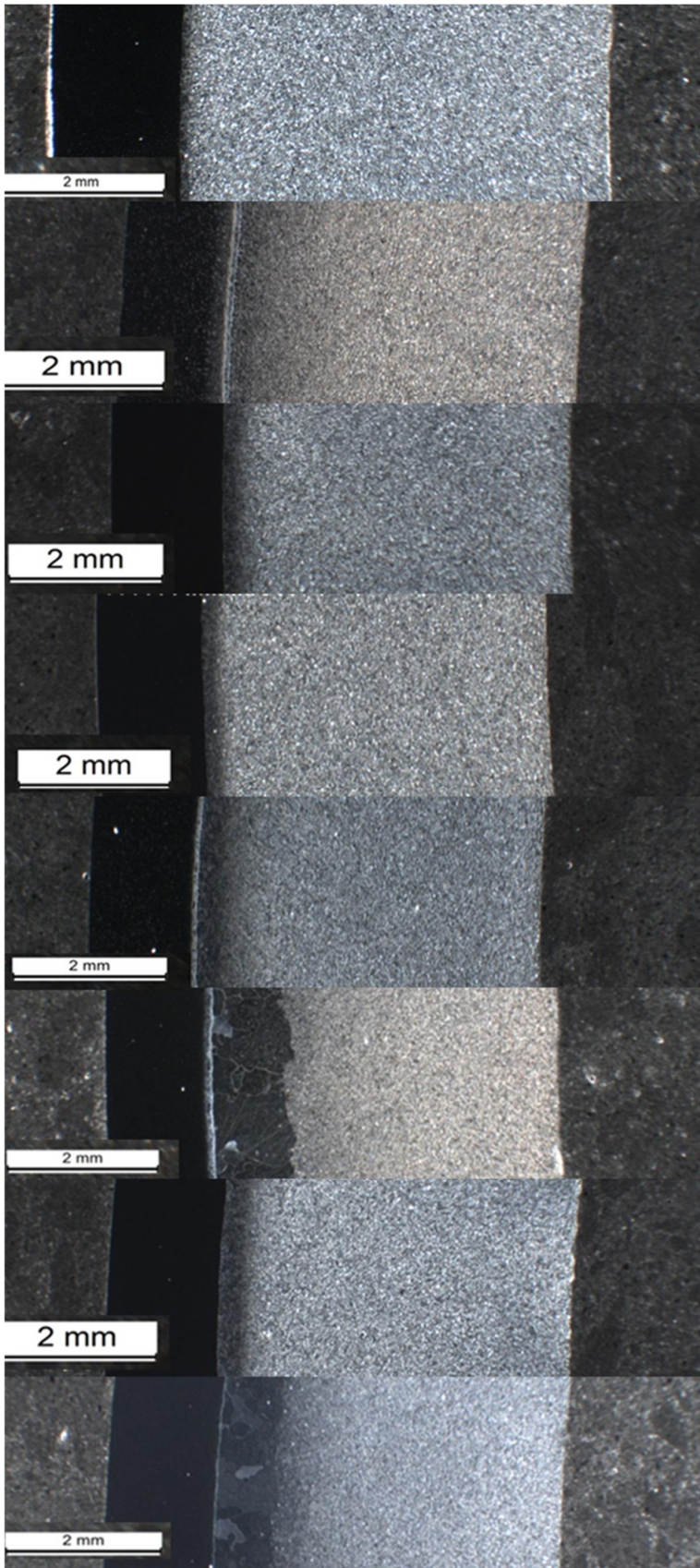
Kuva 1. Yleiskuva P235GH (309) rajapinnasta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



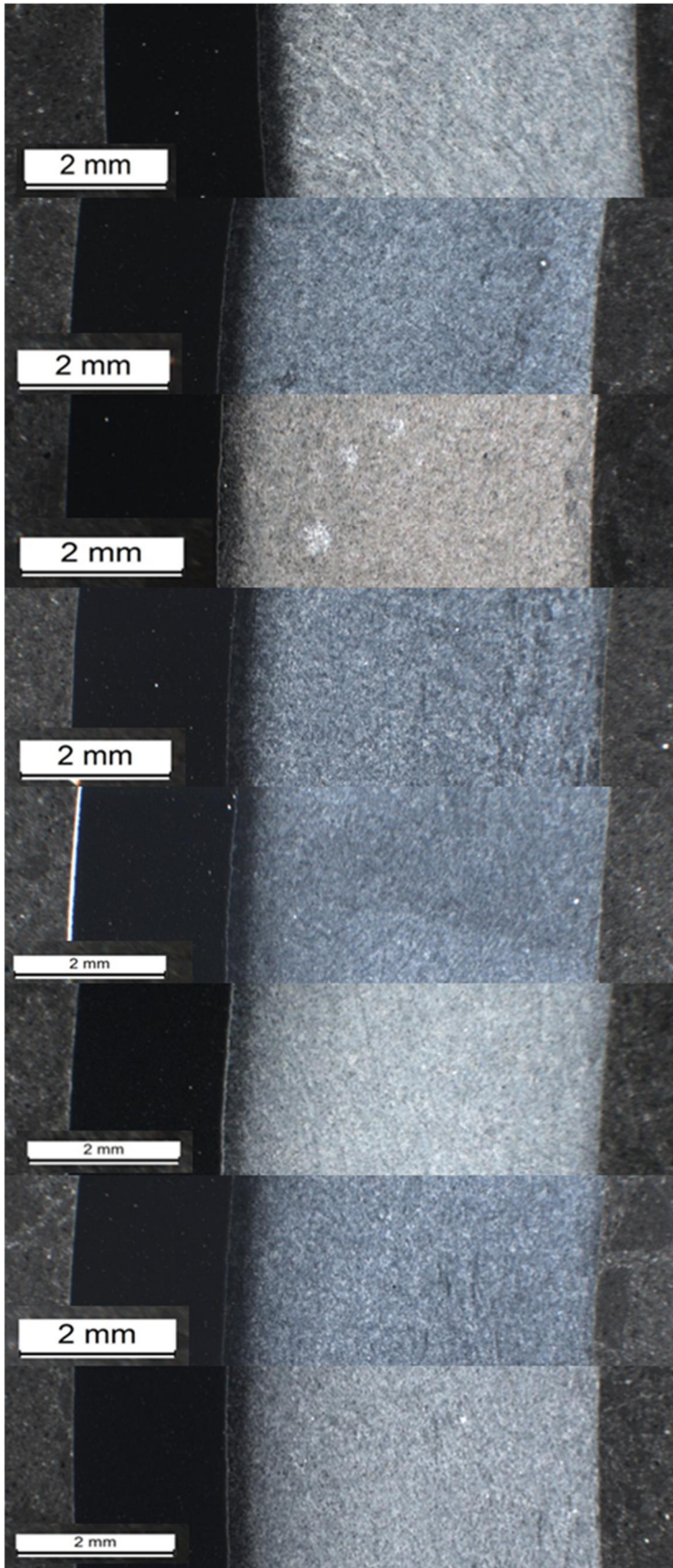
Kuva 2. 16Mo3 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



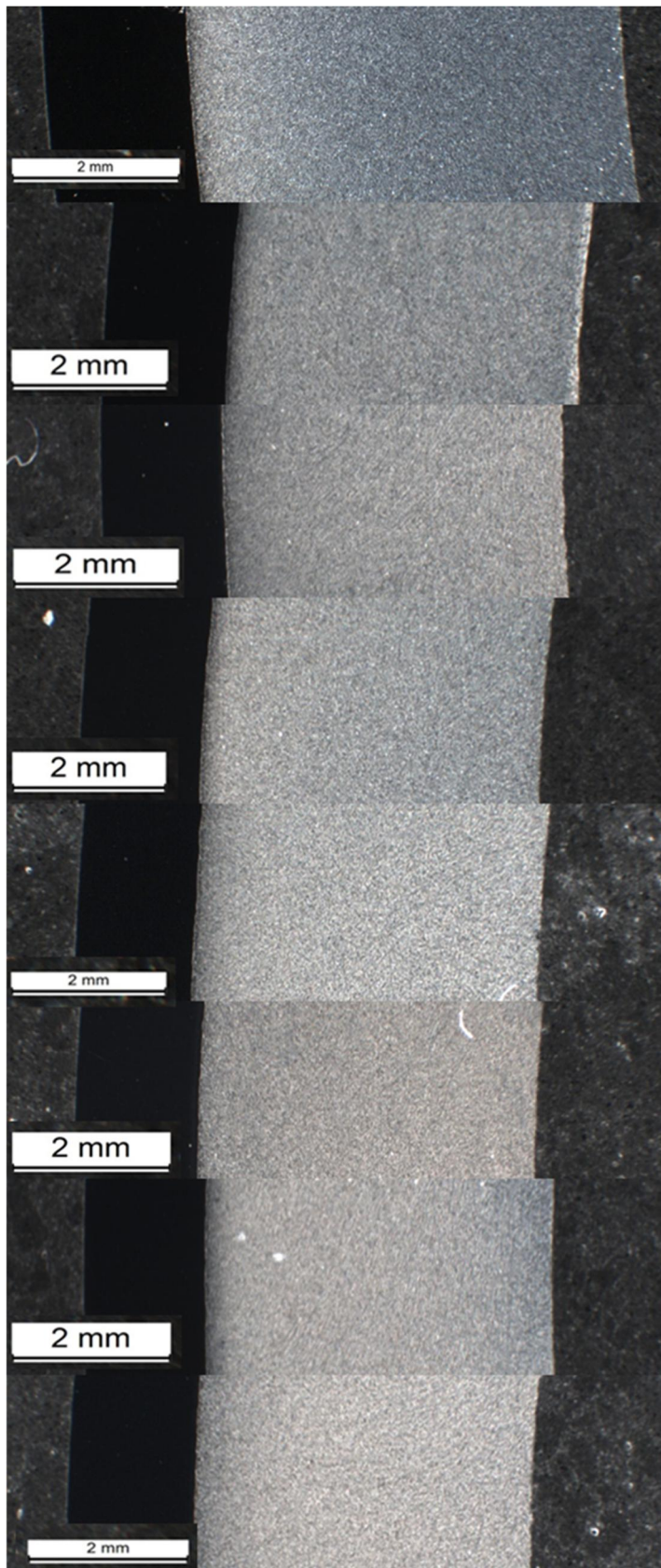
Kuva 3. 7CrMoVTiB10-10 rajapinta a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



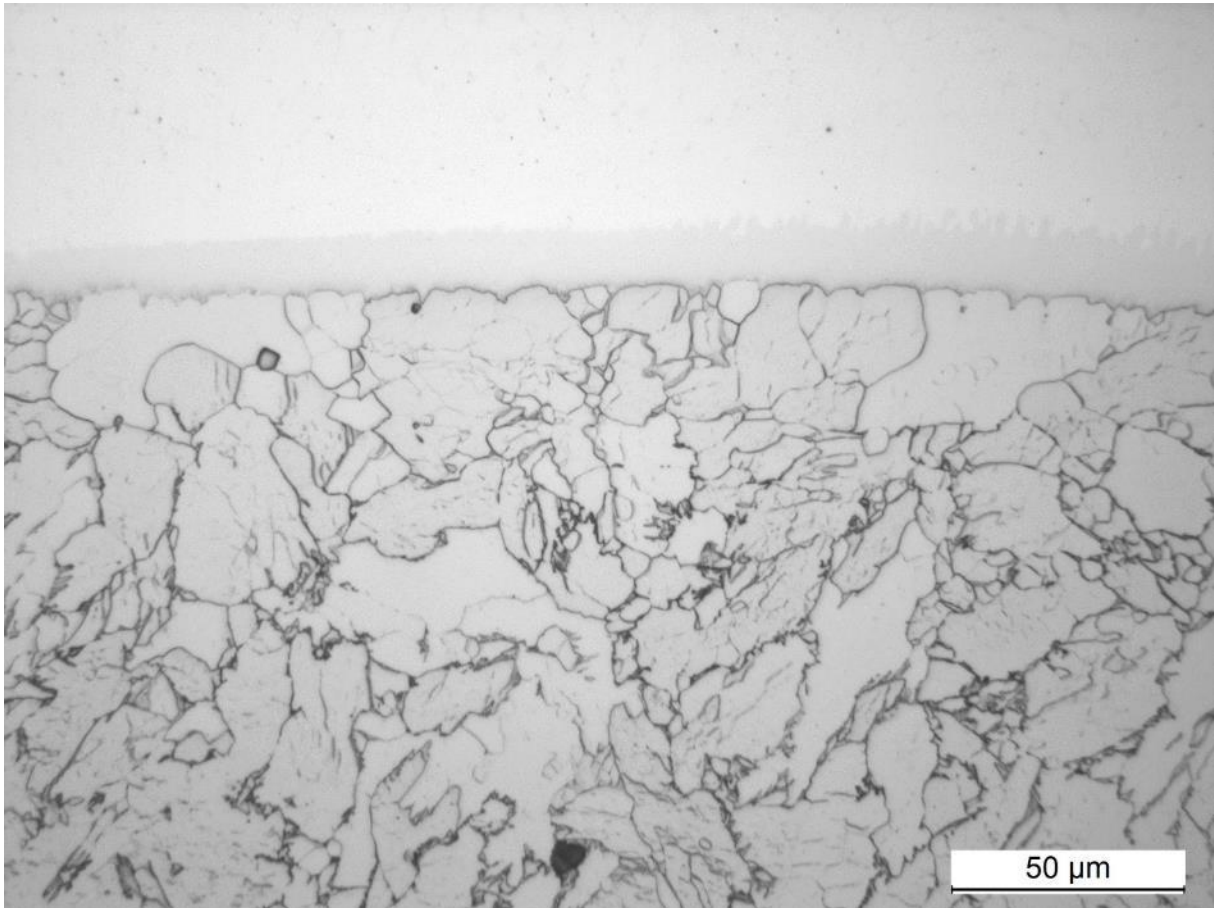
Kuva 4. 304L - St45.8 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



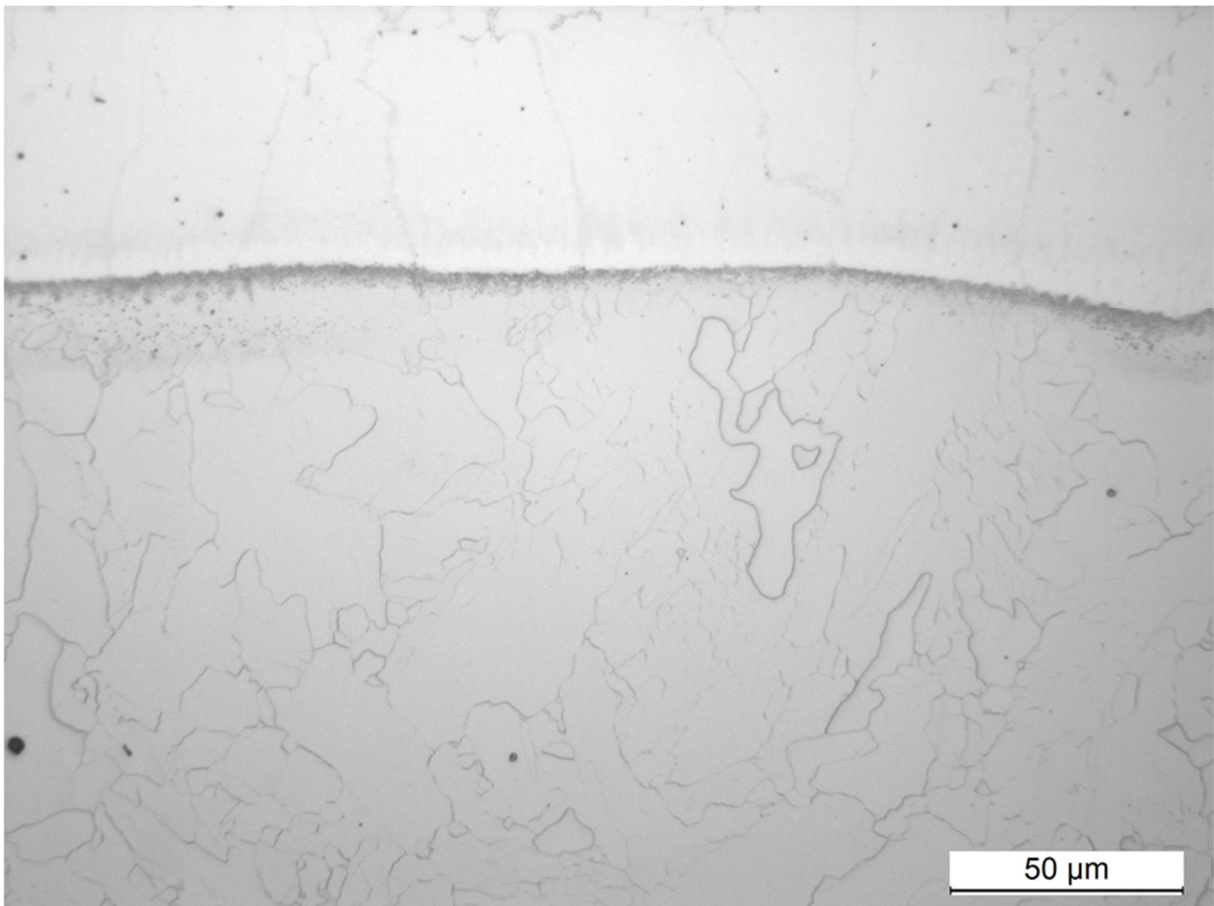
Kuva 5. San28 - T22 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



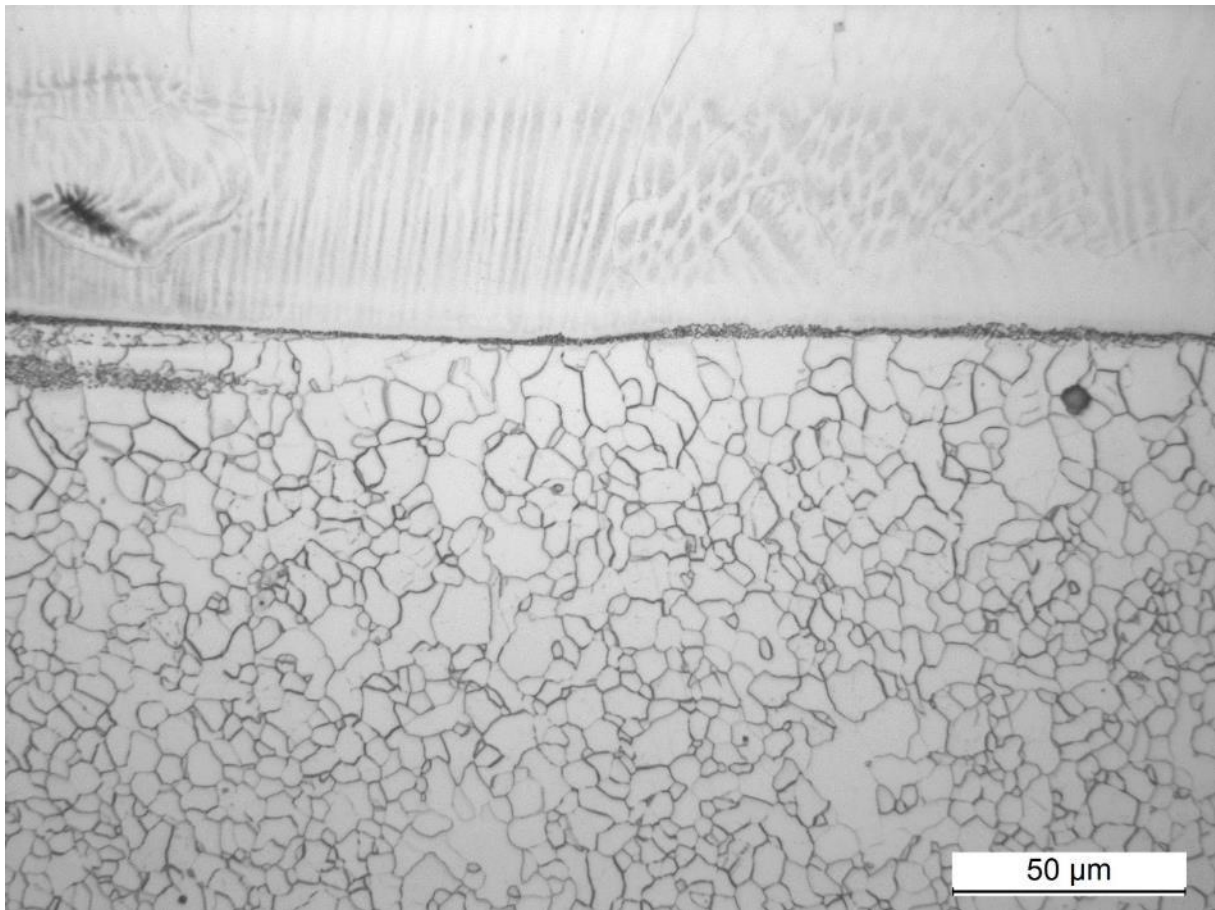
Kuva 6. San38 rajapinta; a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, d) 650°C, 10 h, e) 650°C, 10h, f) 650°C, 1000 h, g) 700°C, 10 h, h) 700°C, 100h



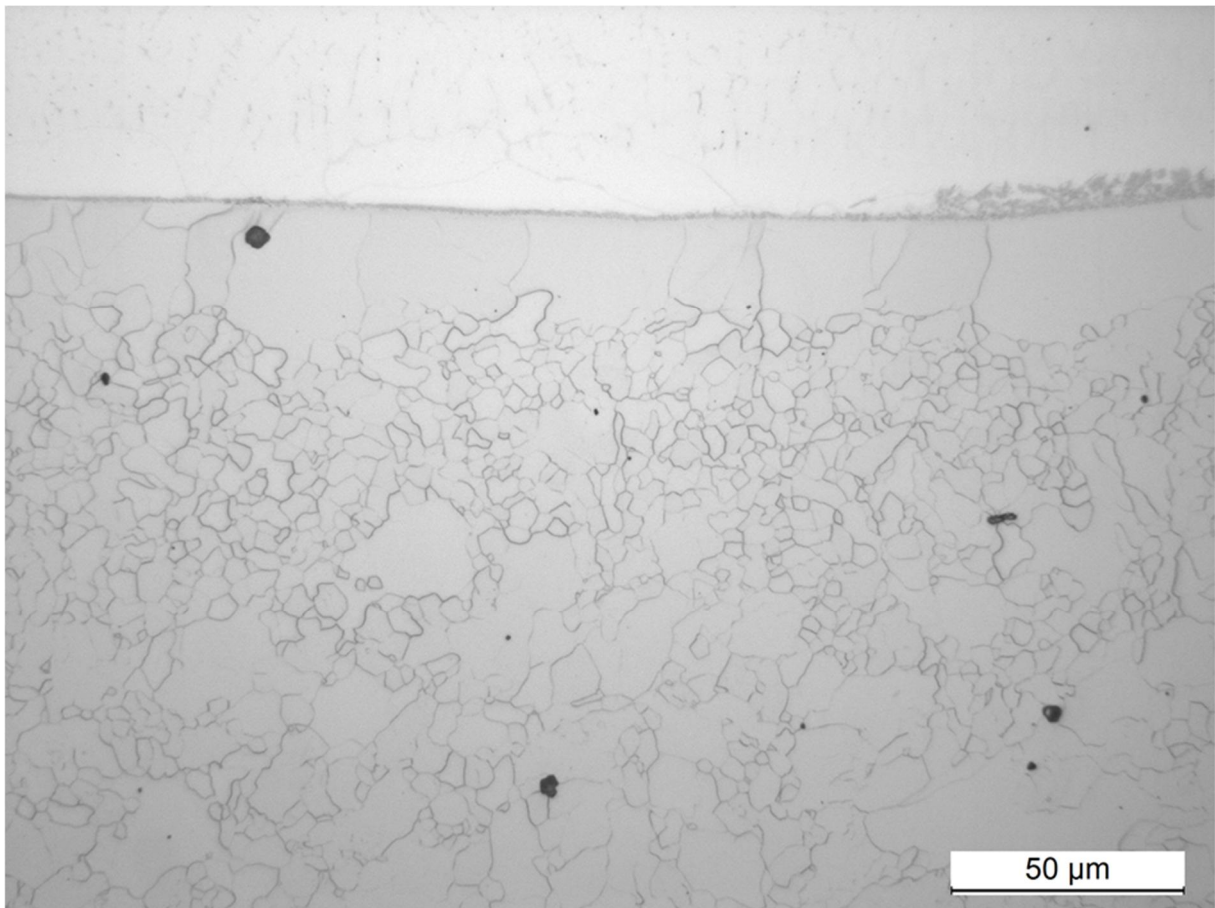
Kuva 7. 309 AZZ rajapinta, toimitustila



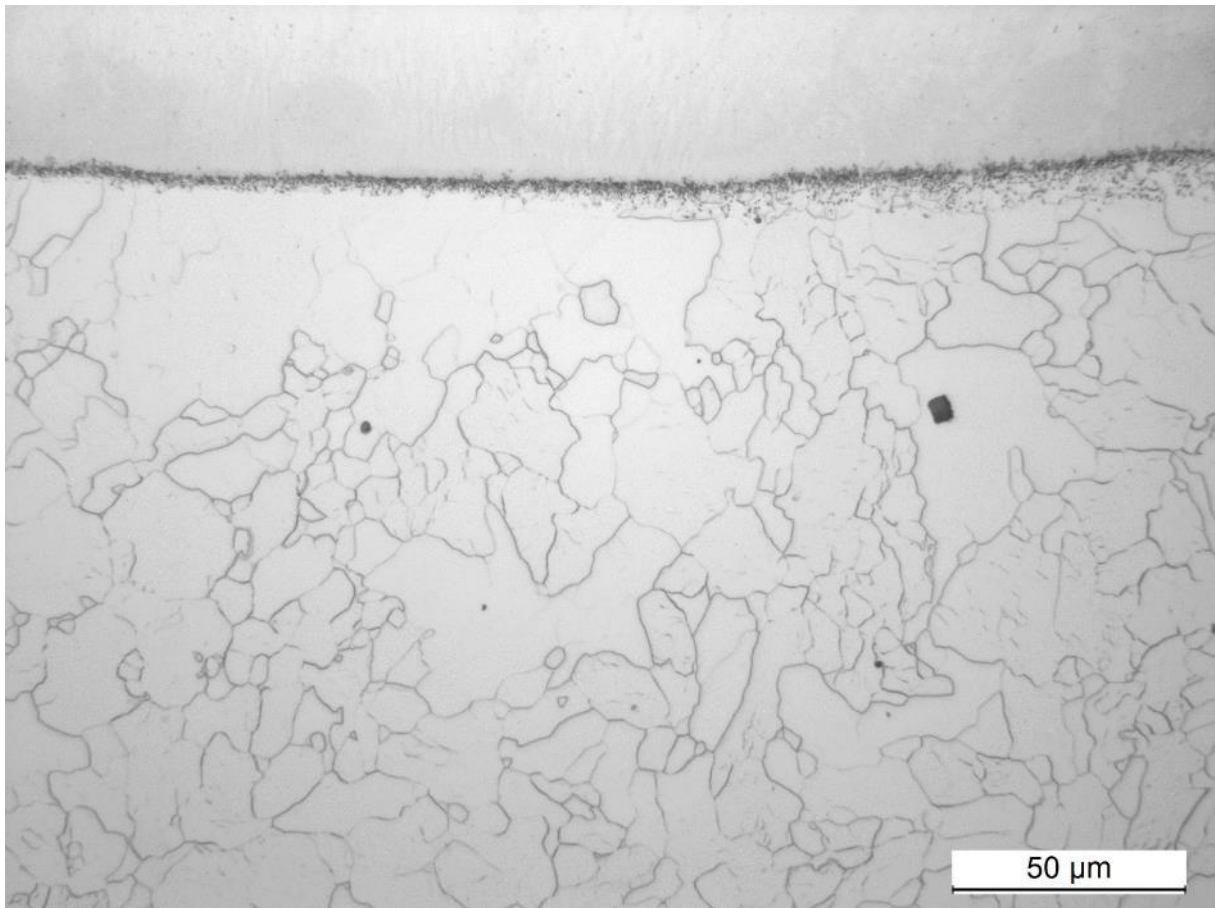
Kuva 8. 309 AZZ, 600°C, 100 h



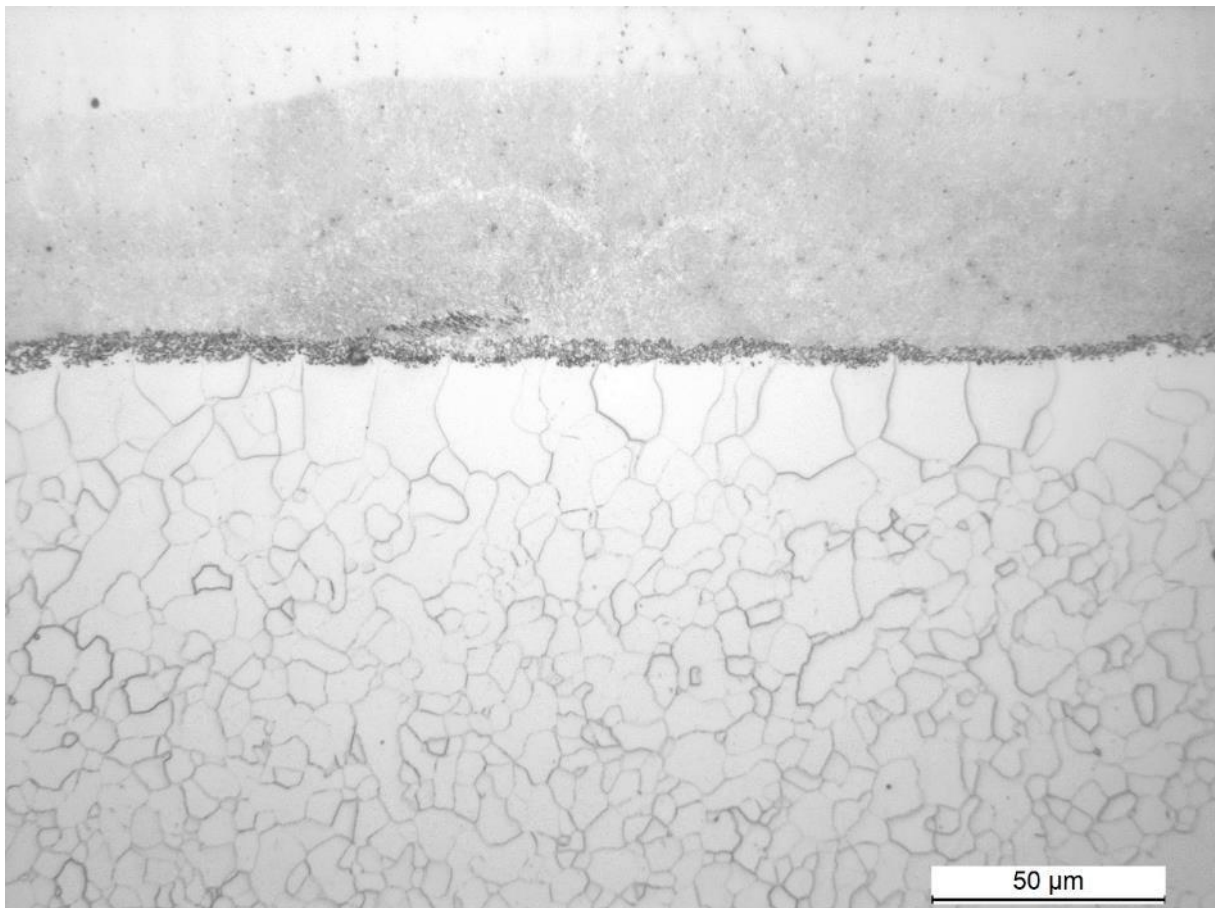
Kuva 9. 309 AZZ, 600°C, 1000 h



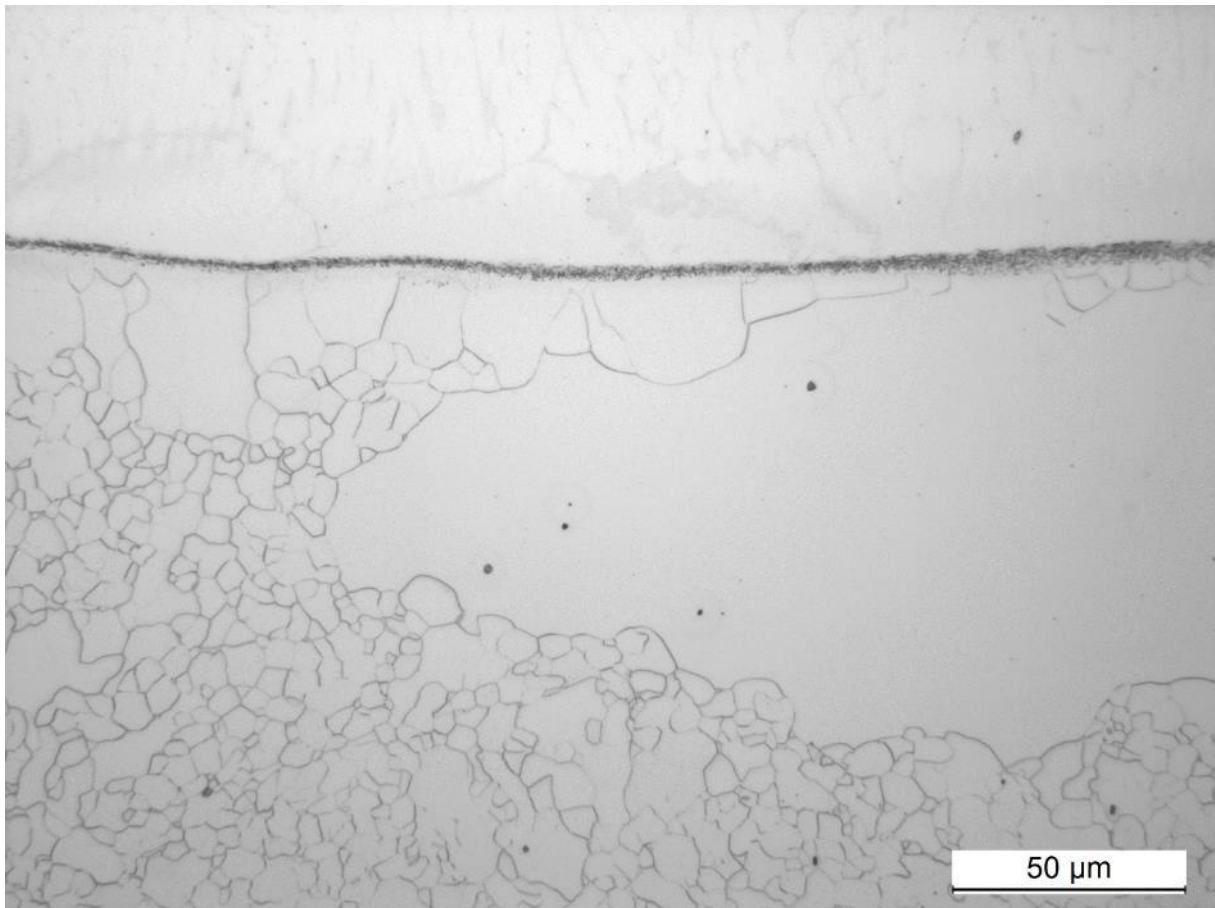
Kuva 10. 309 AZZ, 650°C, 10 h



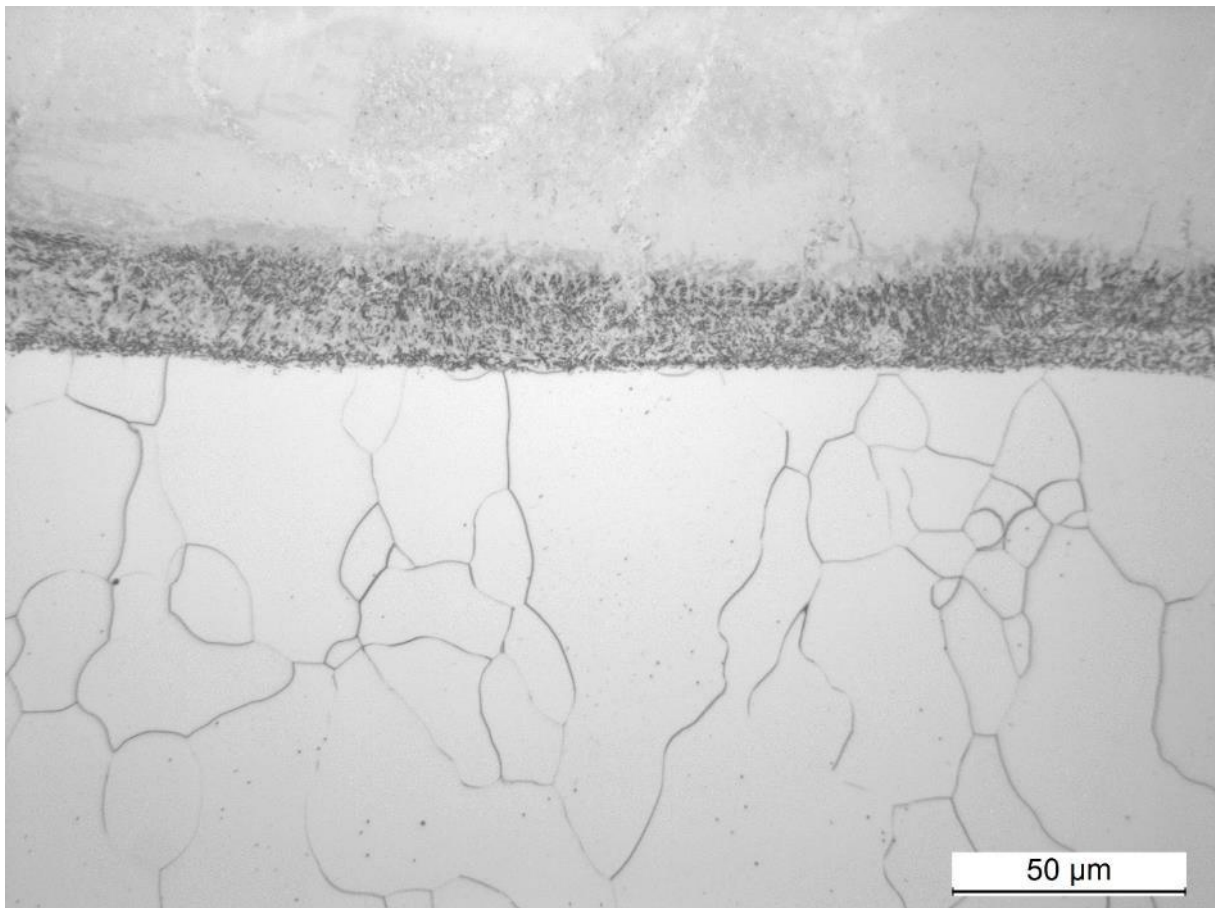
Kuva 11. 309 AZZ, 650°C, 100 h



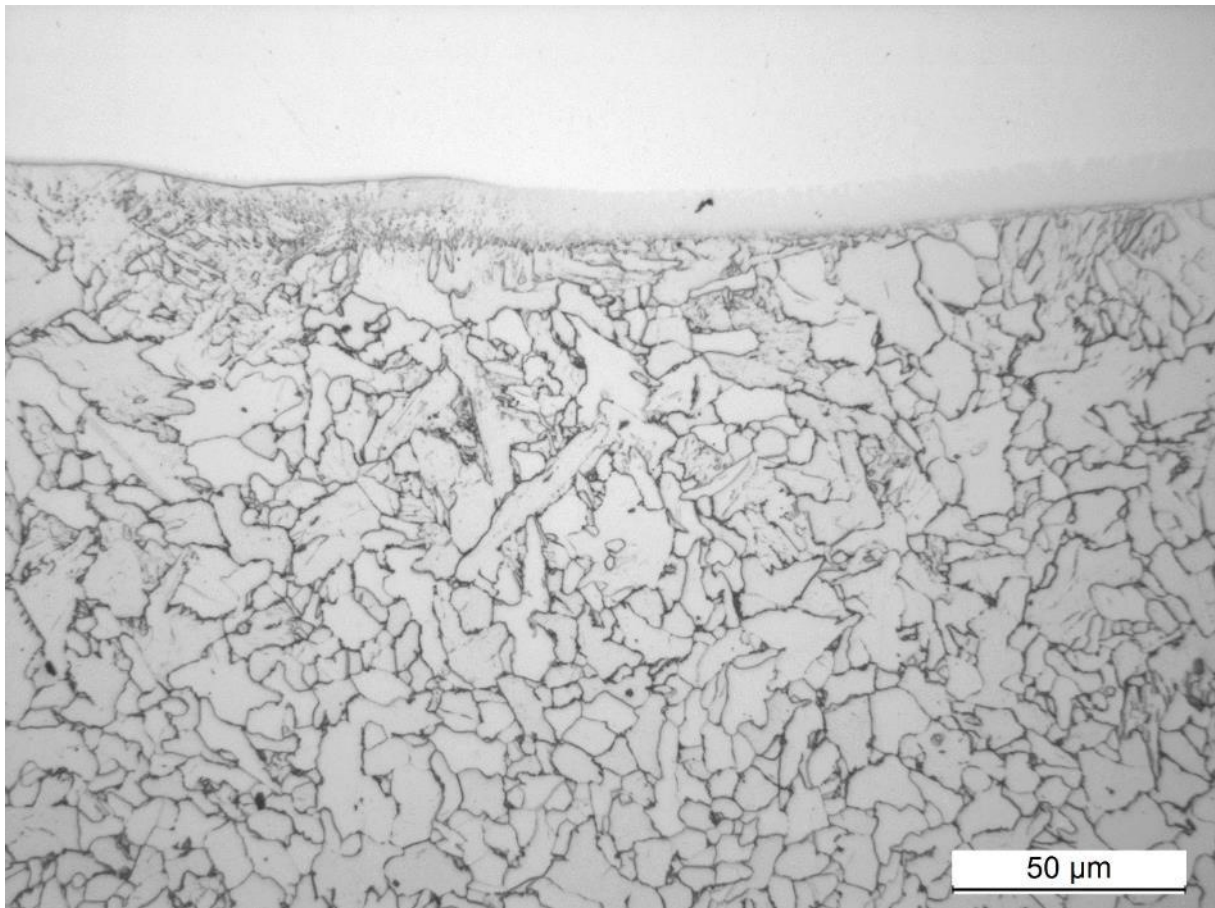
Kuva 12. 309 AZZ, 650°C, 1000 h



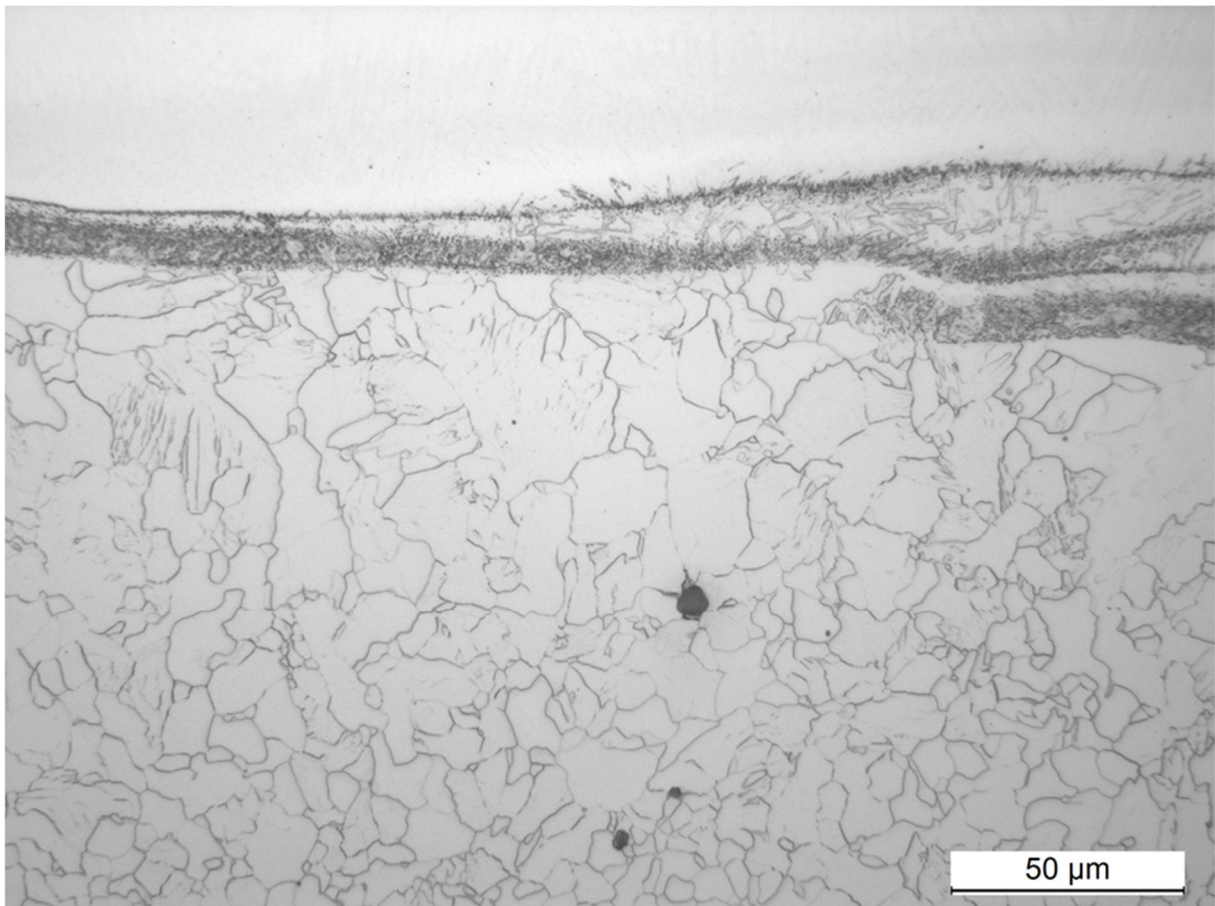
Kuva 13. 309 AZZ, 700°C, 10 h



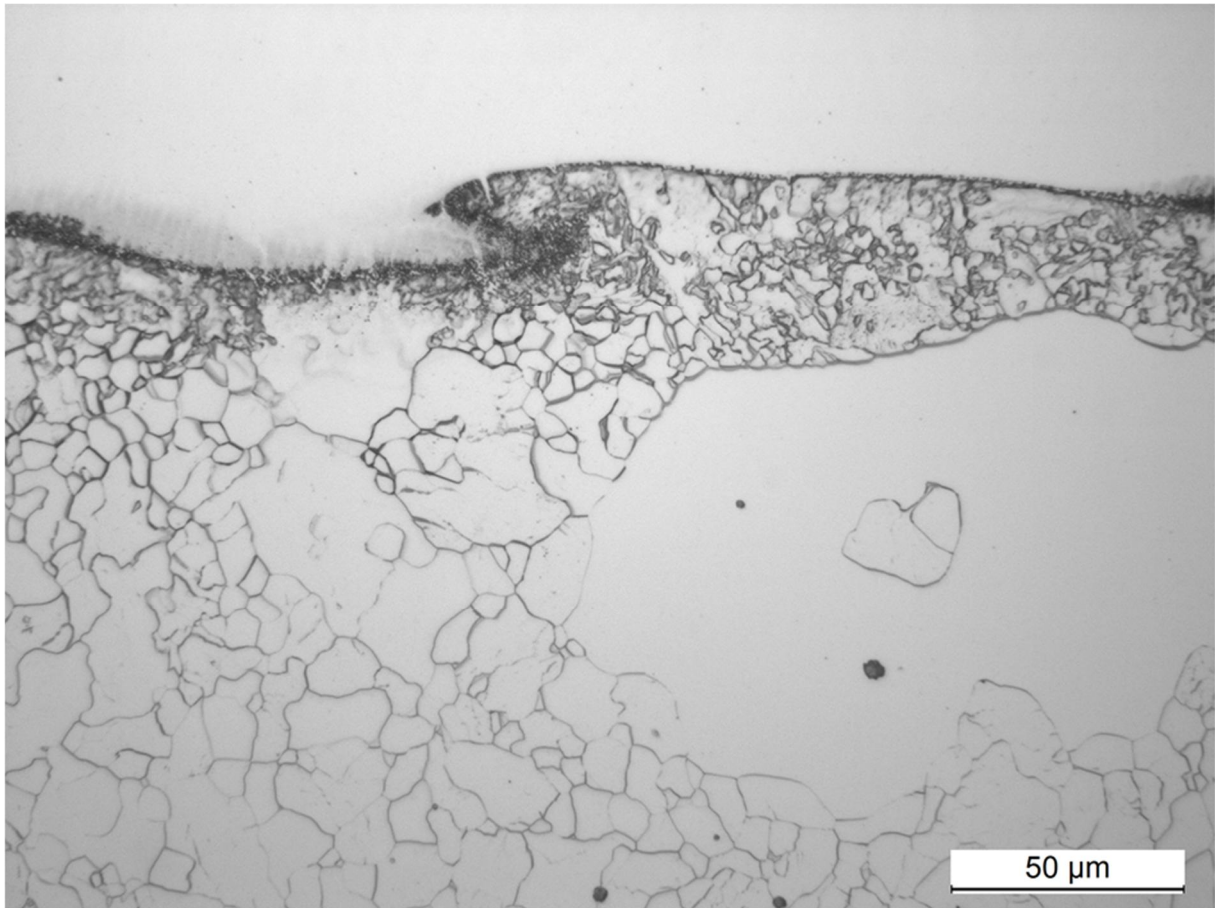
Kuva 14. 309 AZZ, 700°C, 100 h



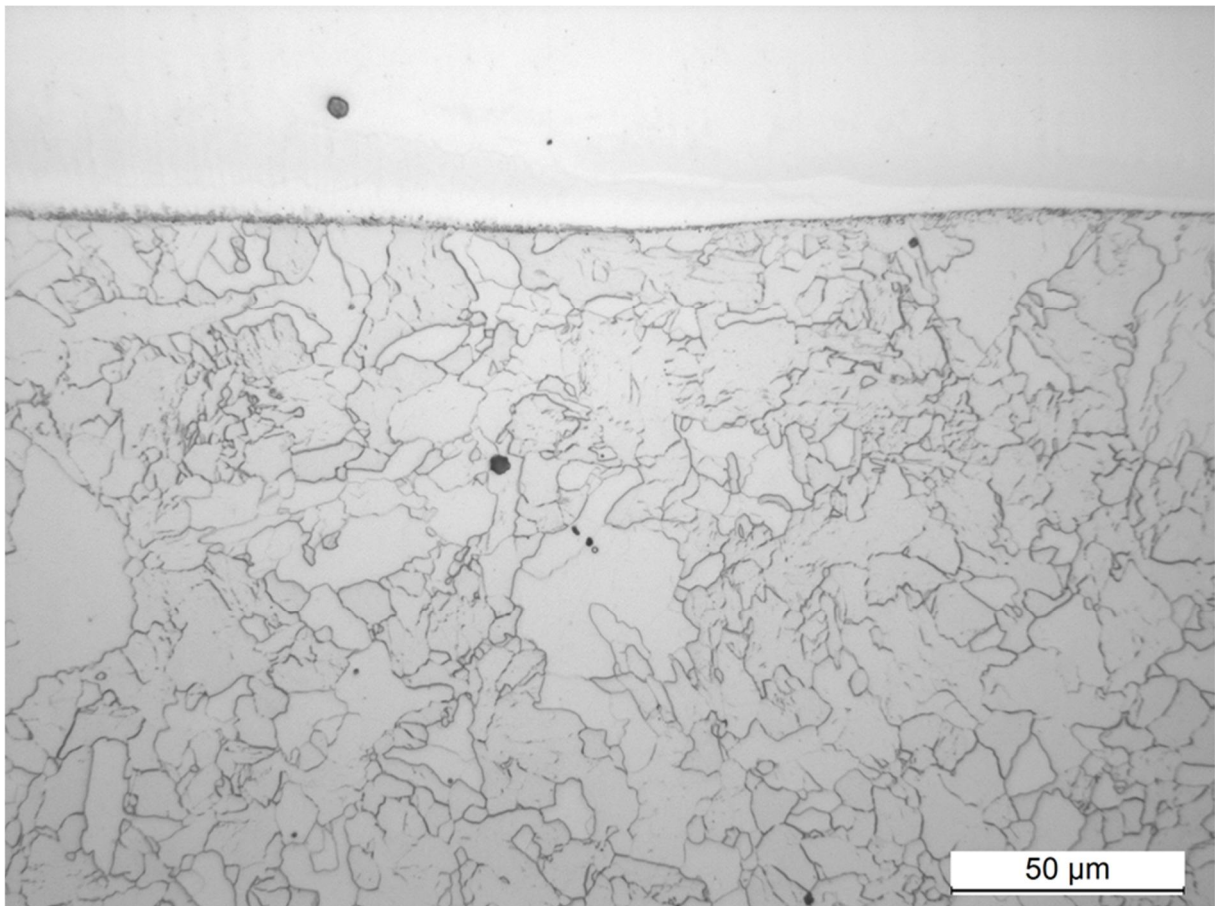
Kuva 15. IN625 AZZ rajapinta, toimitustila



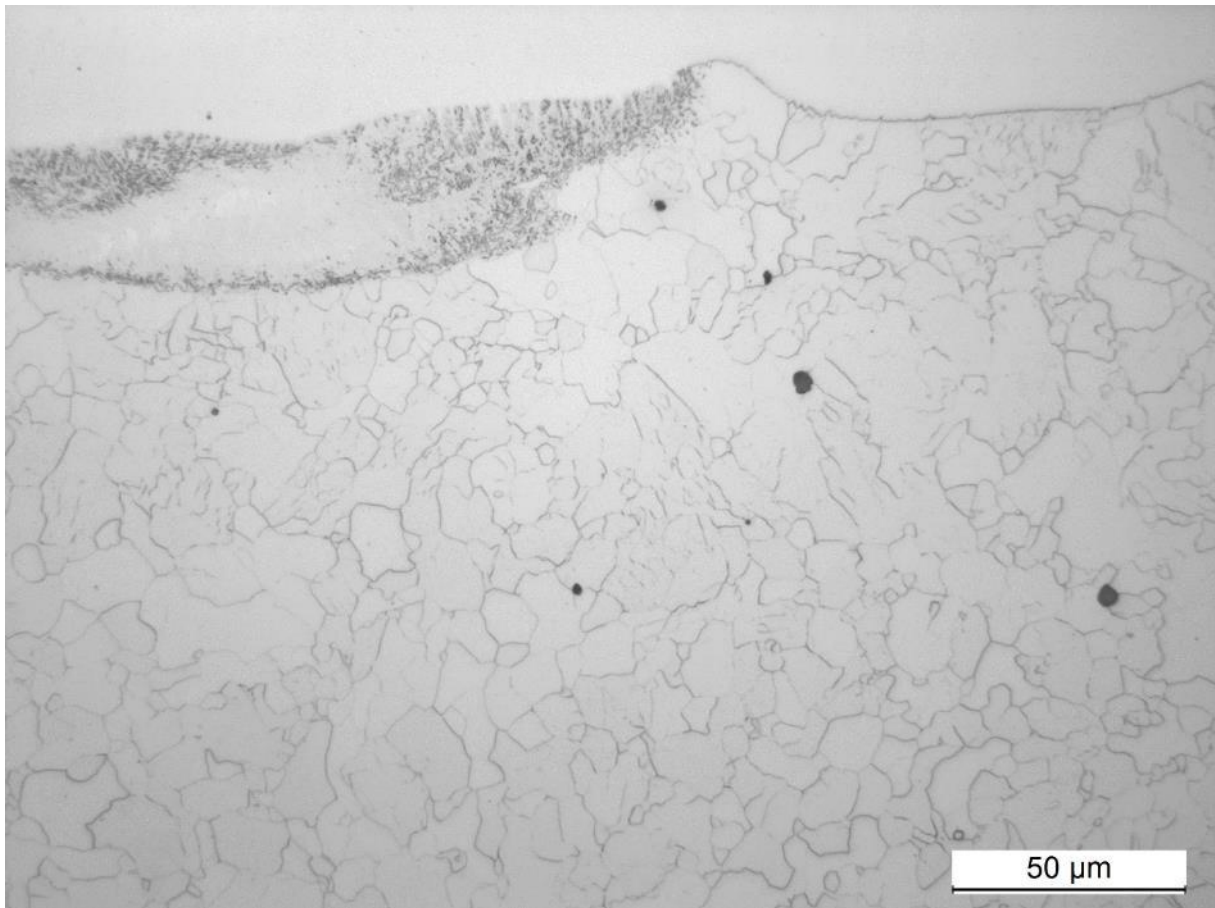
Kuva 16. IN625 AZZ rajapinta, 600°C, 100 h



Kuva 17. IN625 AZZ rajapinta, 600°C, 1000 h



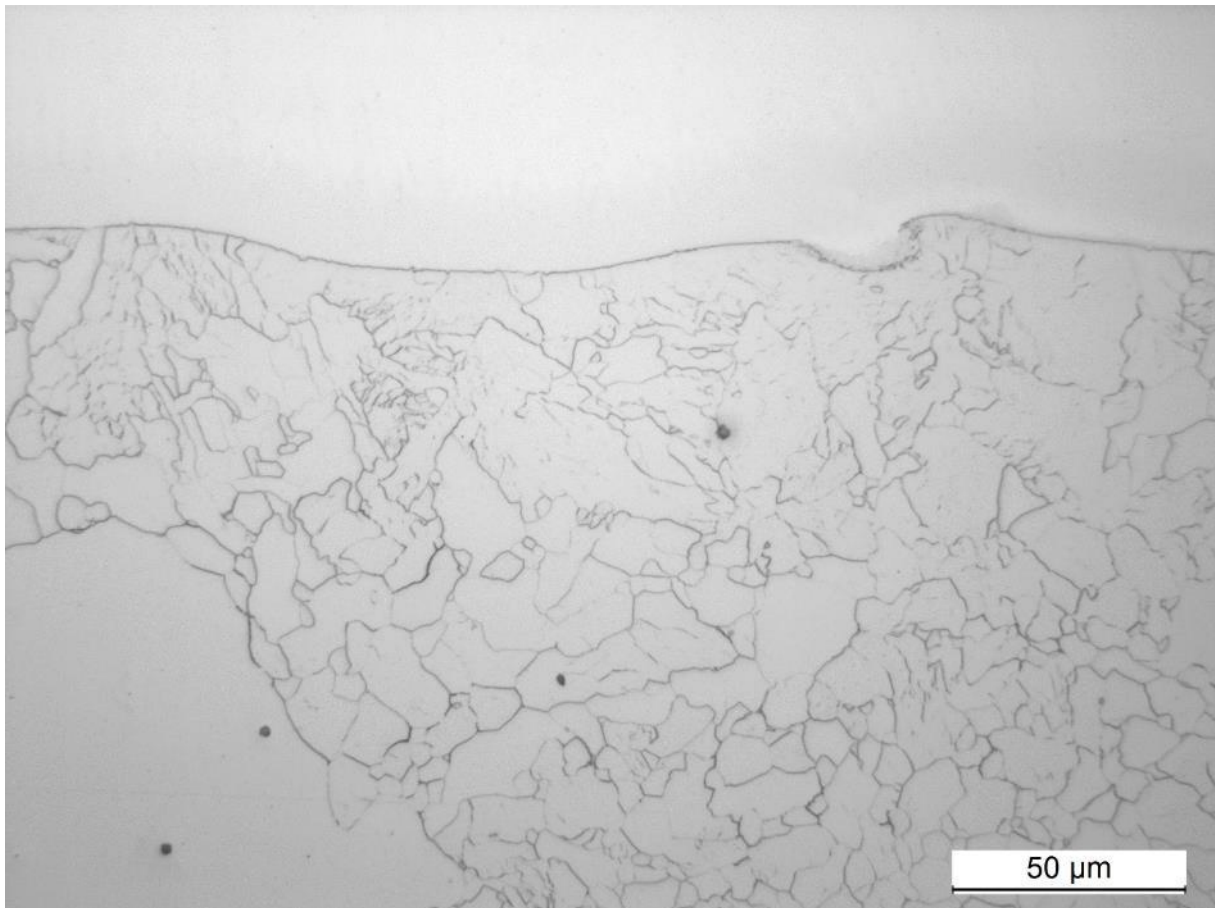
Kuva 18. IN625 AZZ, 650°C, 10 h



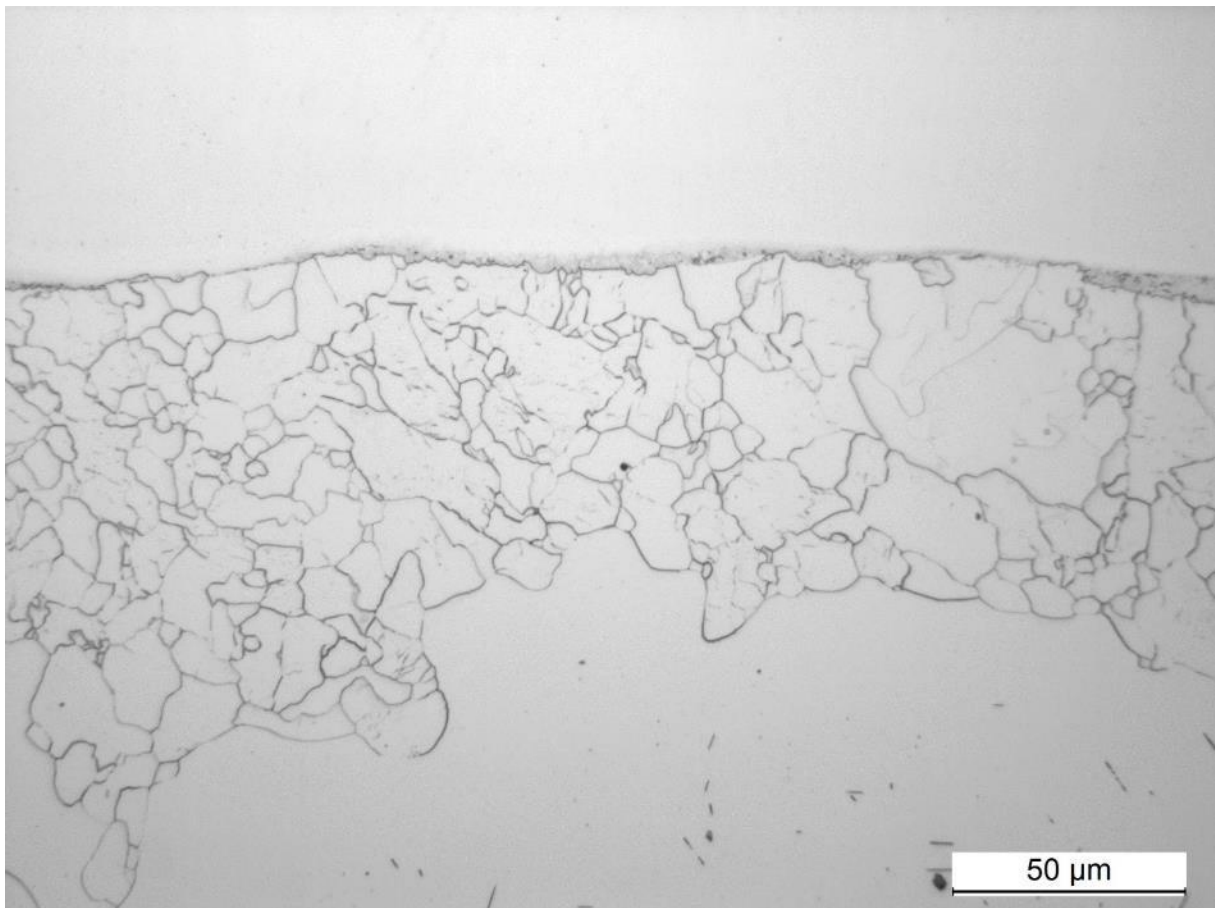
Kuva 19. IN625 AZZ, 650°C, 100 h



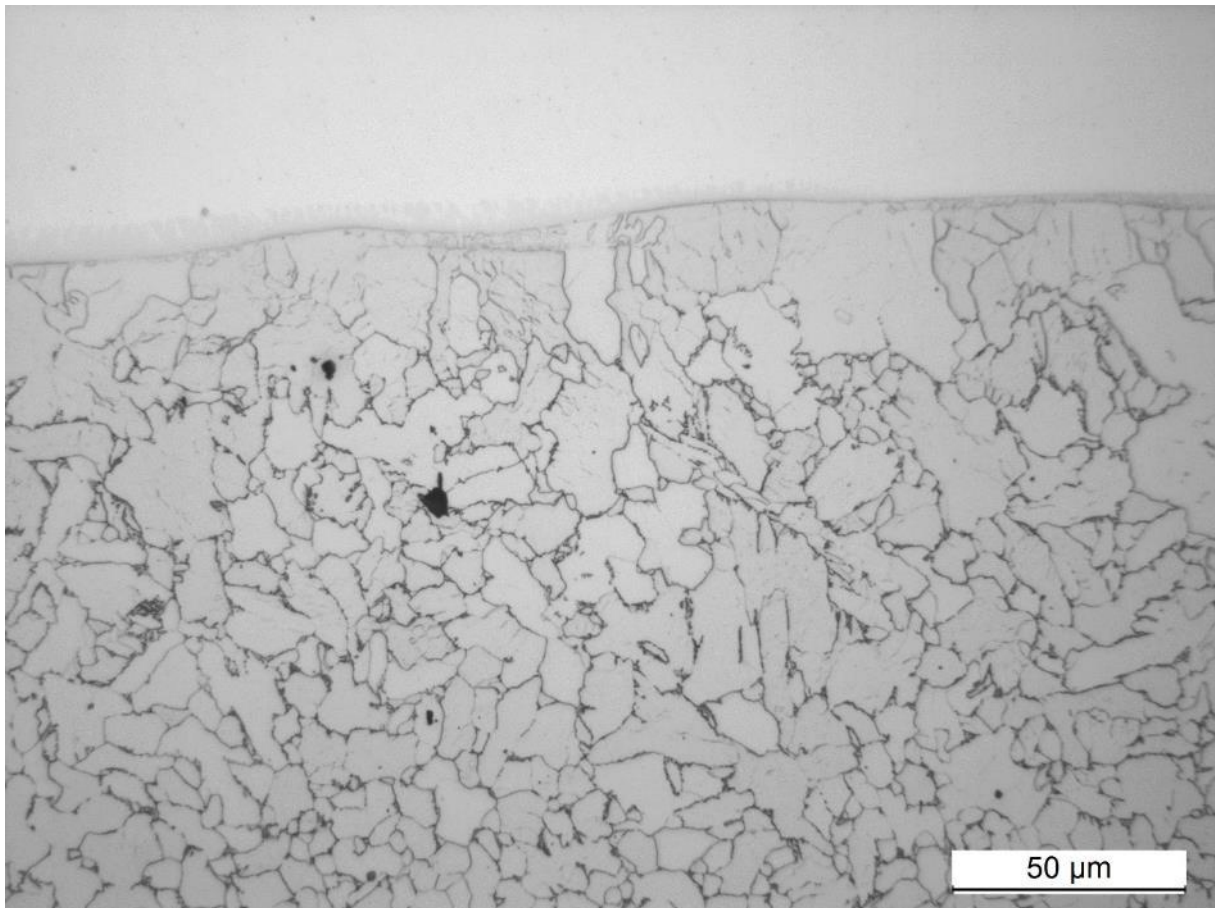
Kuva 20. IN625 AZZ, 650°C, 1000 h



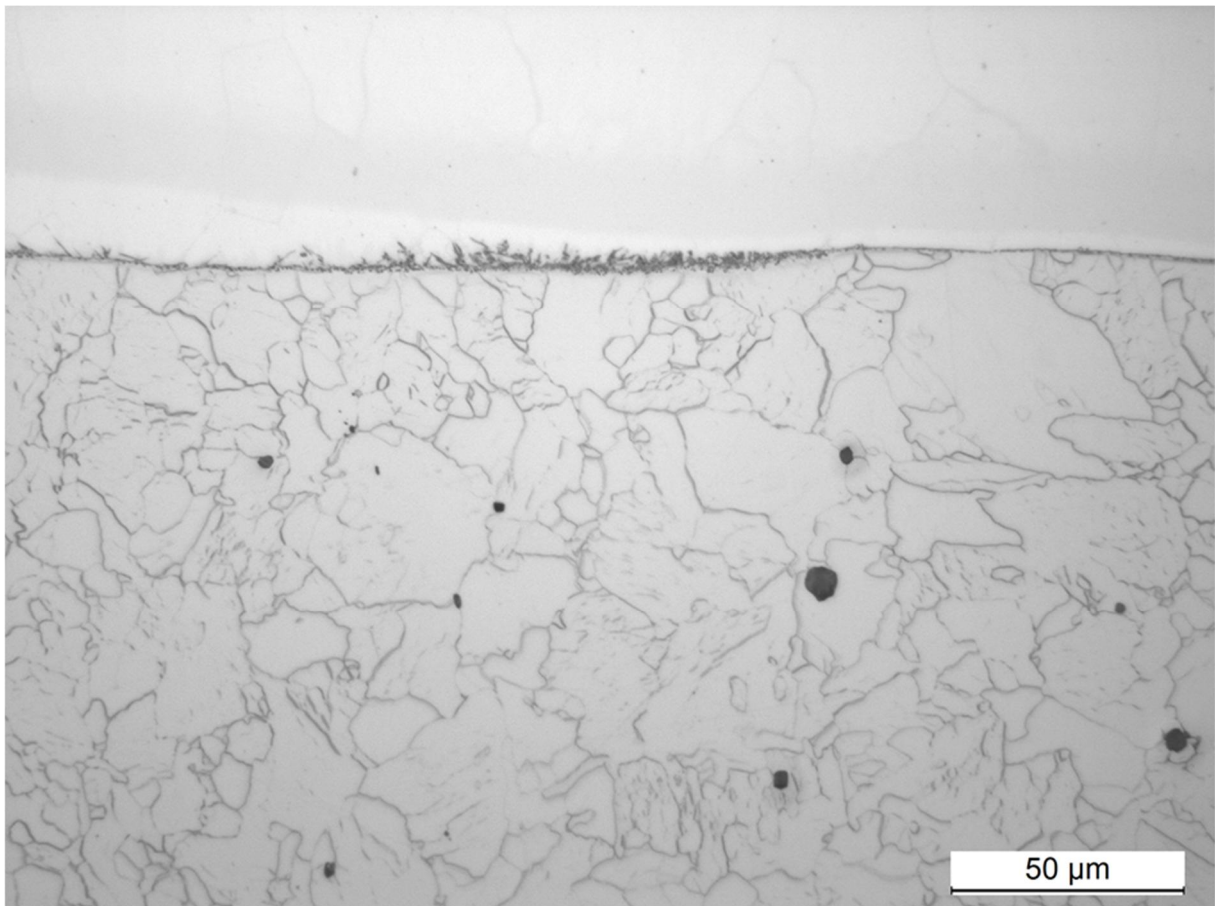
Kuva 21. IN625 AZZ, 700°C, 10 h



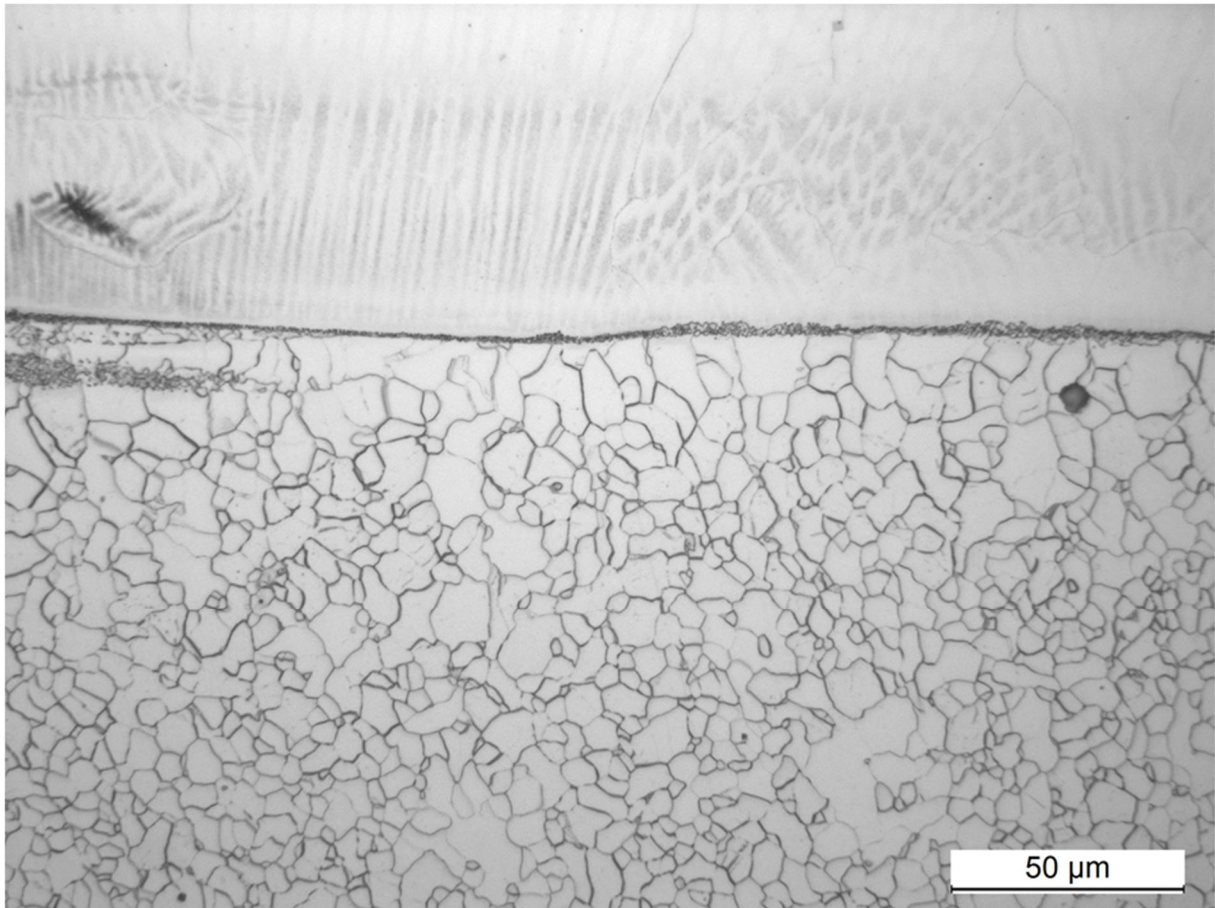
Kuva 22. IN625 AZZ, 700°C, 100 h



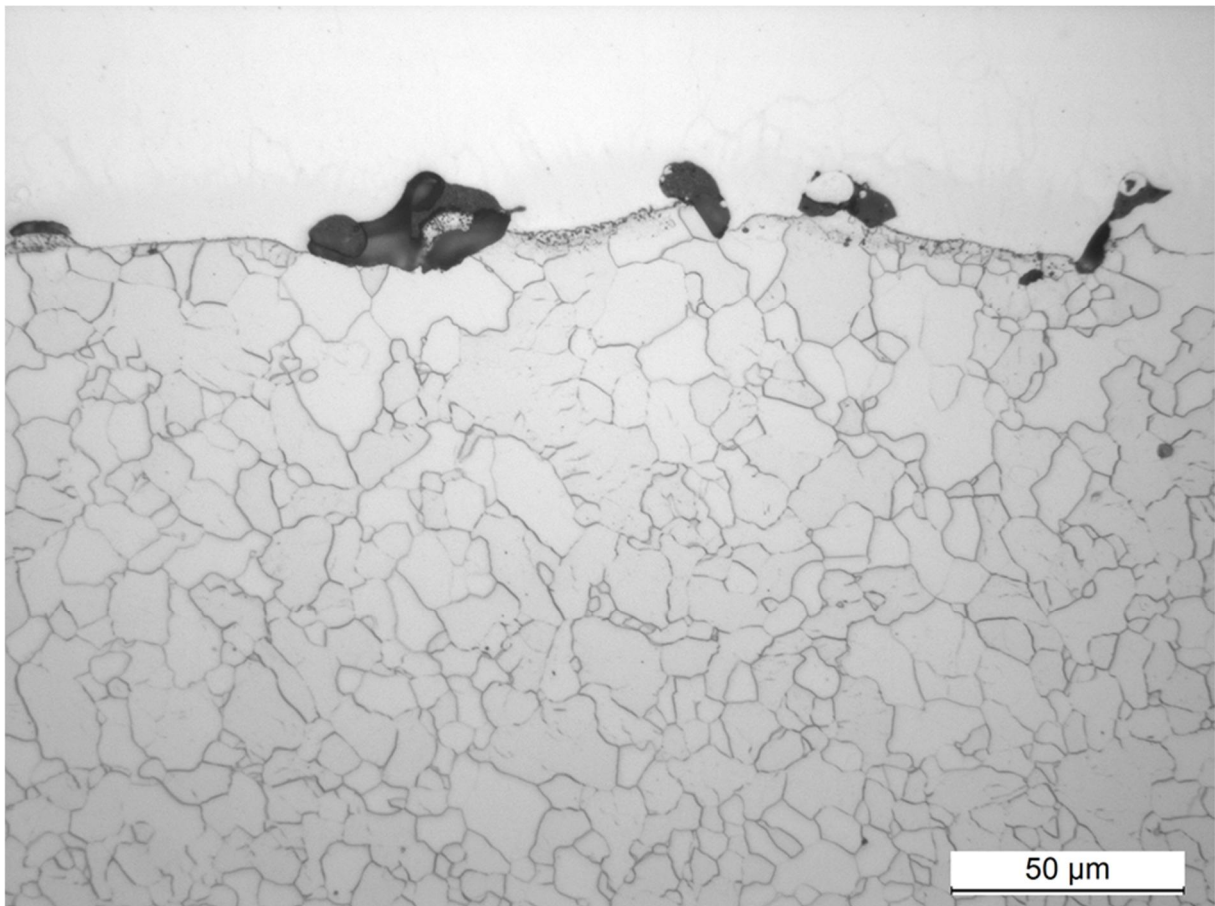
Kuva 23. IN825 AZZ rajapinta, toimitustila



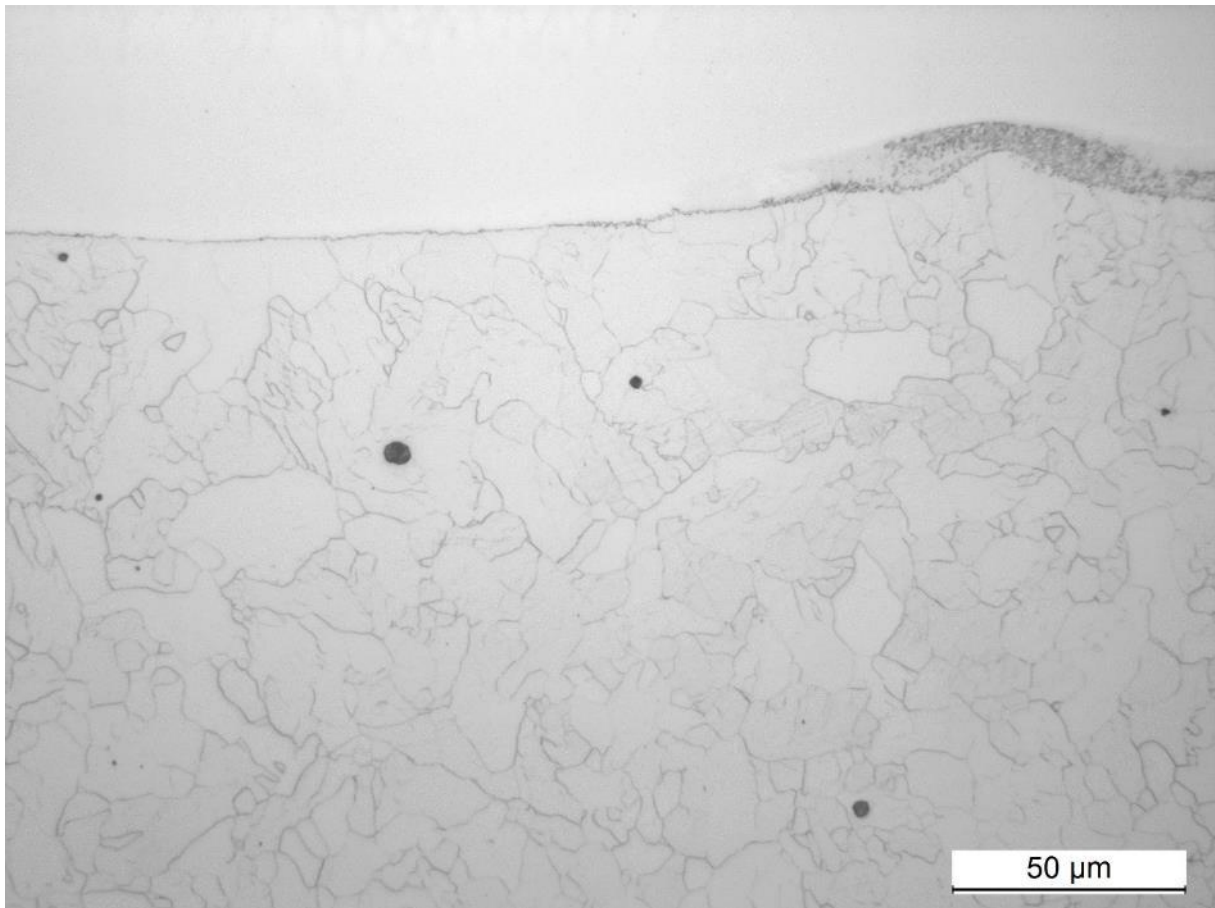
Kuva 24. IN825 AZZ rajapinta, 600°C, 100 h



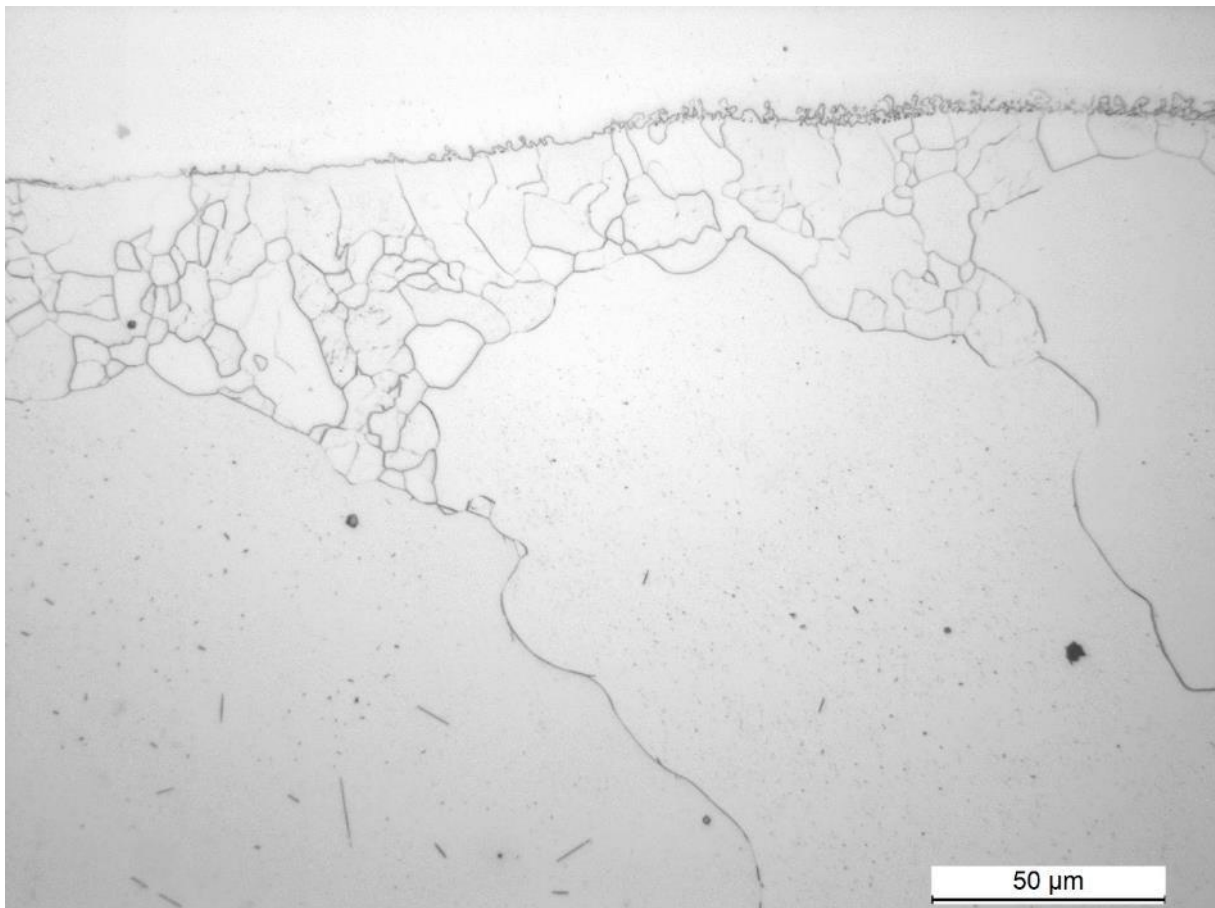
Kuva 25. IN825 AZZ rajapinta, 600°C, 1000 h



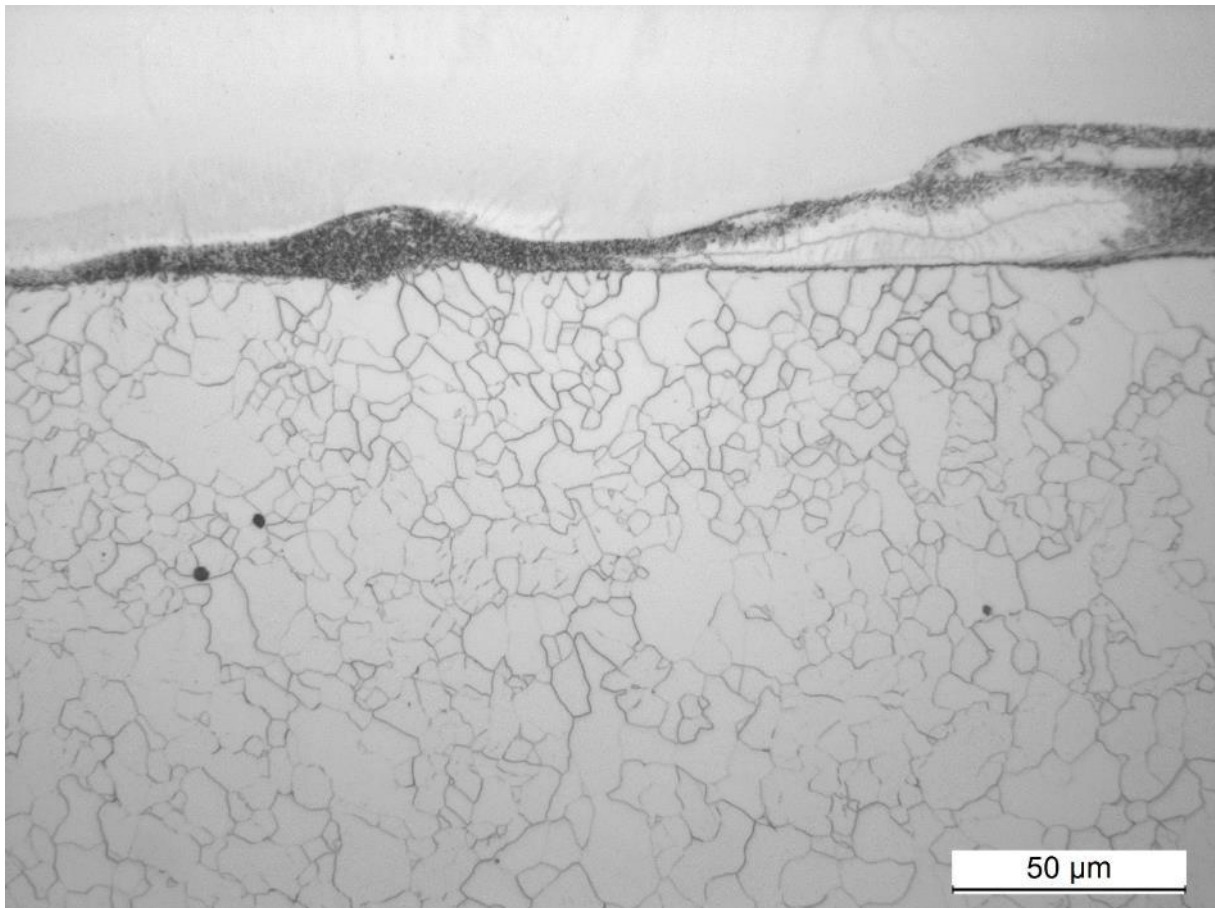
Kuva 26. IN825 AZZ, 650°C, 10 h



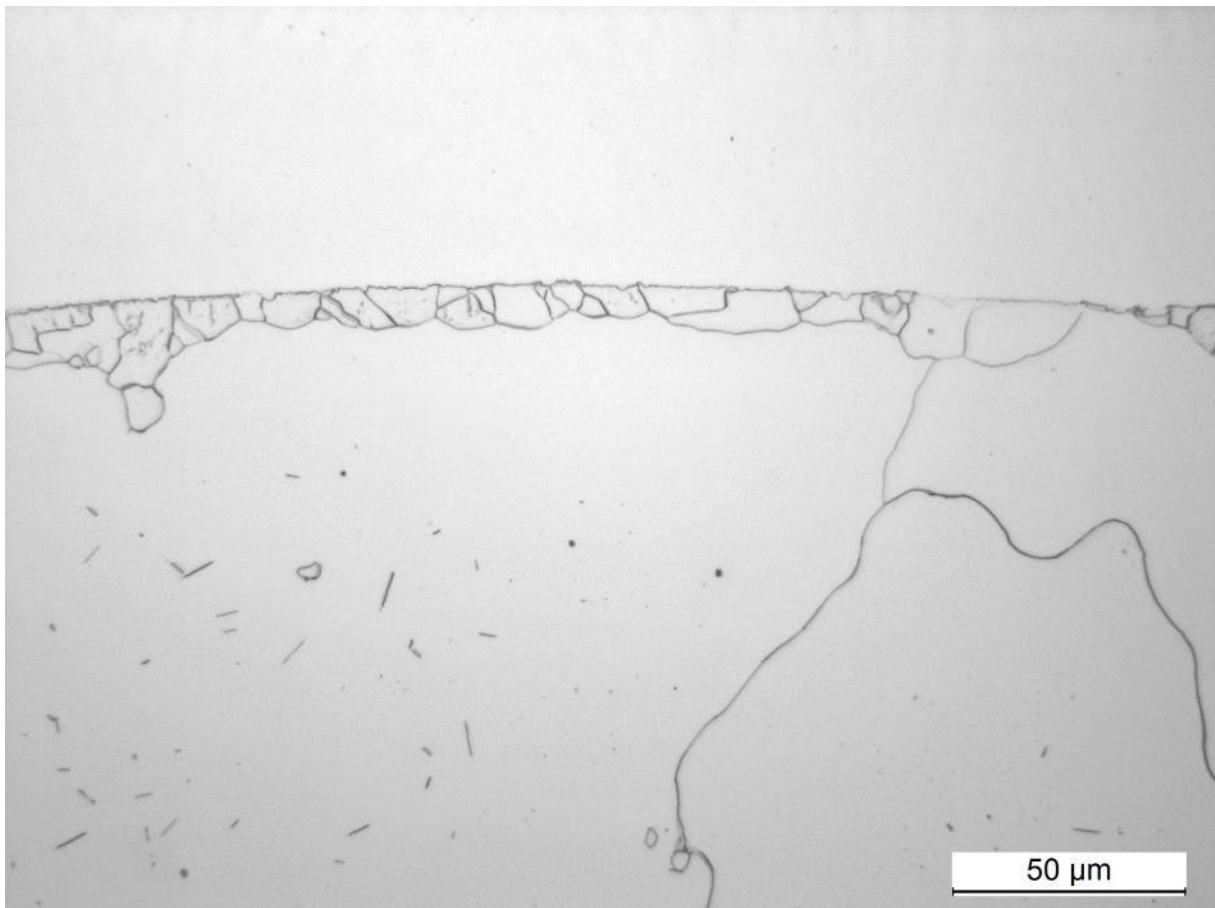
Kuva 27. IN825 AZZ, 650°C, 100 h



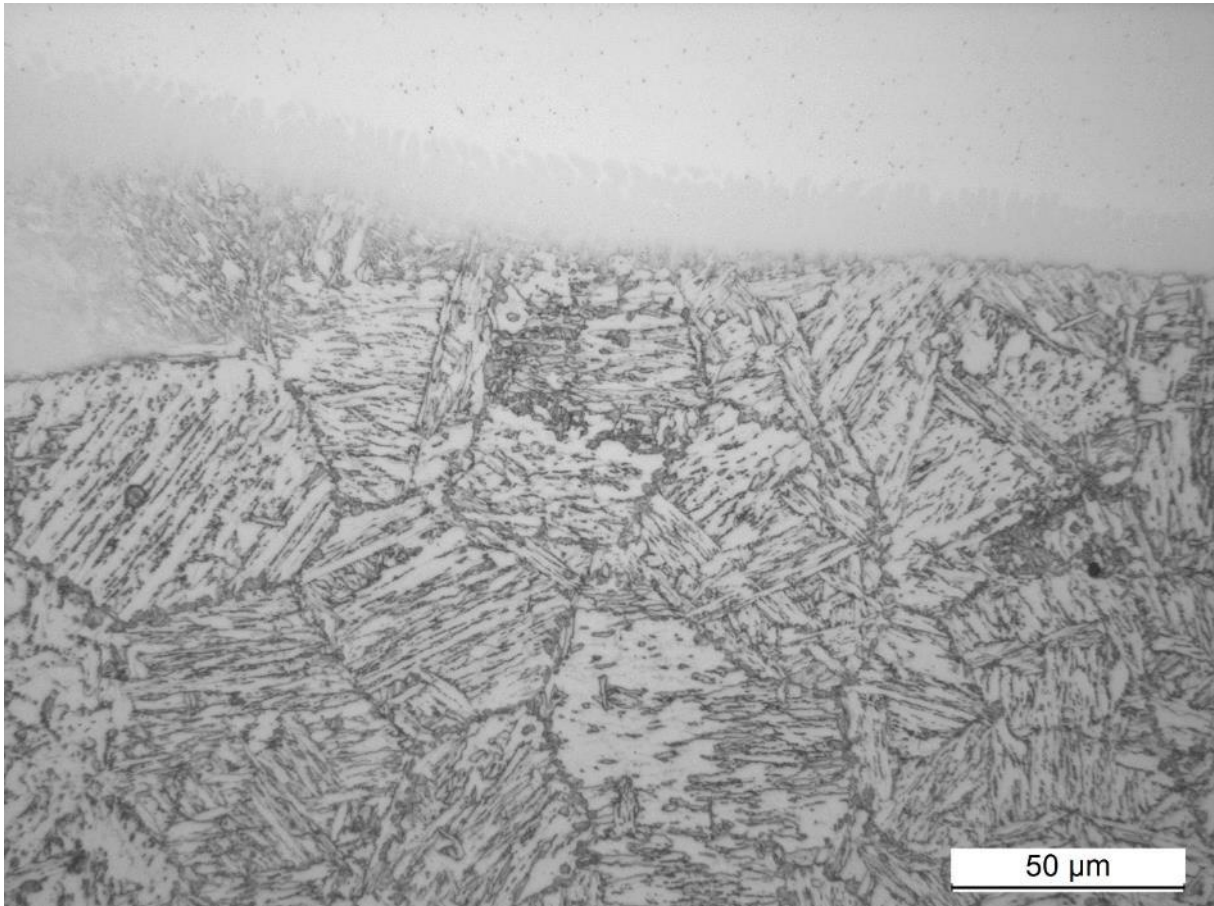
Kuva 28. IN825 AZZ, 650°C, 1000 h



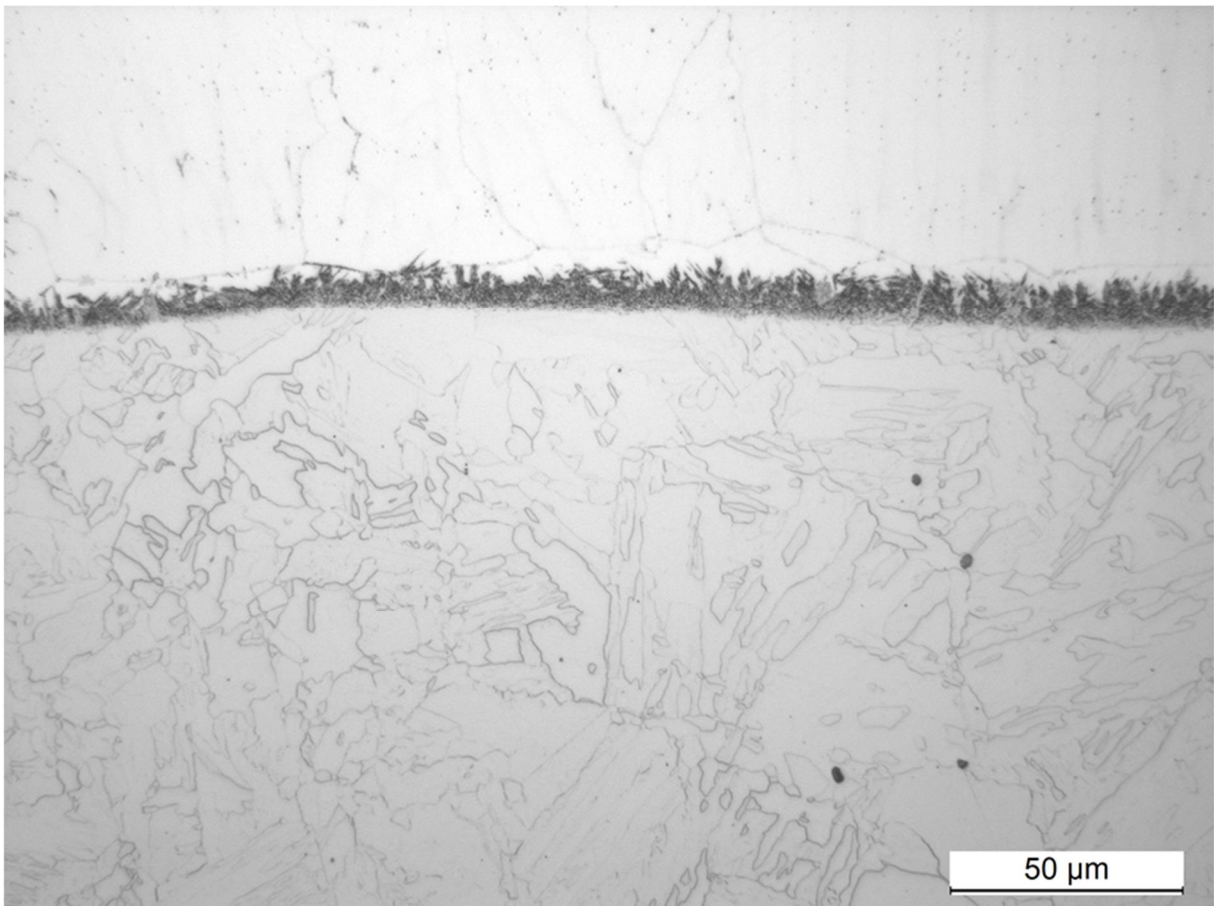
Kuva 29. IN825 AZZ, 700°C, 10 h



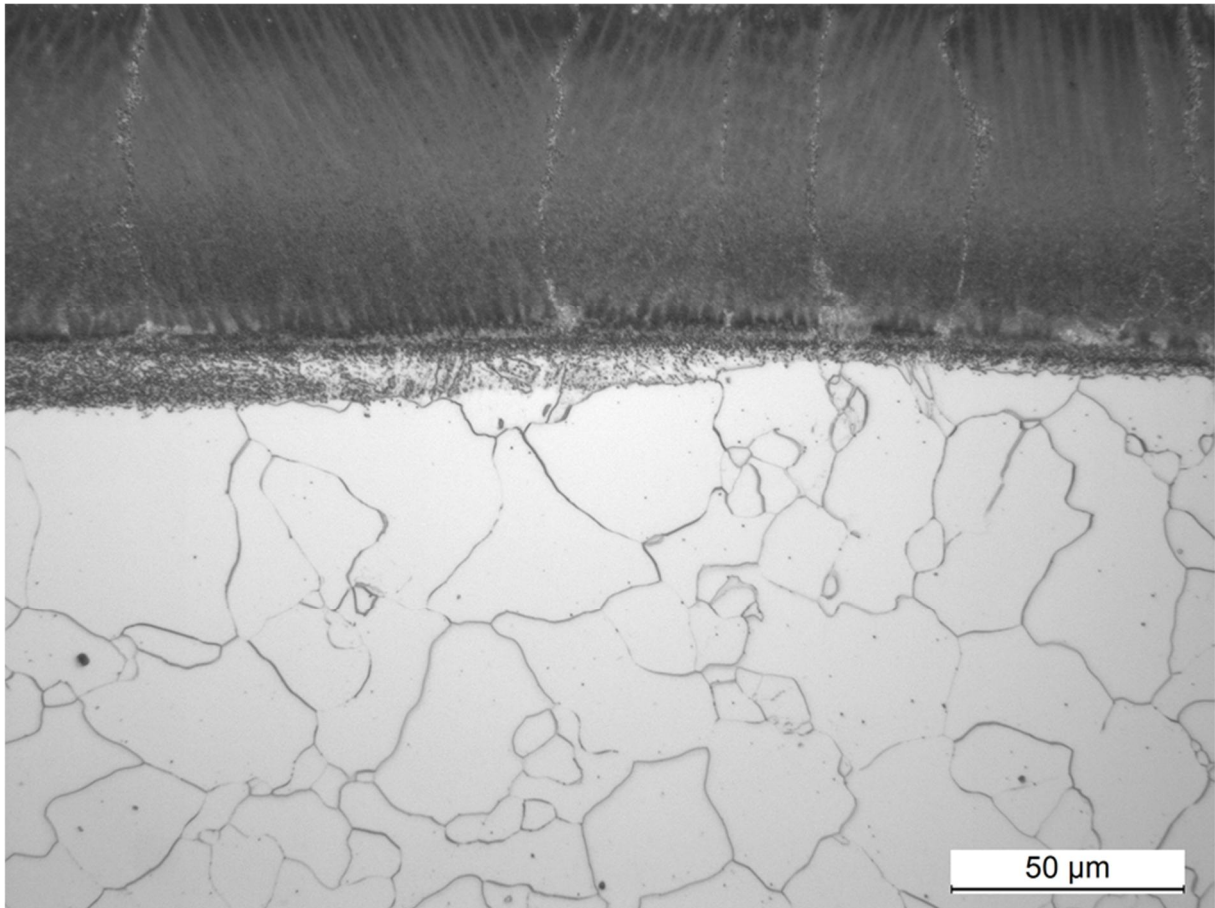
Kuva 30. IN825 AZZ, 700°C, 100 h



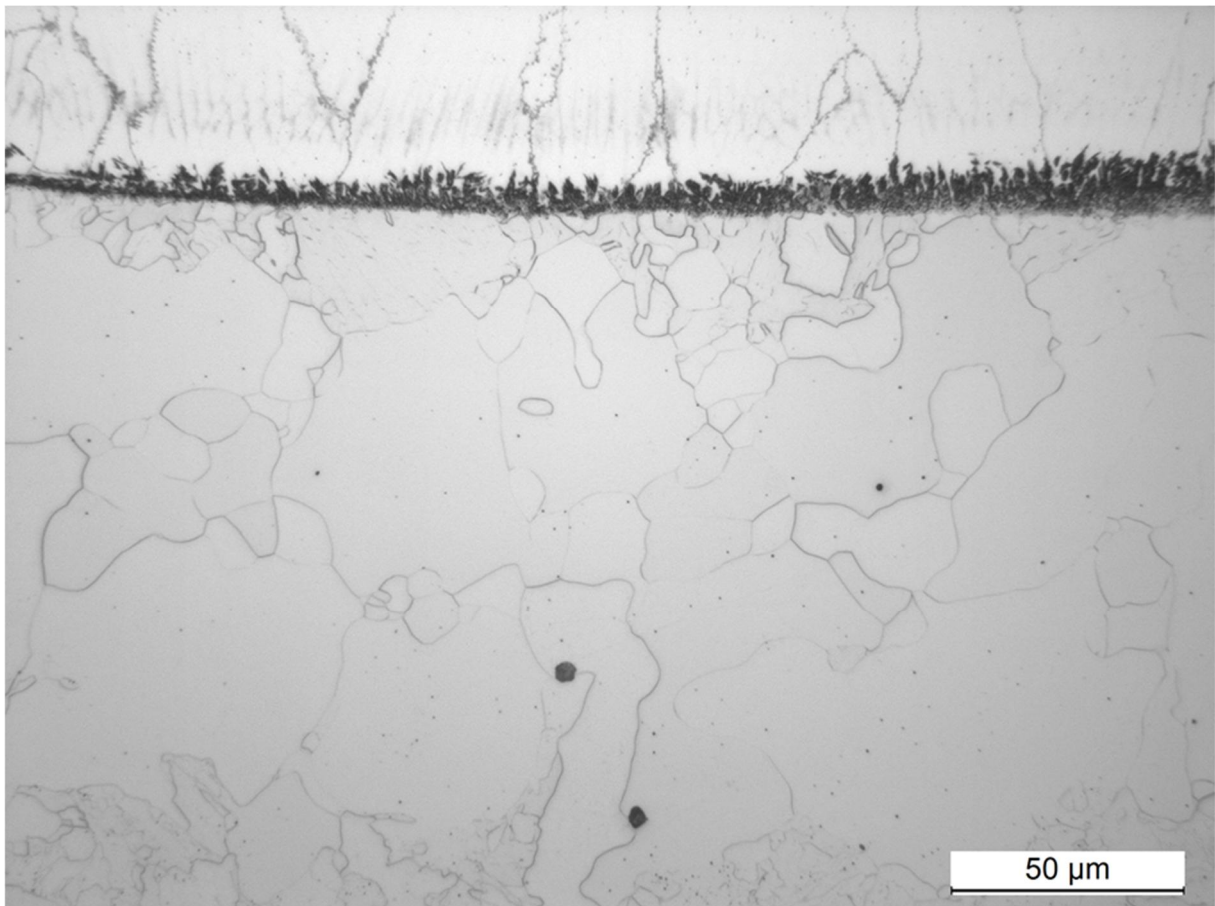
Kuva 31. 309 Uhlig, toimitustila



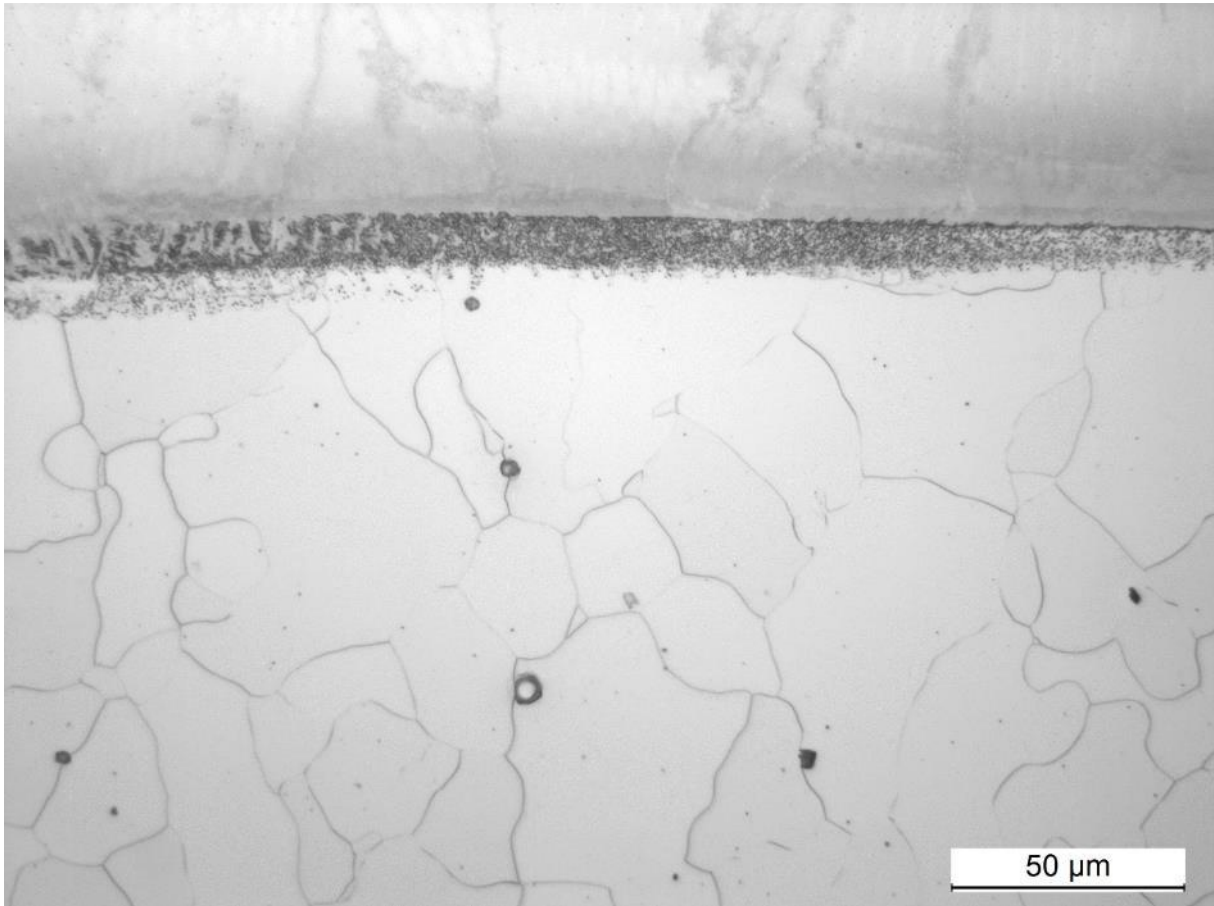
Kuva 32. 309 Uhlig, 600°C, 100 h



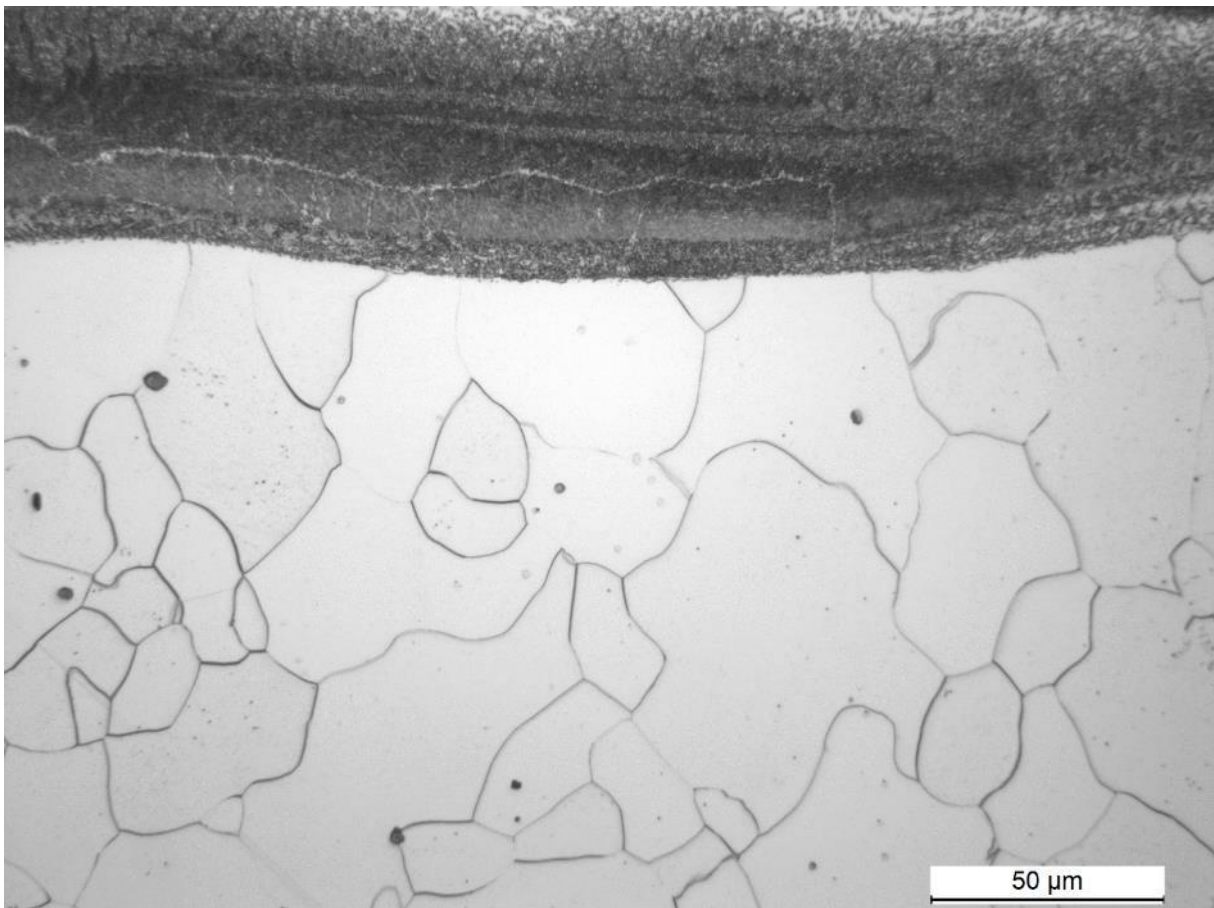
Kuva 33. 309 Uhlig, 600°C, 1000 h



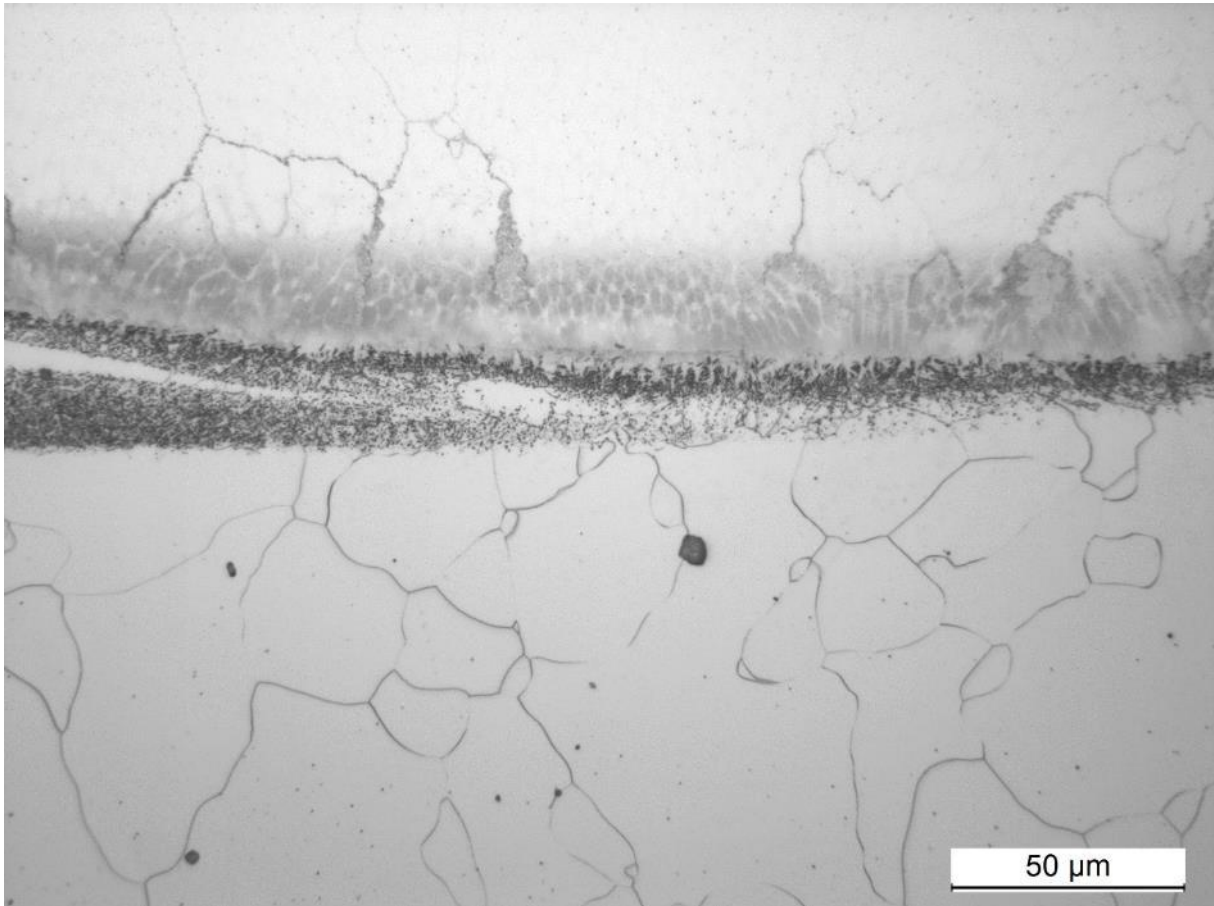
Kuva 34. 309 Uhlig, 650°C, 10 h



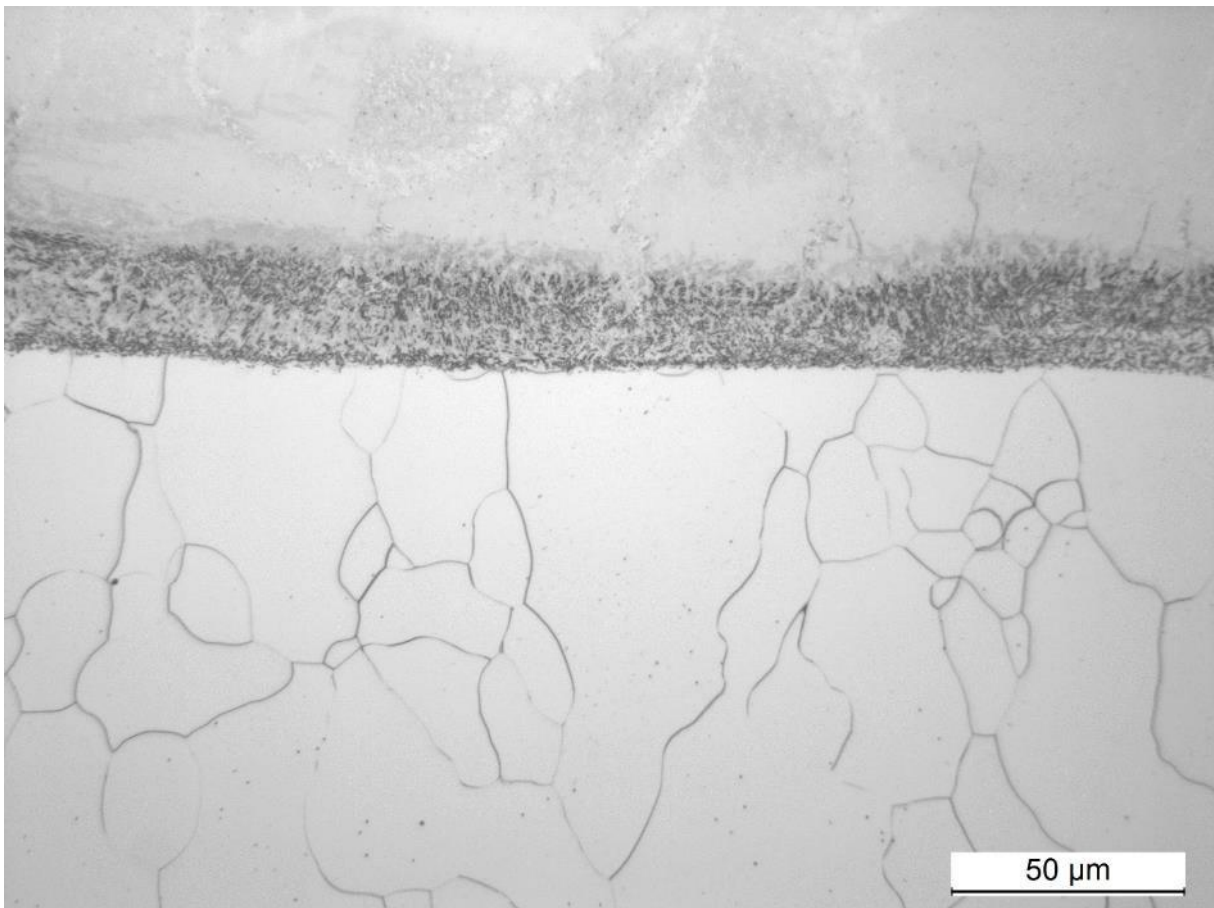
Kuva 35. 309 Uhlig, 650°C, 100 h



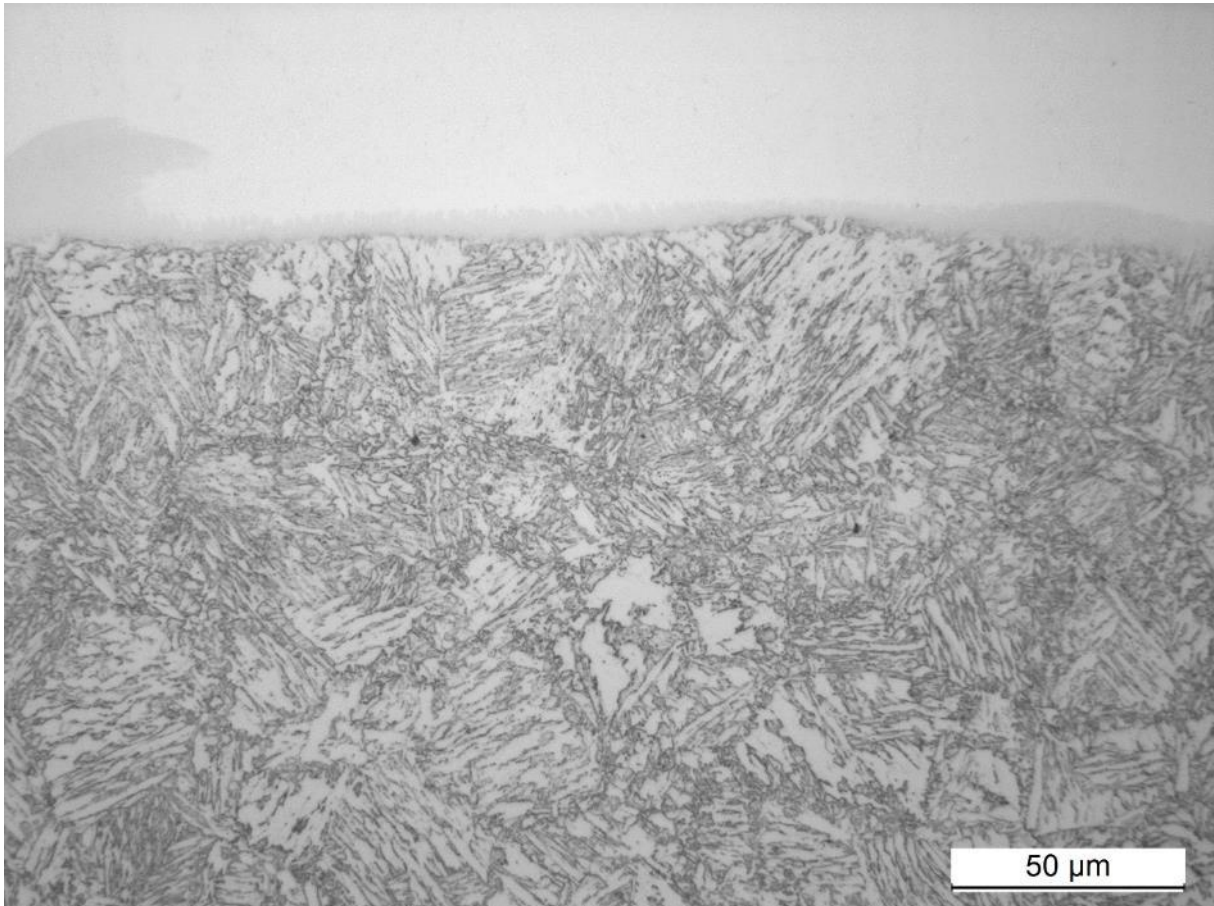
Kuva 36. 309 Uhlig, 650°C, 1000 h



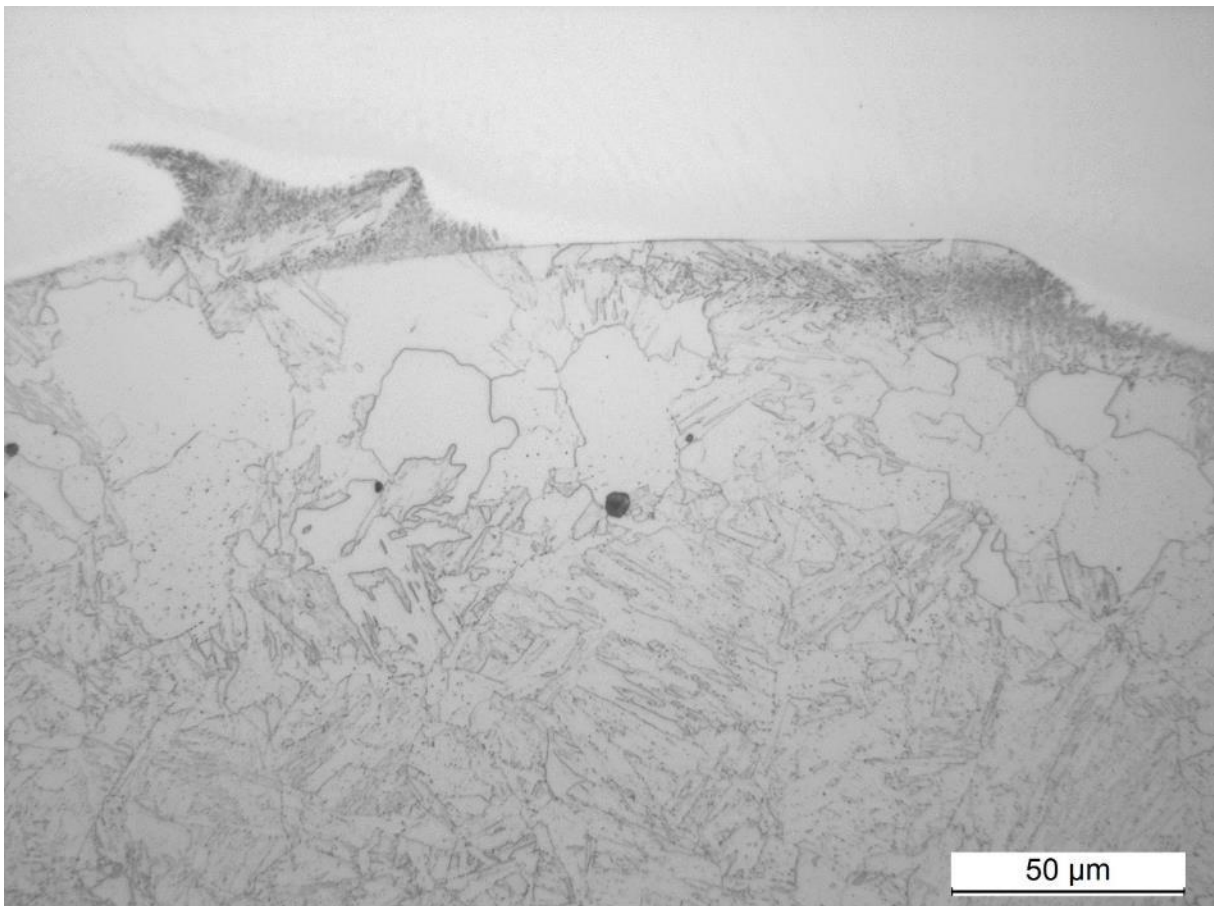
Kuva 37. 309 Uhlig, 700°C, 10 h



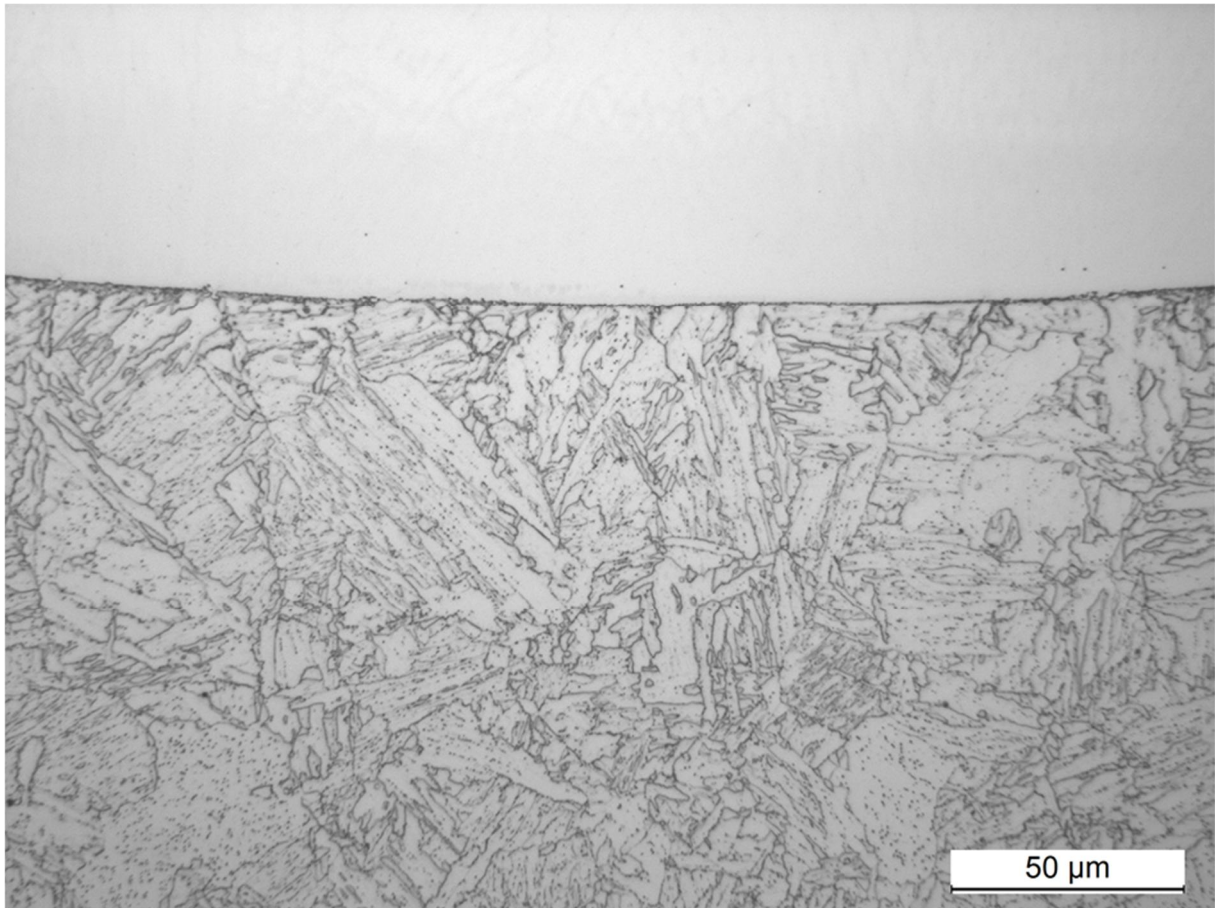
Kuva 38. 309 Uhlig, 700°C, 100 h



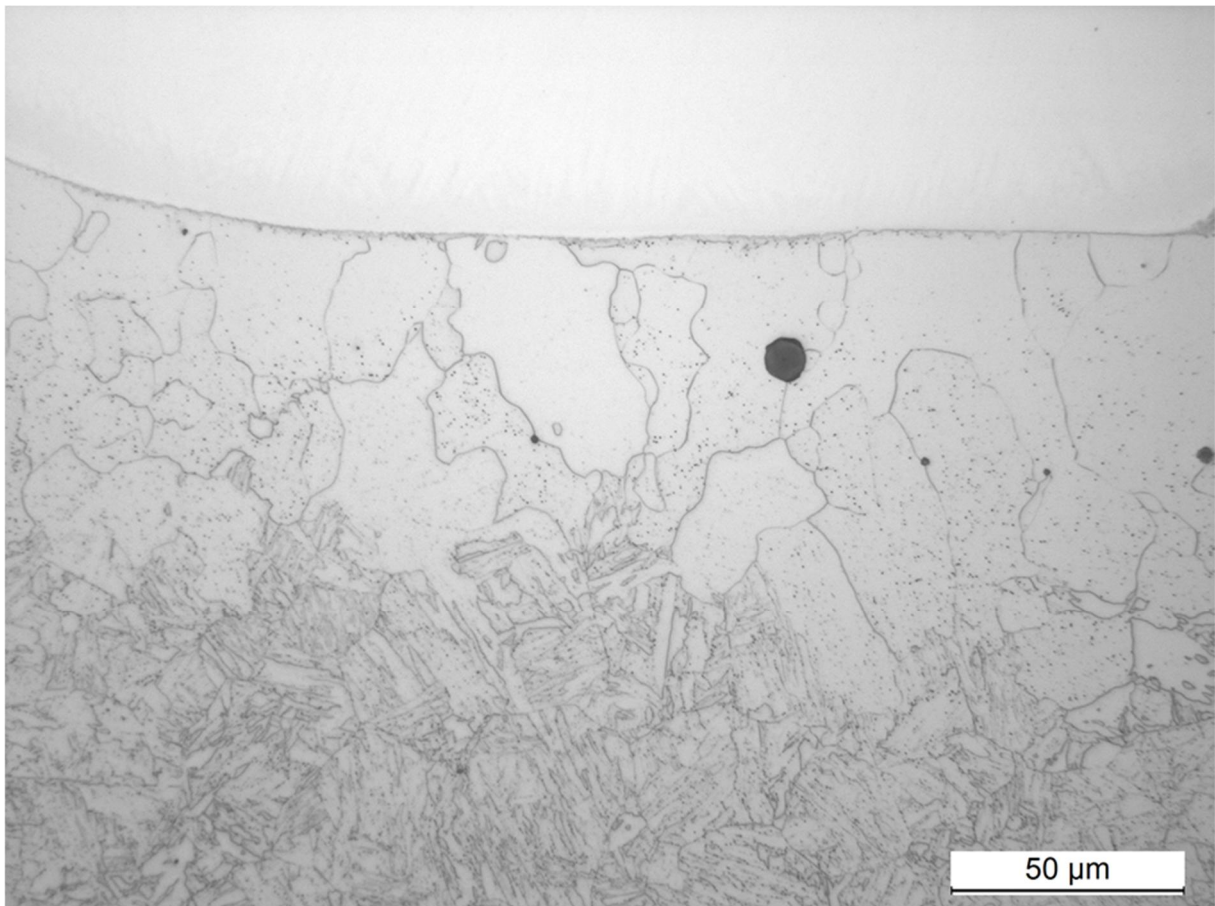
Kuva 39. IN625 Uhlig, toimitustila



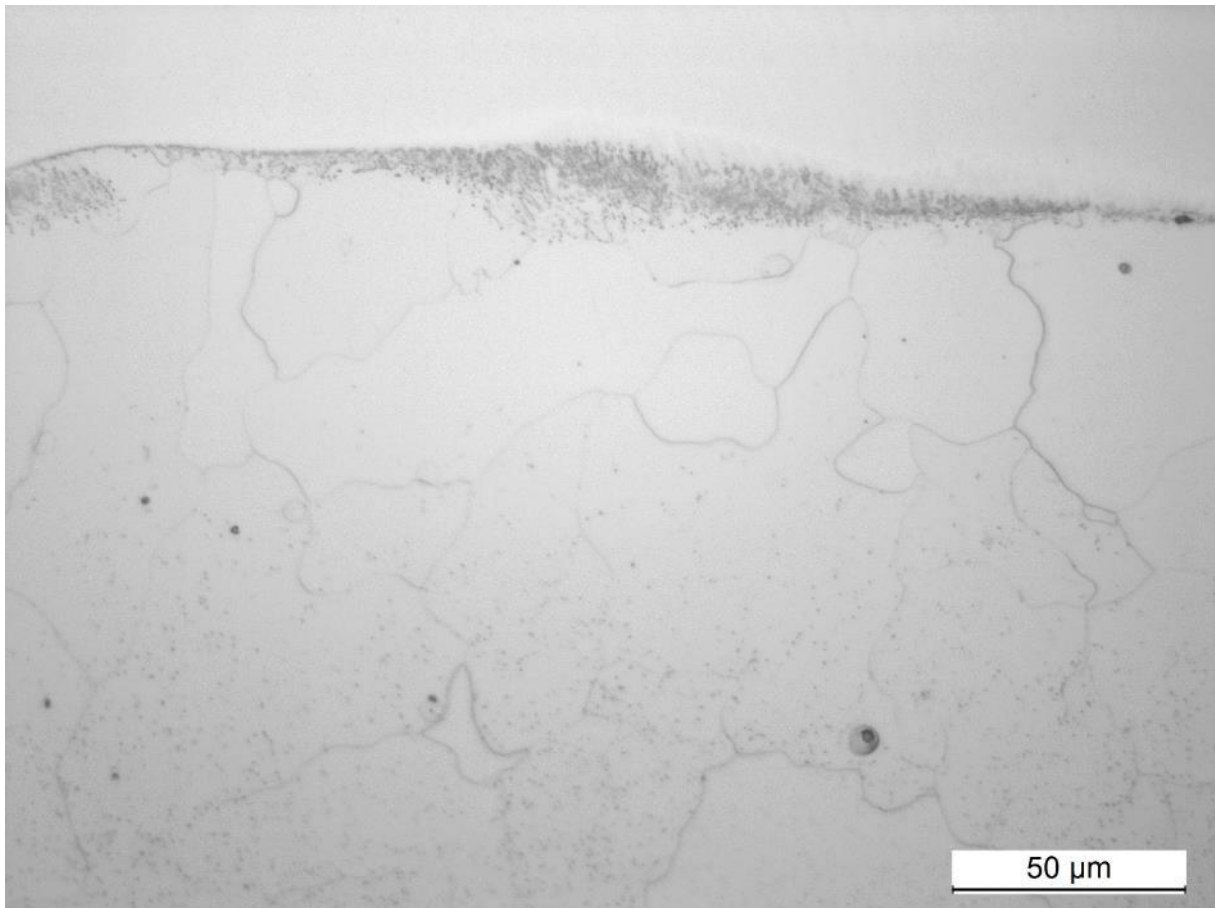
Kuva 40. IN625 Uhlig, 600°C, 100 h



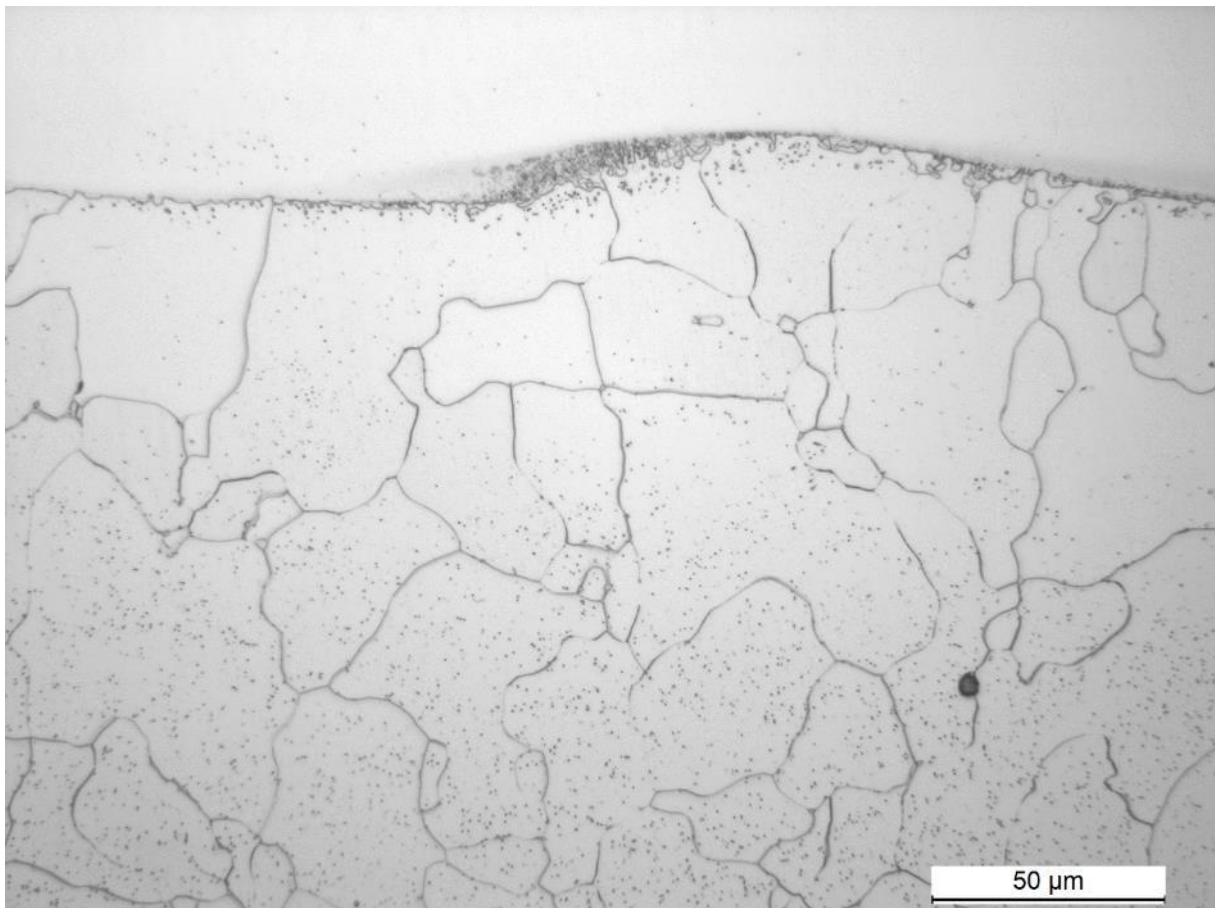
Kuva 41. IN625 Uhlig, 600°C, 1000 h



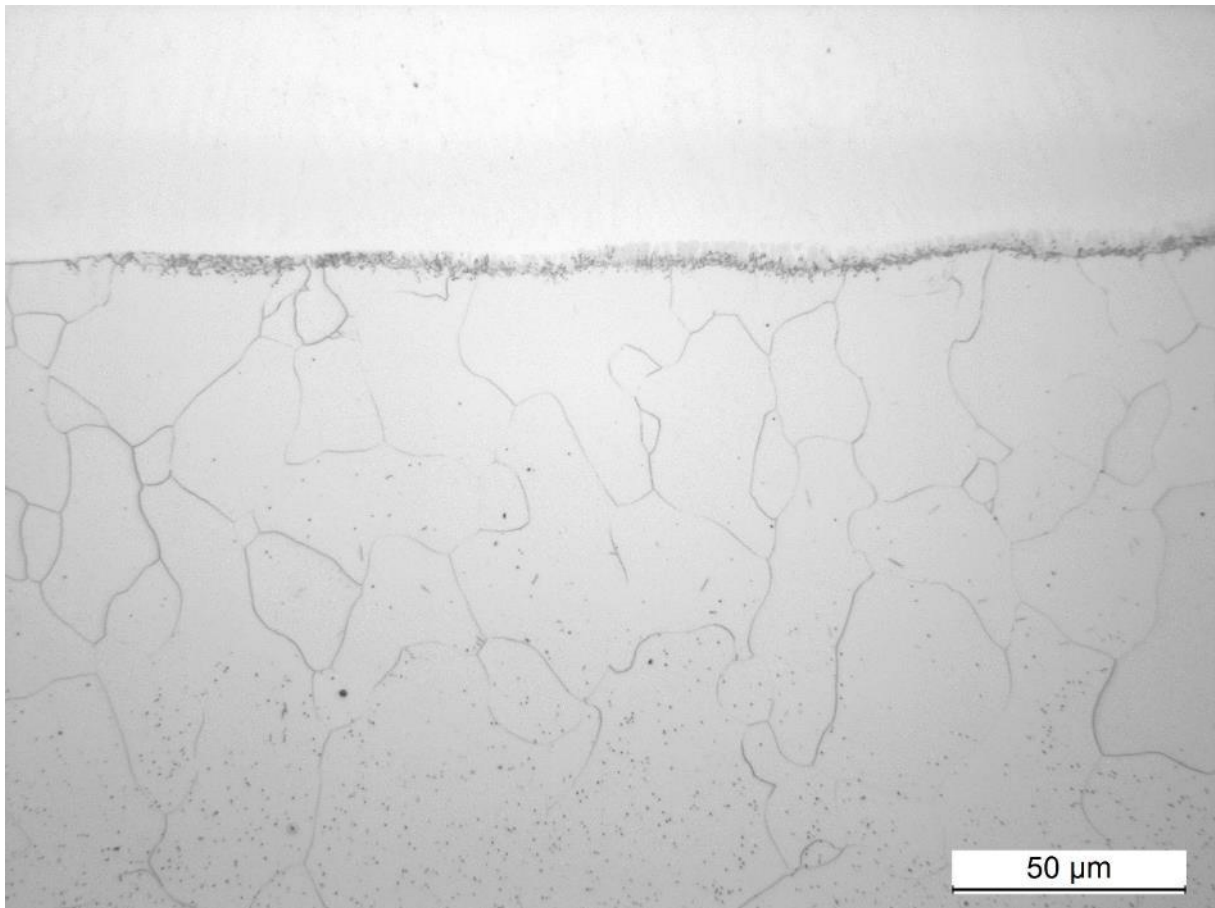
Kuva 42. IN625 Uhlig, 650°C, 10 h



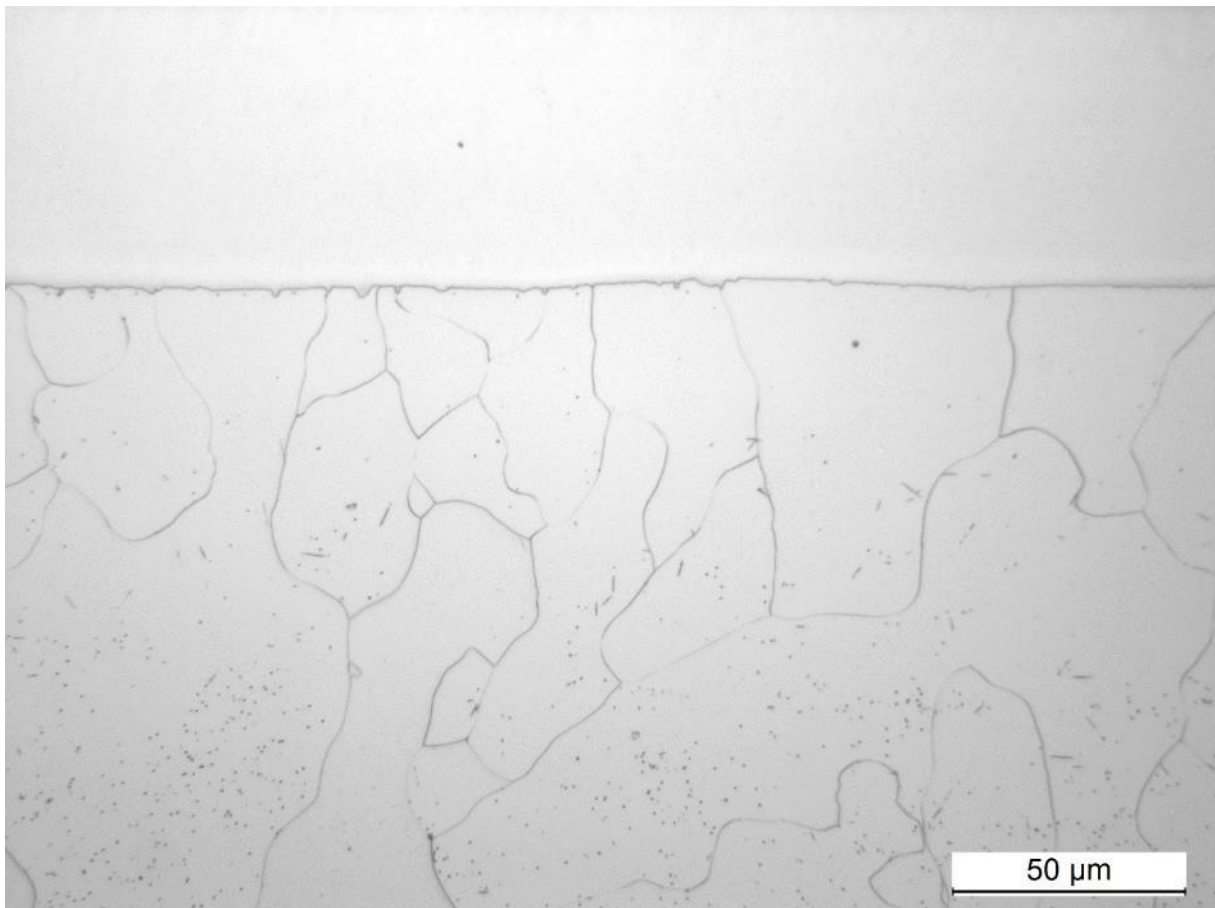
Kuva 43. IN625 Uhlig, 650°C, 100 h



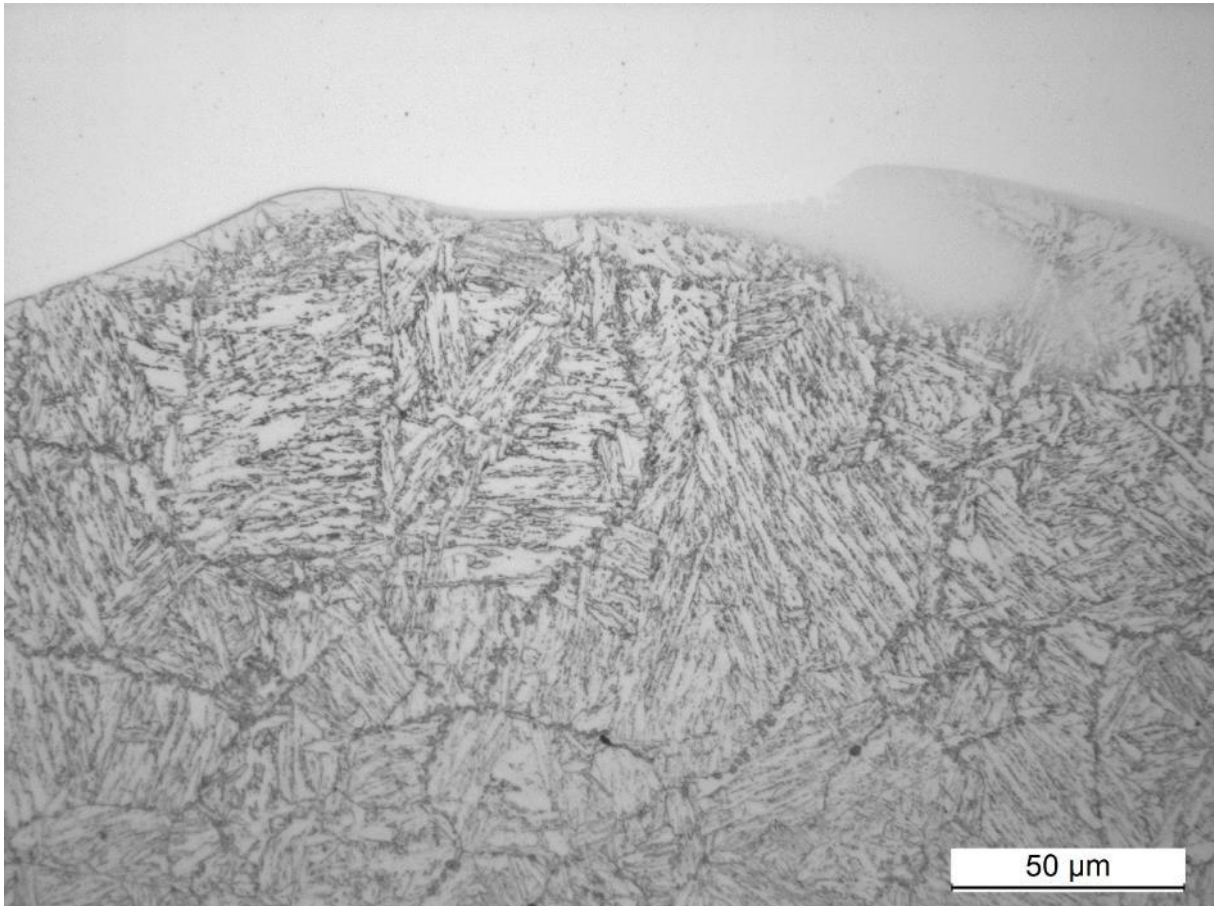
Kuva 44. IN625 Uhlig, 650°C, 1000 h



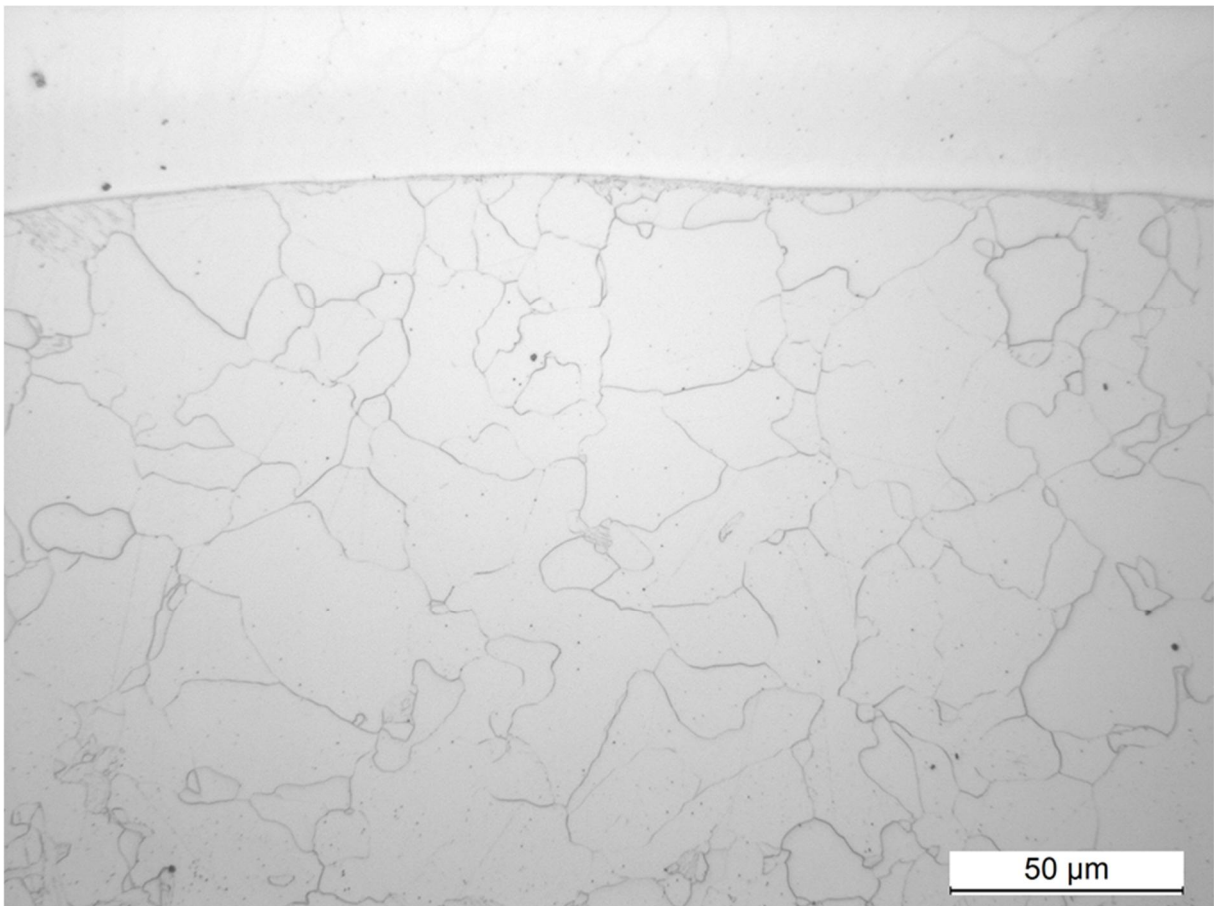
Kuva 45. IN625 Uhlig, 700°C, 10 h



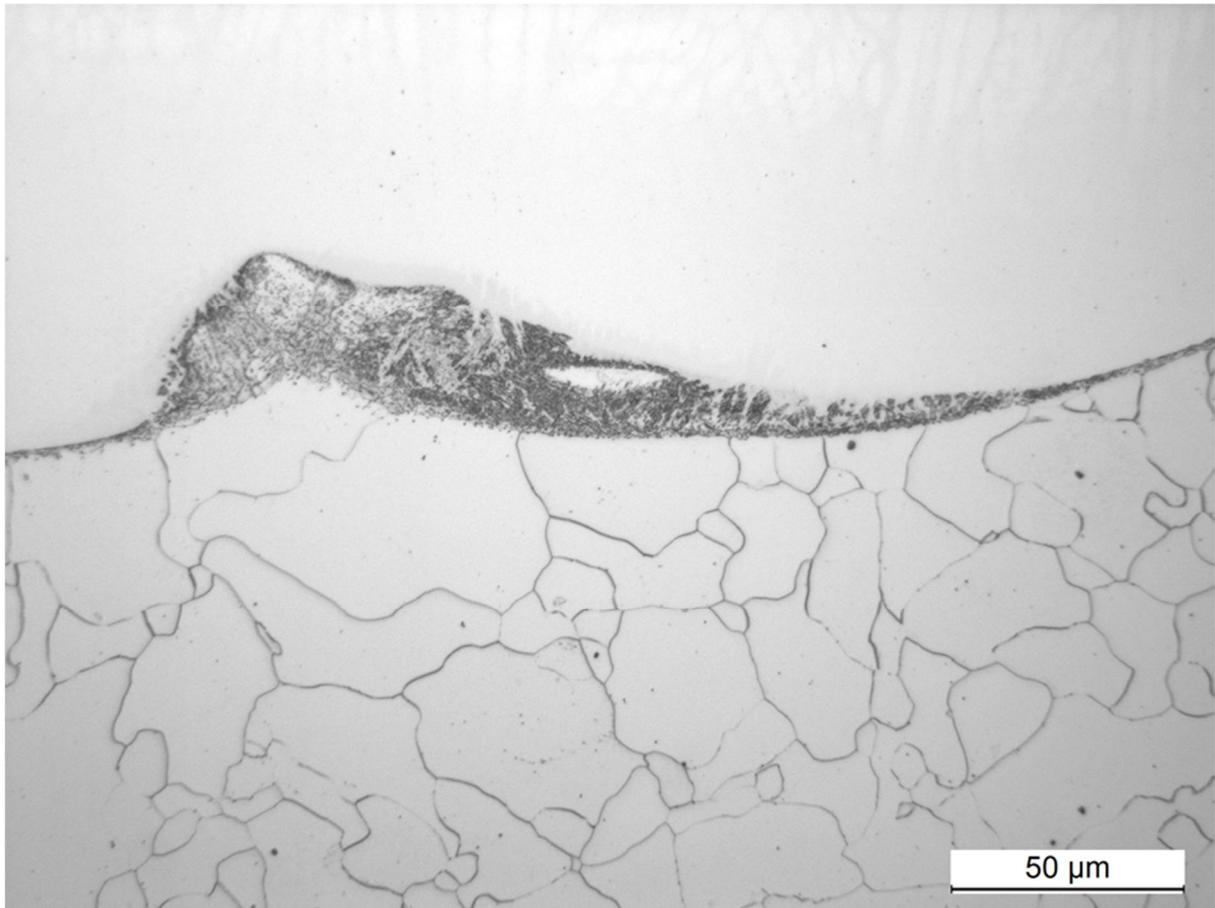
Kuva 46. IN625 Uhlig, 700°C, 100 h



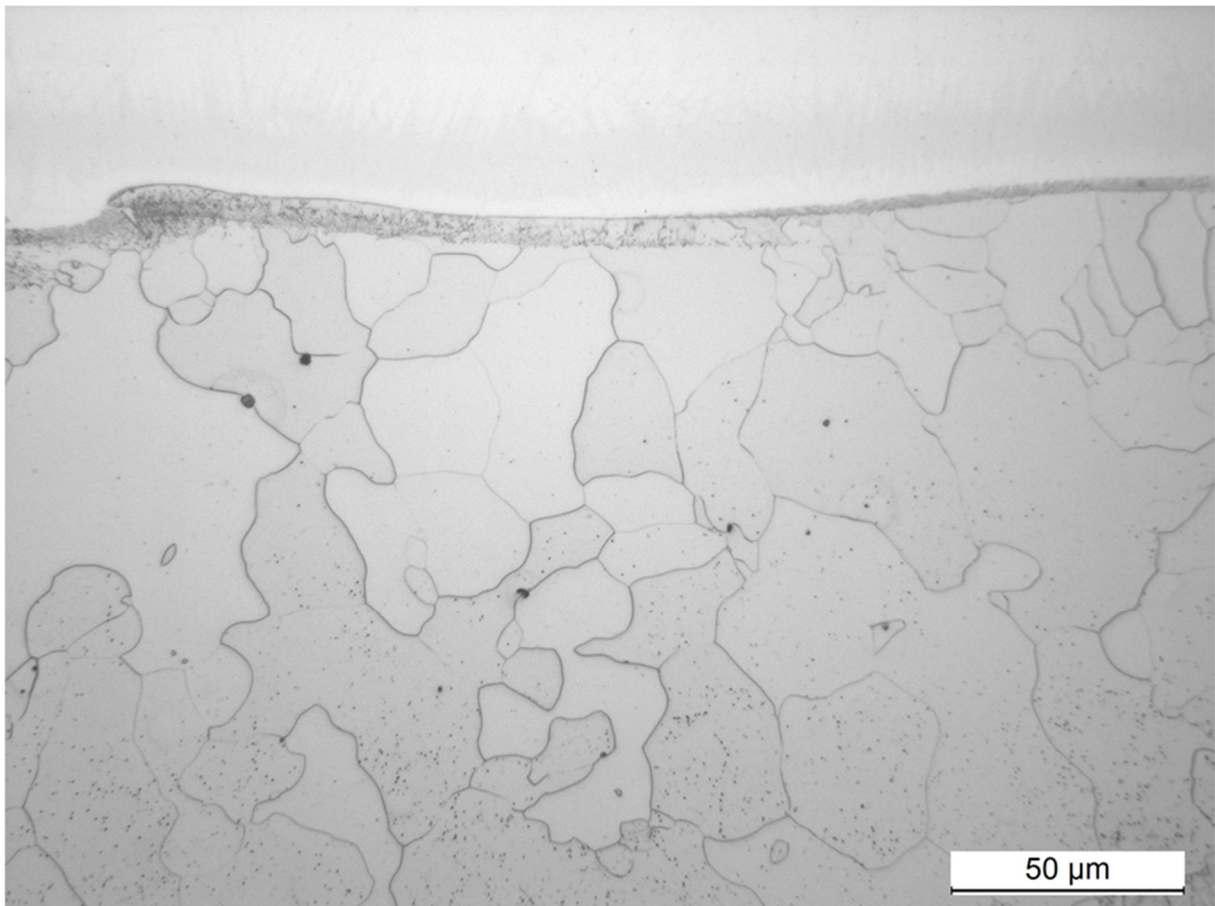
Kuva 47. IN825 Uhlig, toimitustila



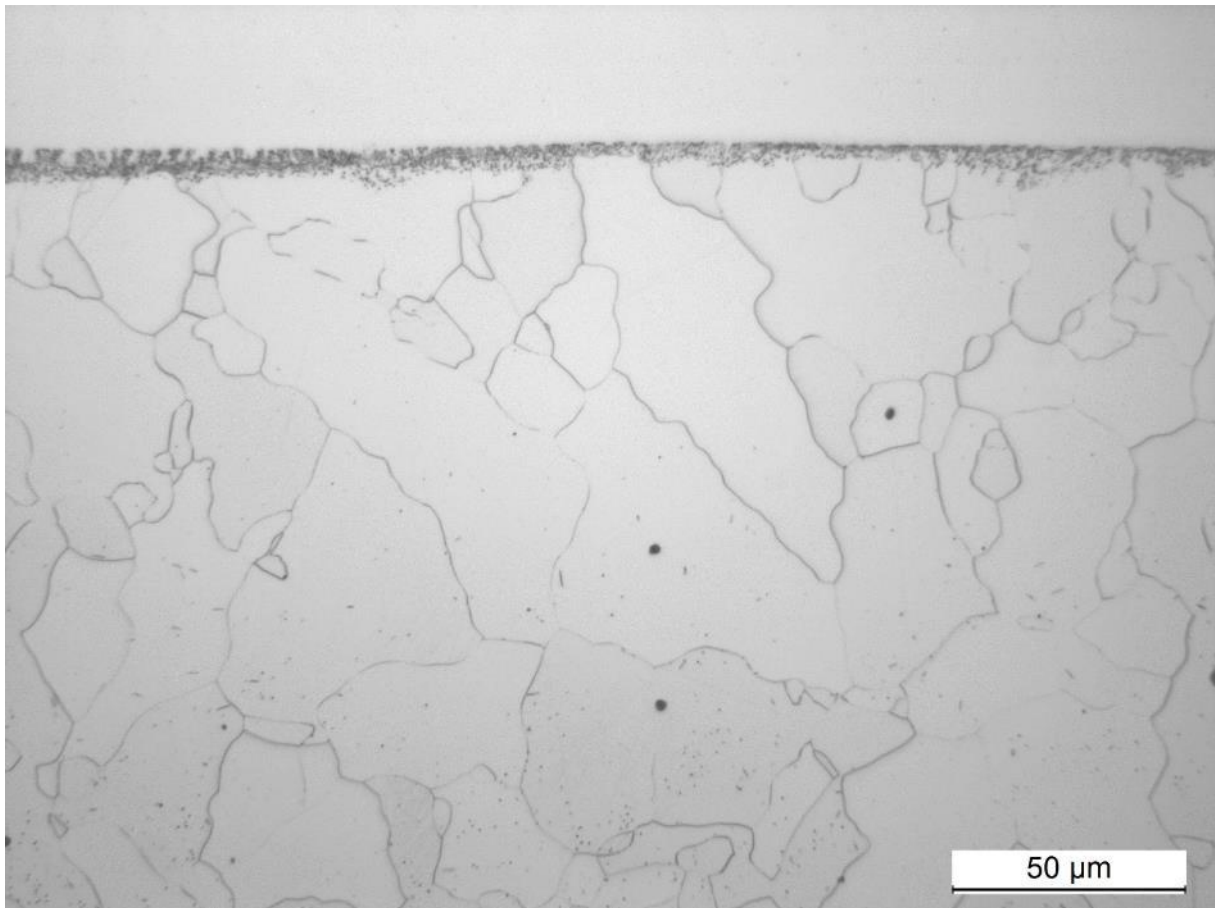
Kuva 48. IN825 Uhlig, 600°C, 100 h



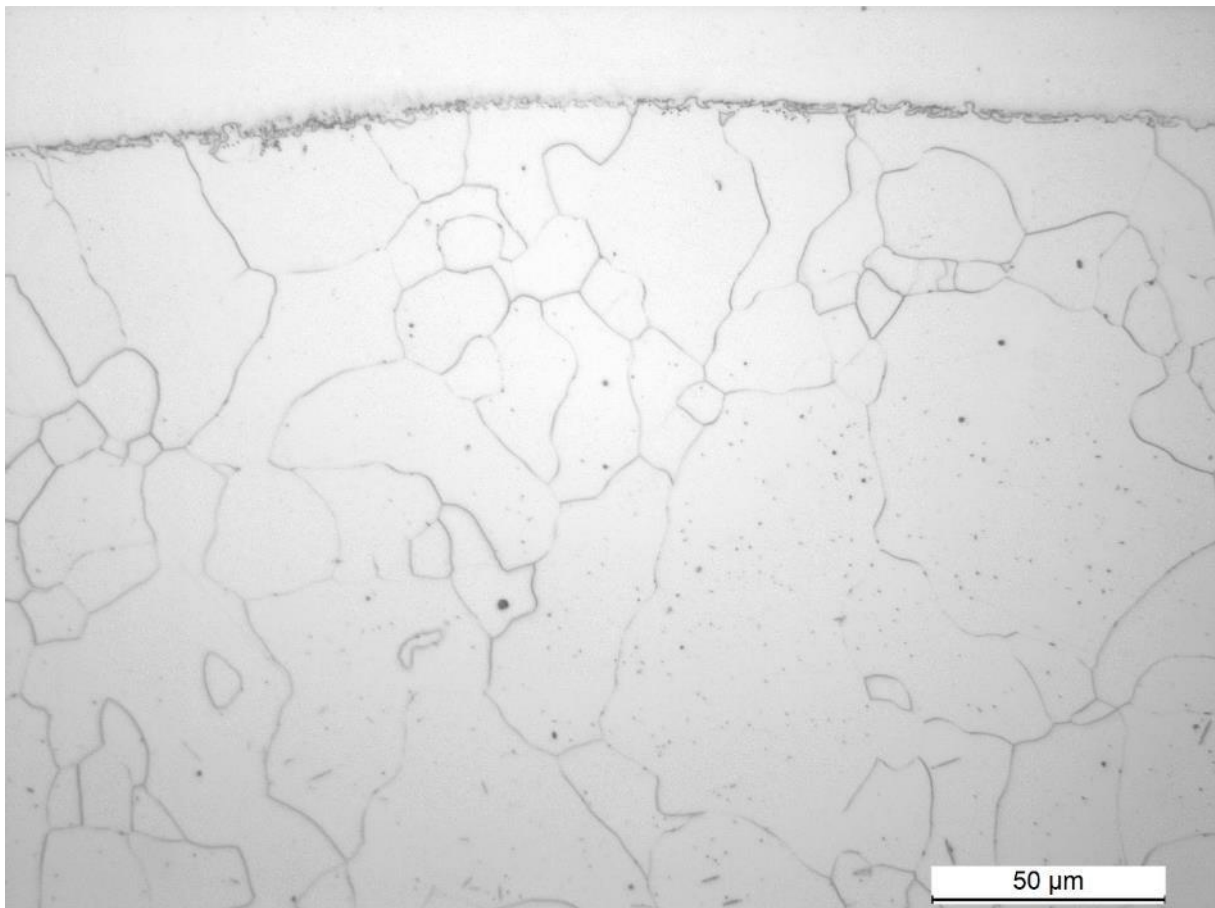
Kuva 49. IN825 Uhlig, 600°C, 1000 h



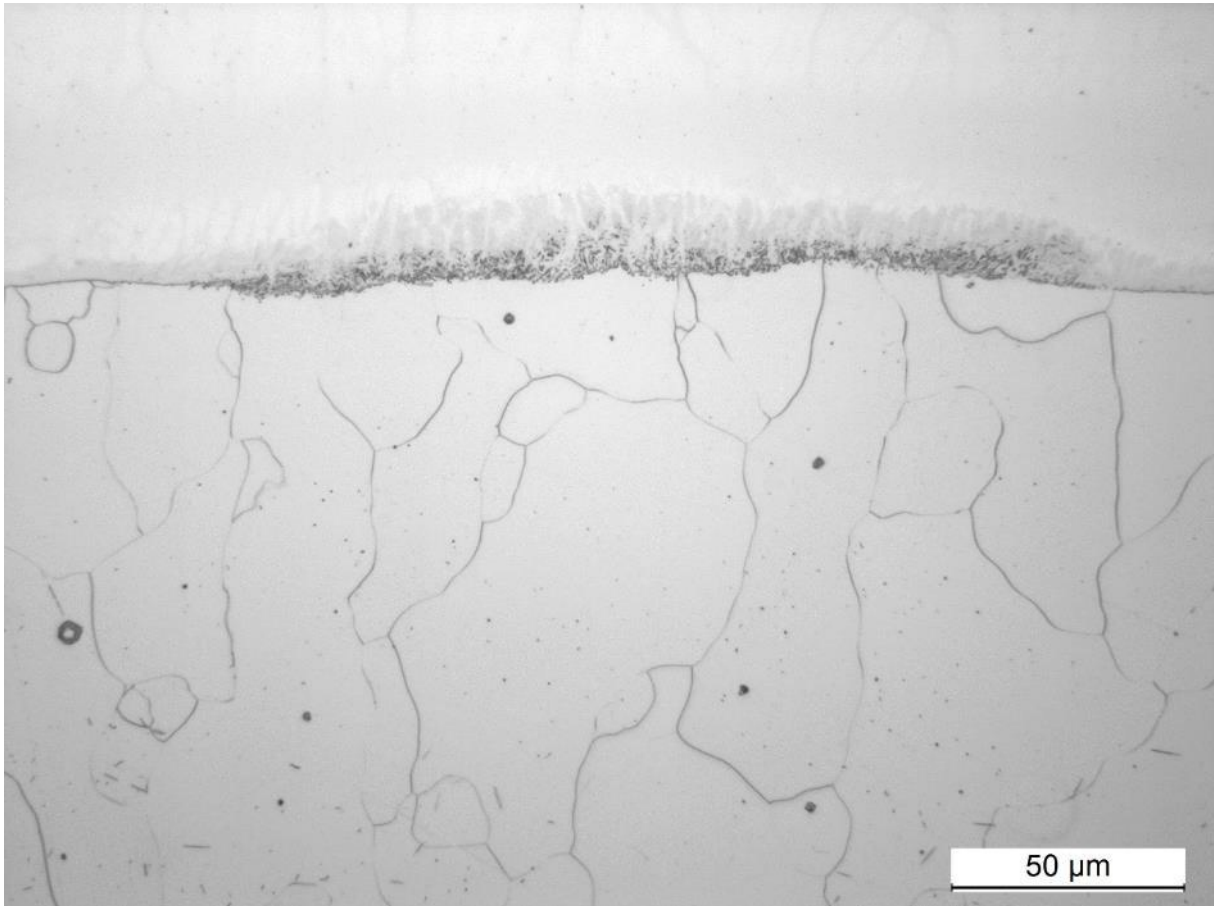
Kuva 50. IN825 Uhlig, 650°C, 10 h



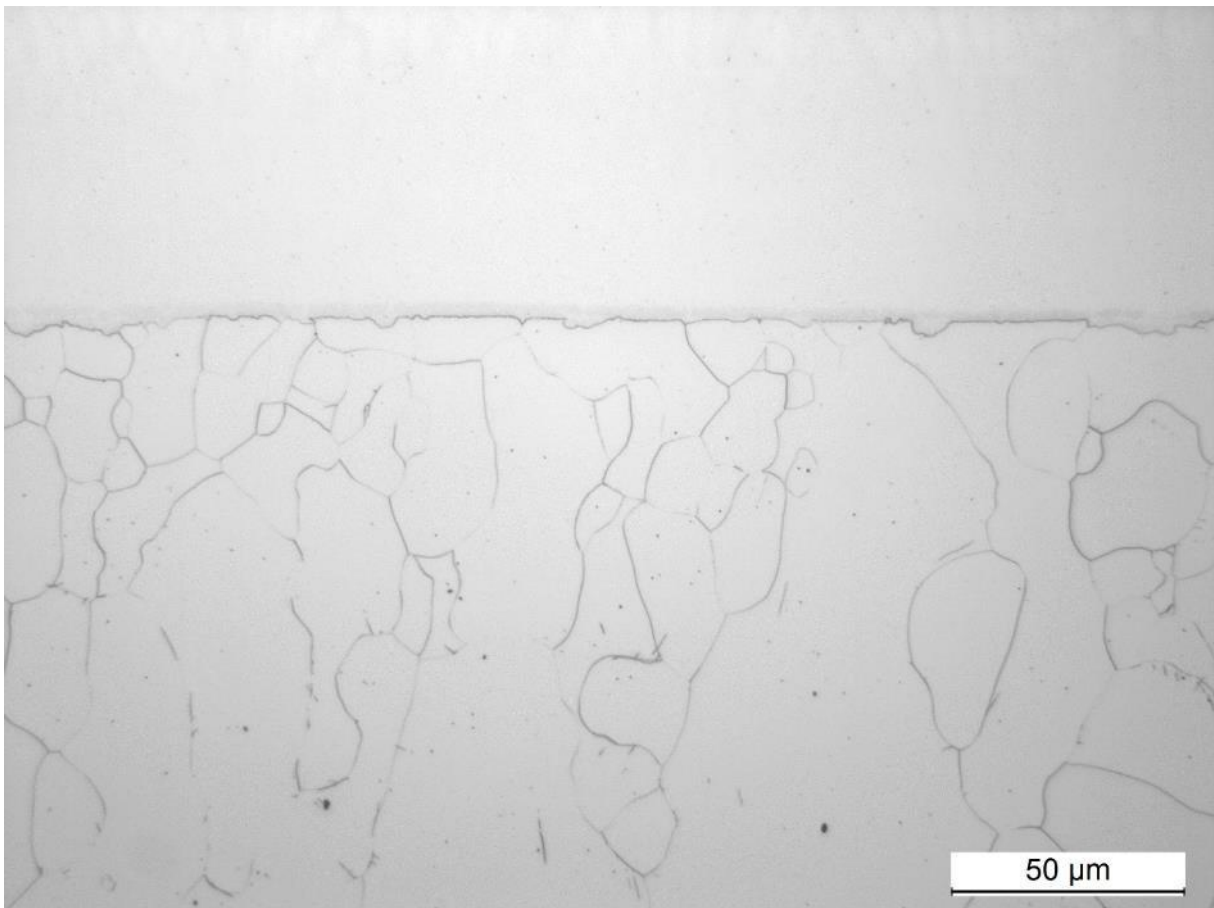
Kuva 51. IN825 Uhlig, 650°C, 100 h



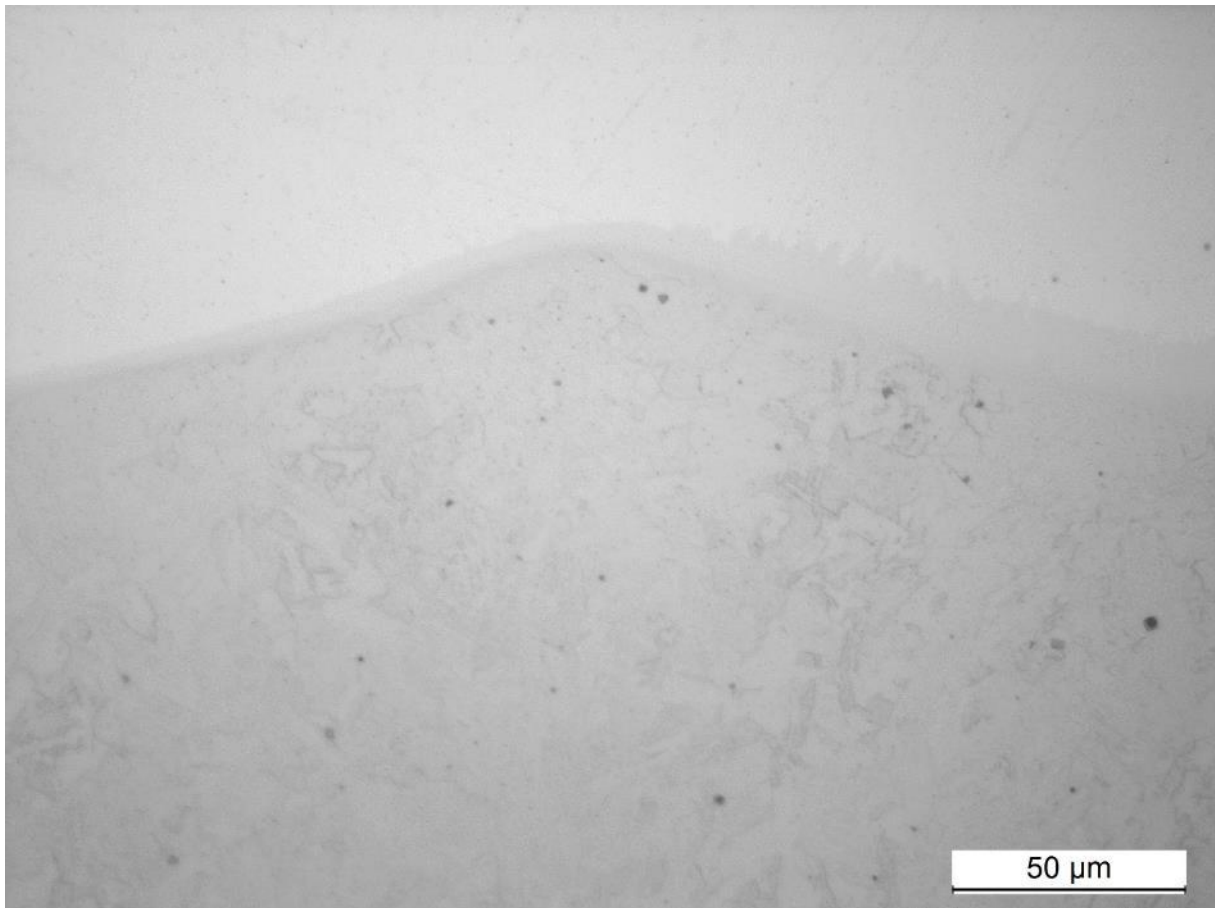
Kuva 52. IN825 Uhlig, 650°C, 1000 h



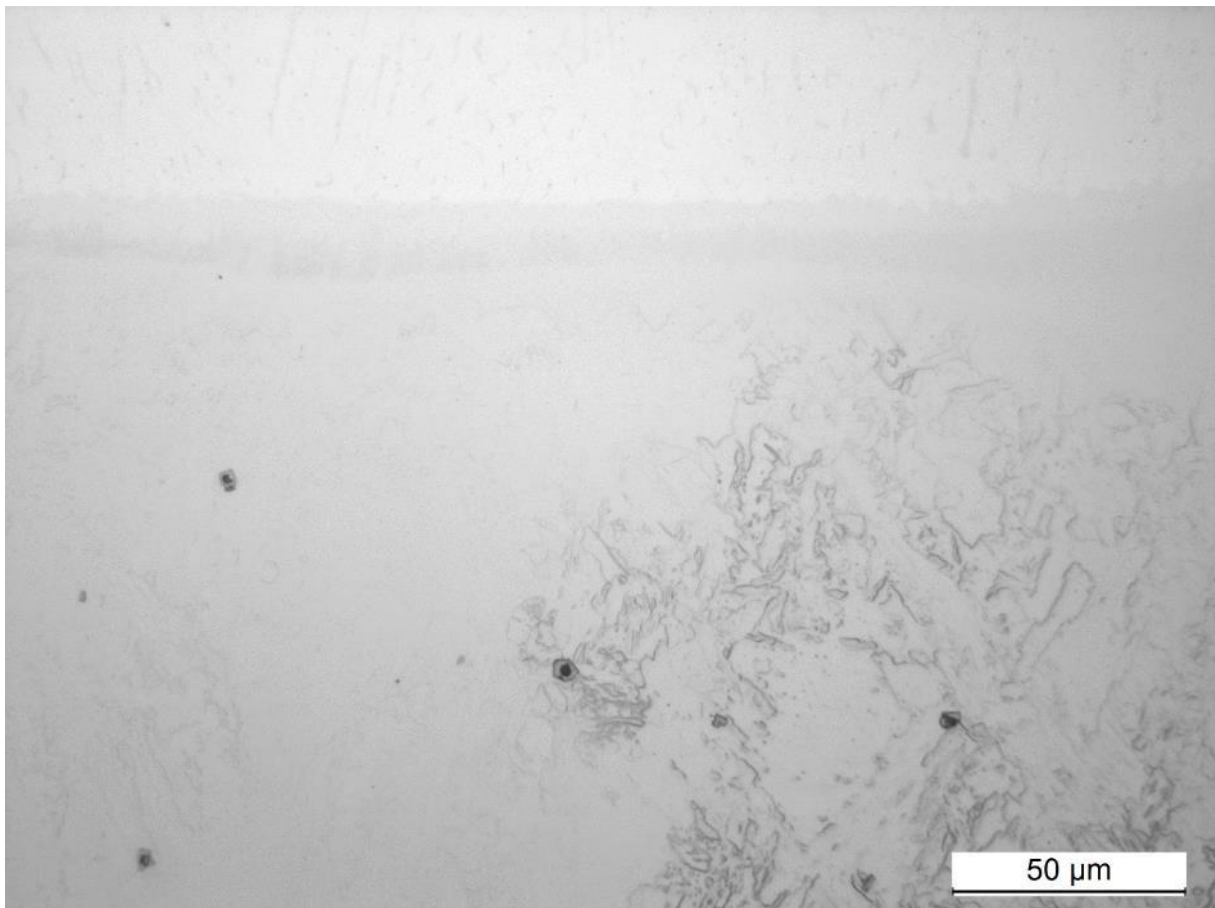
Kuva 53. IN825 Uhlig, 700°C, 10 h



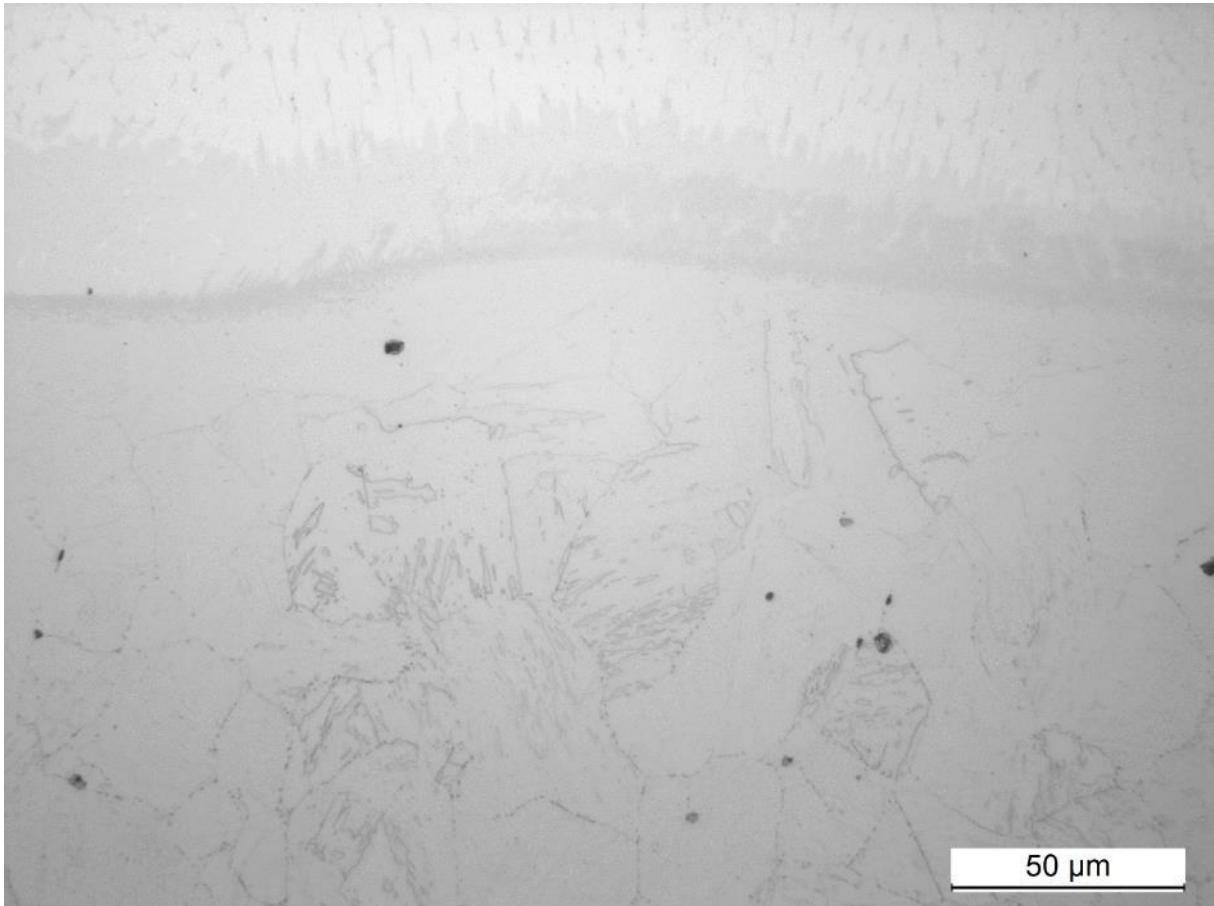
Kuva 54. IN825 Uhlig, 700°C, 100 h



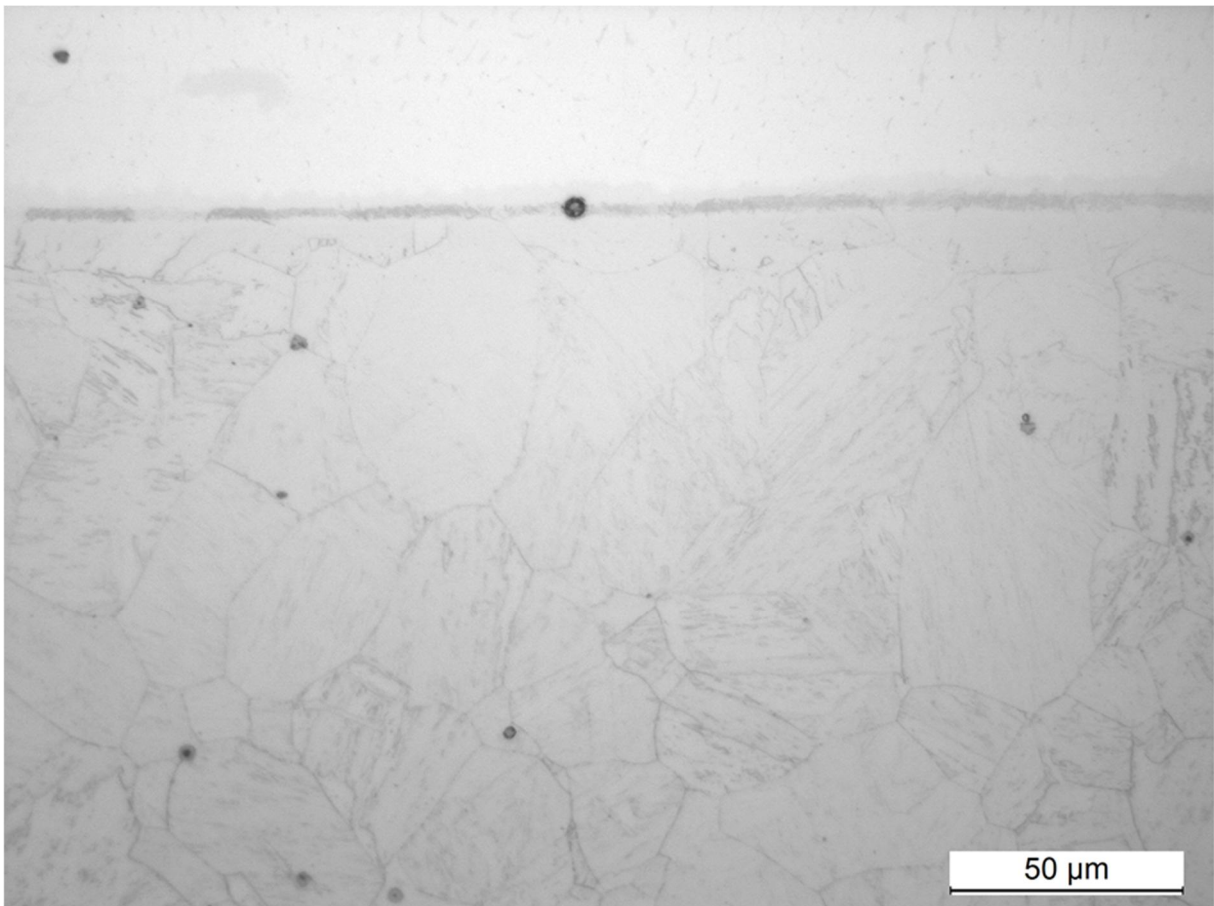
Kuva 55. 309 Areva, toimitustila



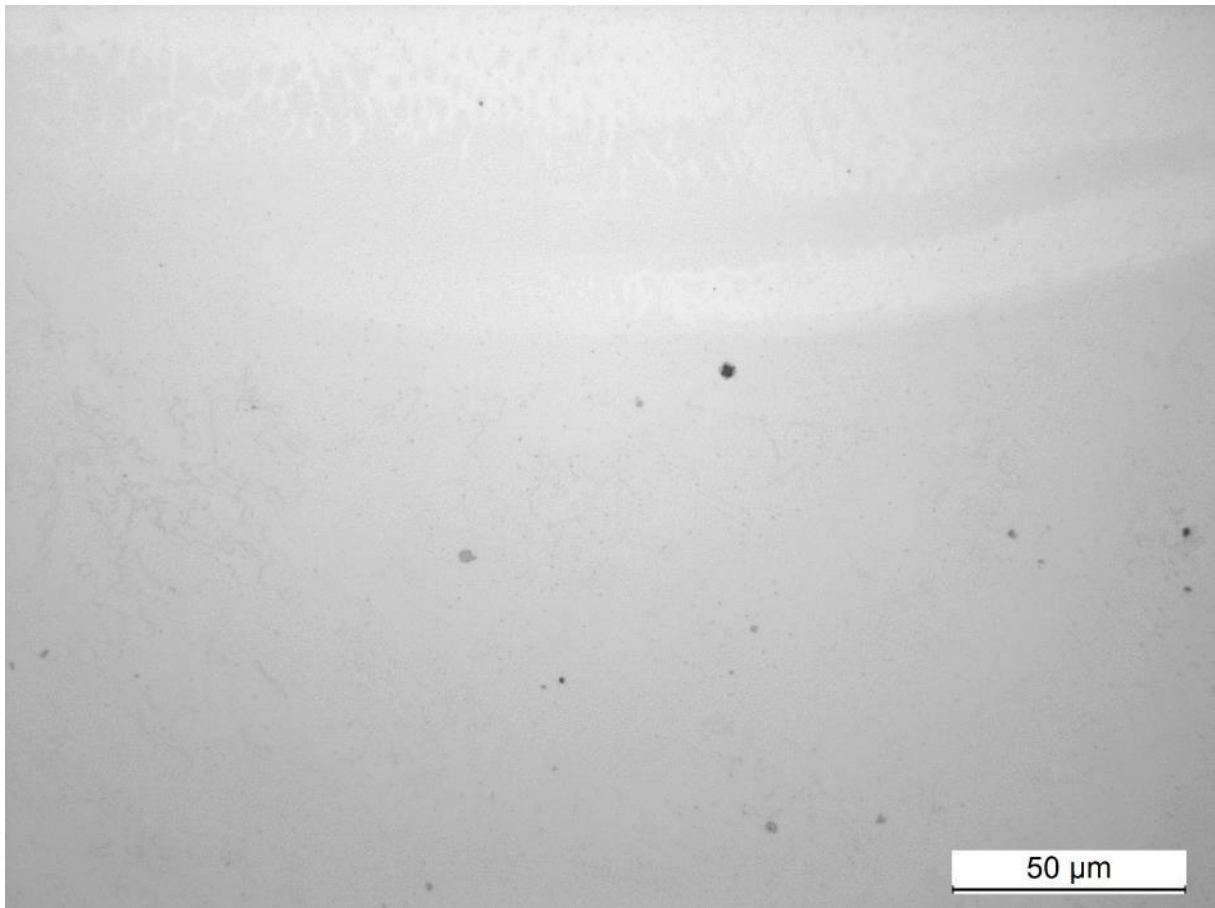
Kuva 56. 309 Areva, 600°C, 100 h



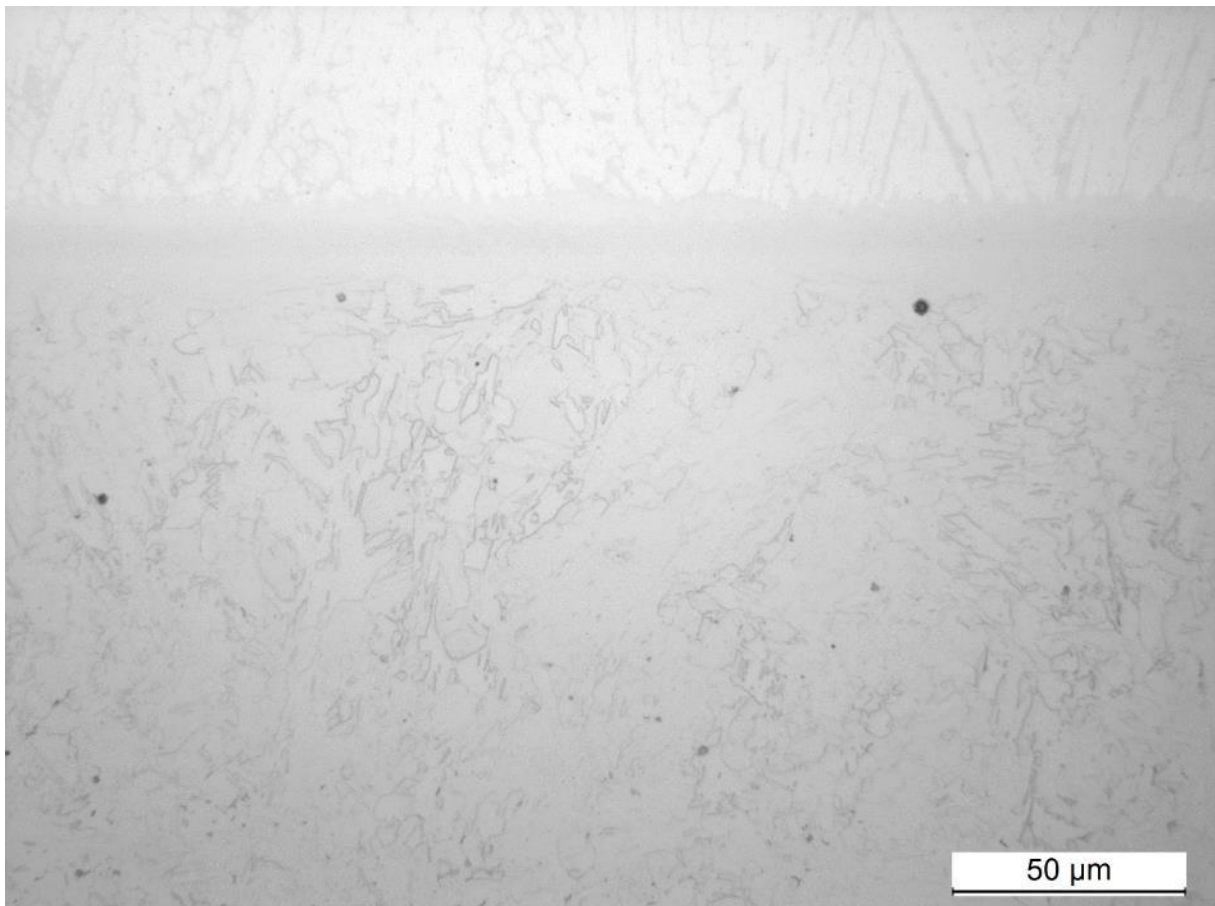
Kuva 57. 309 Areva, 600°C, 1000 h



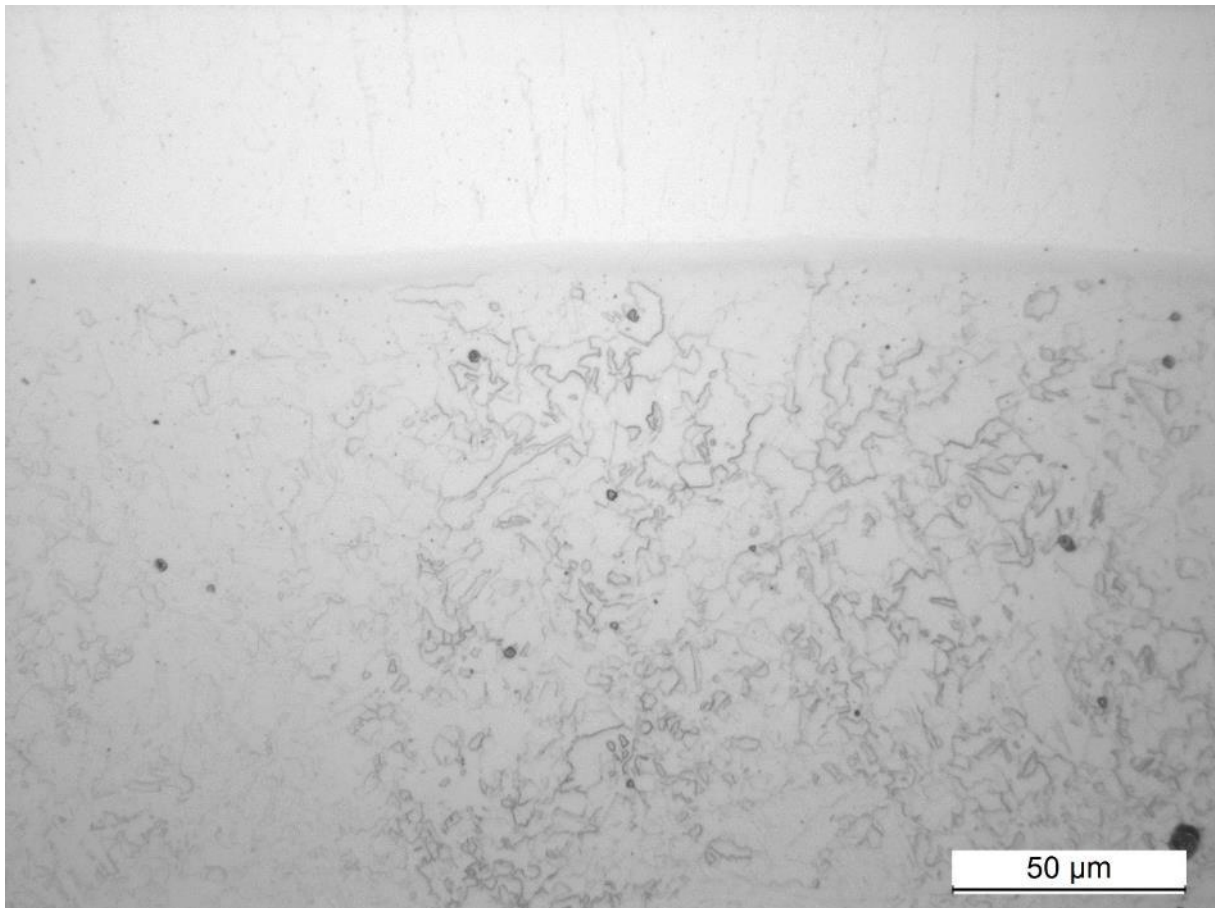
Kuva 58. 309 Areva, 650°C, 10 h



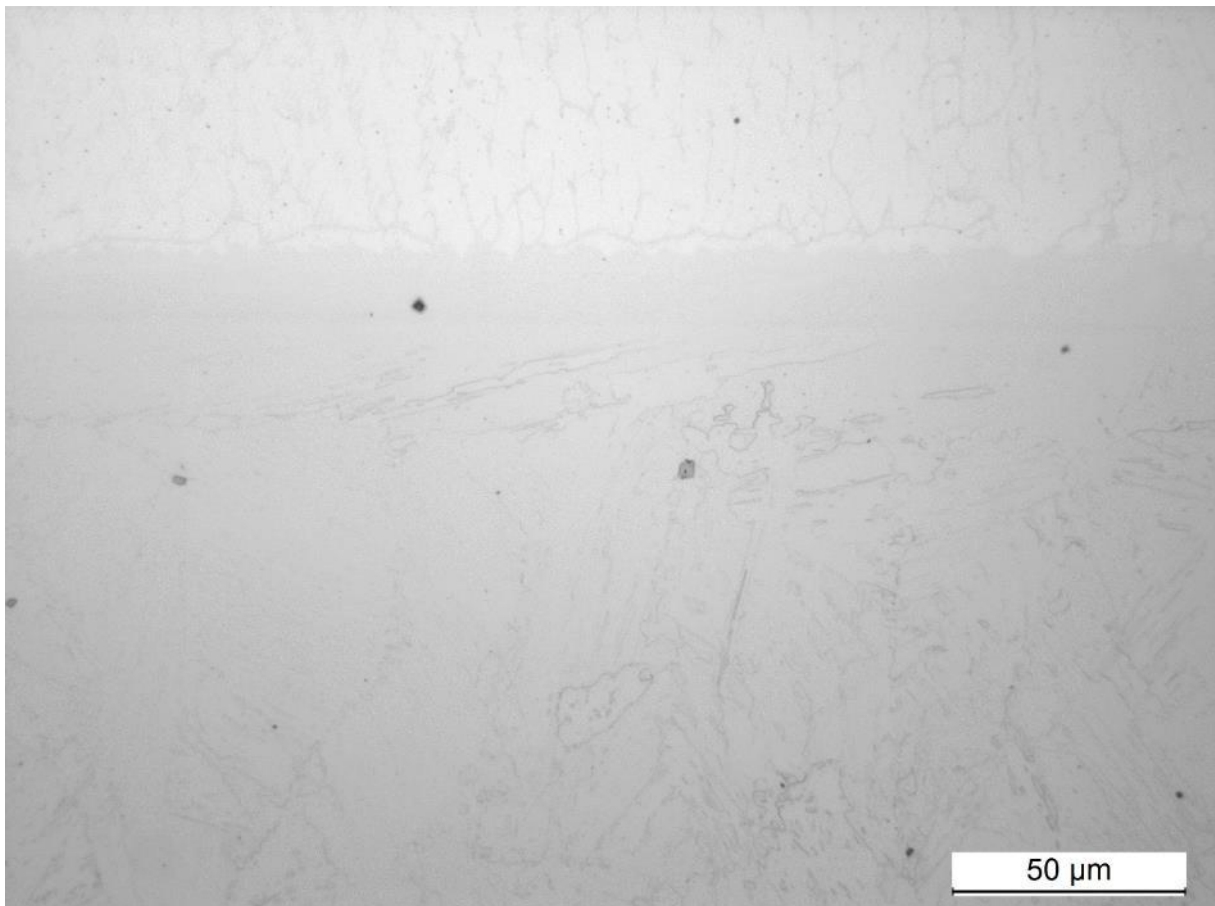
Kuva 59. 309 Areva, 650°C, 100 h



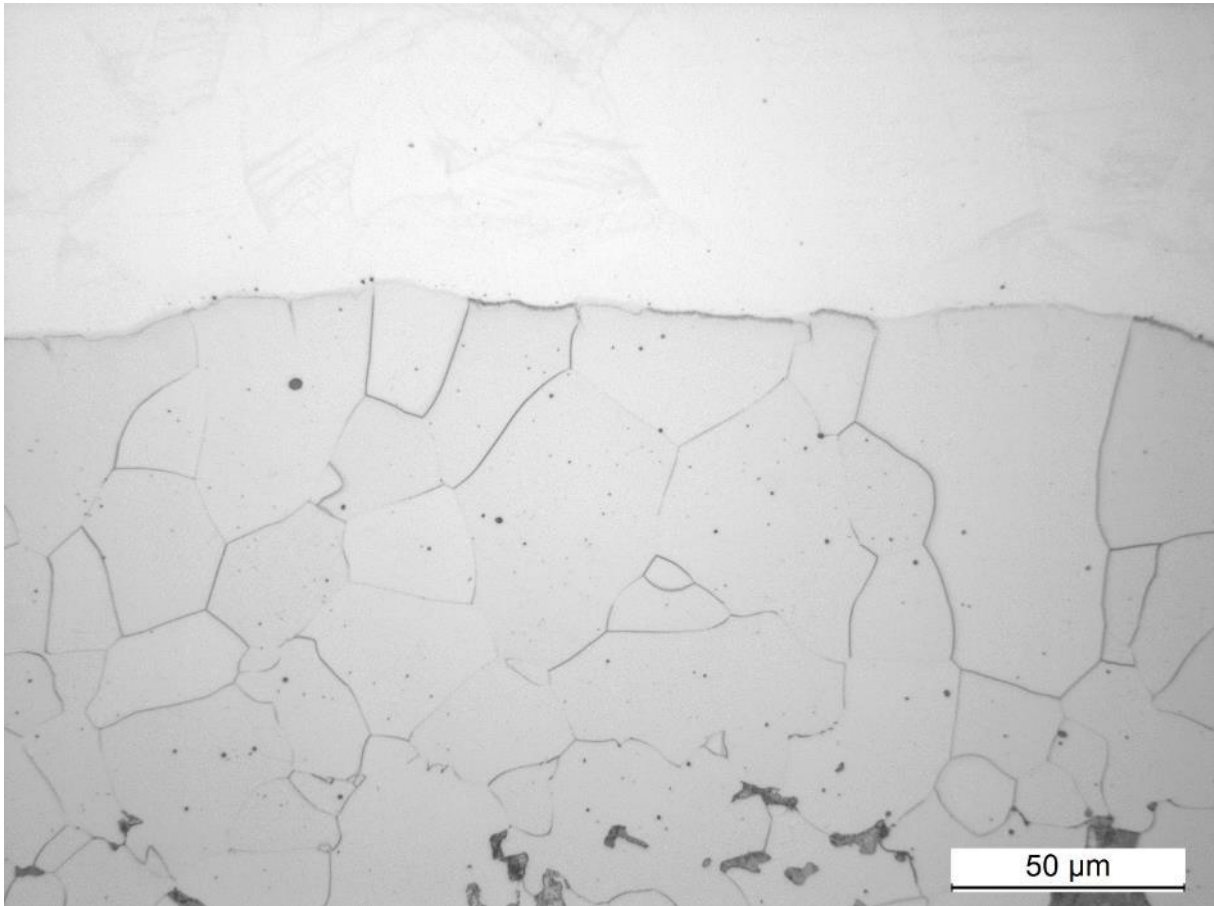
Kuva 60. 309 Areva, 650°C, 1000 h



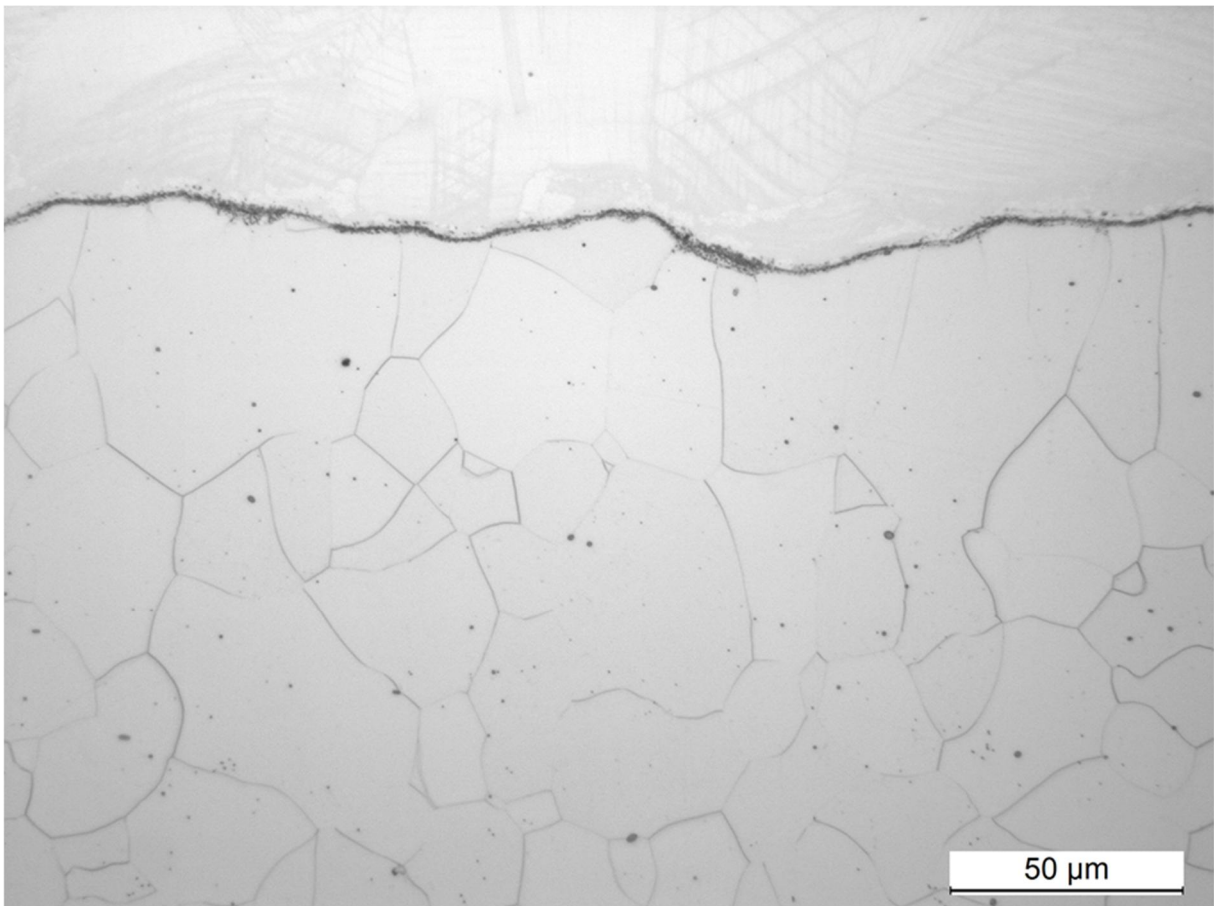
Kuva 61. 309 Areva, 700°C, 10 h



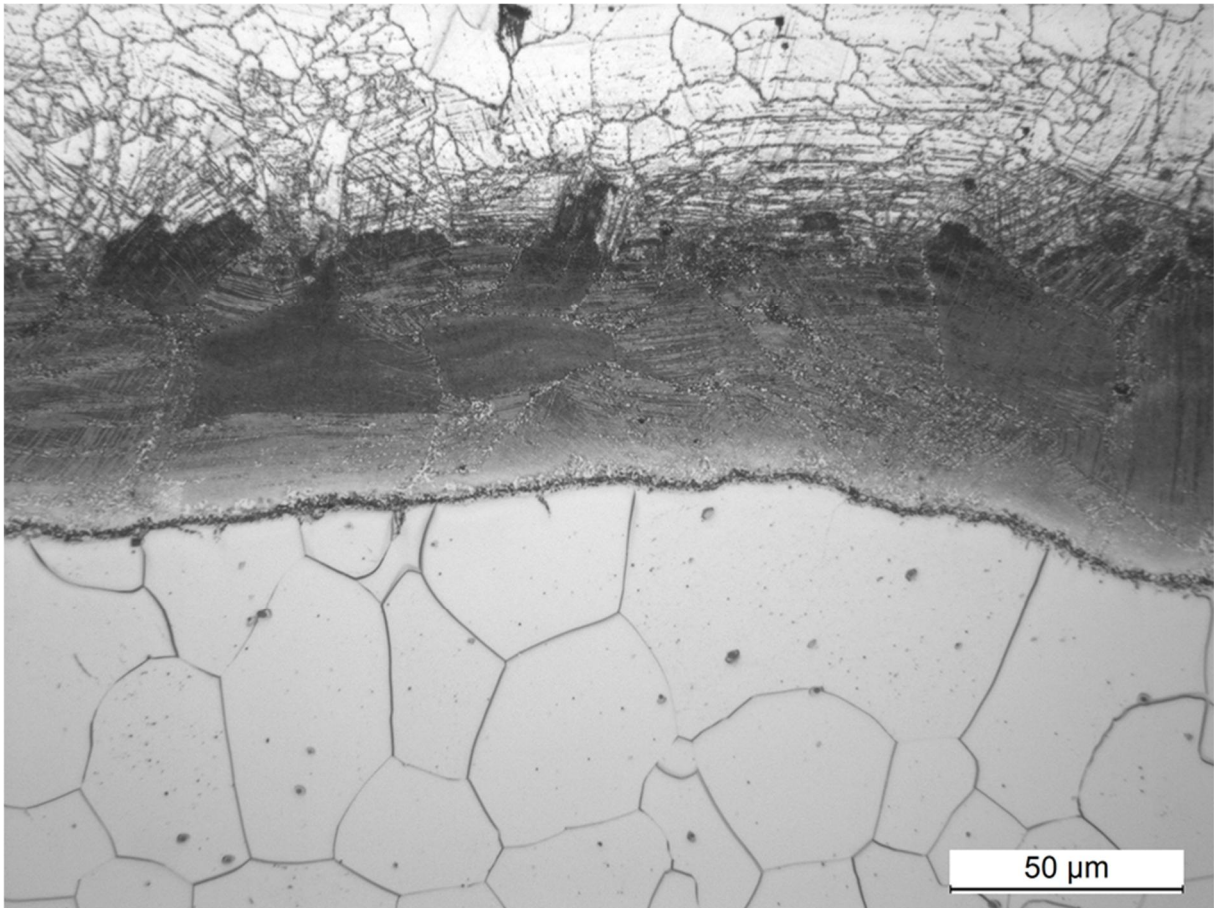
Kuva 62. 309 Areva, 700°C, 100 h



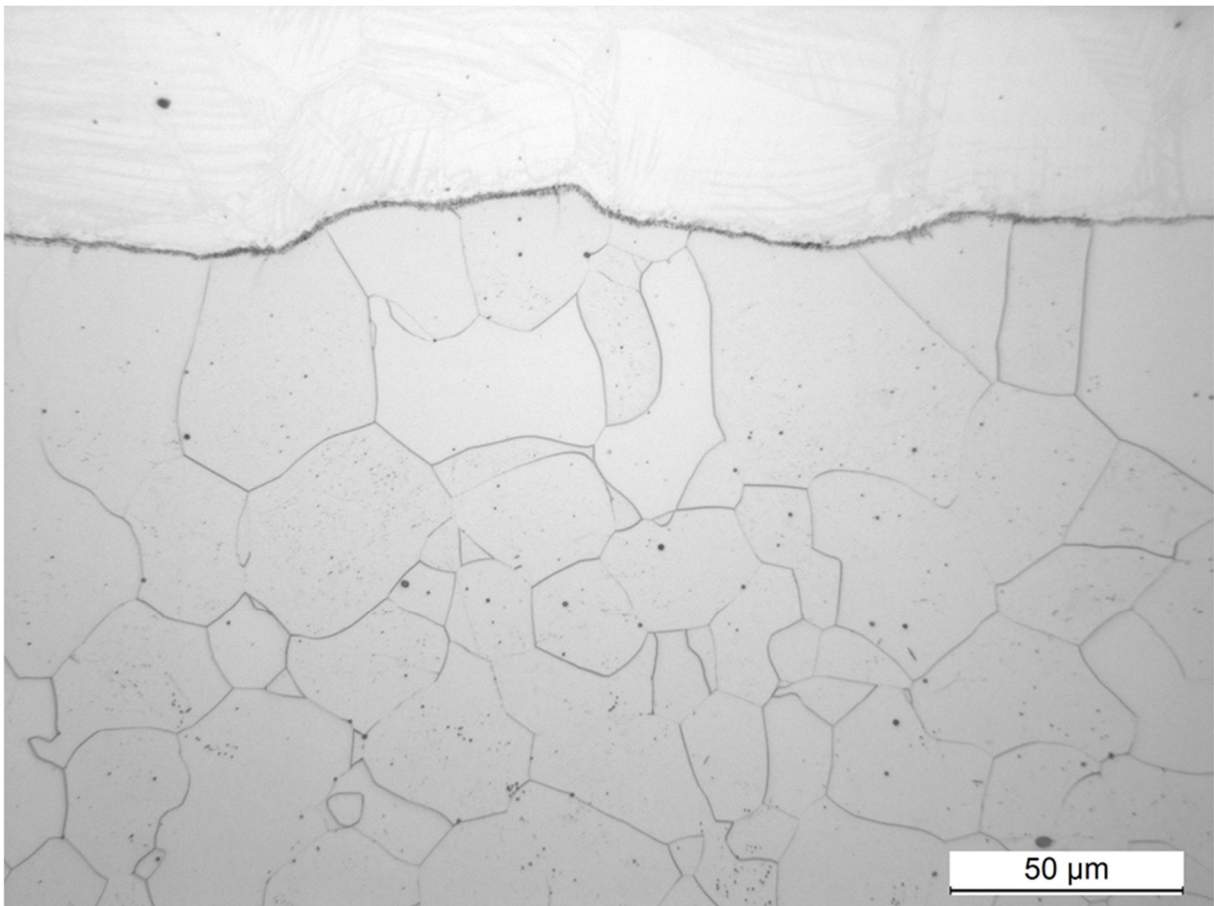
Kuva 63. 304L, toimitustila



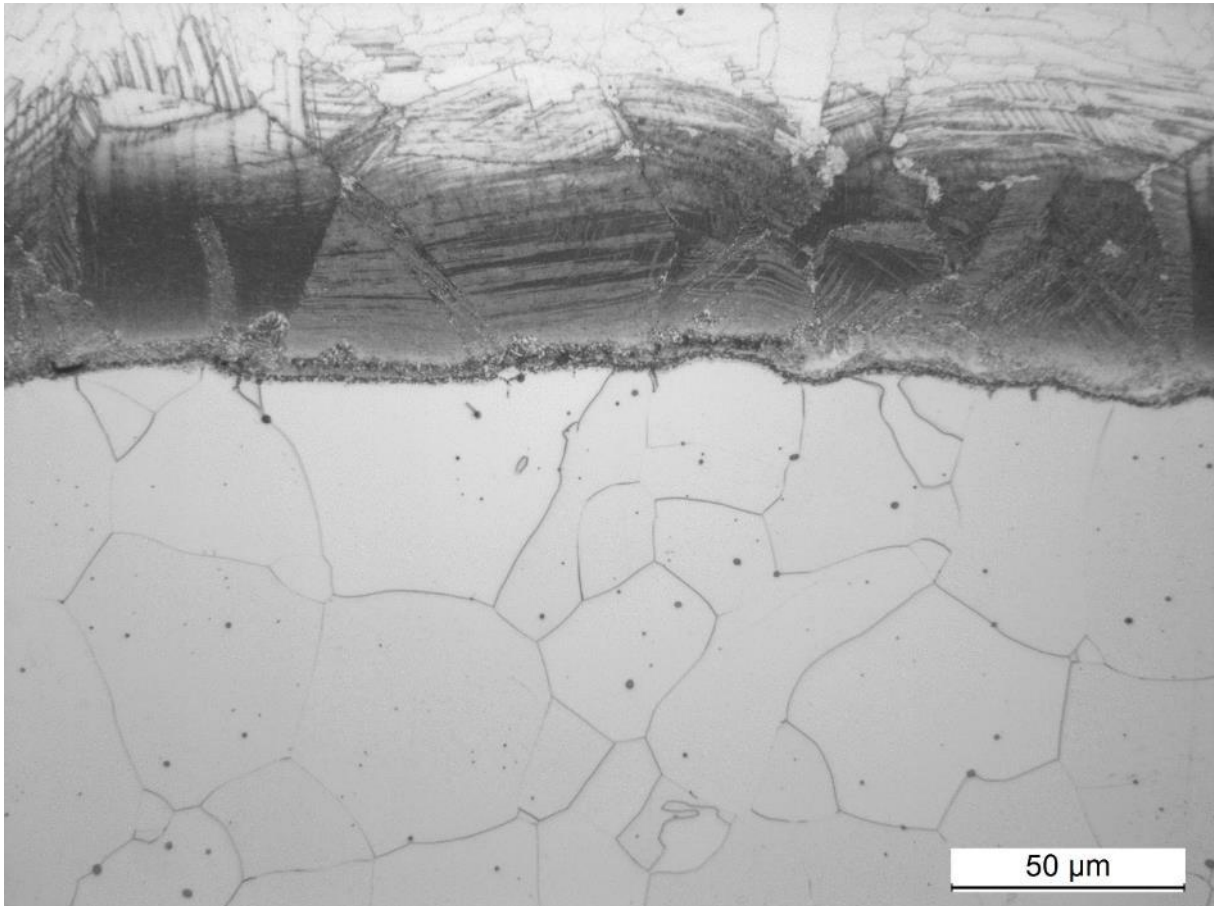
Kuva 64. 304L, 600°C, 100 h



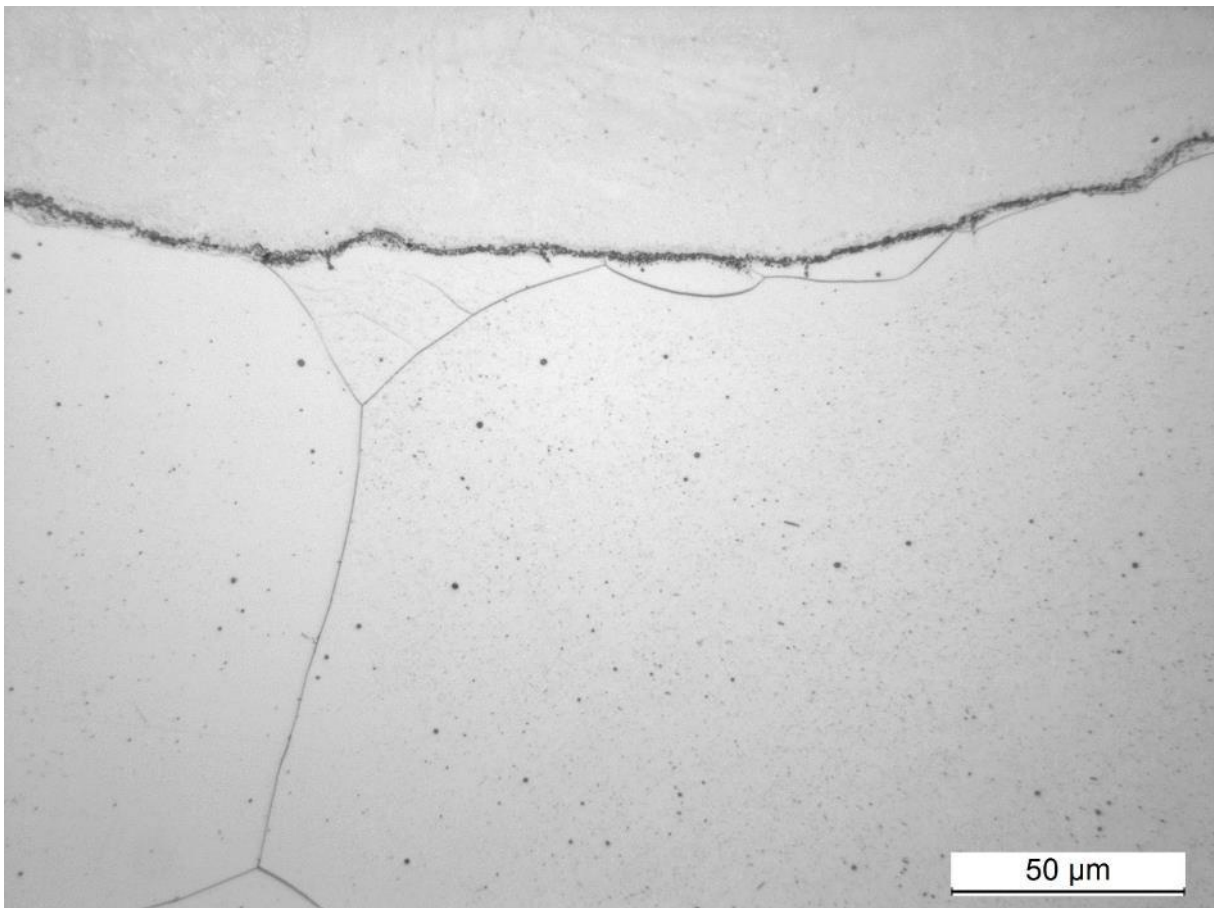
Kuva 65. 304L rajapinta, 600°C, 1000 h



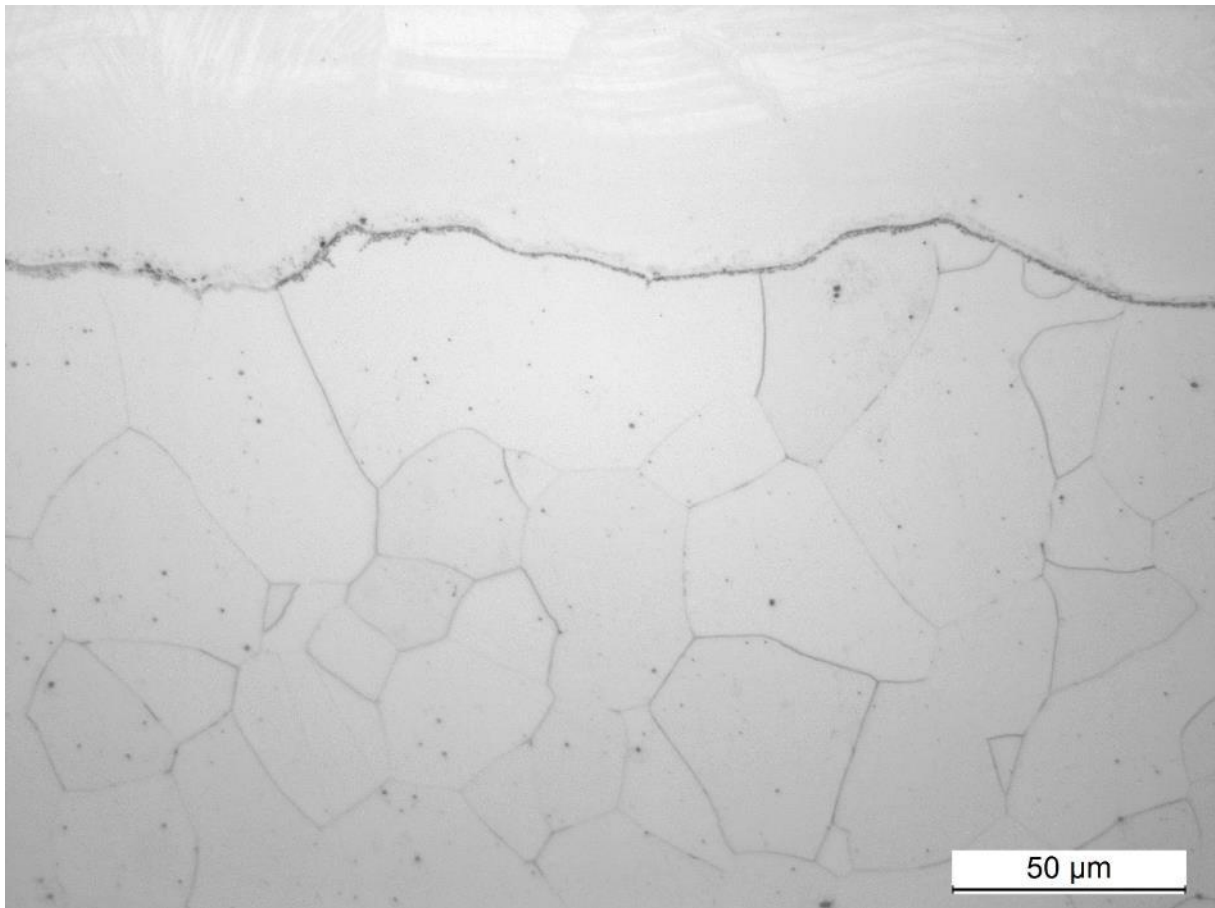
Kuva 66. 304L, 650°C, 10 h



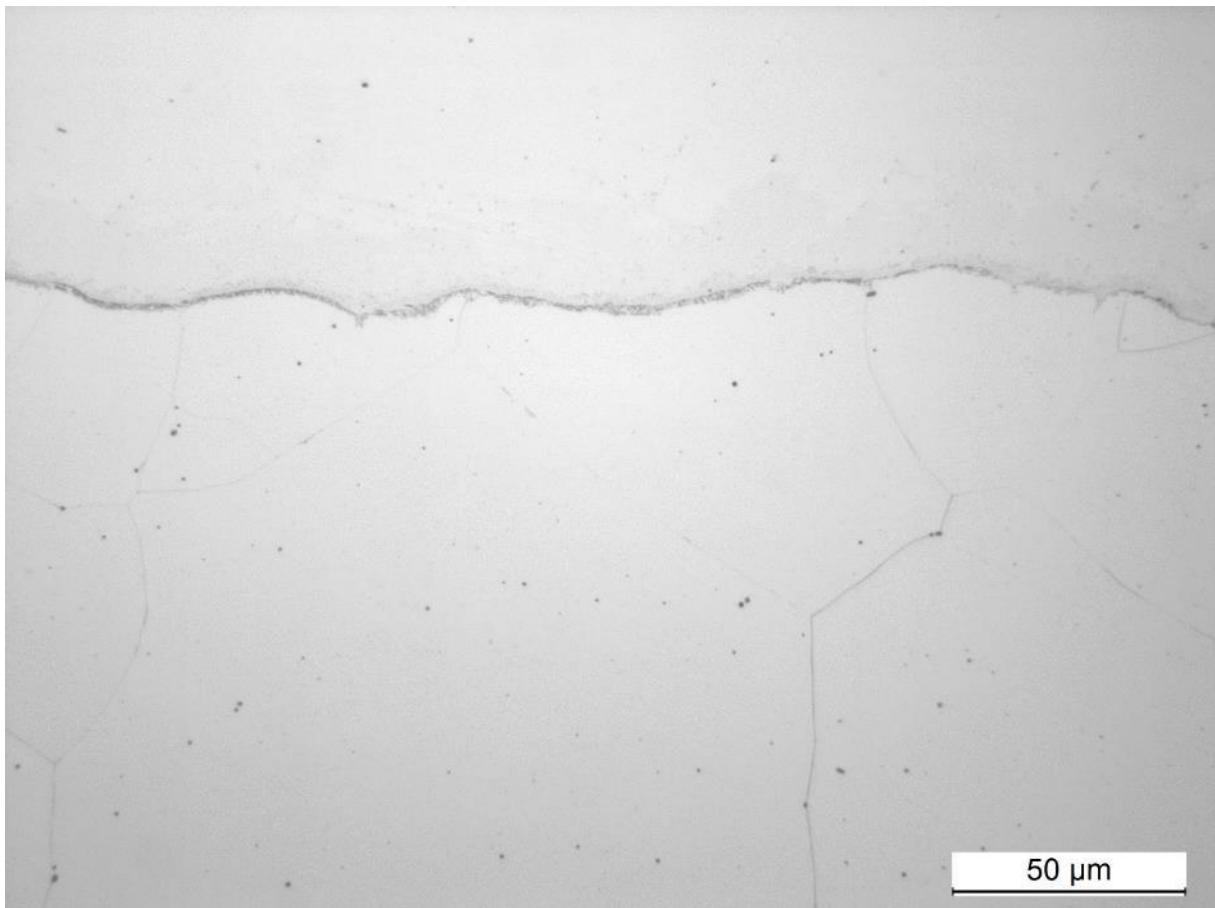
Kuva 67. 304L, 650°C, 100 h



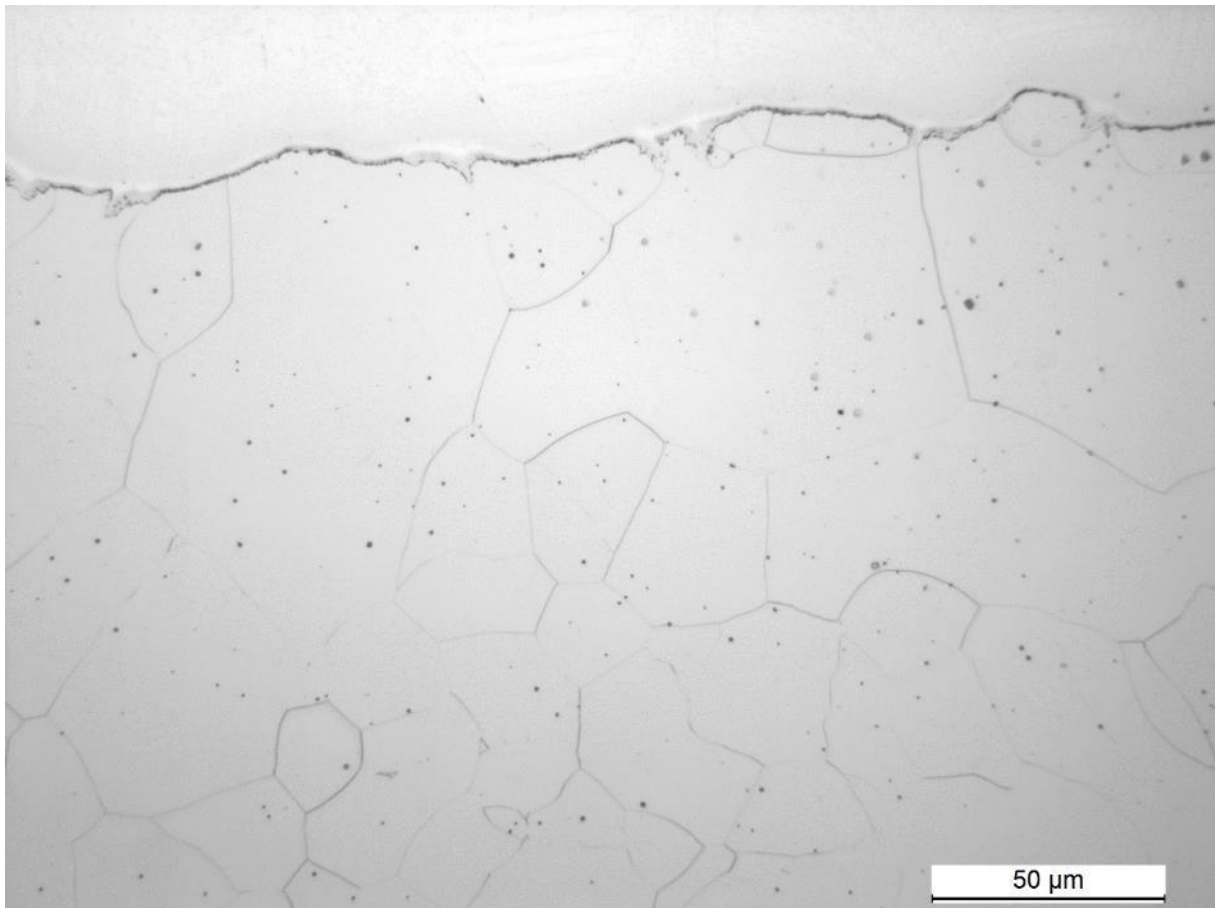
Kuva 68. 304L, 650°C, 1000 h



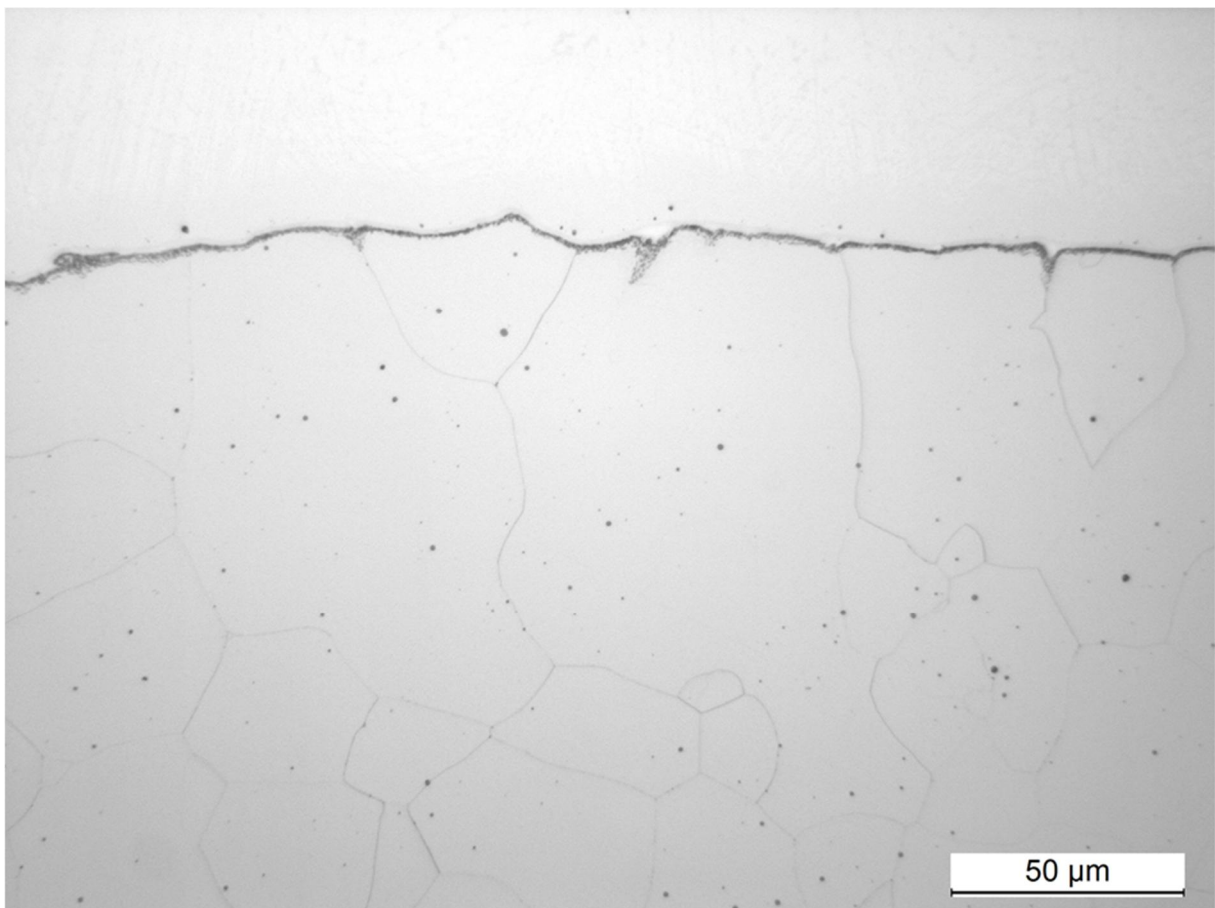
Kuva 69. 304L, 700°C, 10 h



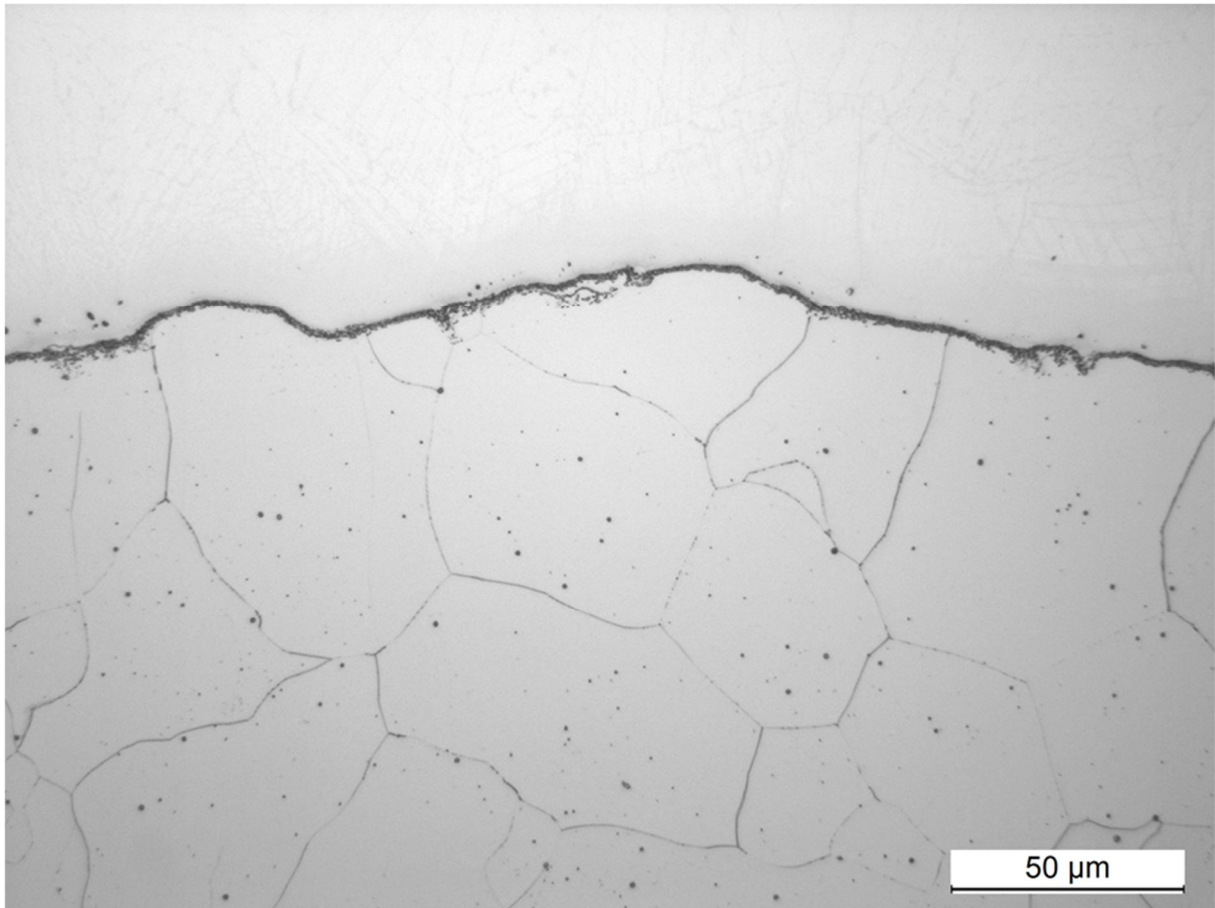
Kuva 70. 304L, 700°C, 100 h



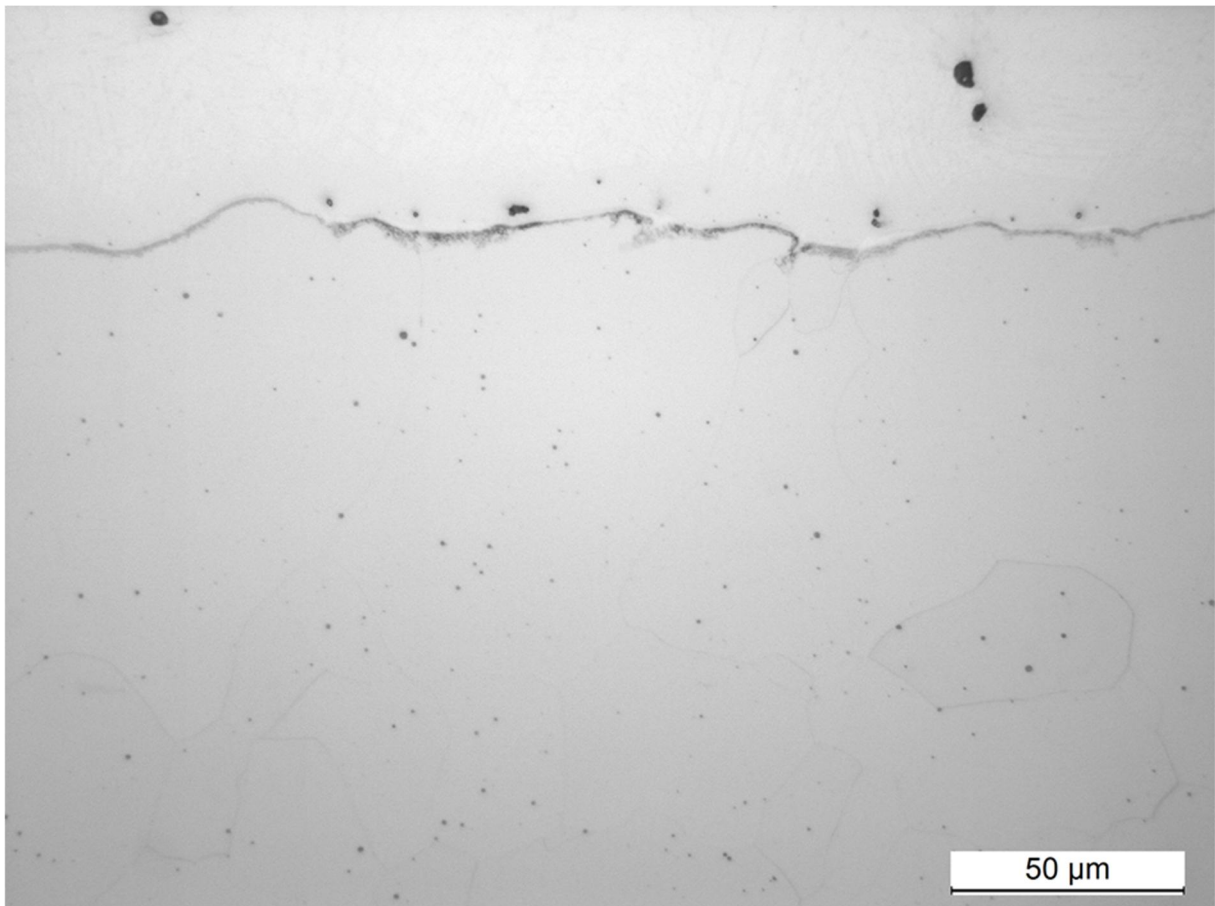
Kuva 71. San28 rajapinta, toimitustila



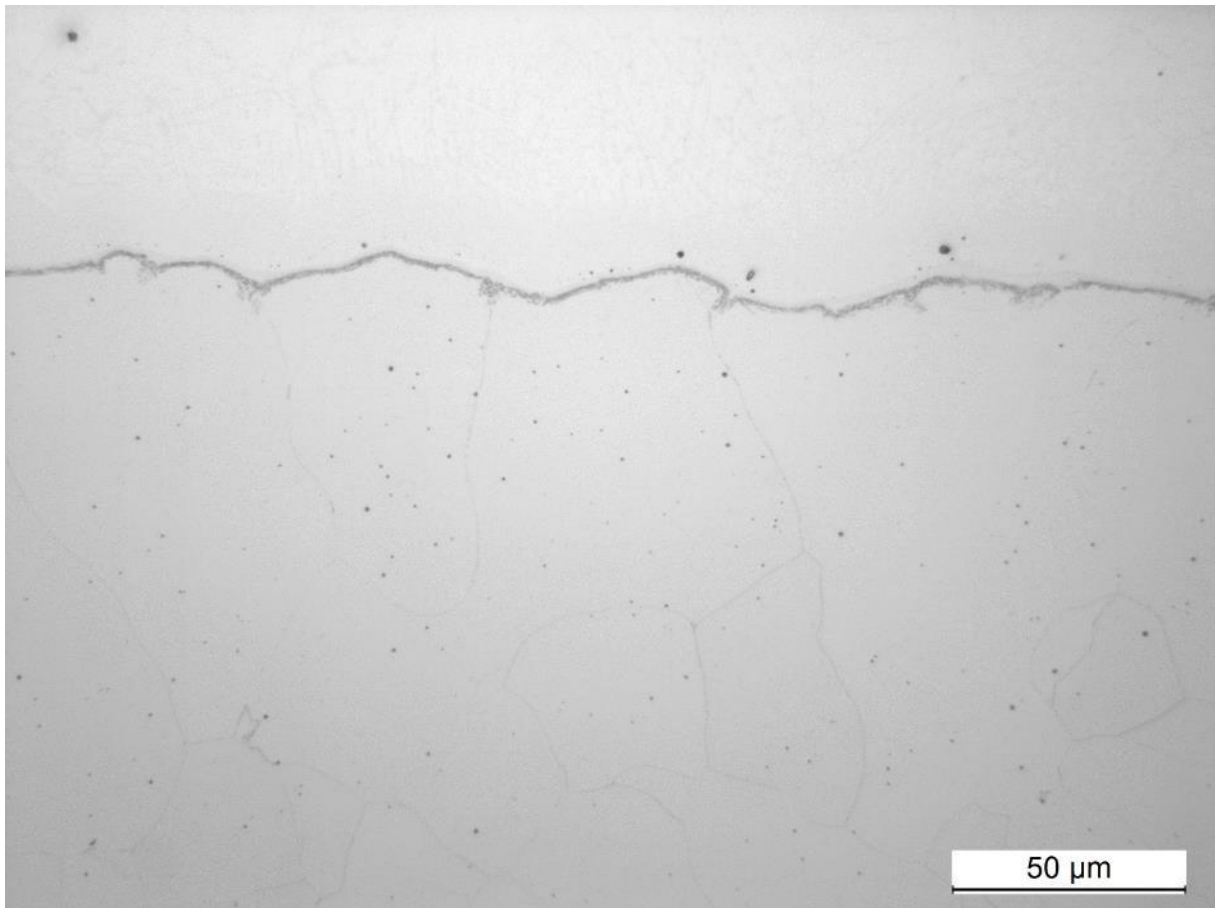
Kuva 72. San28 rajapinta, 600°C, 100 h



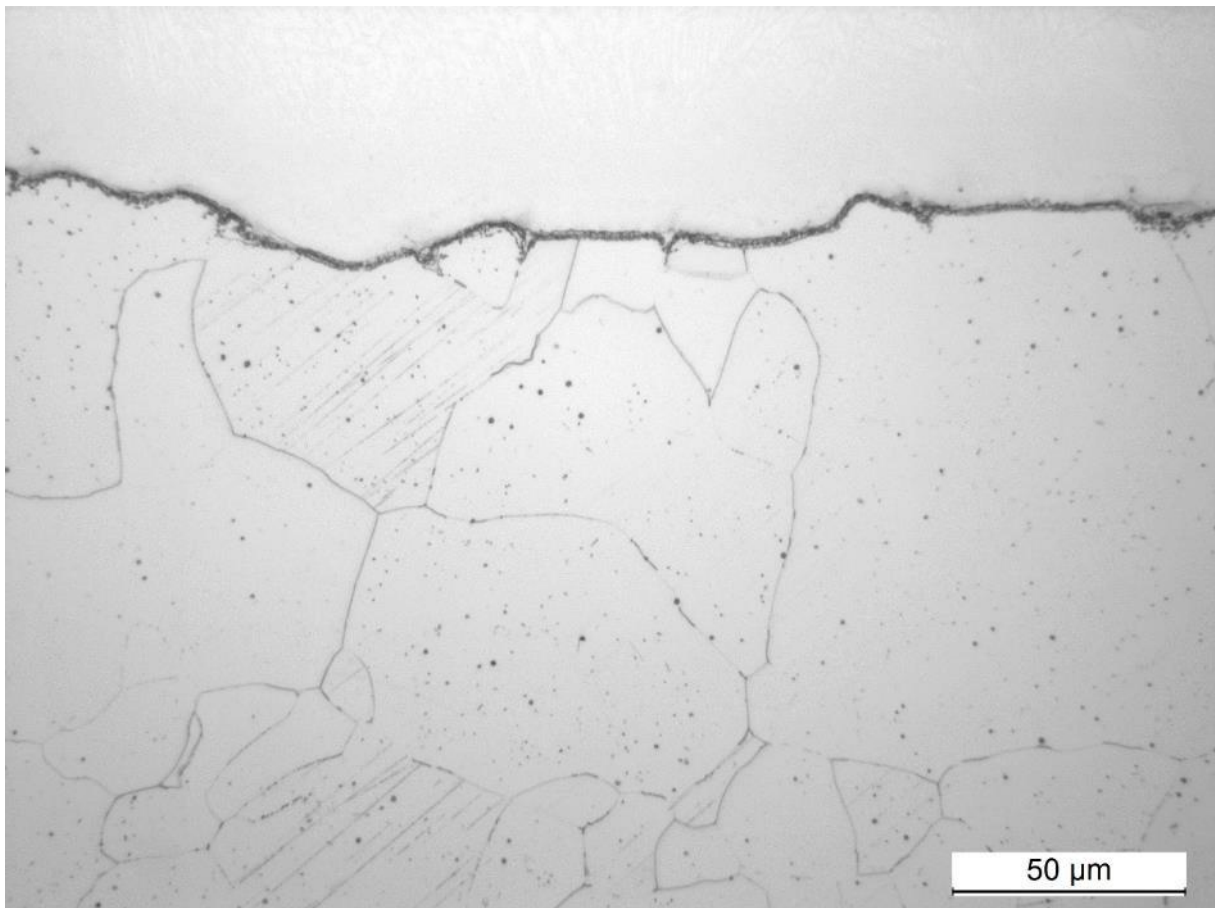
Kuva 73. San28, 600°C, 1000 h



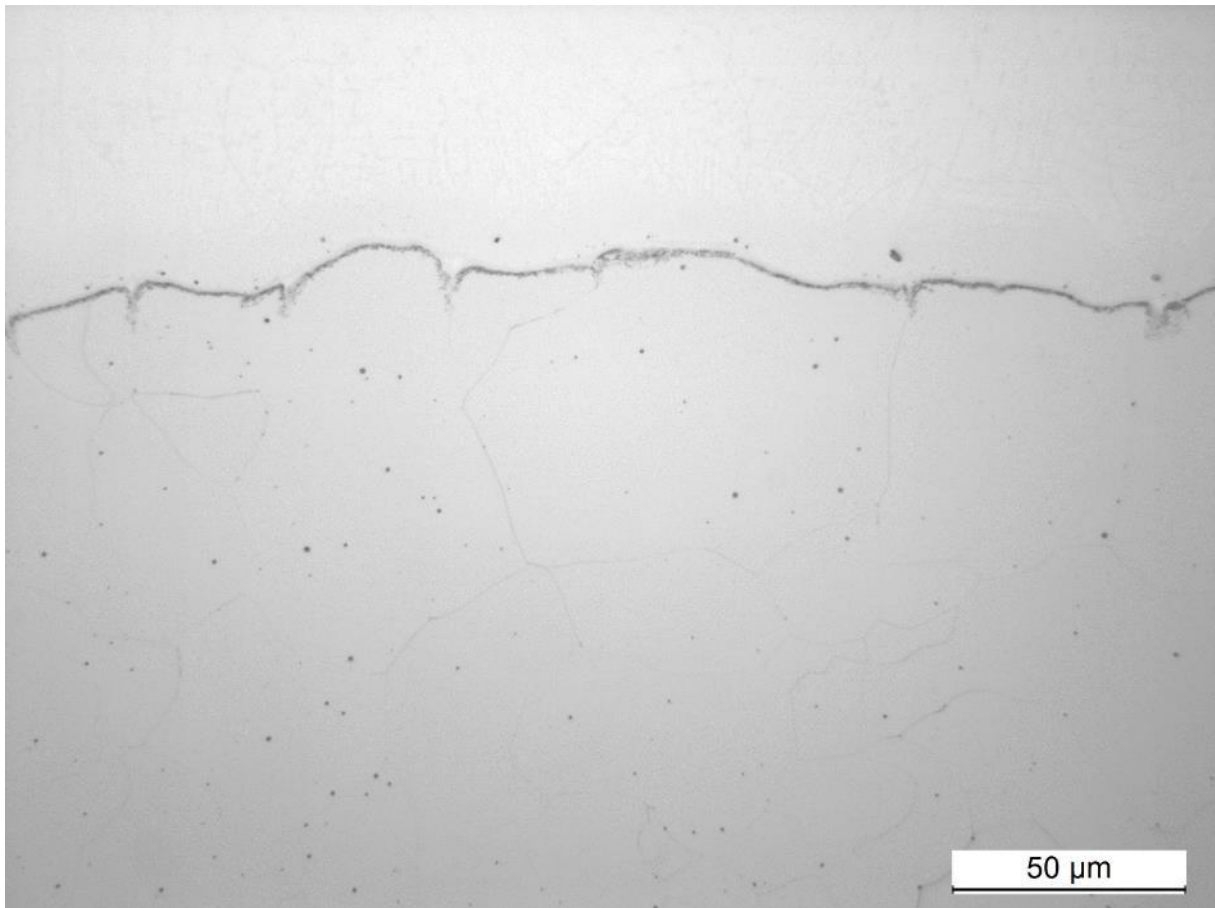
Kuva 74. San28, 650°C, 10 h



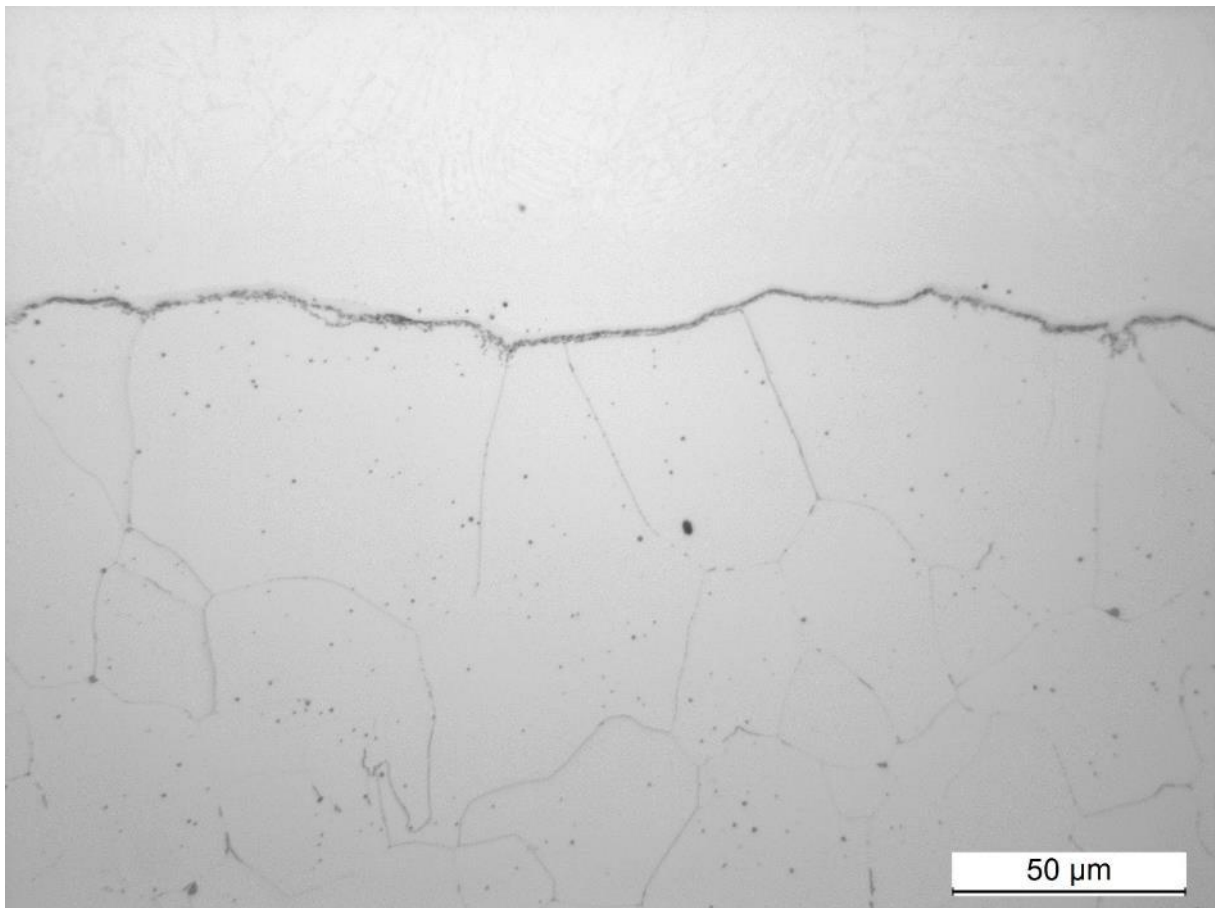
Kuva 75. San28, 650°C, 100 h



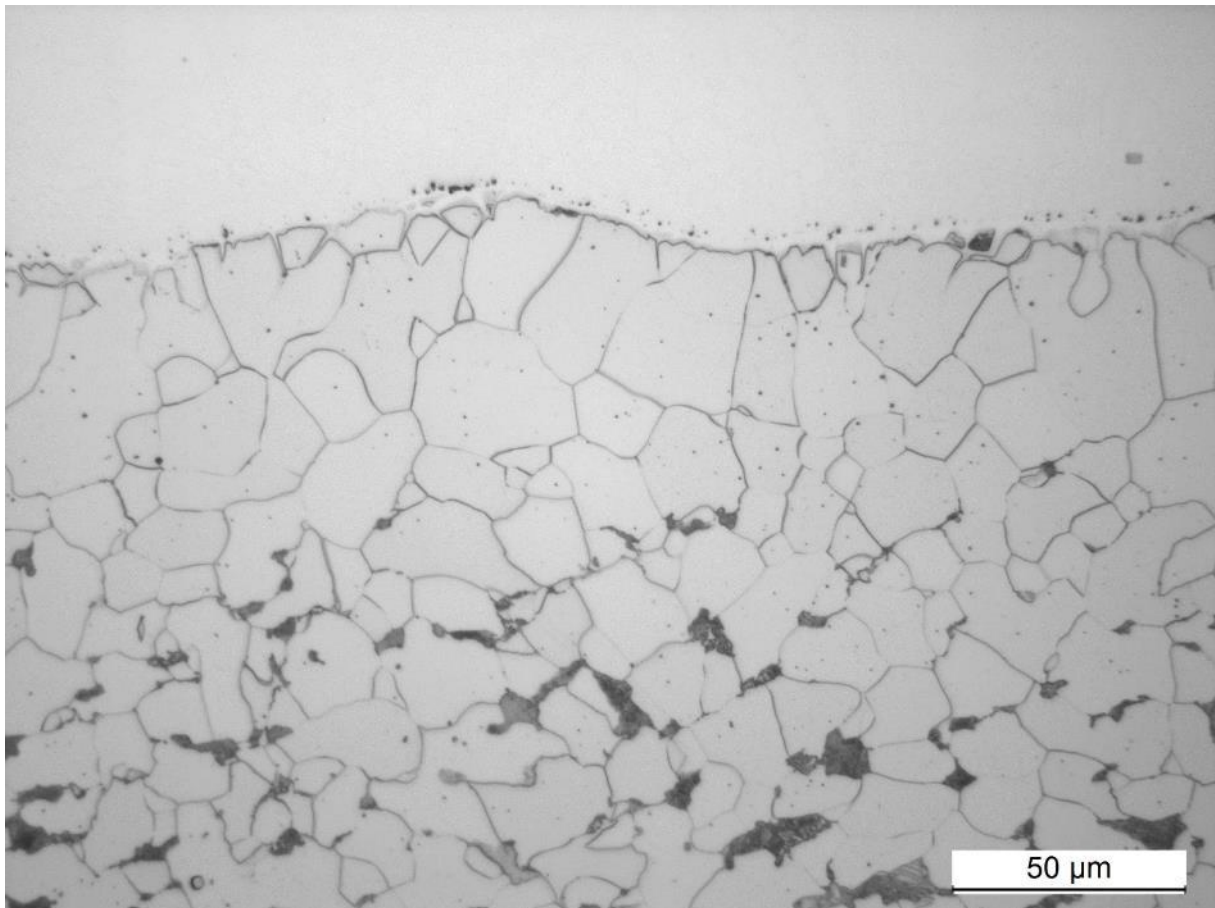
Kuva 76. San28, 650°C, 1000 h



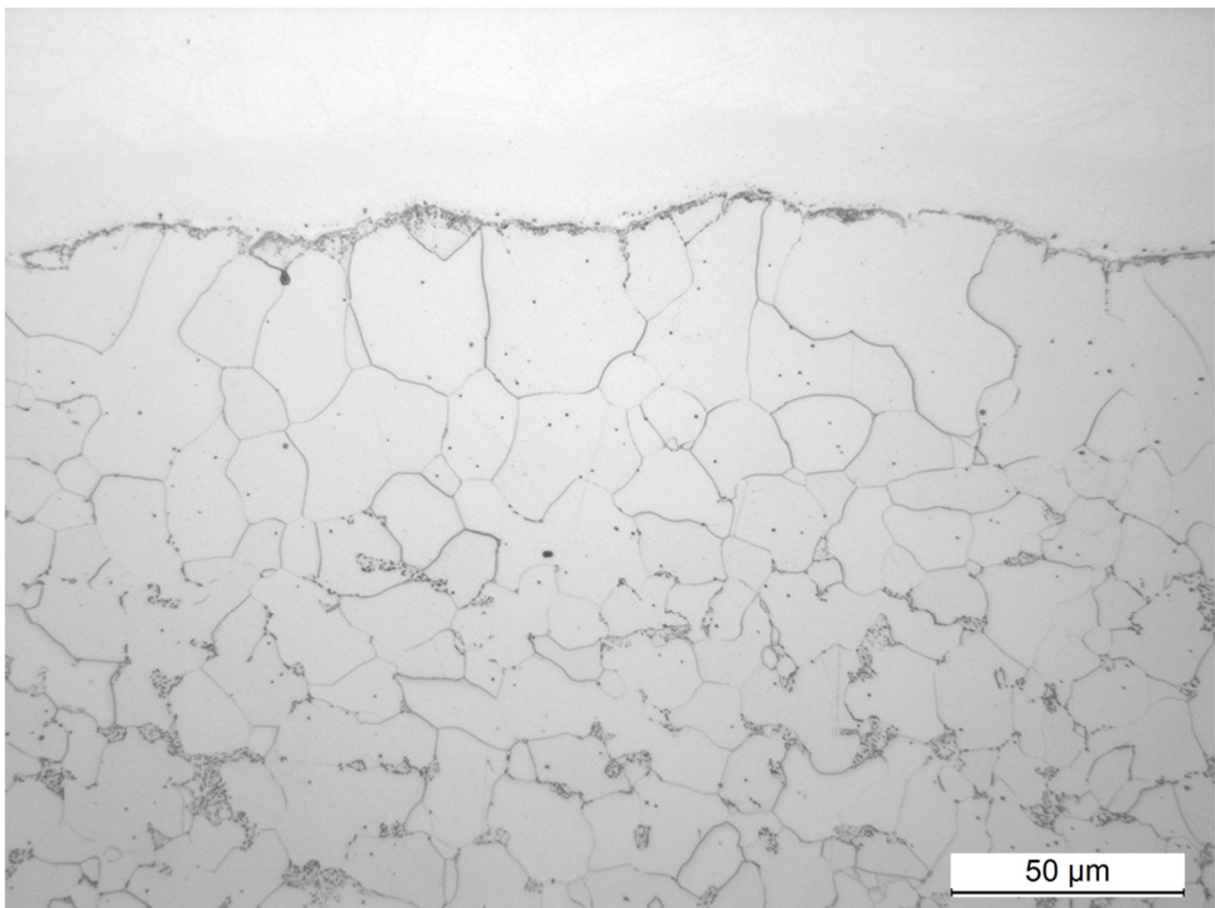
Kuva 77. San28, 700°C, 10 h



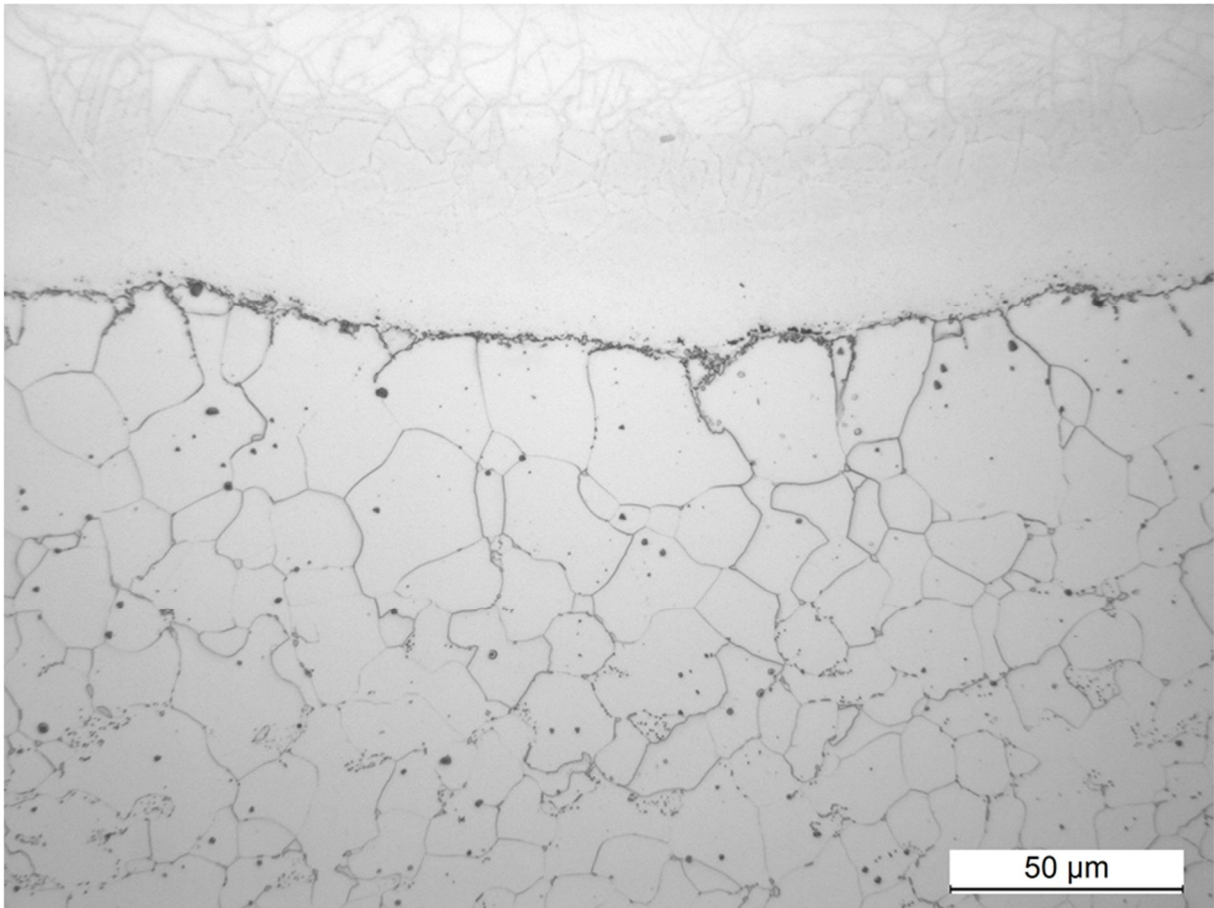
Kuva 78. San28, 700°C, 100 h



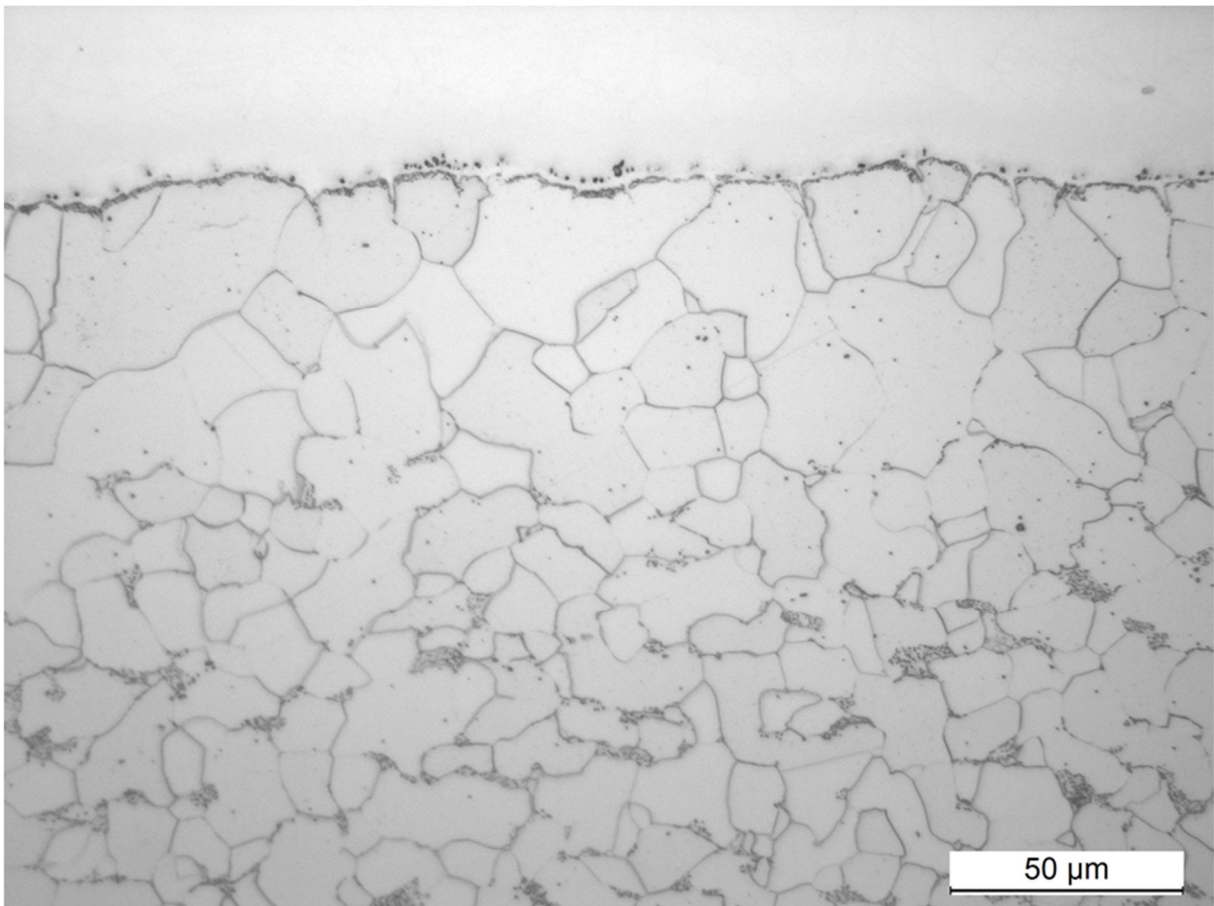
Kuva 79. San38 rajapinta, toimitustila



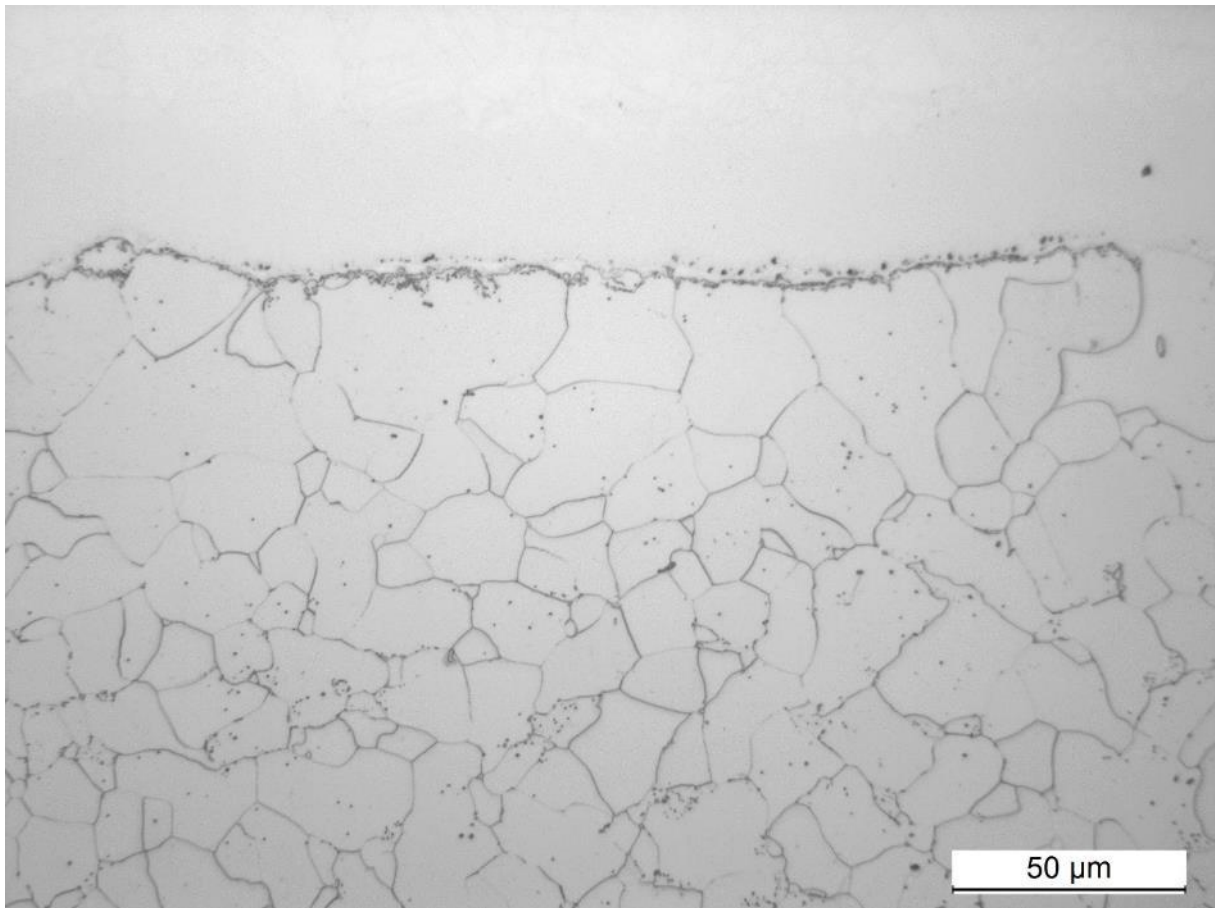
Kuva 80. San38, 600°C, 100 h



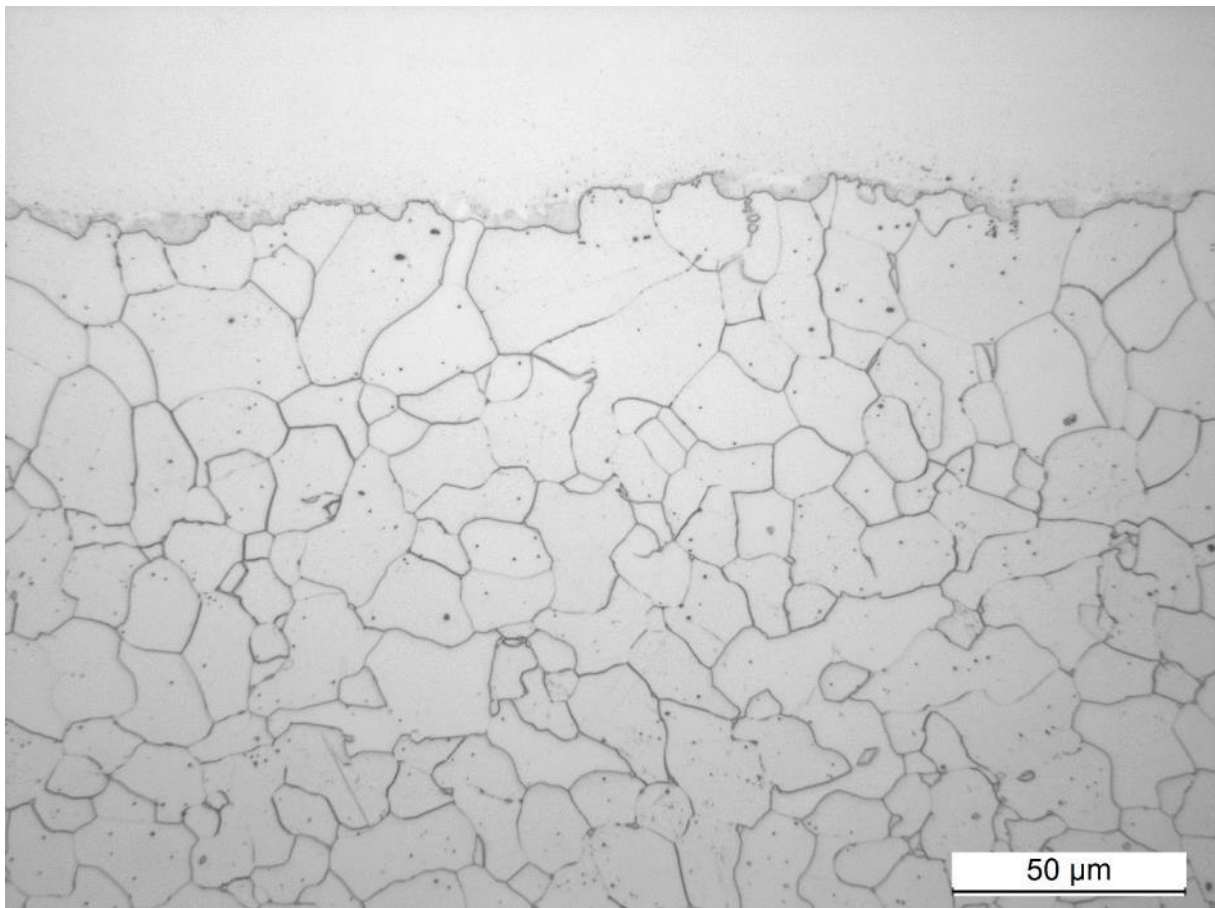
Kuva 81. San38 rajapinta, 600°C, 1000 h



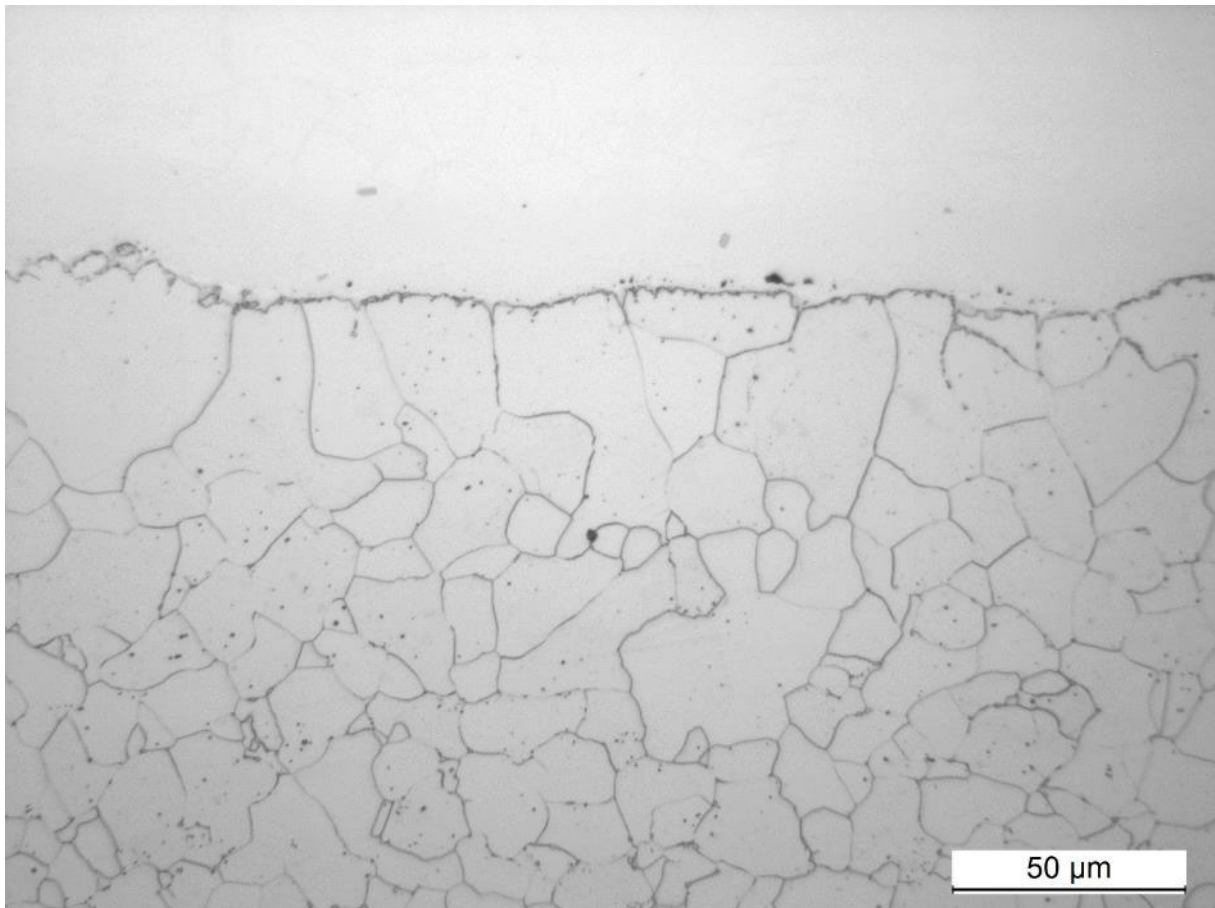
Kuva 82. San38, 650°C, 10 h



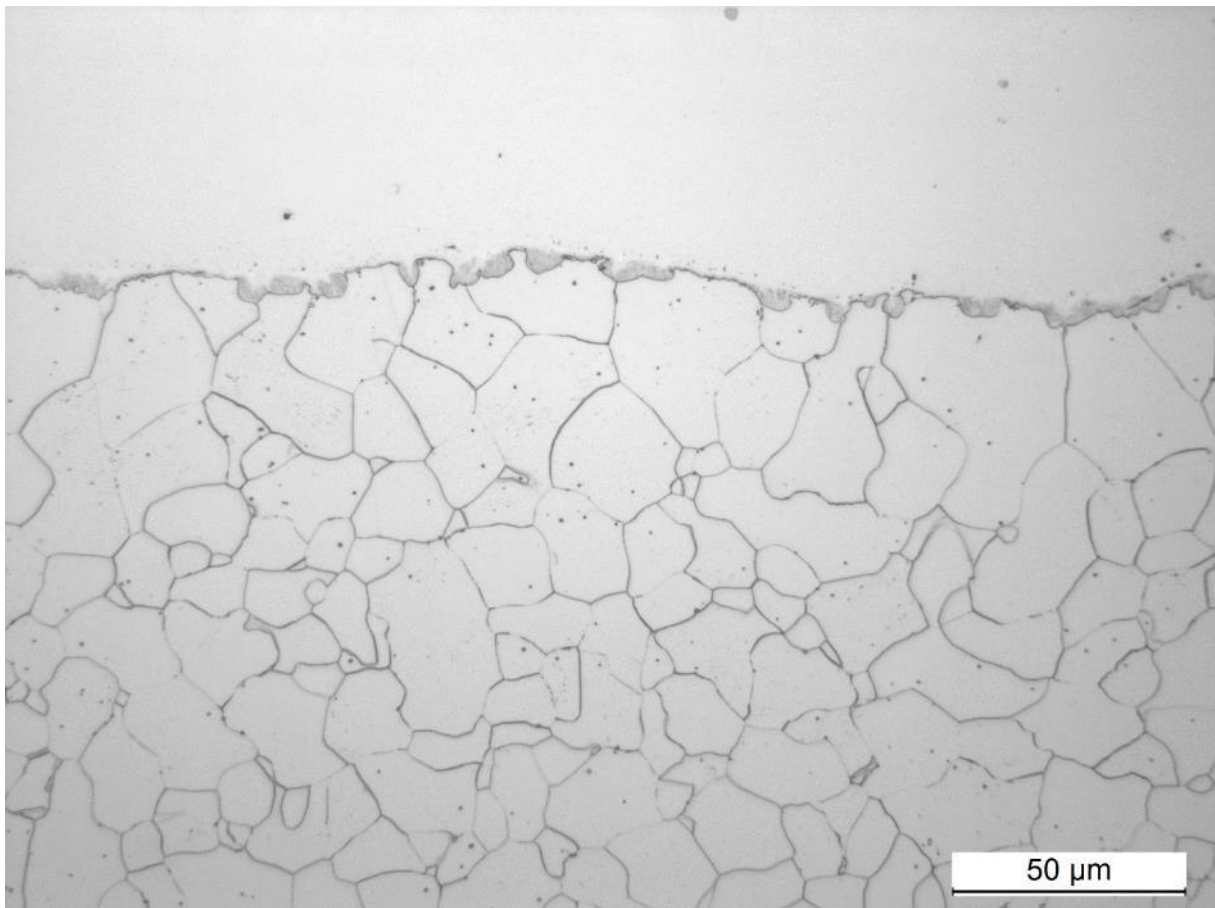
Kuva 83. San38, 650°C, 100 h



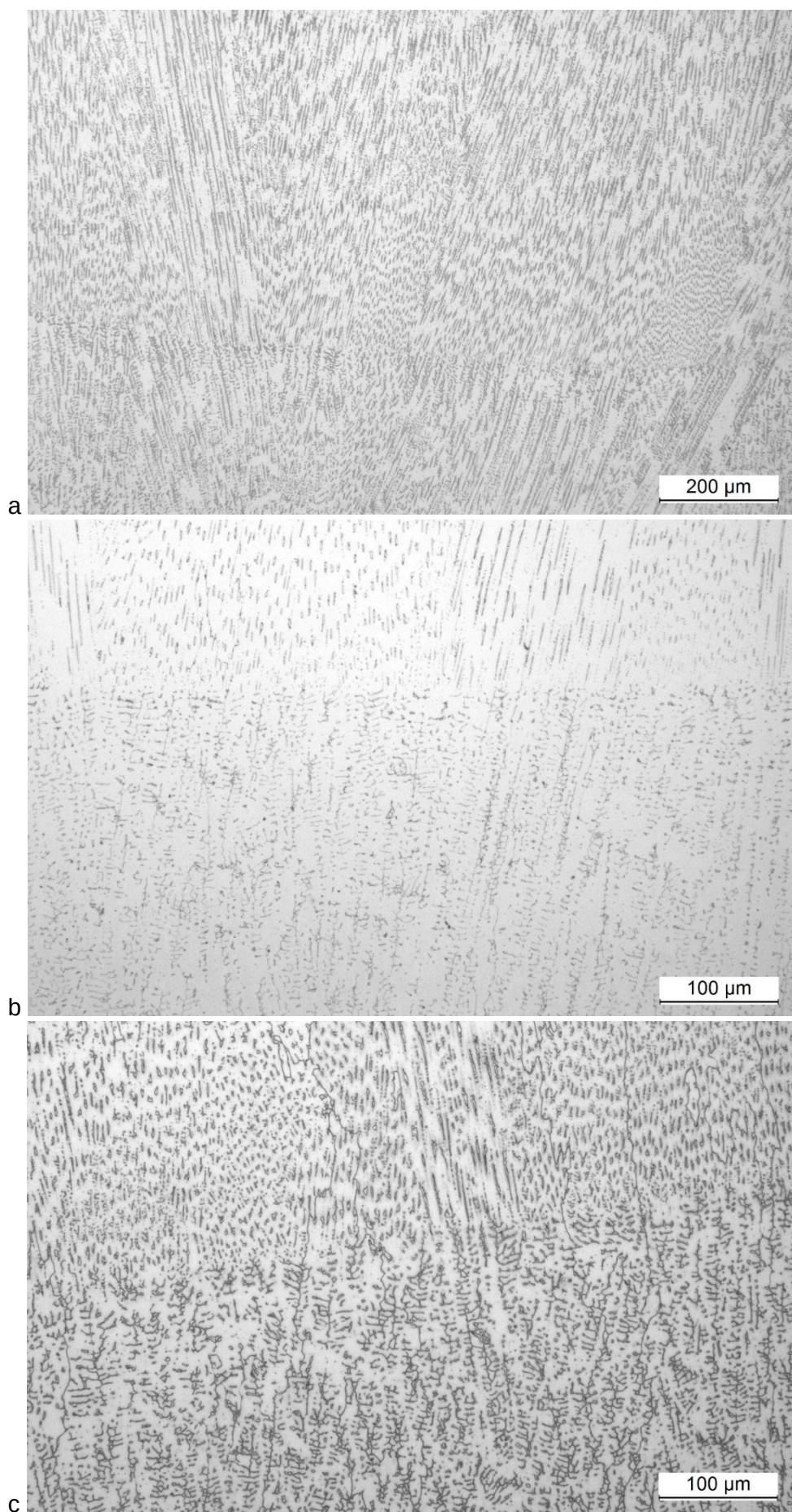
Kuva 84. San38, 650°C, 1000 h



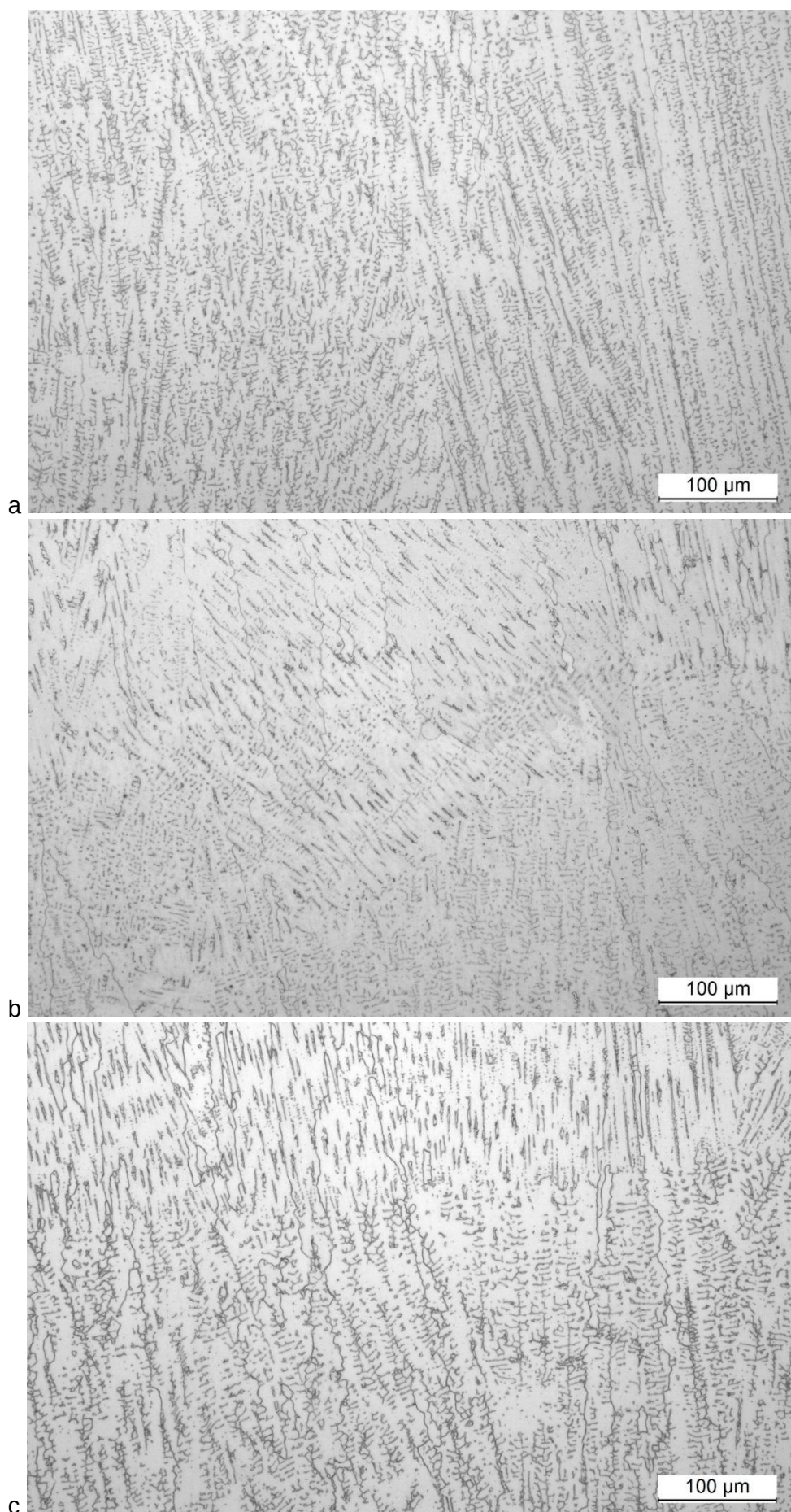
Kuva 85. San38, 700°C, 10 h



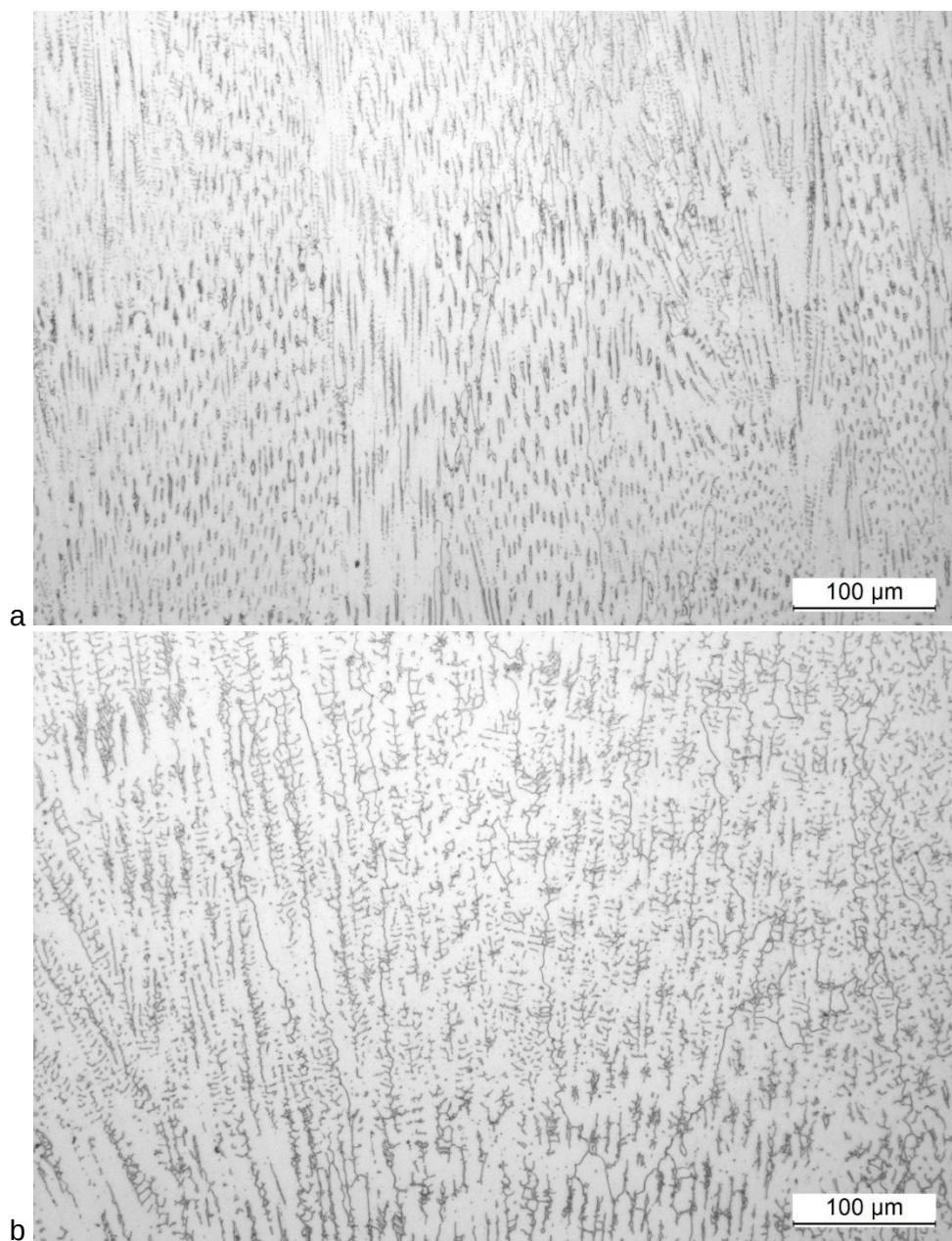
Kuva 86. San38, 700°C, 100 h



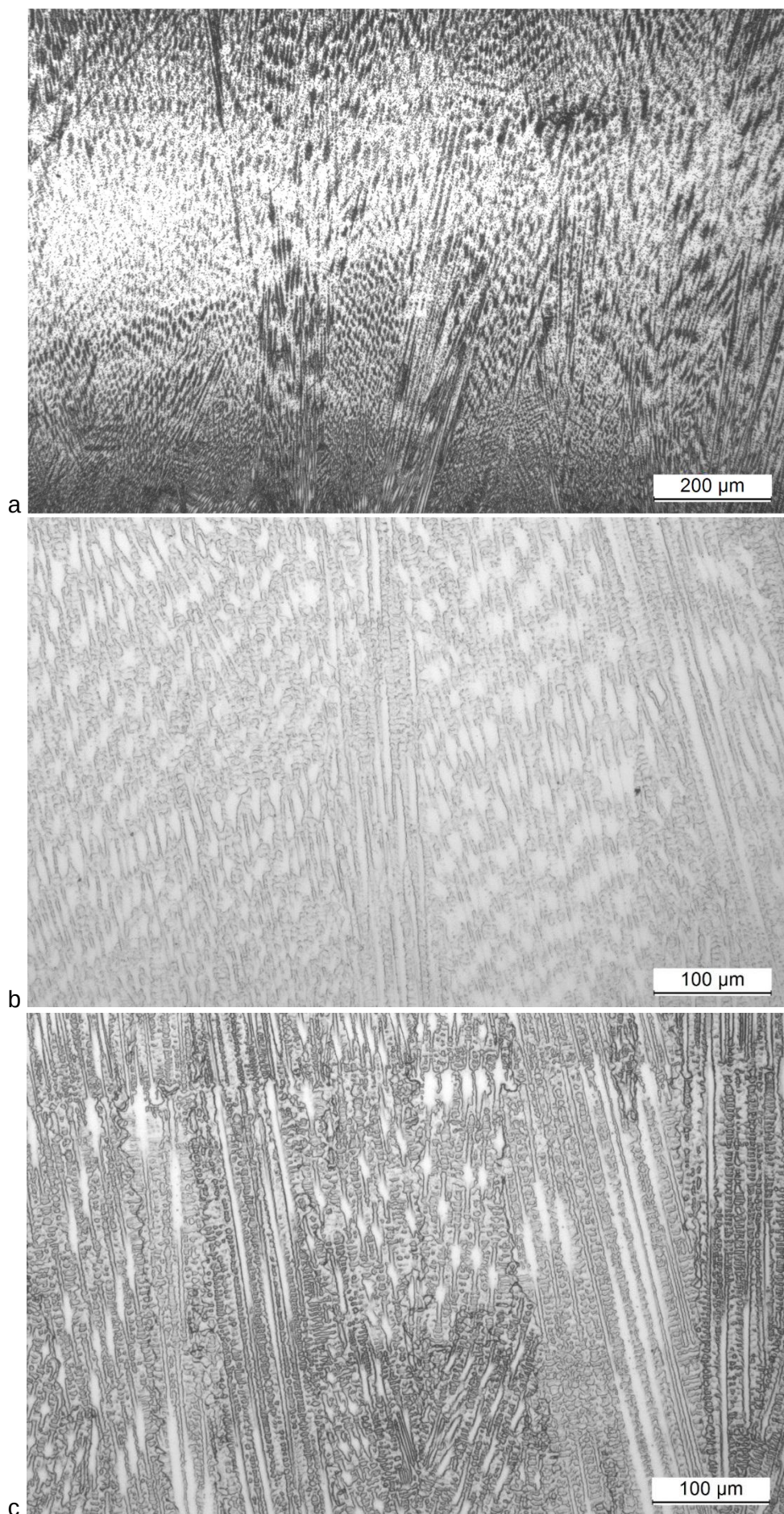
Kuva 1. 309 AZZ, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.



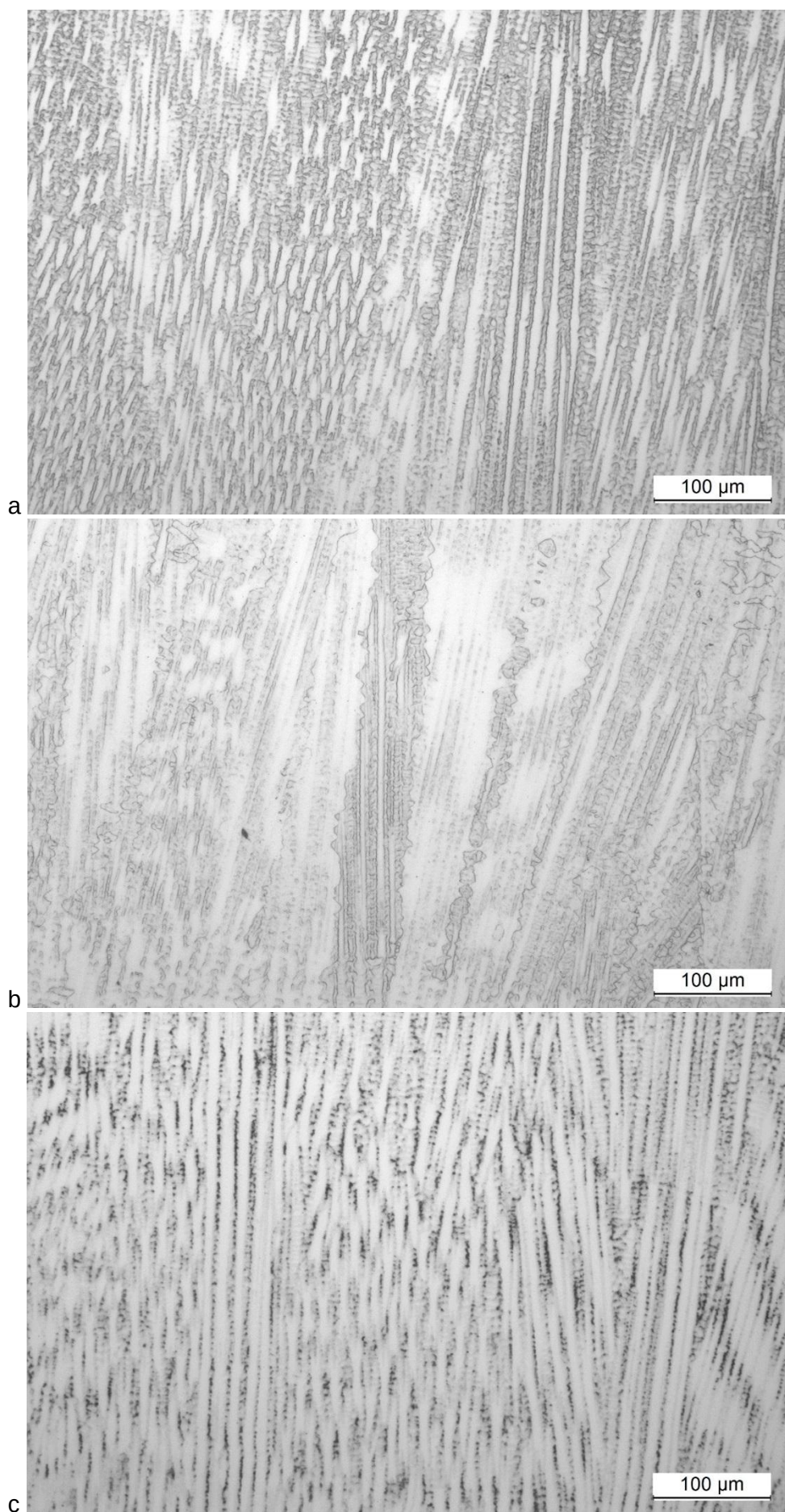
Kuva 2. 309 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



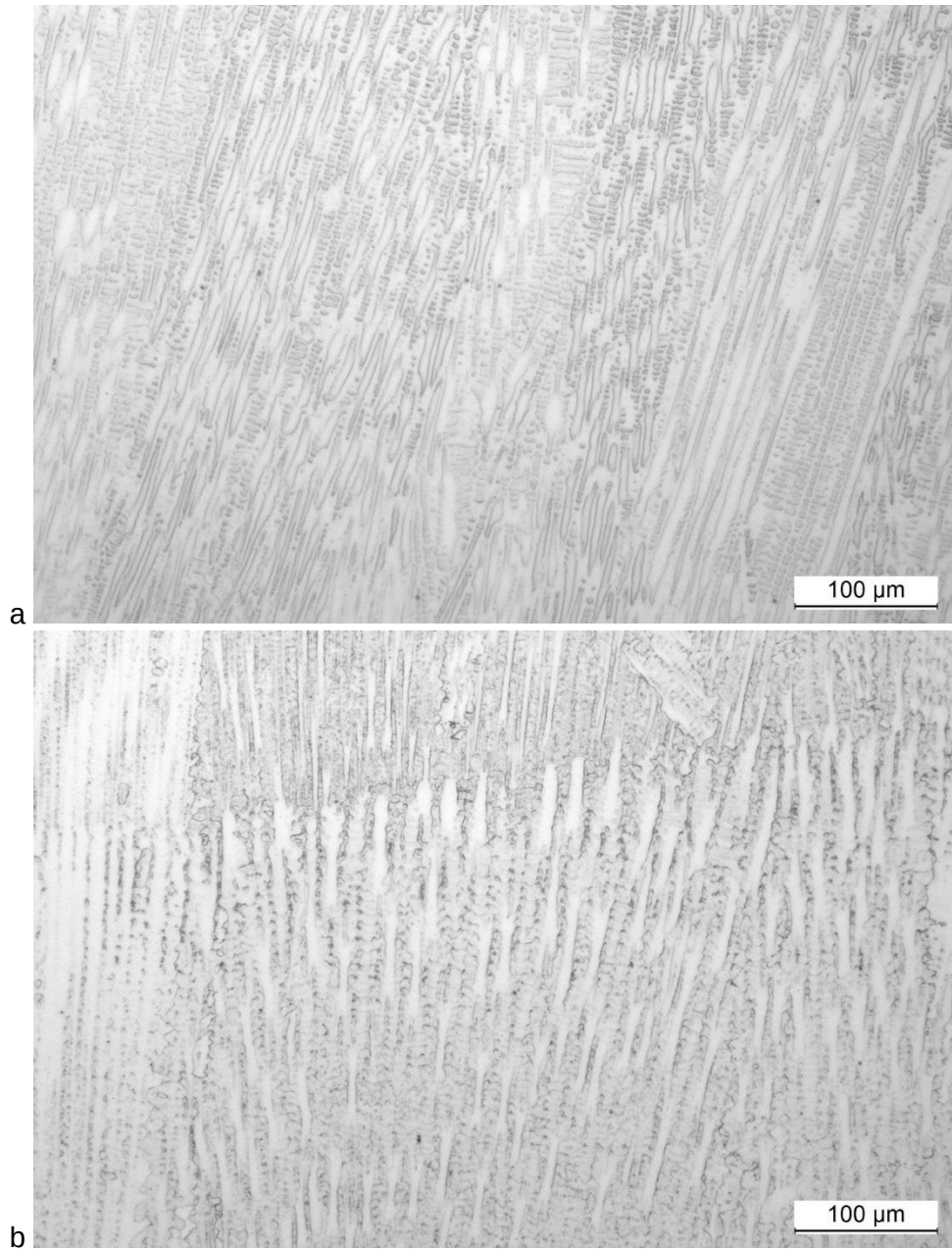
Kuva 3. 309 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



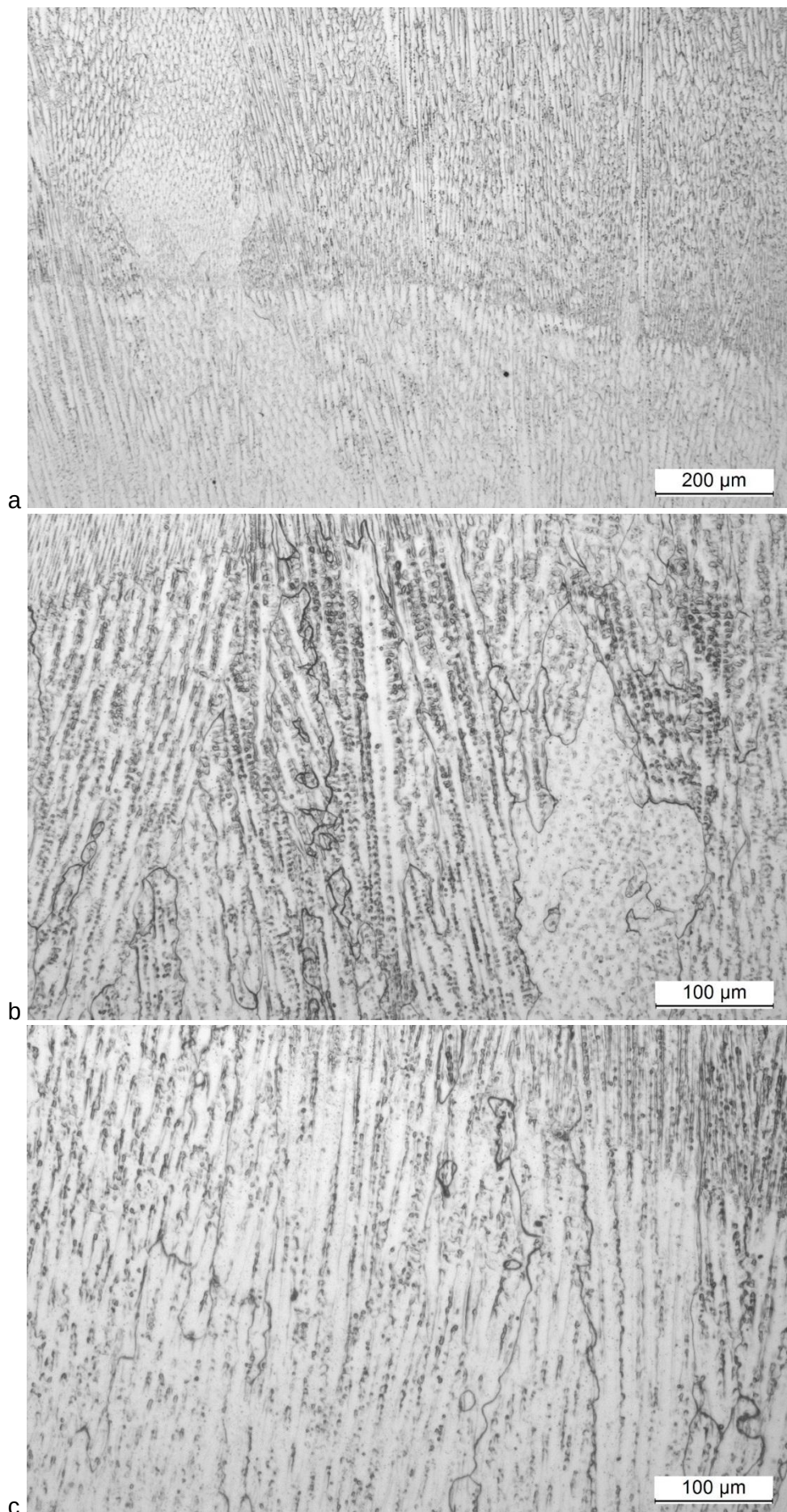
Kuva 4. IN625 AZZ, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suurennos



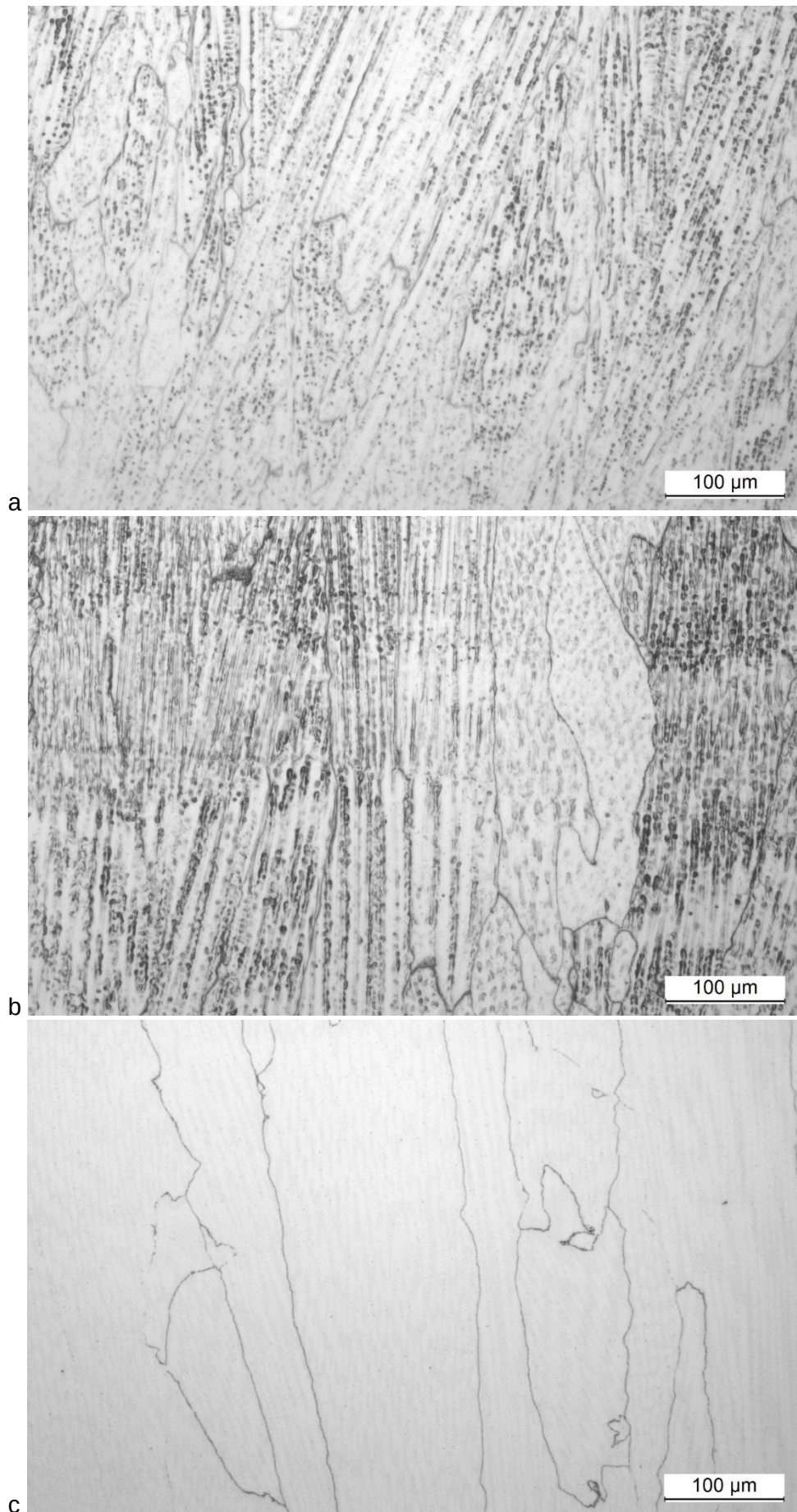
Kuva 5. IN625 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



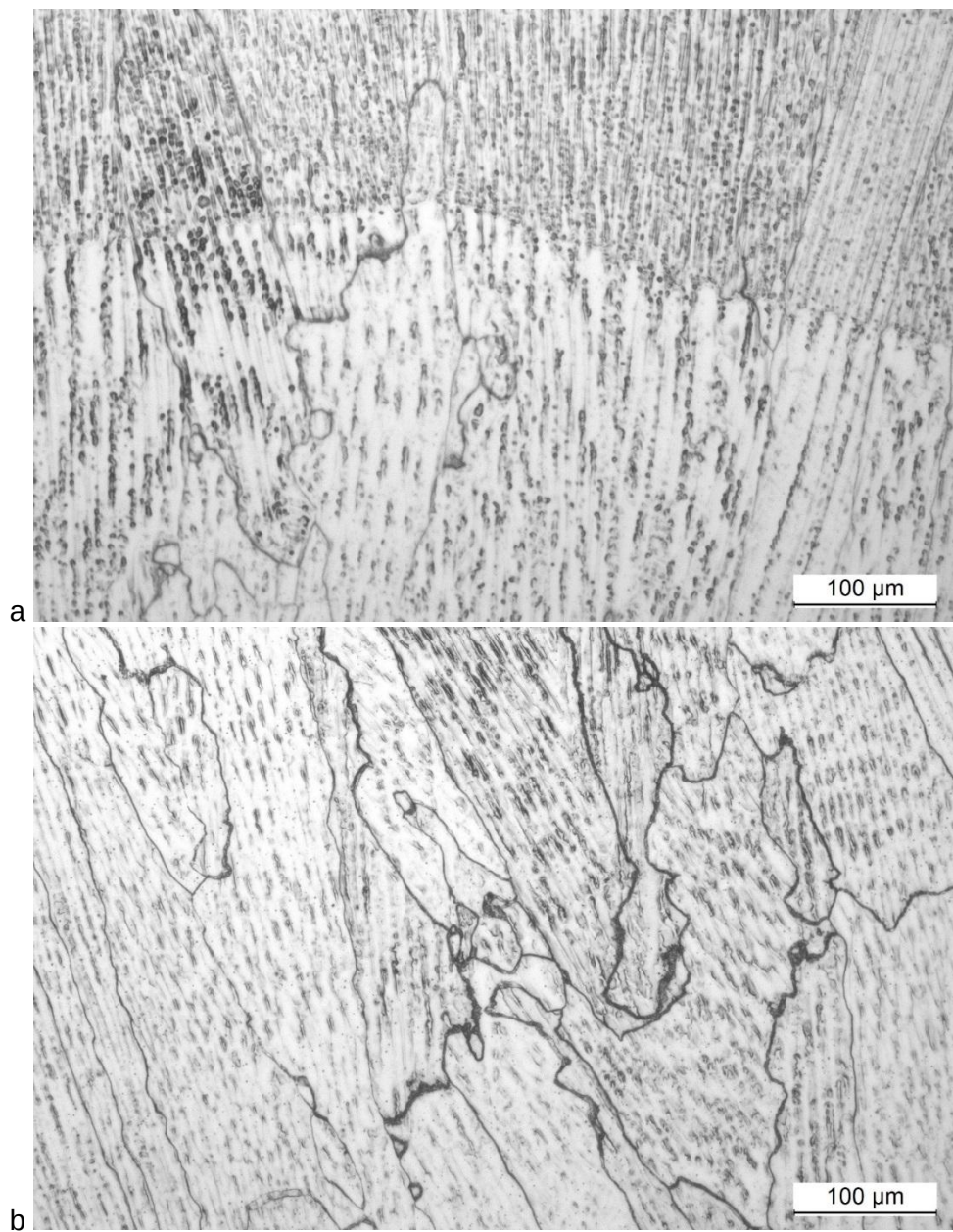
Kuva 6. IN625 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



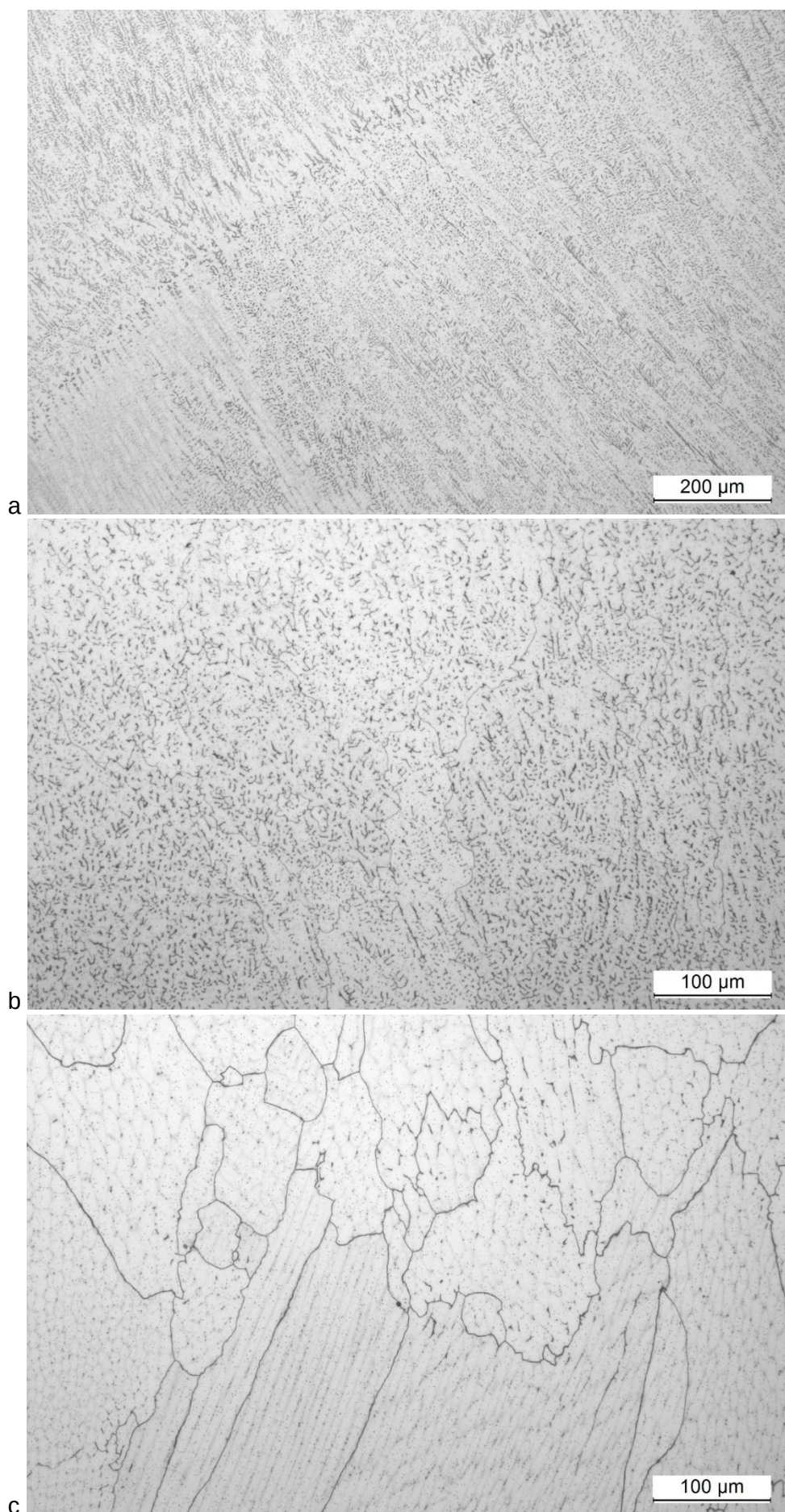
Kuva 7. IN825 AZZ, toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.



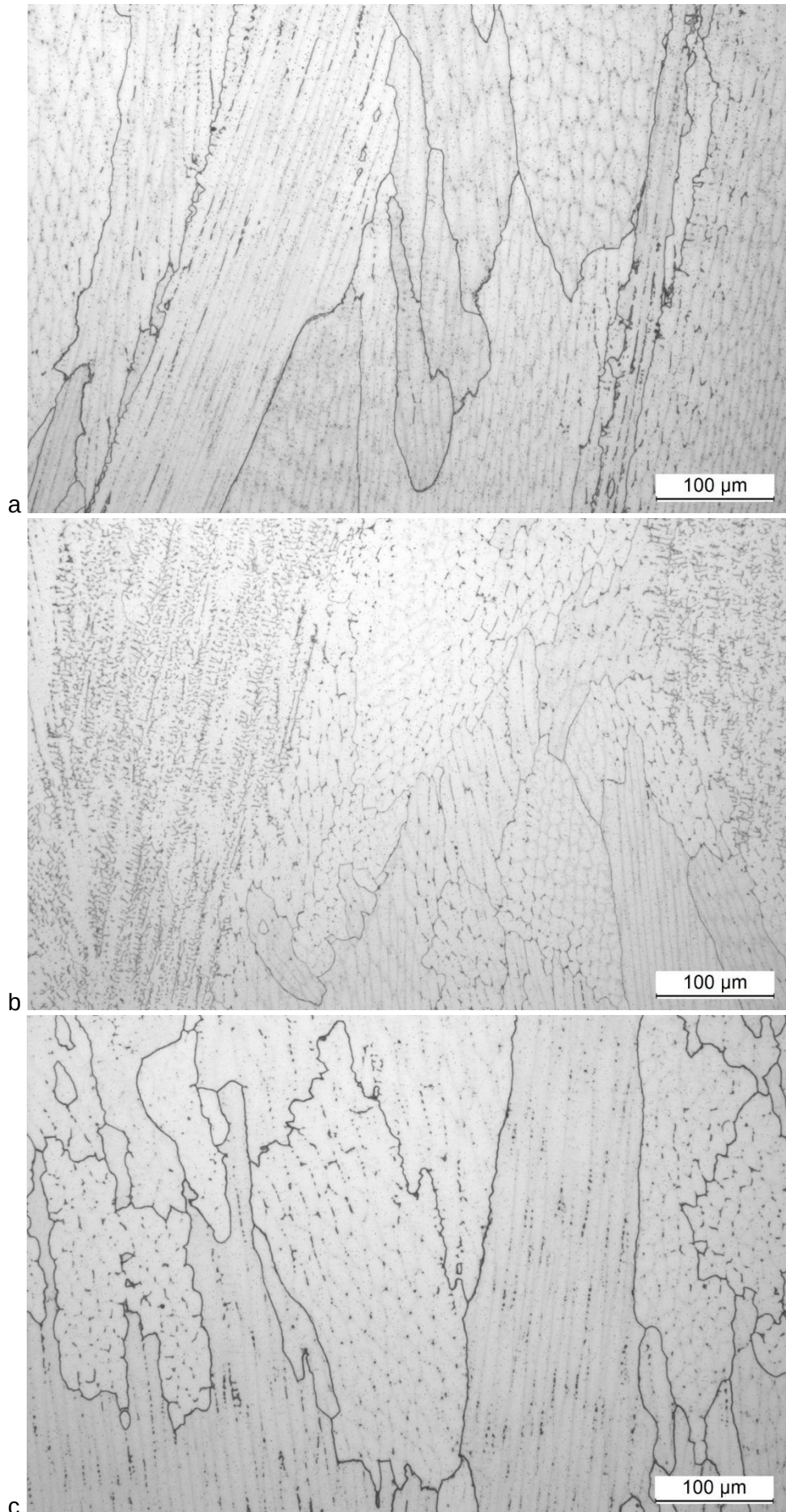
Kuva 8. IN825 AZZ, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



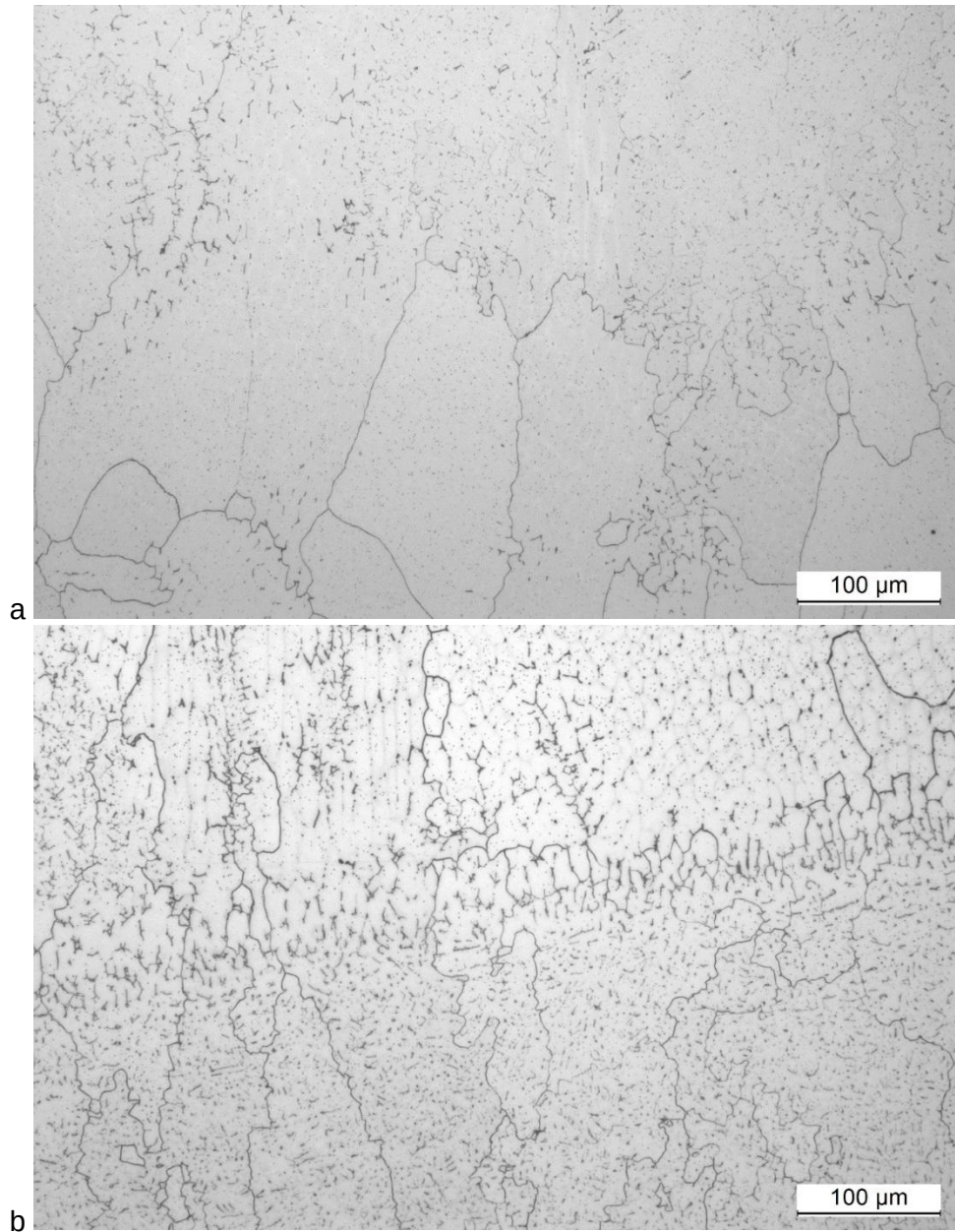
Kuva 9. IN825 AZZ, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



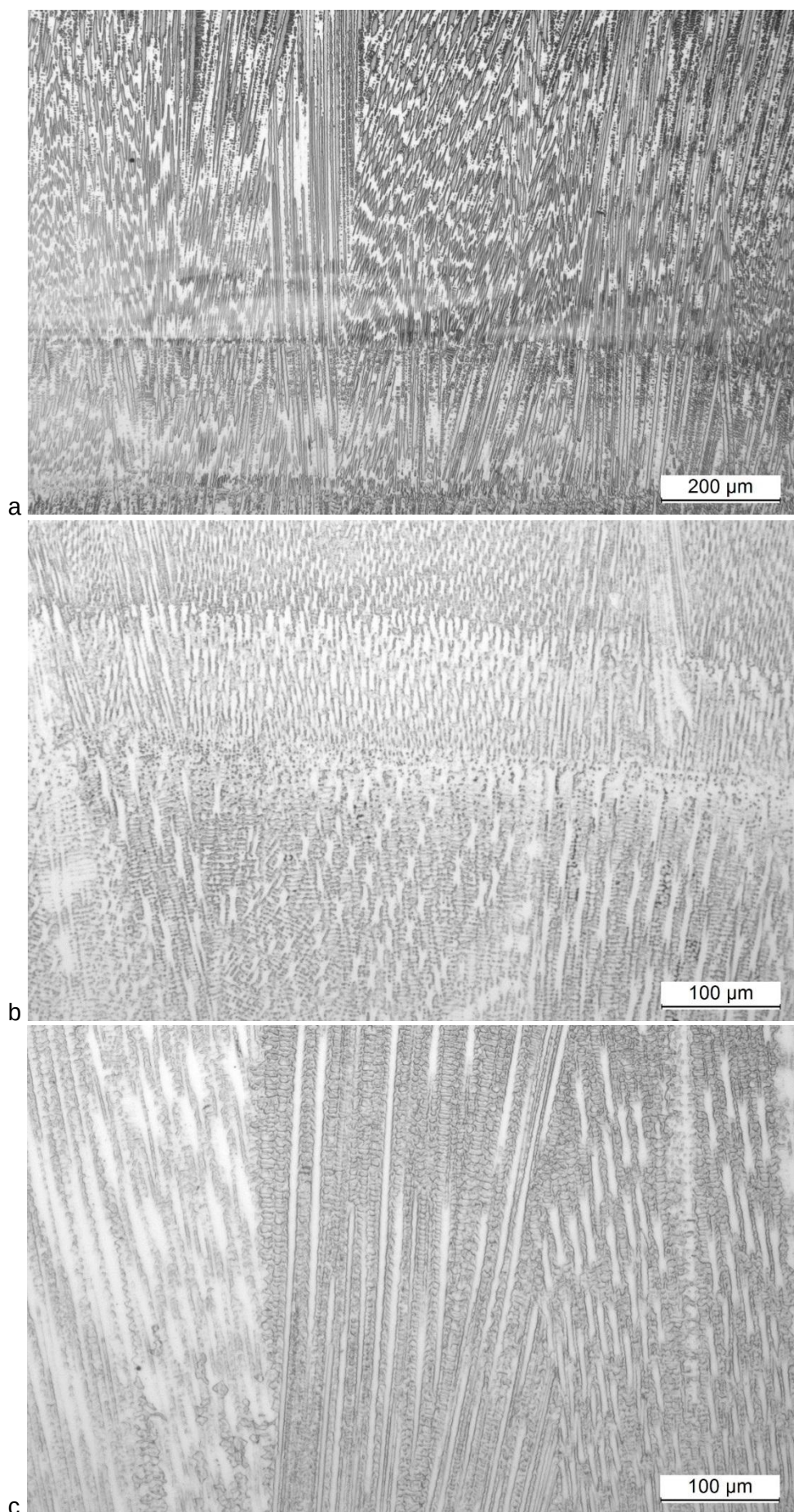
Kuva 10. 309 Uhlig, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suur.



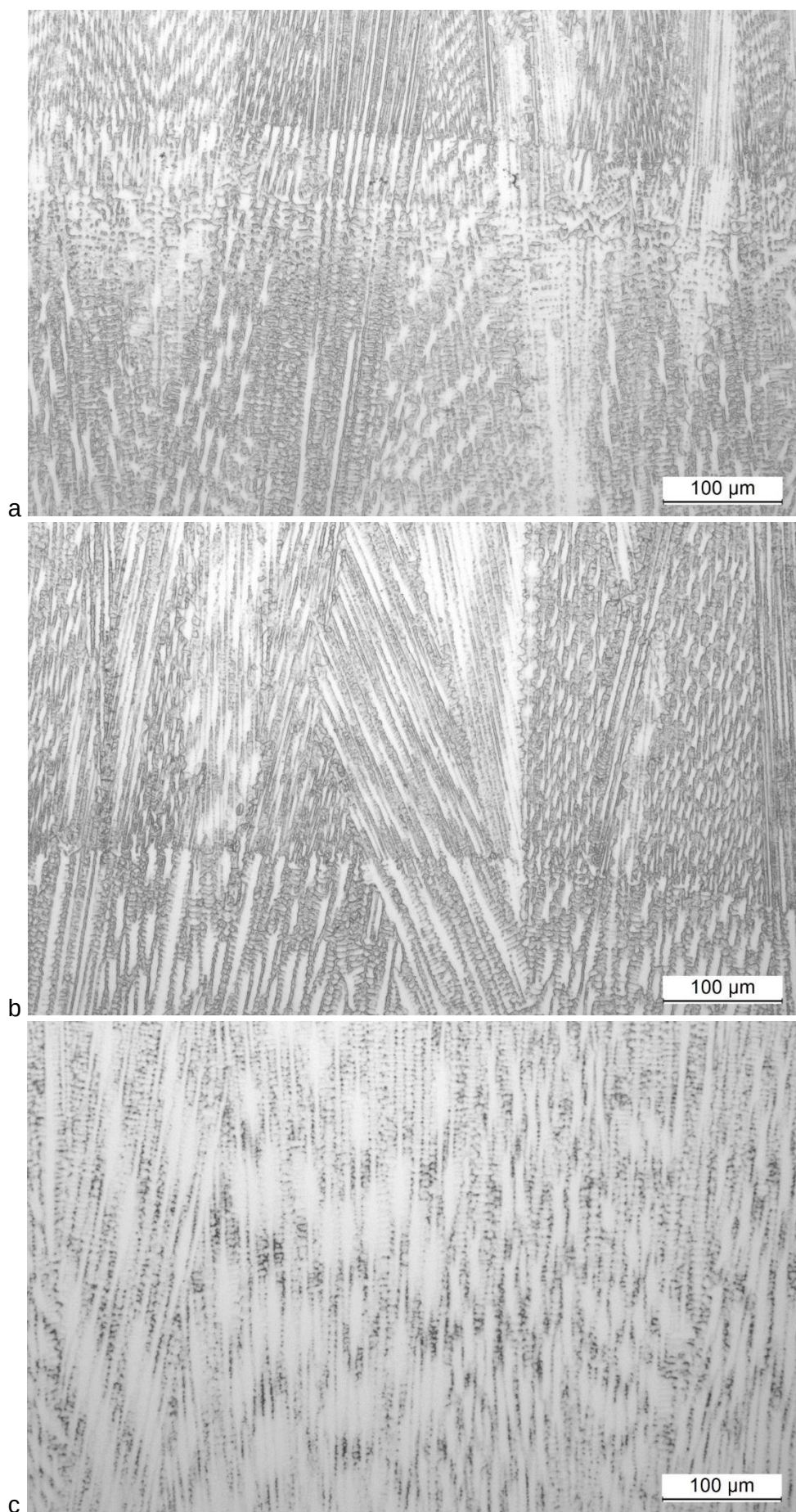
Kuva 11. 309 Uhlig a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



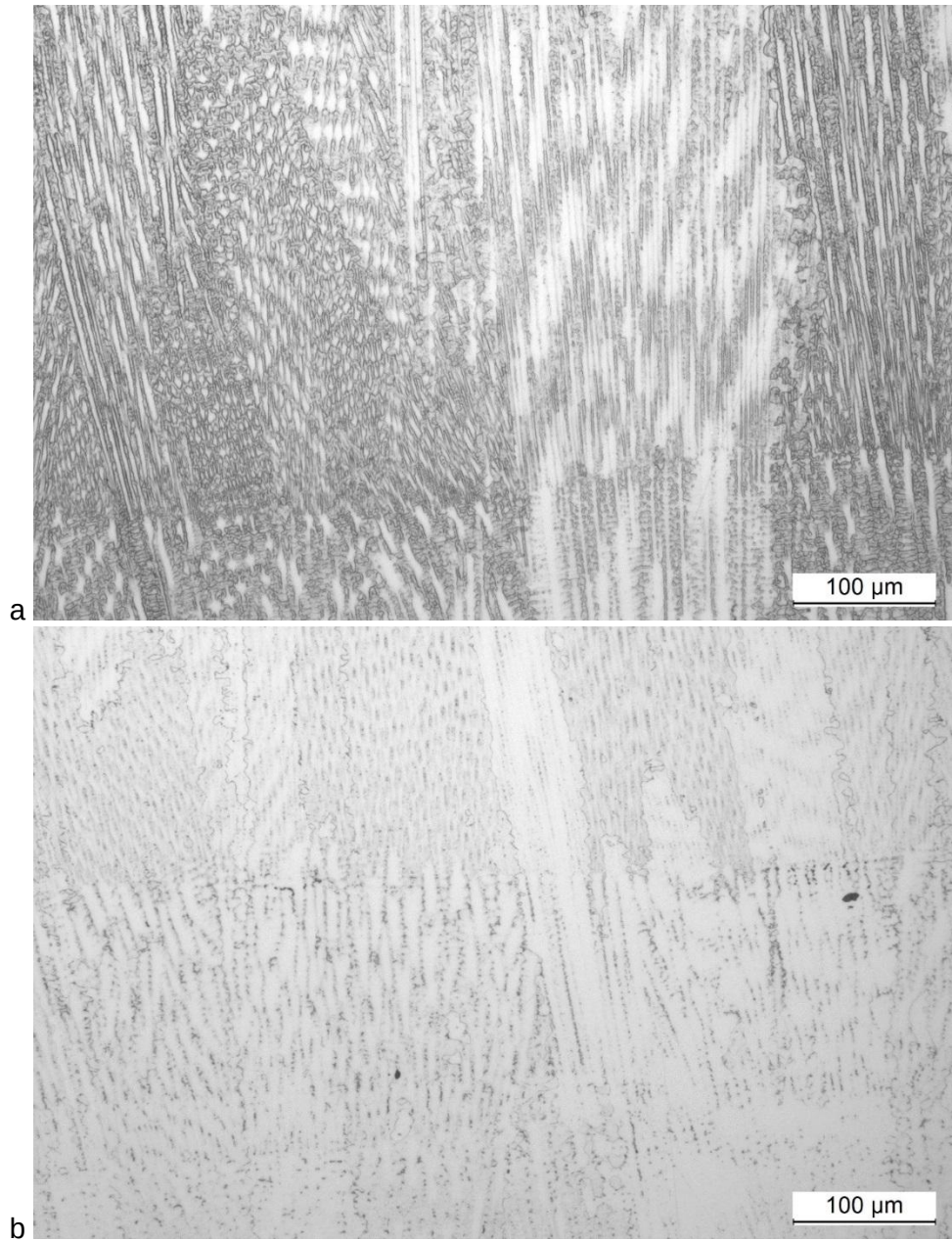
Kuva 12. 309 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



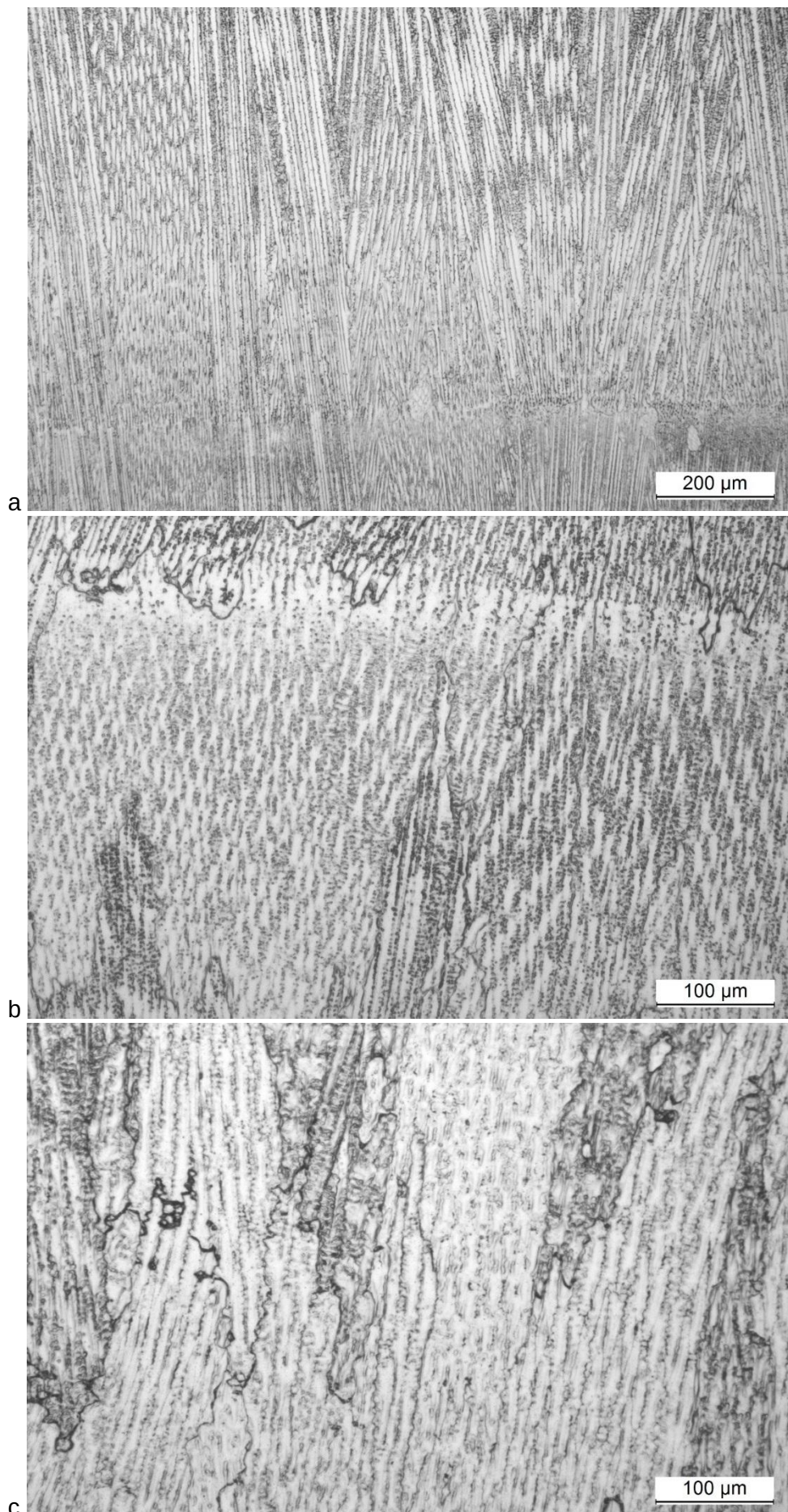
Kuva 13. IN625 Uhlig, a) toimitustila, b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.



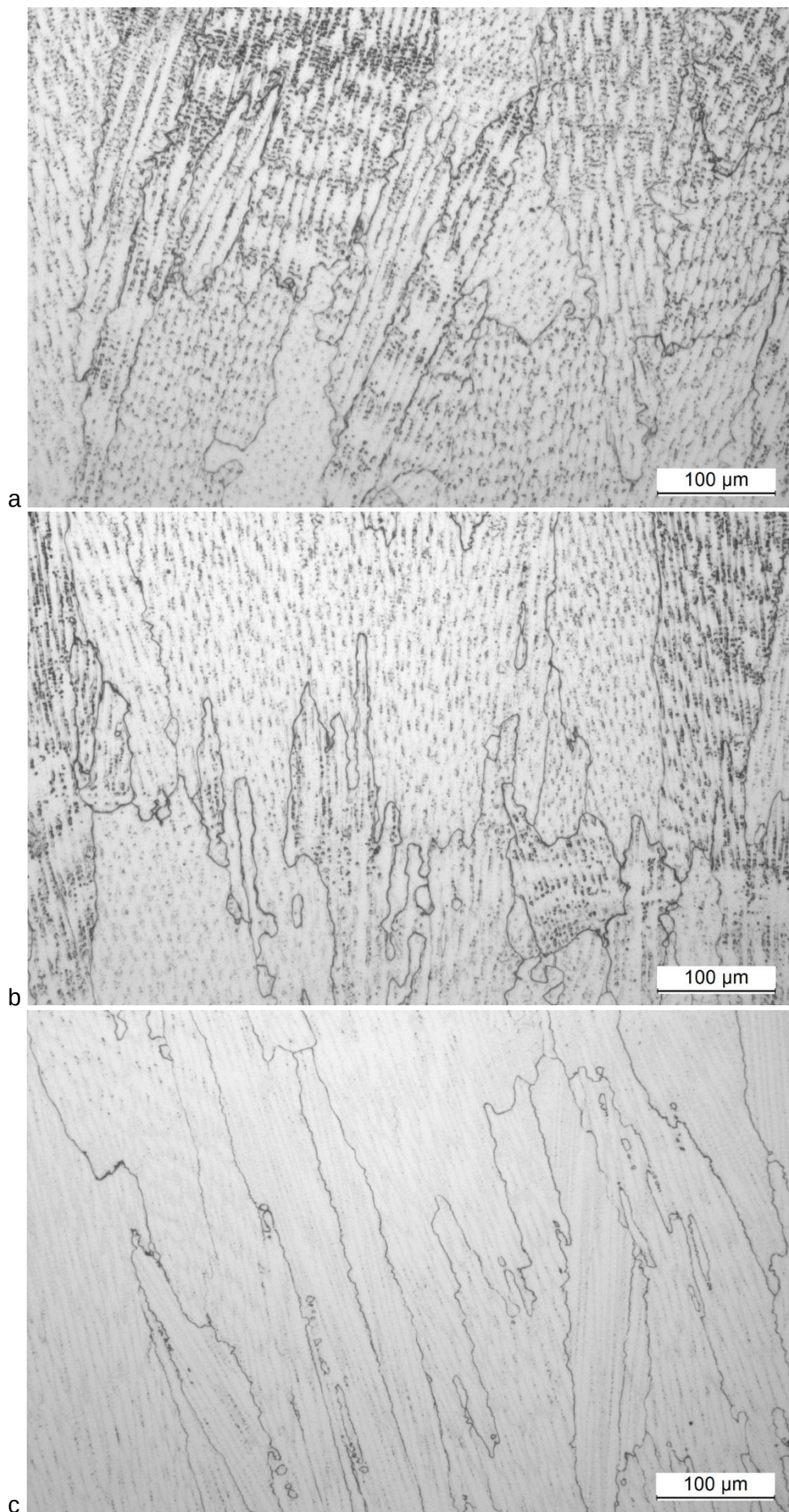
Kuva 14. IN625 Uhligh, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



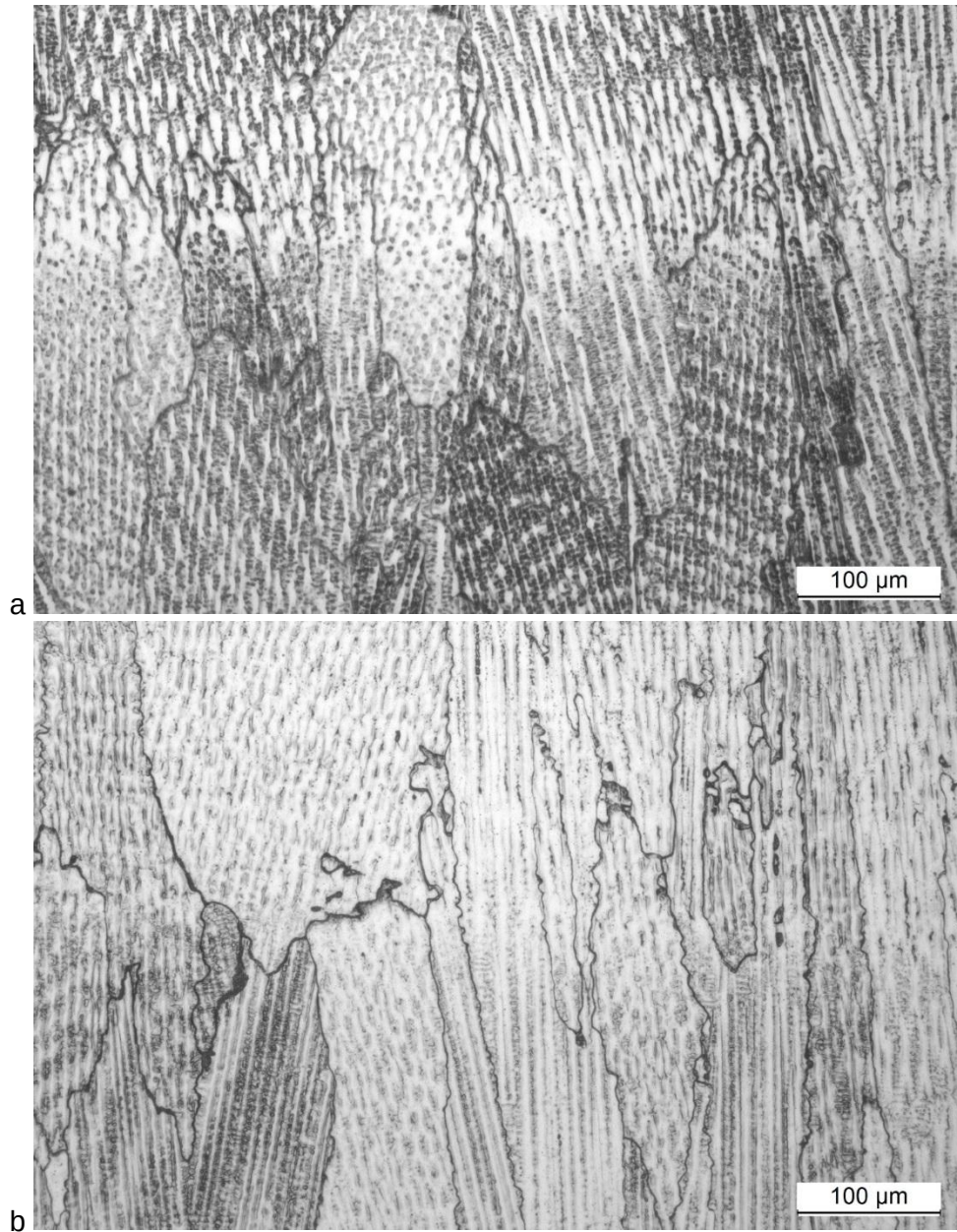
Kuva 15. IN625 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



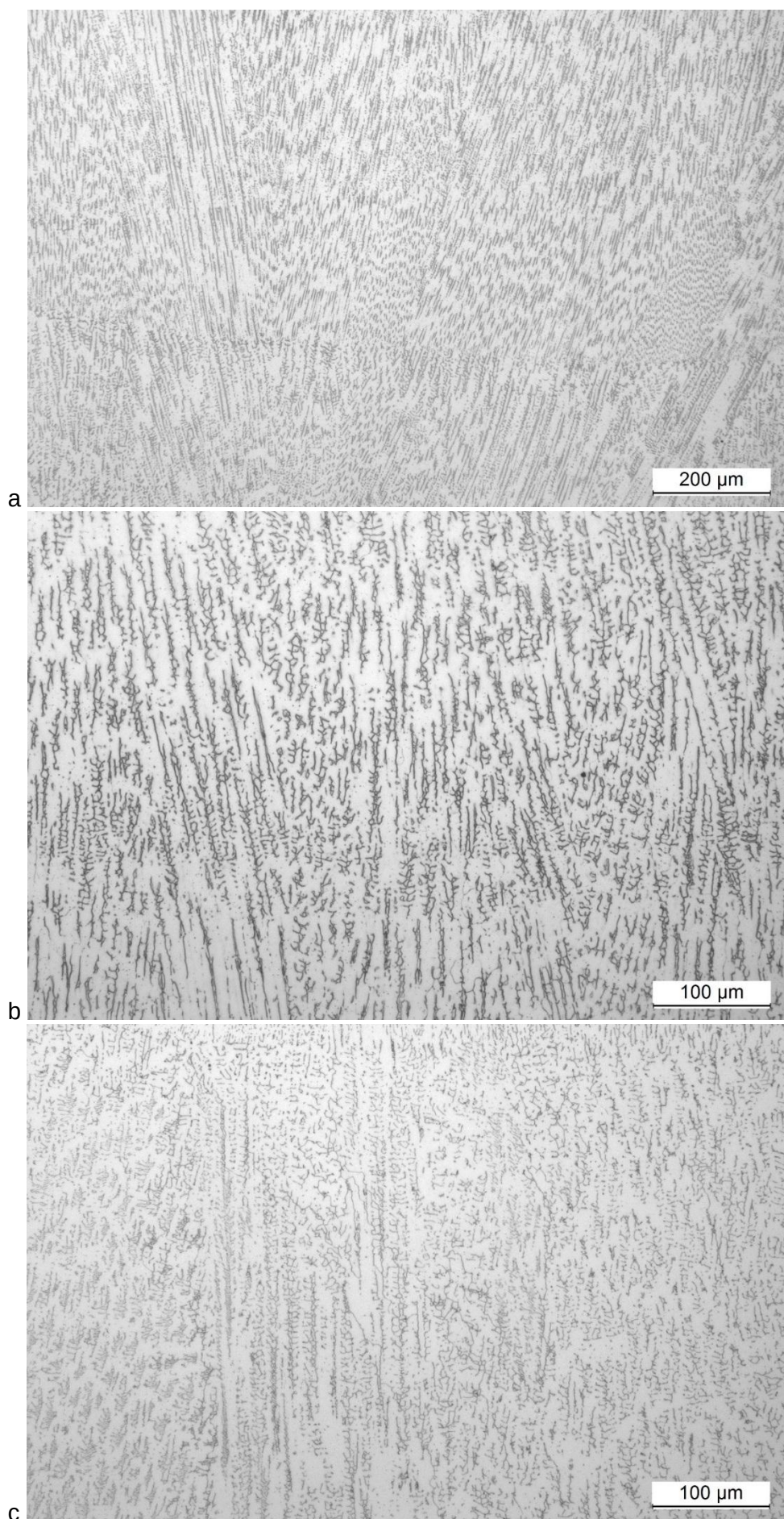
Kuva 16. IN825 Uhlig, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom suur.



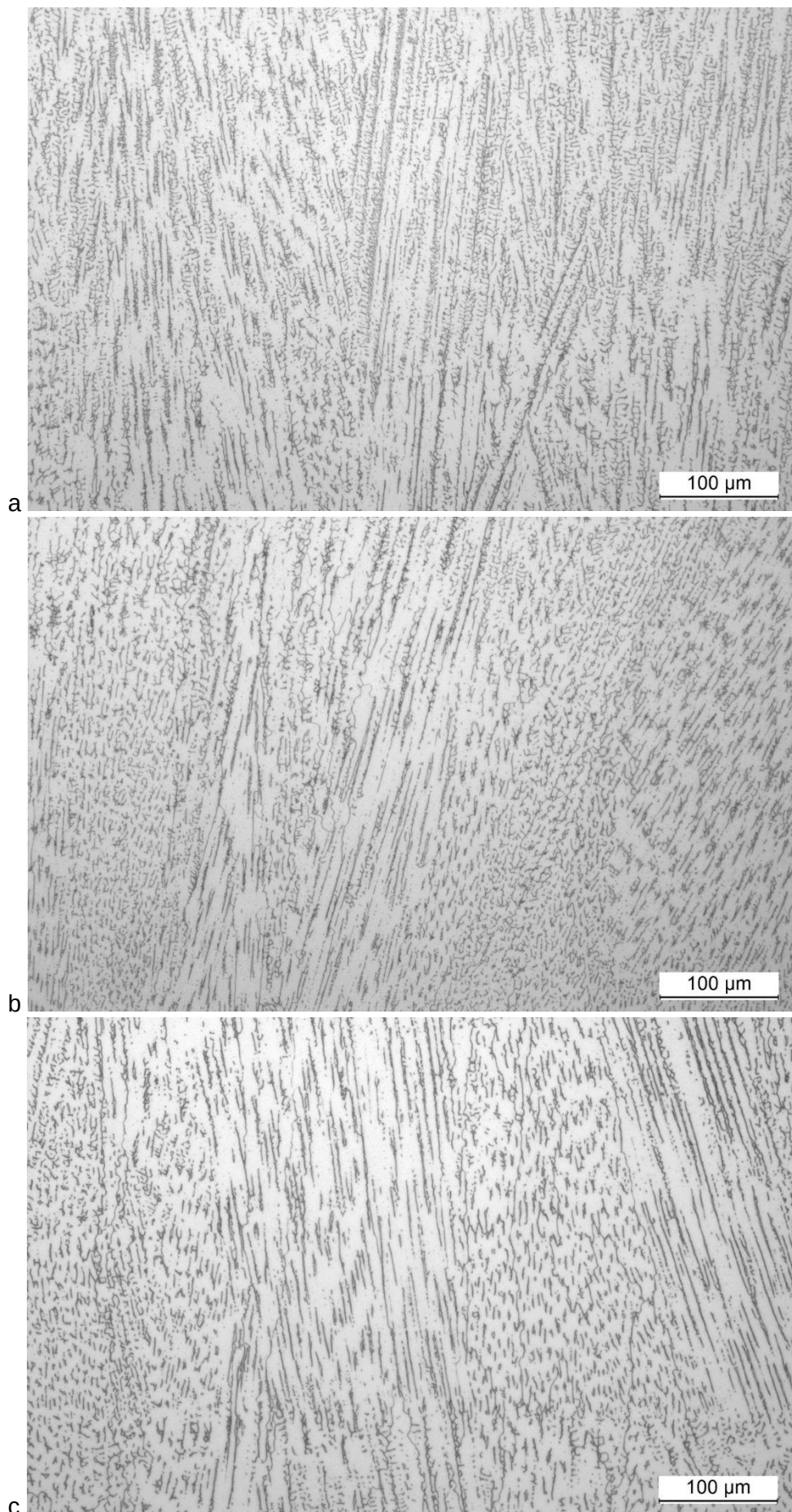
Kuva 17. IN825 Uhlug, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



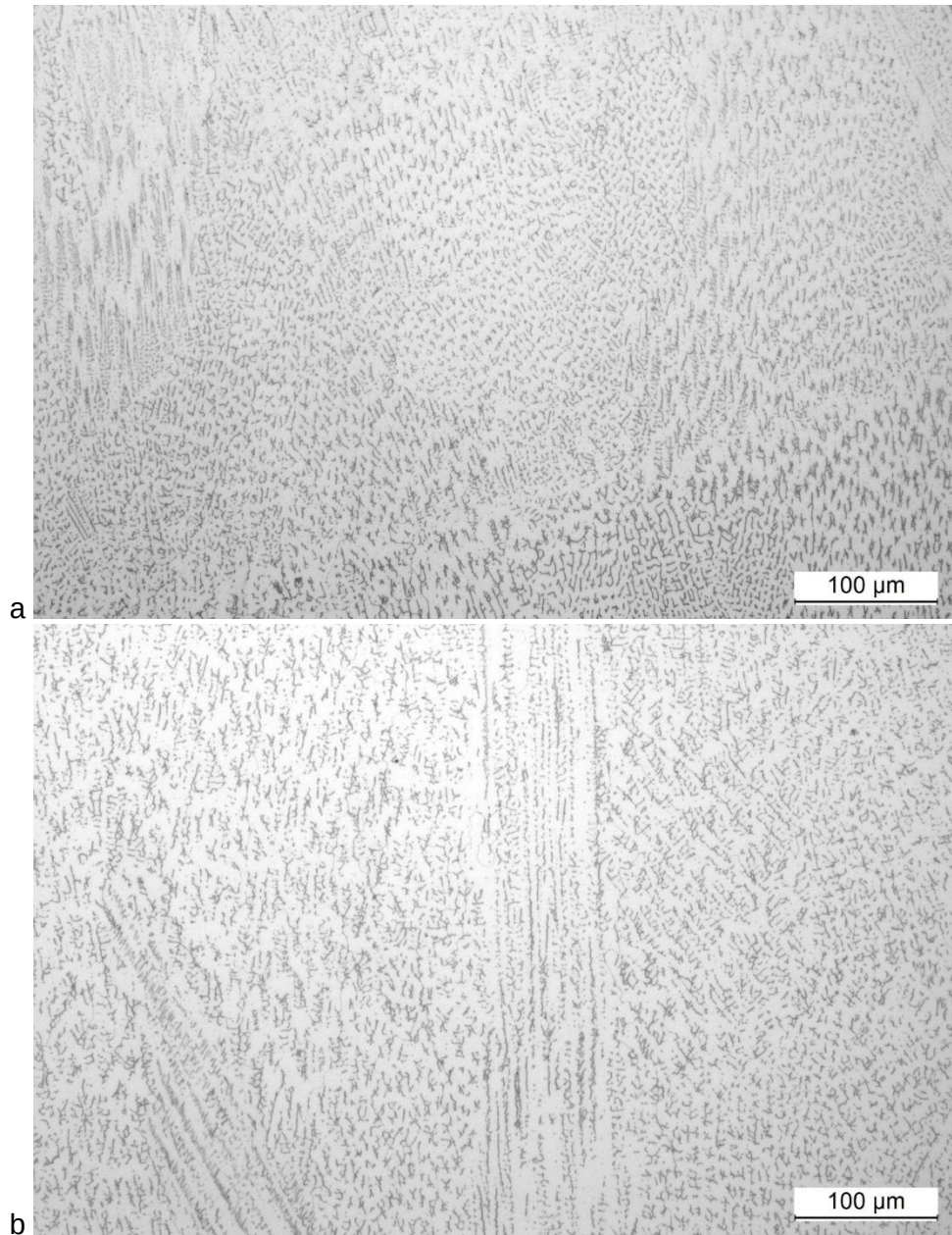
Kuva 18. IN825 Uhlig, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



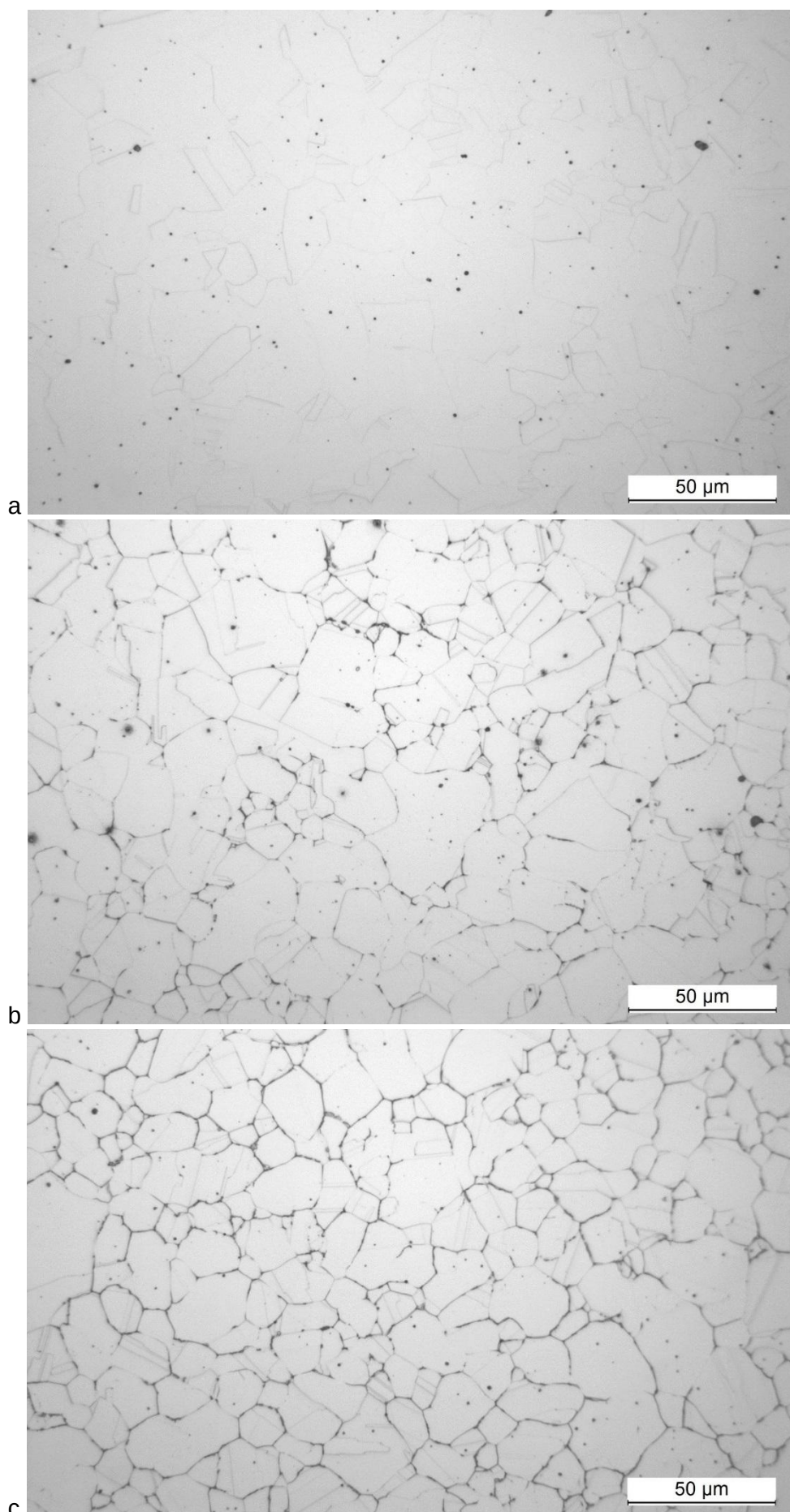
Kuva 19. 309 Areva, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h, huom. suur.



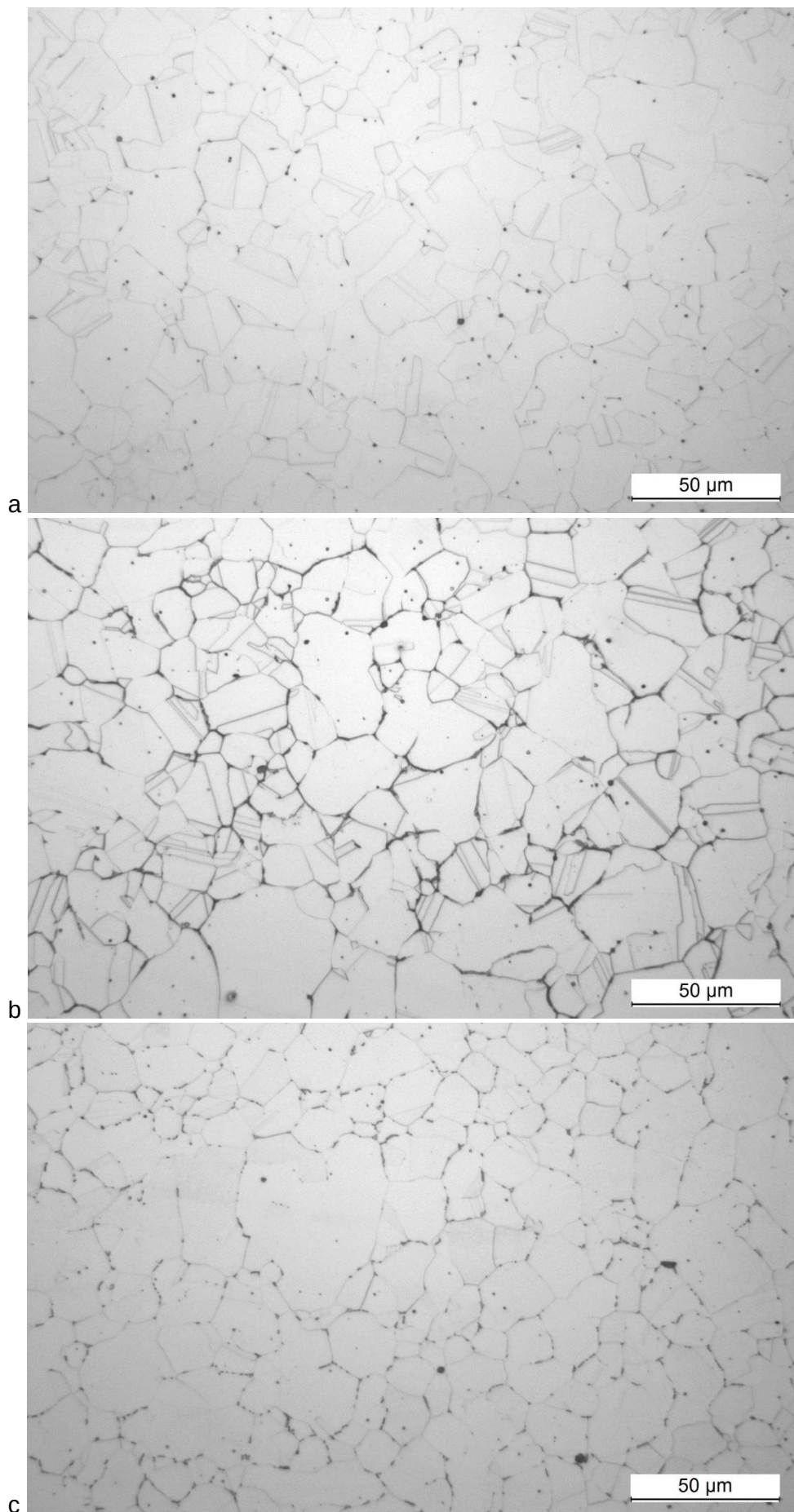
Kuva 20. 309 Areva, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



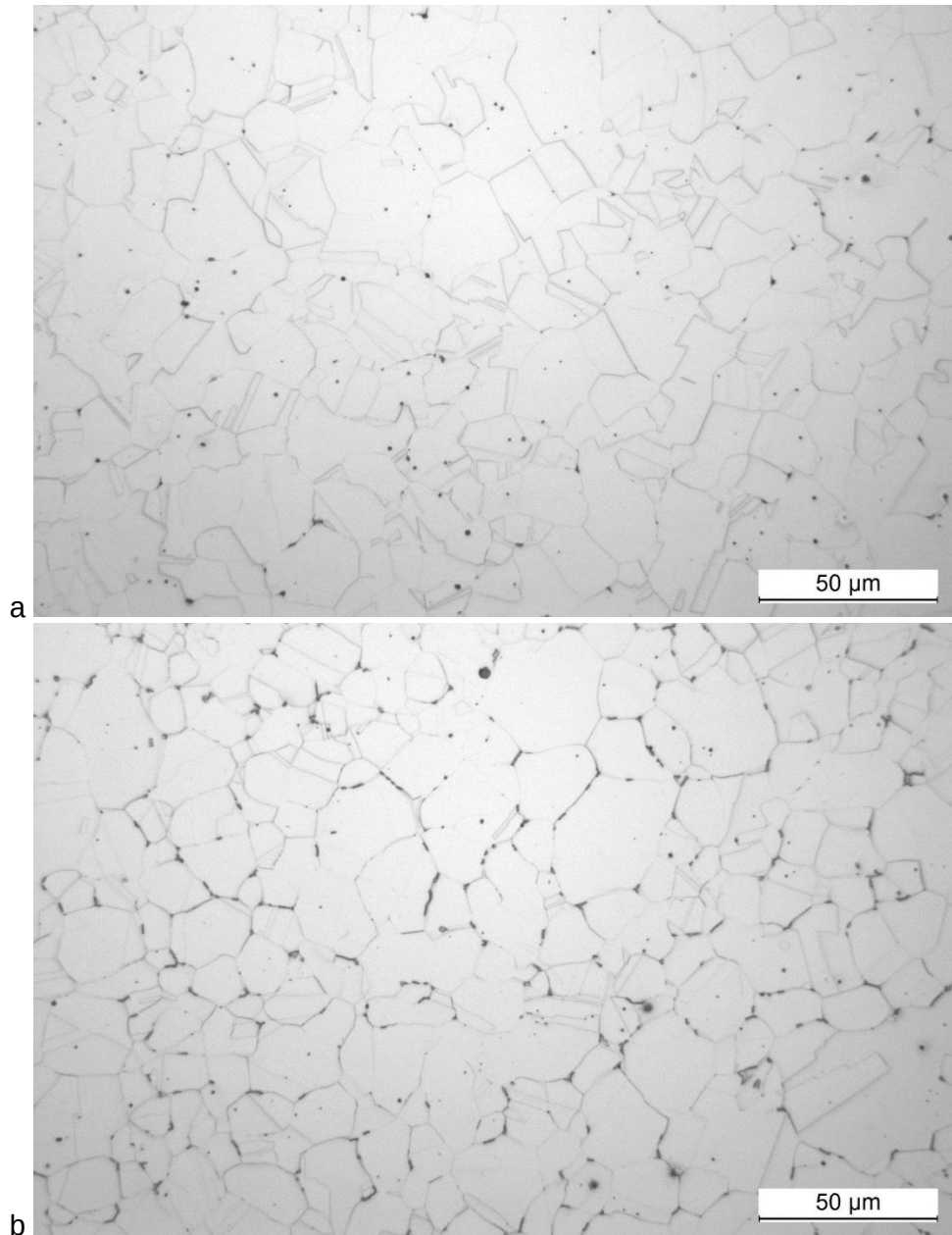
Kuva 21. 309 Areva, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



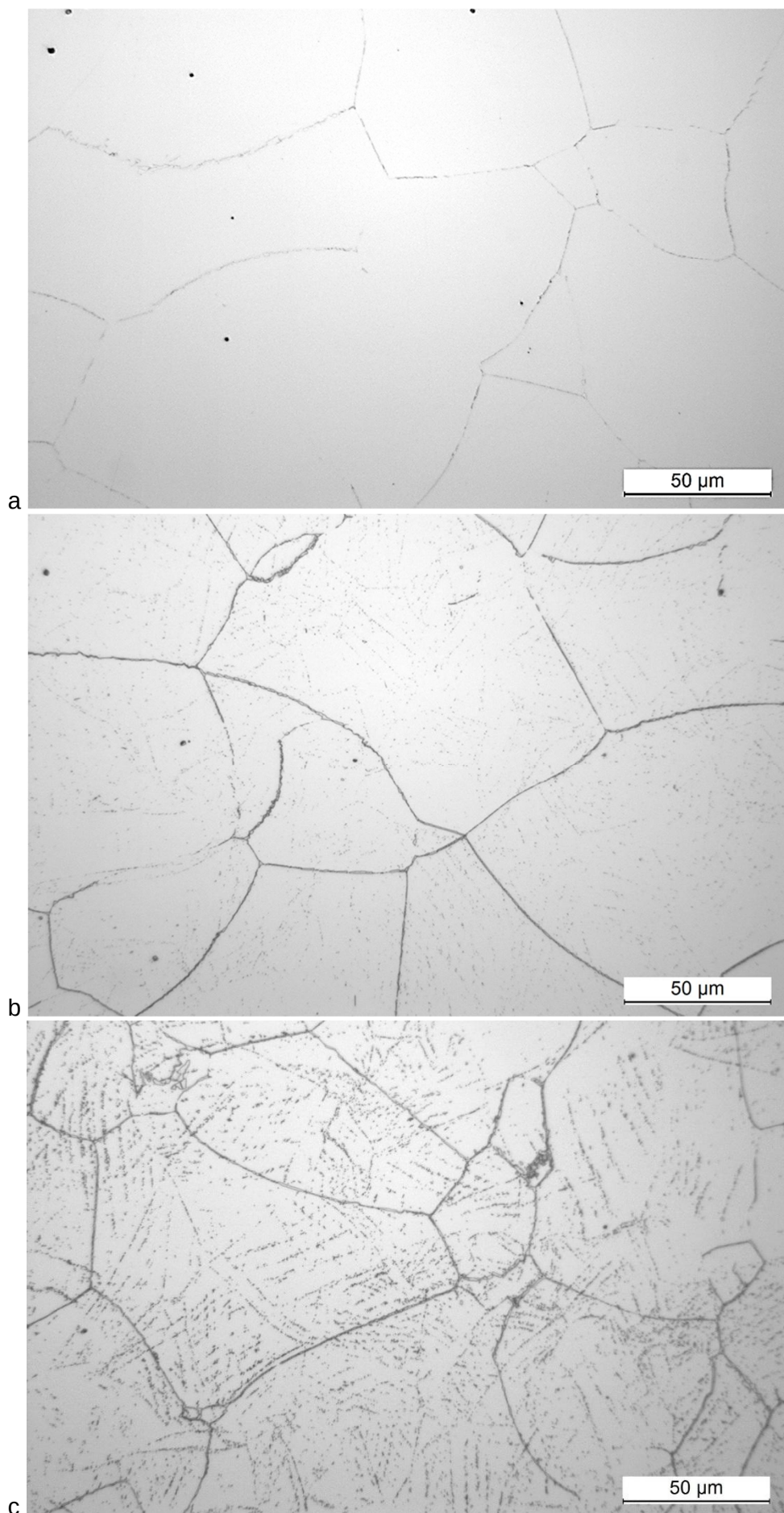
Kuva 22. 304L, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.



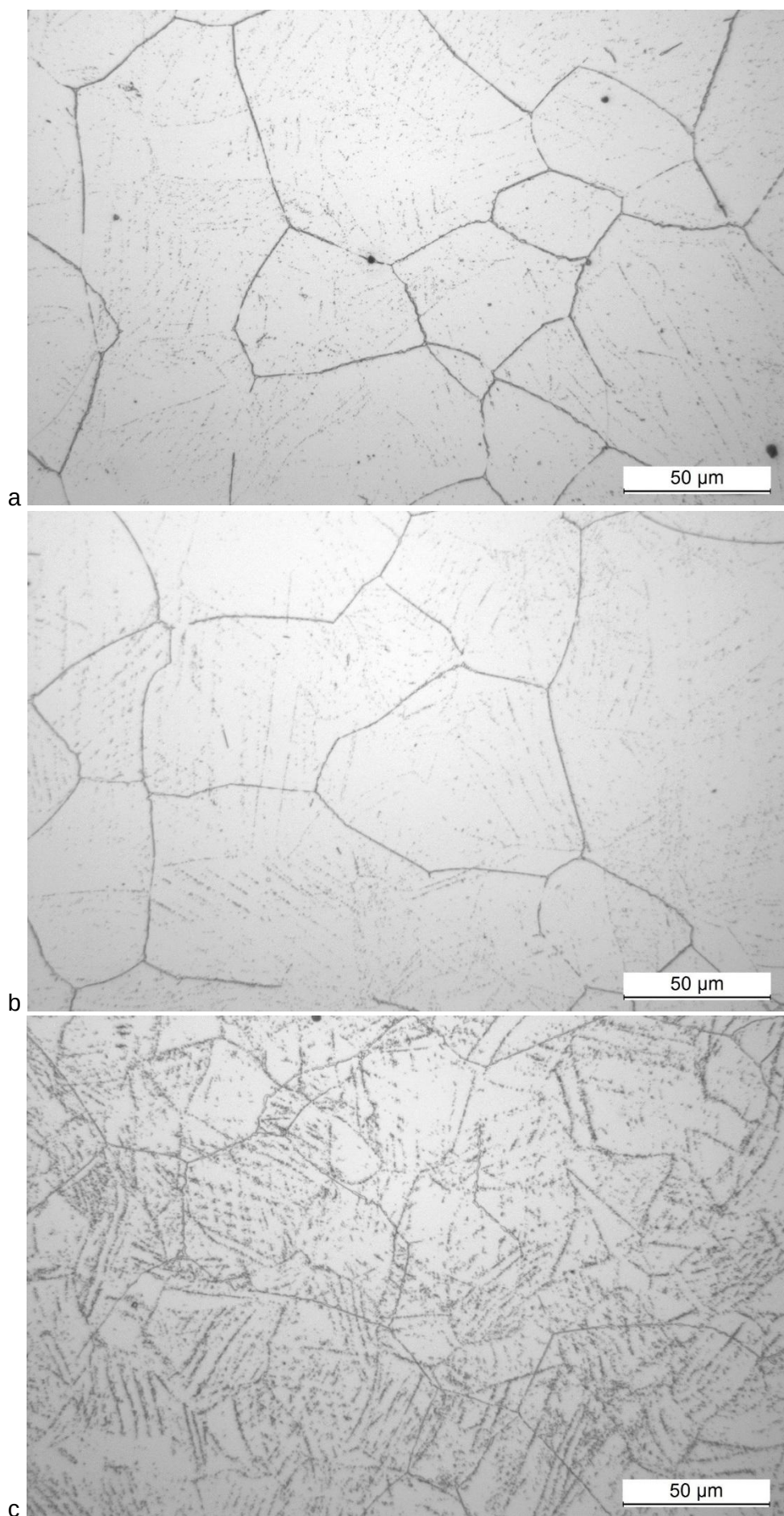
Kuva 23. 304L, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



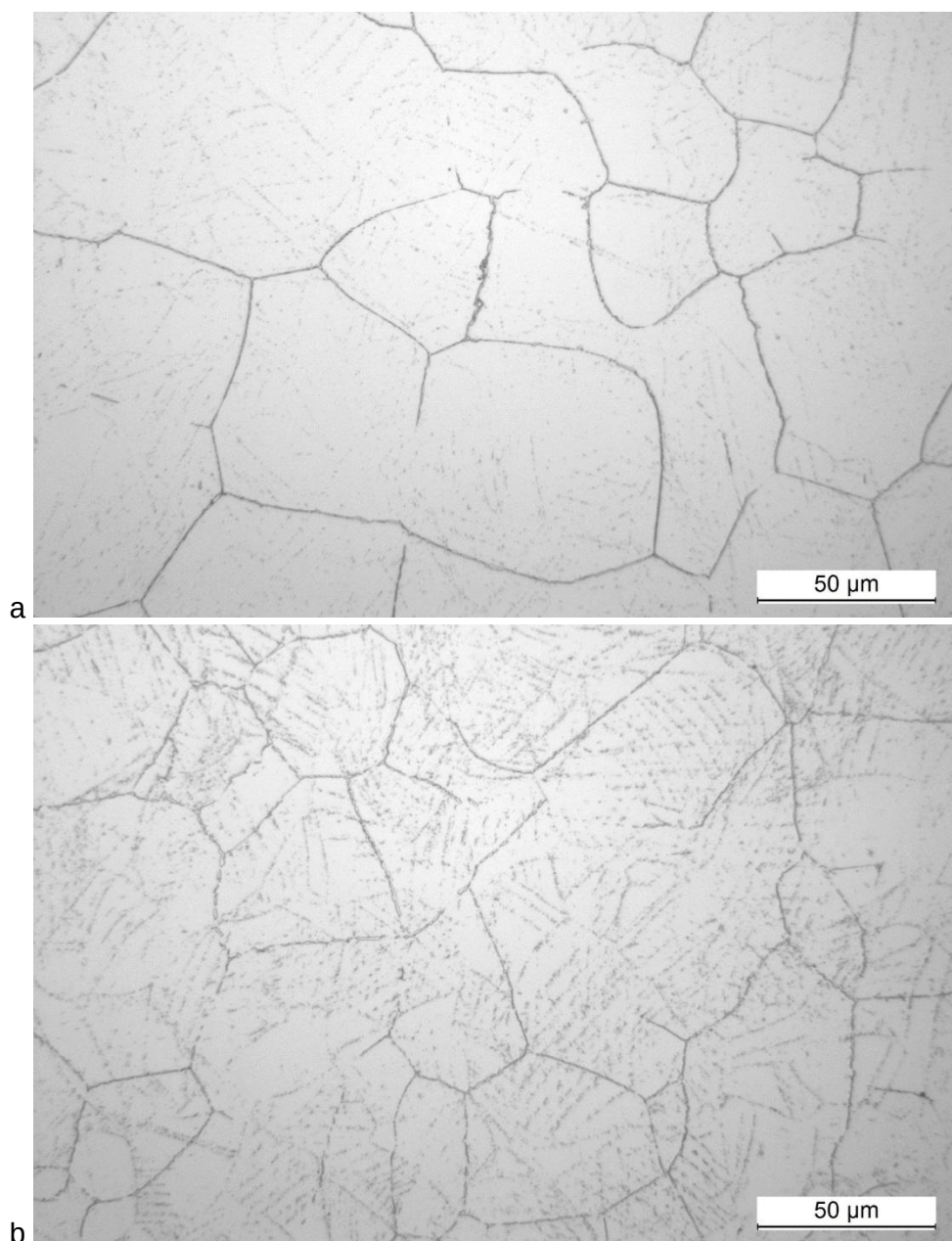
Kuva 24. 304L, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



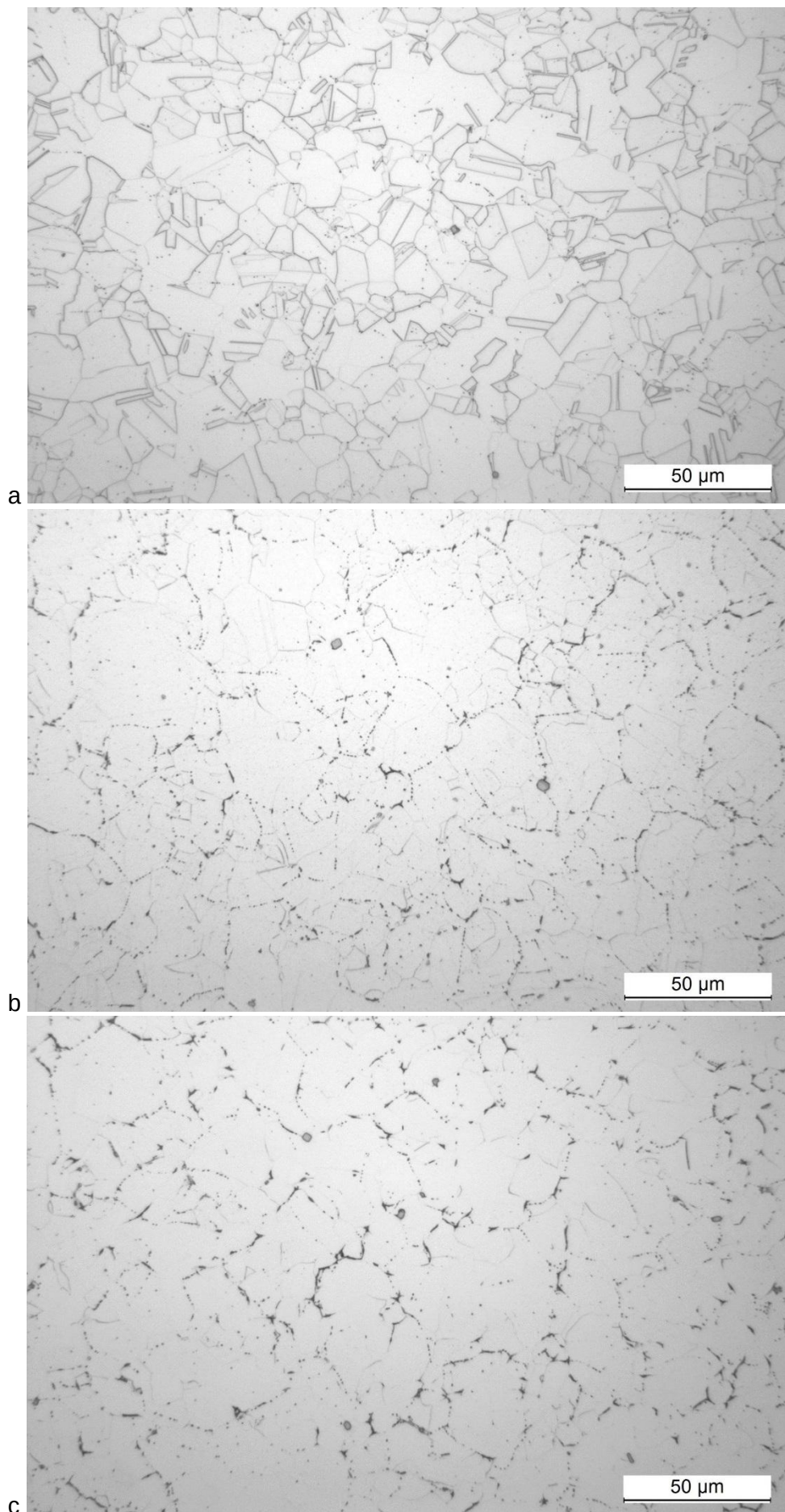
Kuva 25. San28, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.



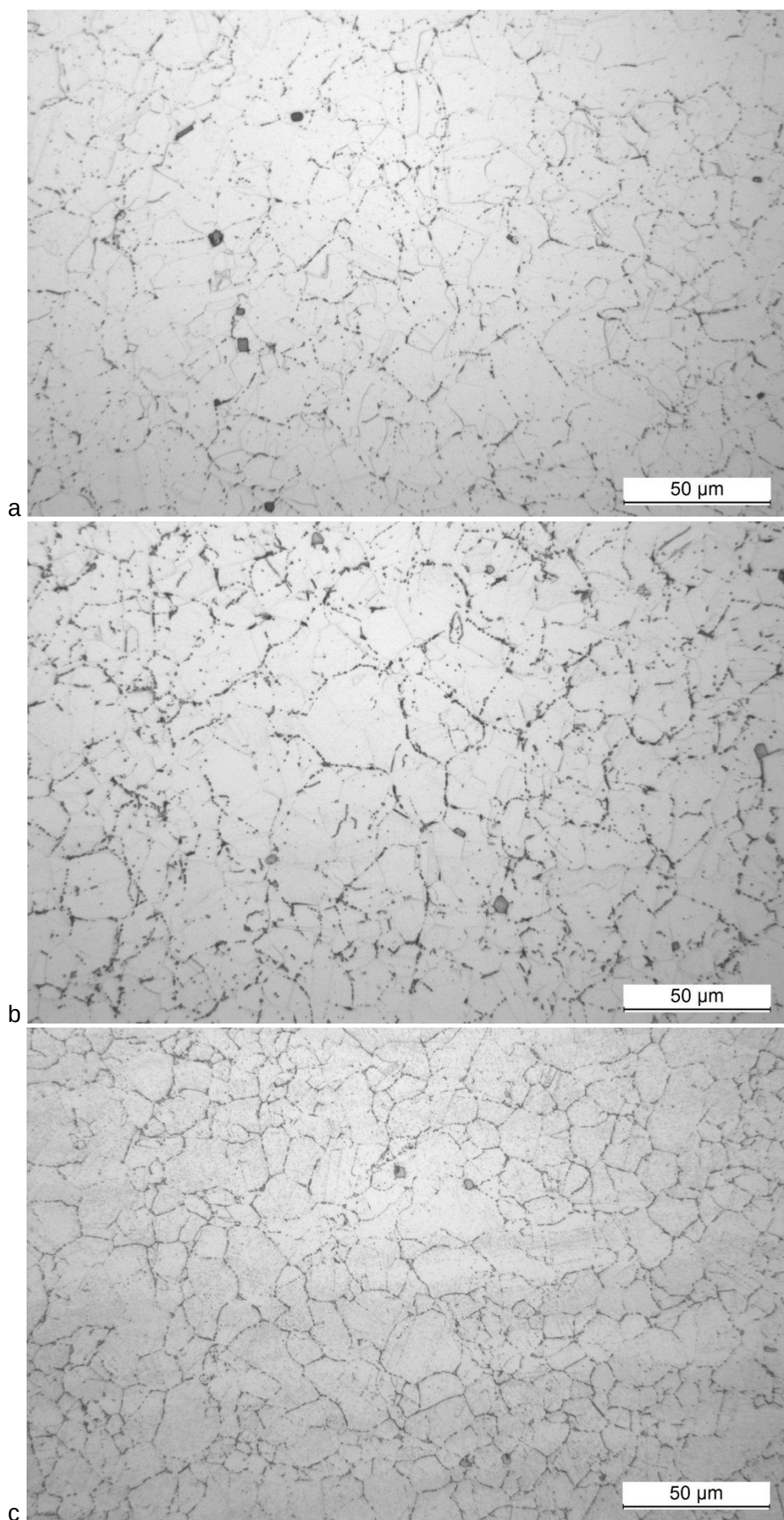
Kuva 26. San28, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h



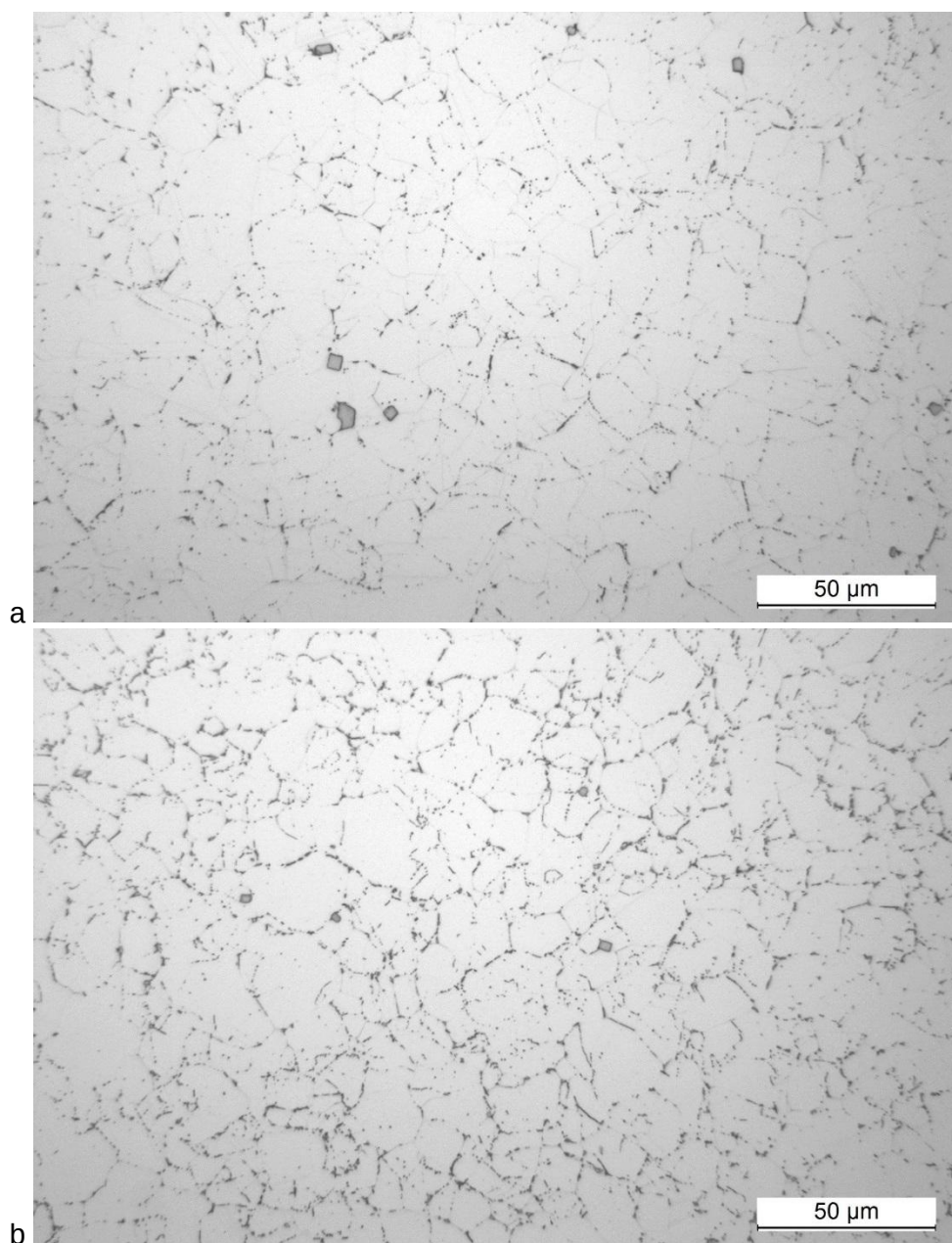
Kuva 27. San28, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h



Kuva 28. San38, a) toimitustila b) 600°C, 100 h, c) 600°C, 1000 h.

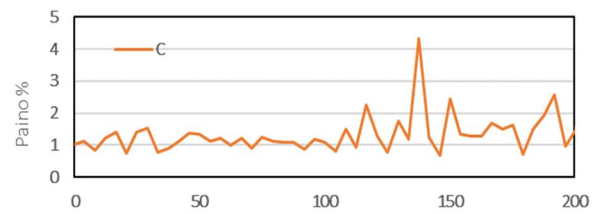
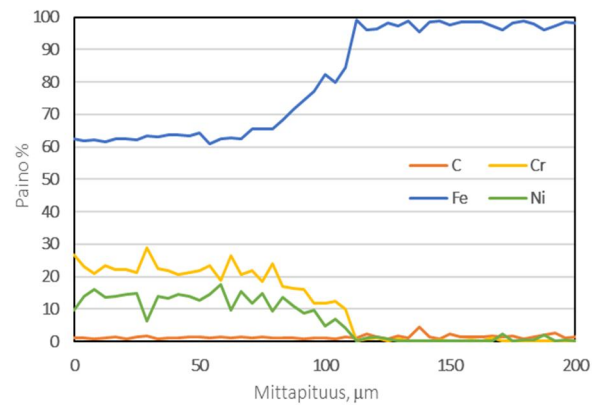


Kuva 29. San38, a) 650°C, 10h, b) 650°C, 100 h, c) 650°C, 1000 h

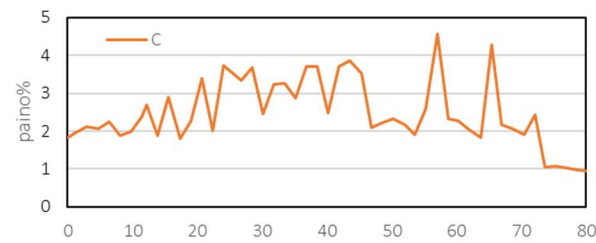
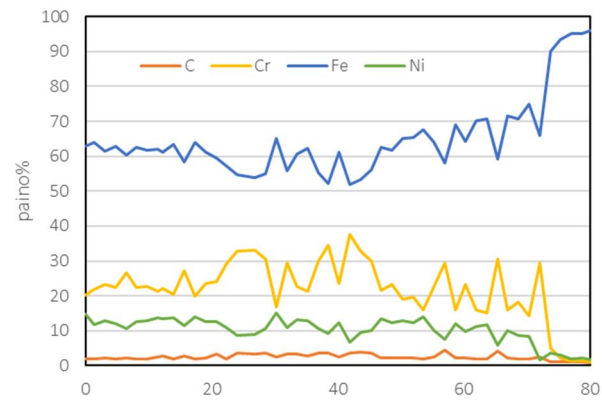


Kuva 30. San38, a) 700°C, 10h, b) 700°C, 100 h

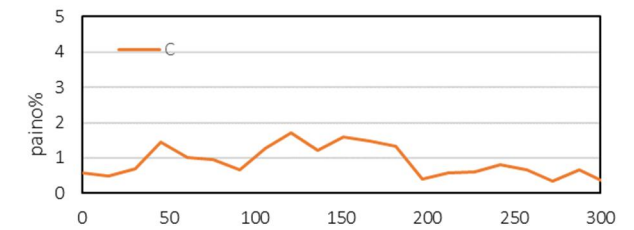
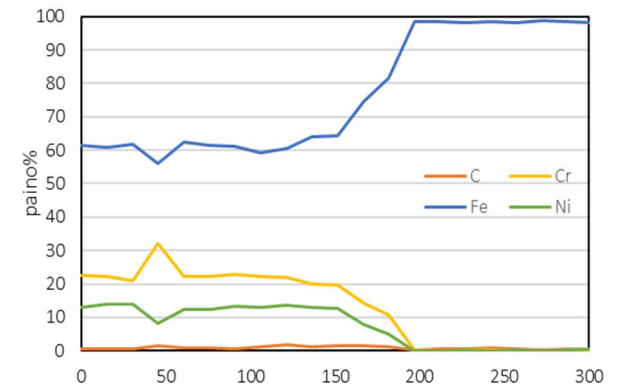
Toimitustila
AZZ309L



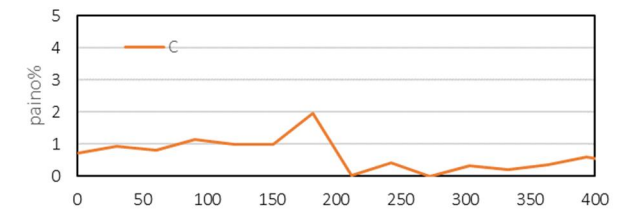
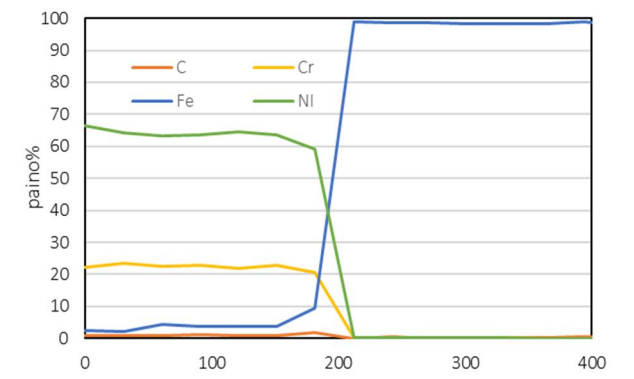
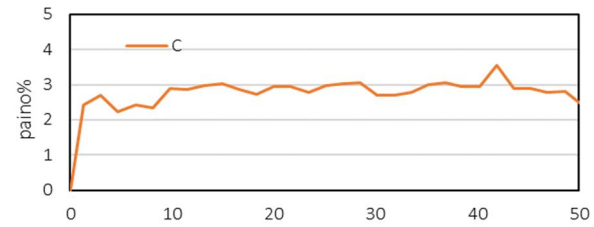
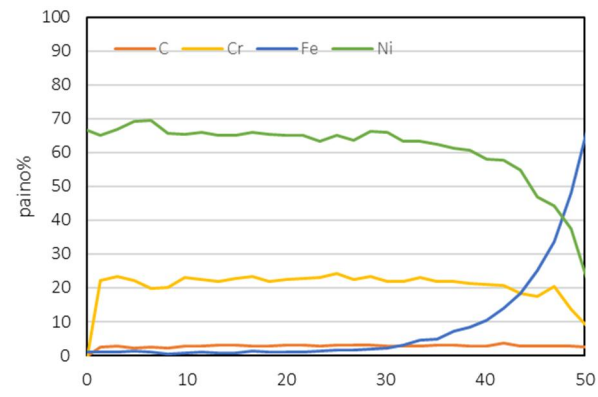
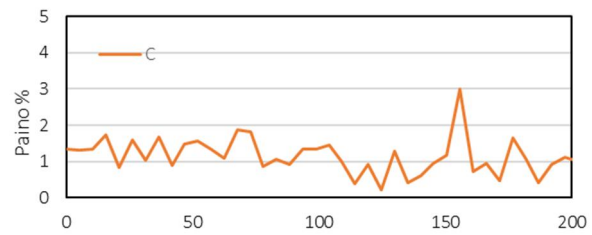
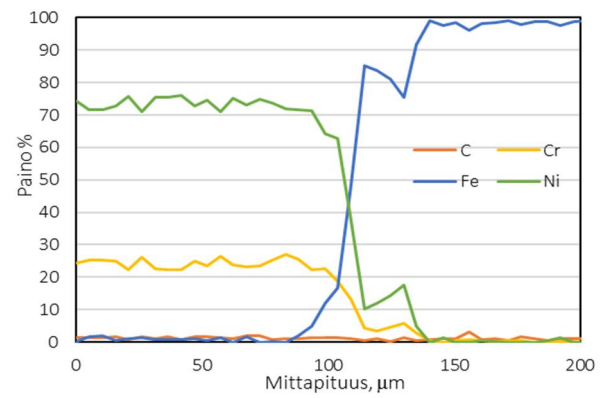
1000 h, 650°C



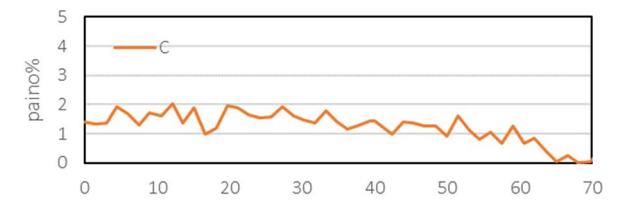
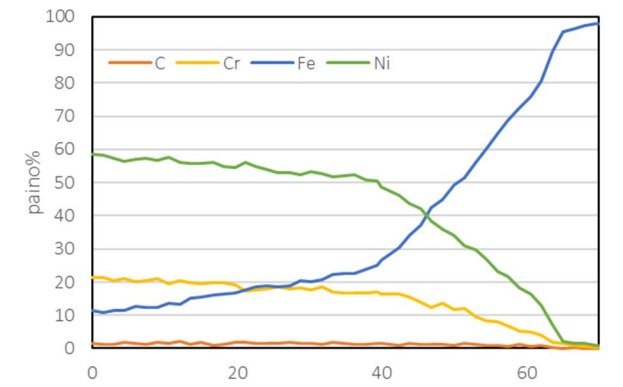
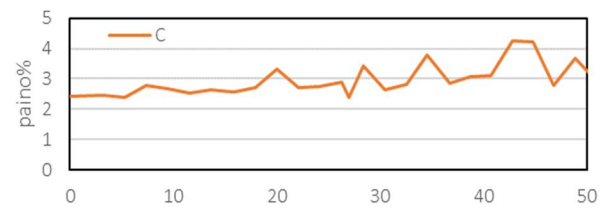
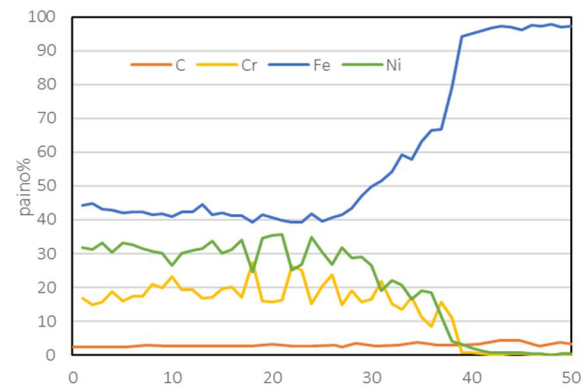
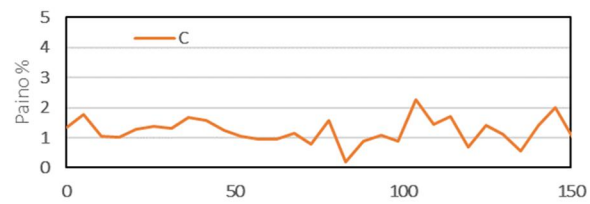
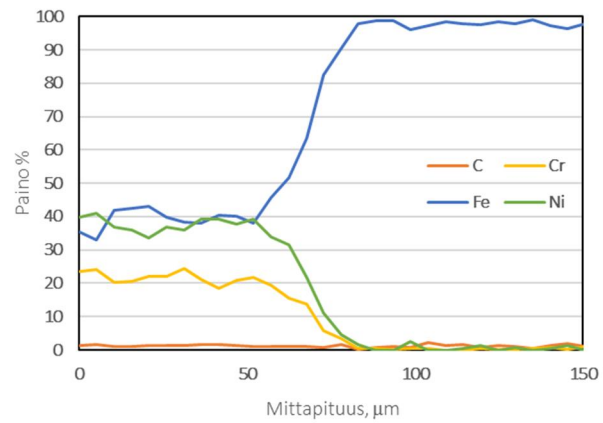
100 h, 700°C



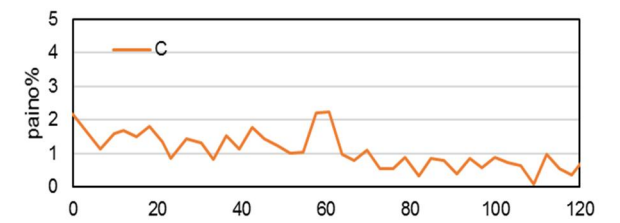
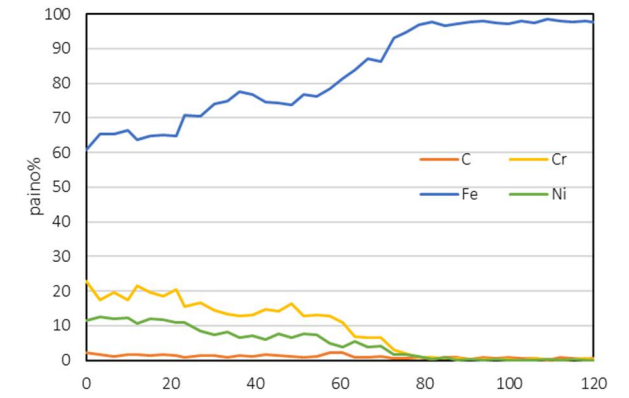
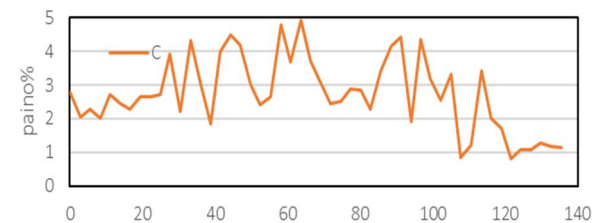
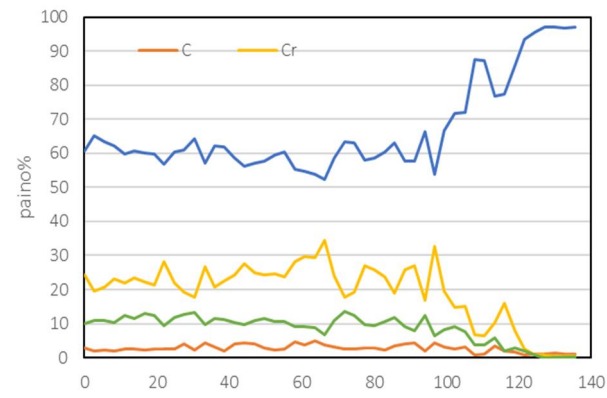
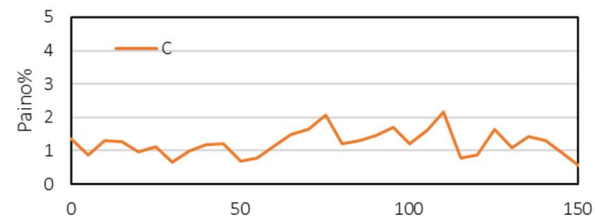
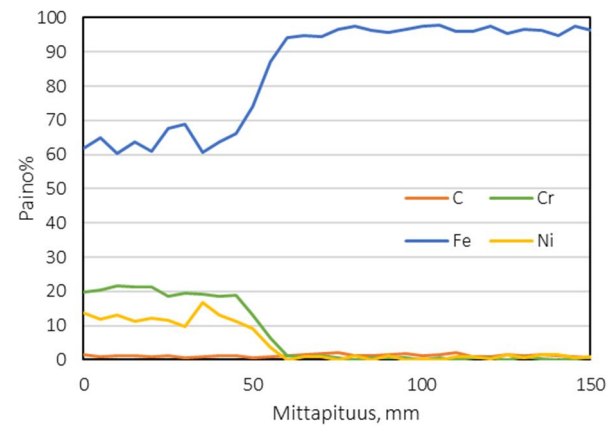
AZZ625



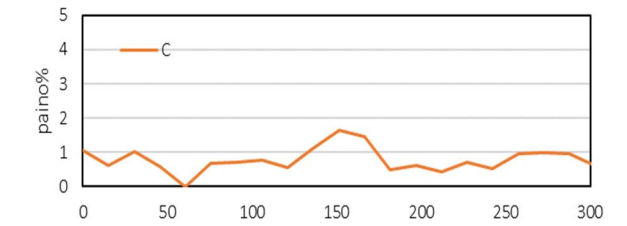
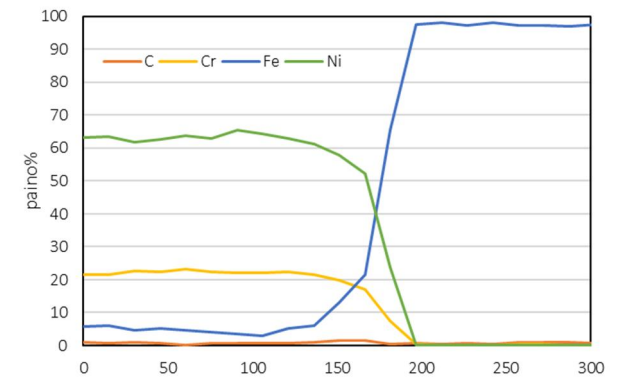
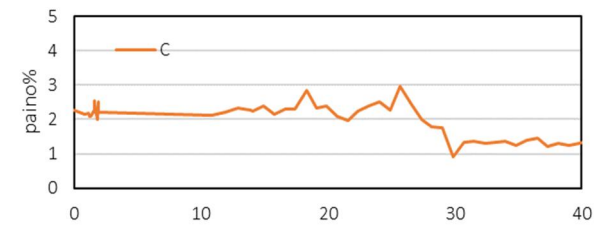
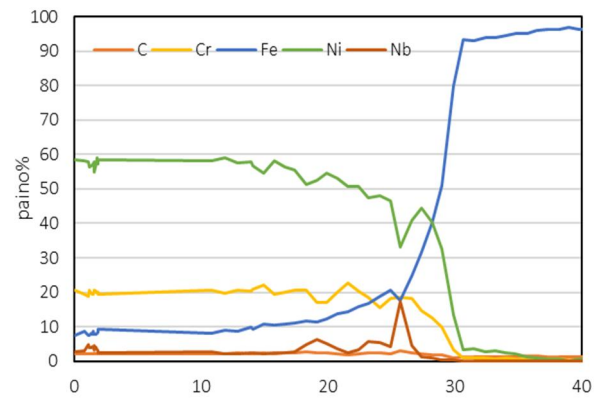
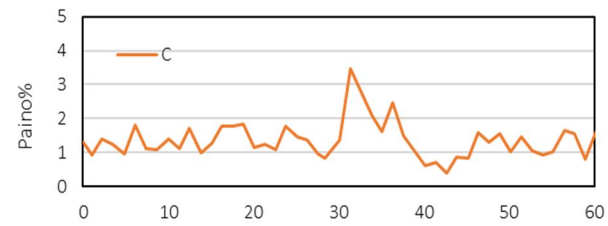
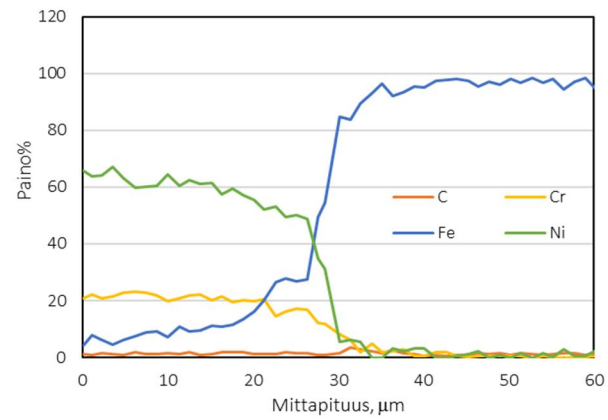
AZZ825



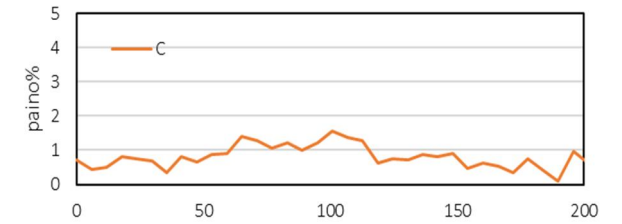
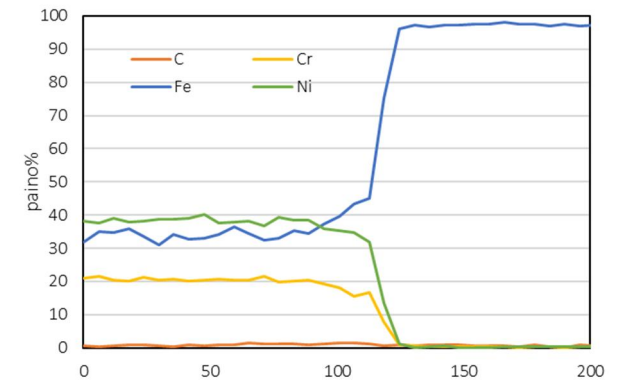
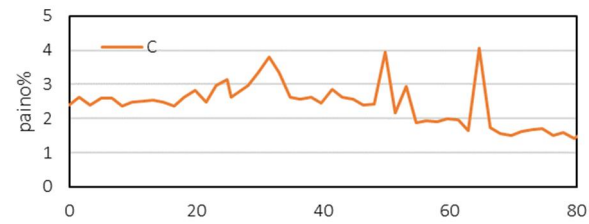
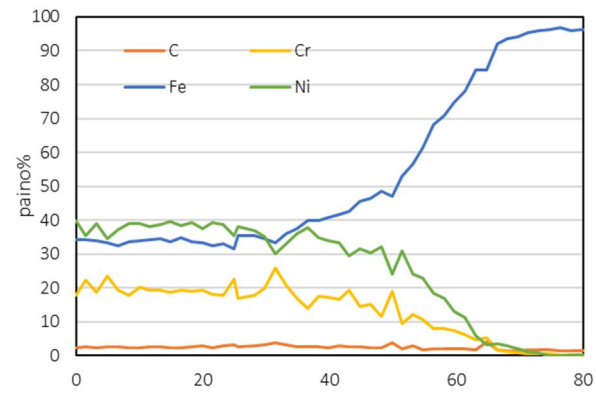
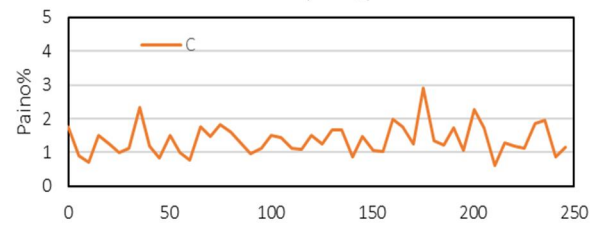
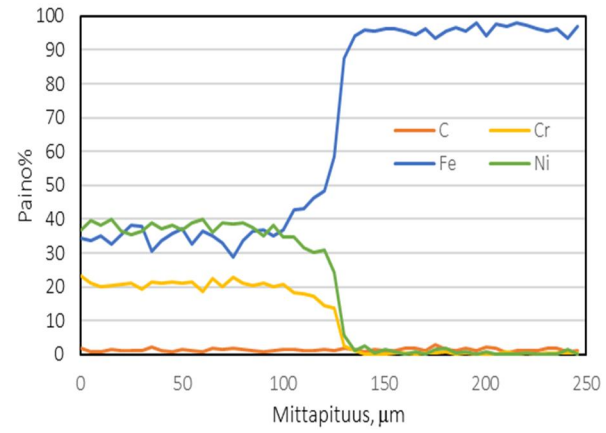
Uhl309L



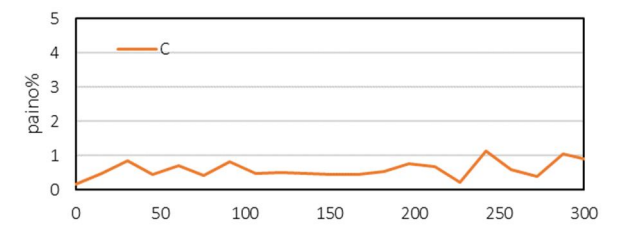
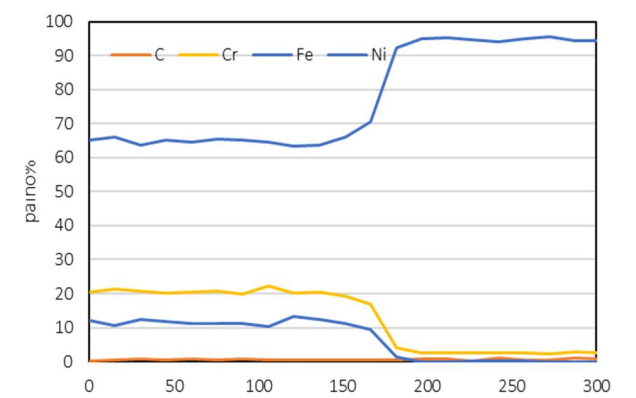
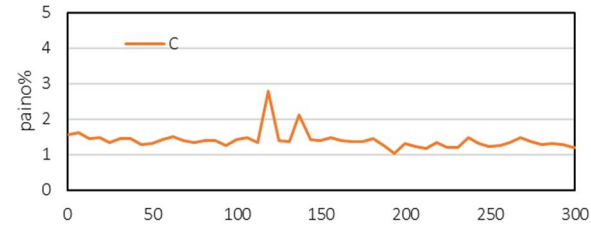
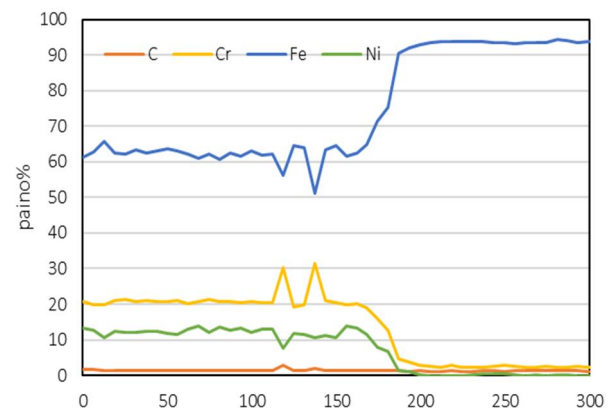
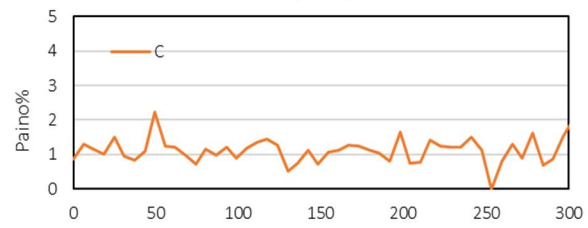
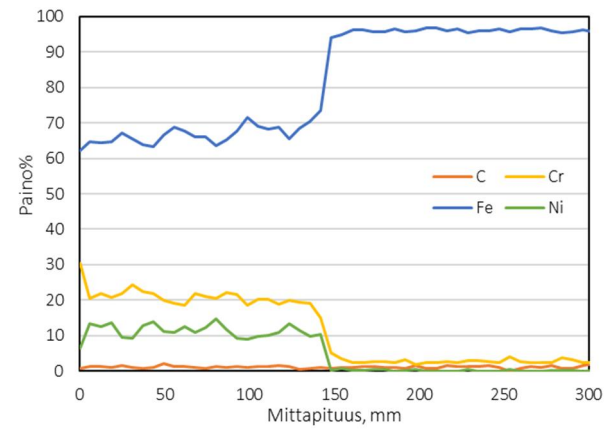
Uhlig625



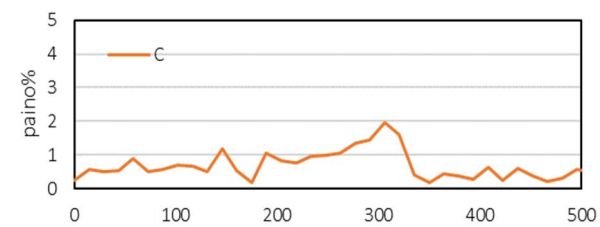
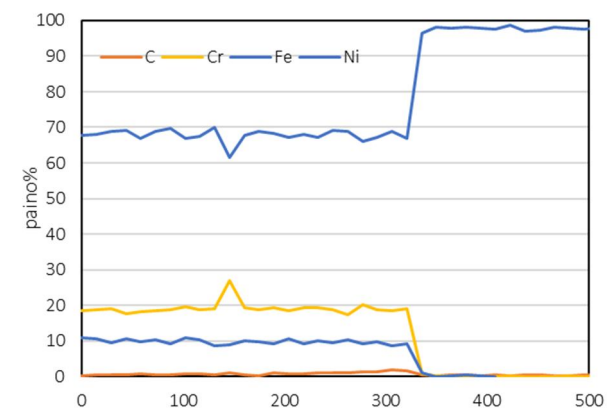
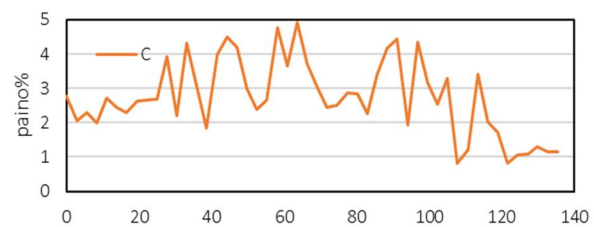
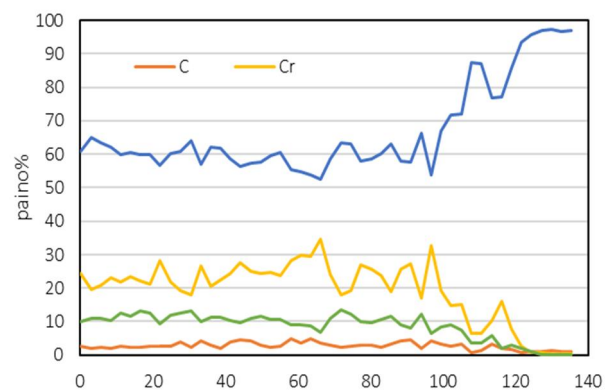
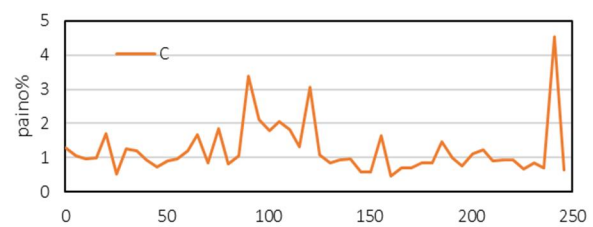
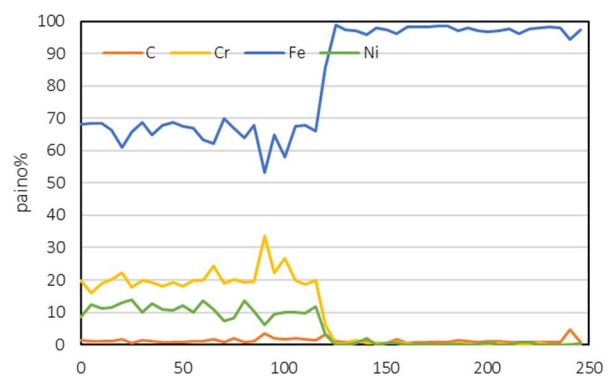
Uhlig825



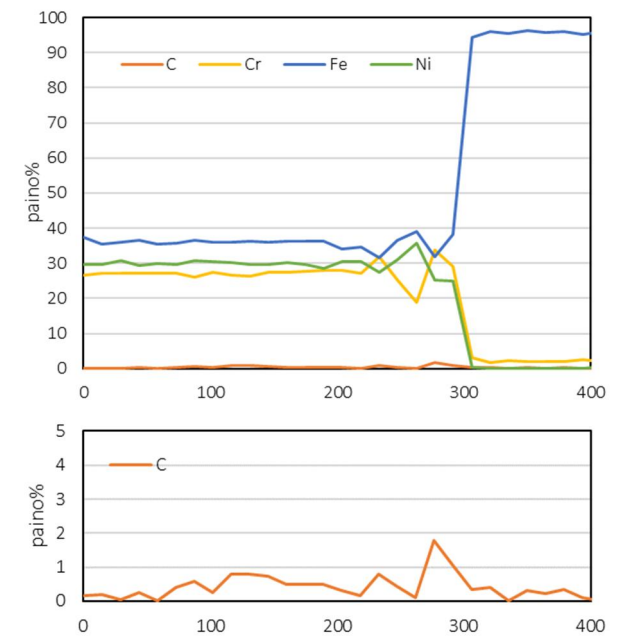
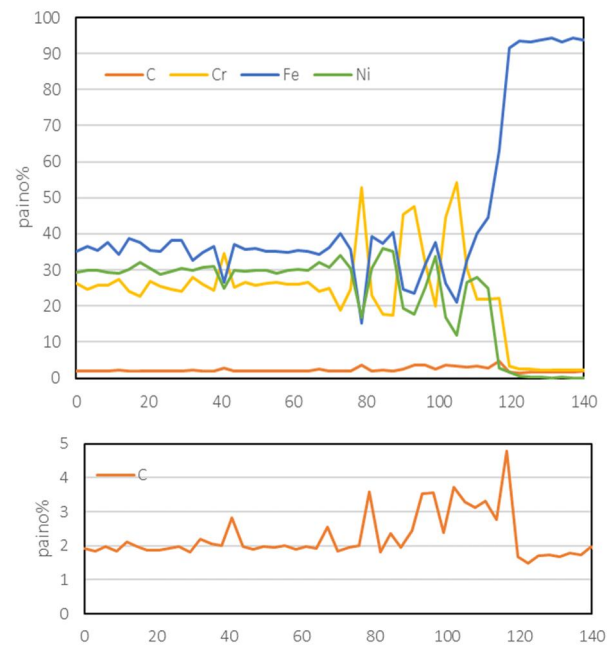
Areva 309L



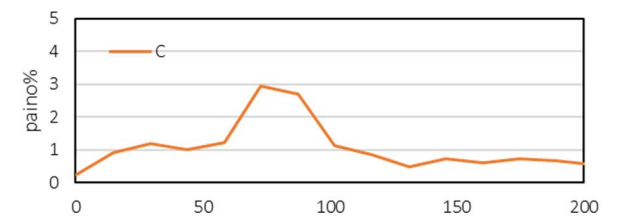
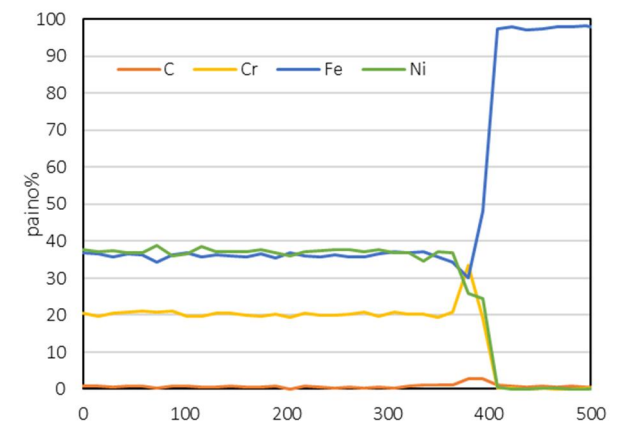
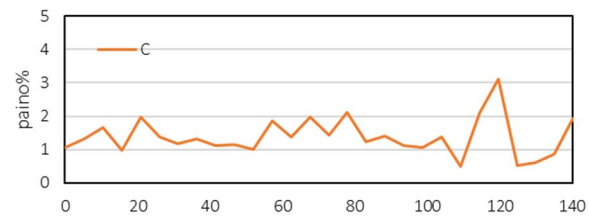
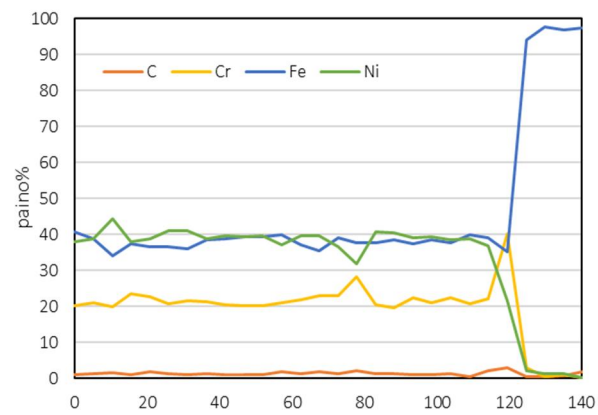
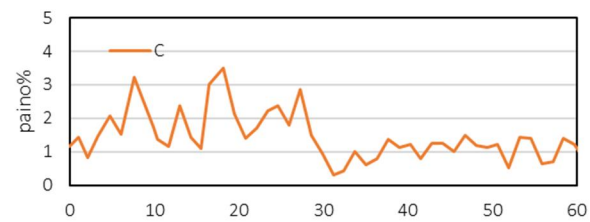
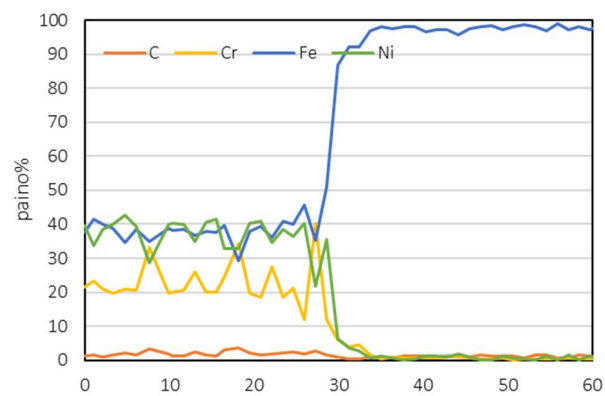
304L



San28



San38



LIITE 5

**LUT: Selvitys sularännien toiminnasta vaihtelevalla kuormalla – esitys
28.9.2017**



Sularännien toimintaolosuhteet: lämpörasitukset, sulavirtaukset ja dynamiikka

Eetu Rantanen

28.9.2017

Kysymys



- Toiminta-aikaa pitäisi pystyä pidentämään
- Sularännejä hajoaa
- Tarkastus vaikeaa

”Voisiko yksi hajoamisen syy olla lämpötilan vaihtelut?”

Sisällys

- Datan keruu esimerkkitehtailta
- Sulakourun energiatase ja laskenta
- Tehdyt mittaukset
- Tehdasvertailu



Datan keruu



- Dataa käytössä seuraavilta tehtailta
 - Sunila
 - Joutseno
 - Äänekoski
 - Enocell
 - Pietarsaari
 - Kaukas
 - Kymi, vaihtelevalla mittausvälillä
 - Kotkamills, ei rännin sisäänmenolämpötilaa
 - Oulu, 1 vrk



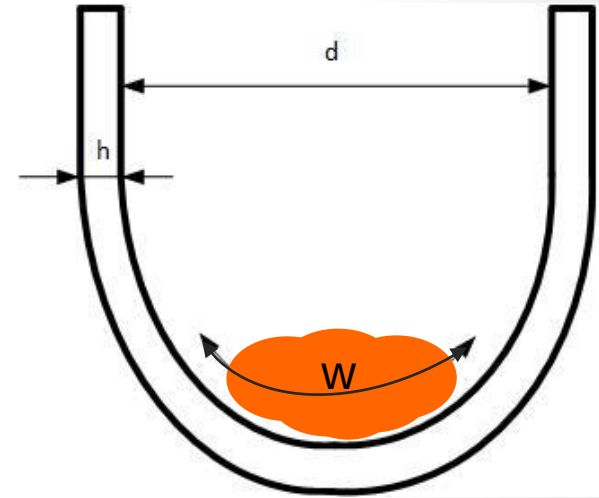
Sulamäärän arviointi/laskenta

- Polttoliipeästä
 - Keskimääräinen pidemmän aikavälin luku
- Liuotinsäiliötaseesta
 - Kokonaissulavirta, höngän määrä tiedettävä
- Erikoismittauksilla
 - Videointi (nopeus, poikkipinta-ala)

Sulakourun energiatase



- Sula
 - Johtuminen sulasta tuhkaosiin
- Sulasta kouruun
 - Konvektio, ripaefekti
 - Säteily
- Kourumetalli
 - Johtuminen, lämmönjohtavuus
- Kourusta veteen
 - Konvektio
- Lisäksi tulipesän säteily



Sulakourun lämpötilaprofiili



- Tyhjä vs. keskiarvo, sulasyöksy?
- Keskimääräinen vs. maksimi?
- Lisäpohdintaa vaaditaan



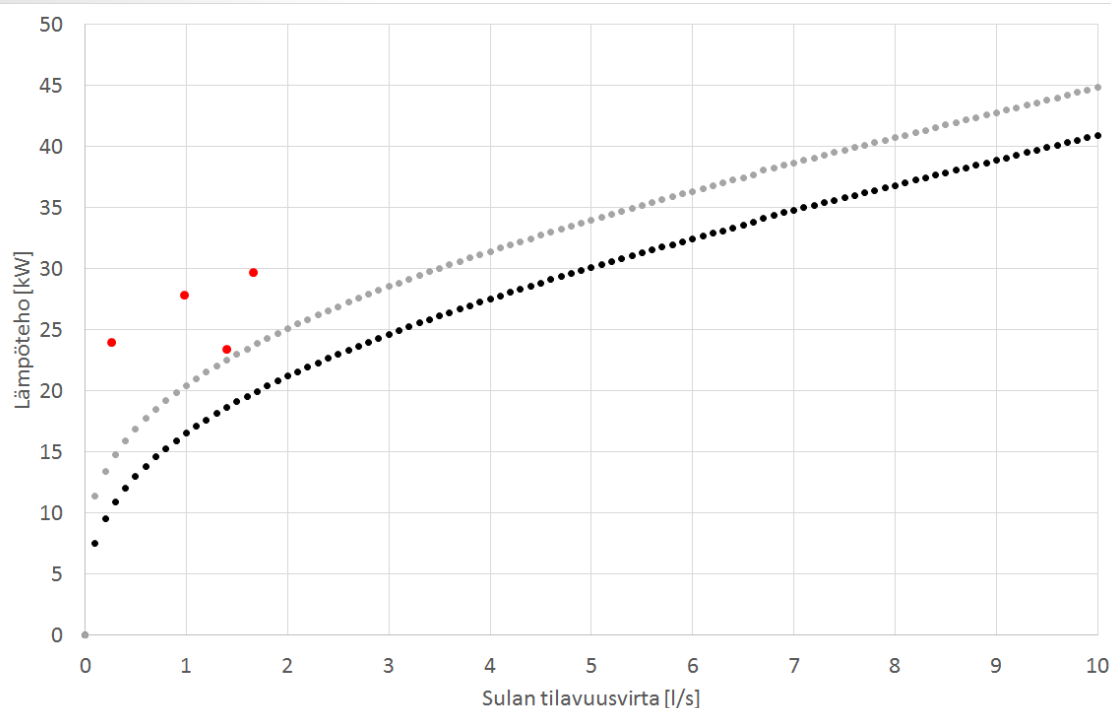
Lämpövuon suuruuden arviointi

- Lämpövuoto laskettavissa keskimäärin mitatusta lämpötiladatasta ja arvioidusta alasta
- Konvektiokerroin vesipuolelle noin $4400 \text{ W/m}^2\text{K}$, musta rauta 41 W/mK
- Teräksen lämpötila vesipuolella luokkaa 100°C , sulan puolella $30\text{--}40^\circ\text{C}$ korkeampi

		Lämpövuoto [kW/m^2]					
		Kattila A		Kattila B			
Kontaktileveys [m]	Sulakouru	1	3	1	2	3	4
	0,10	215	254	17	260	234	21
	0,15	143	169	11	174	156	14
	0,20	107	127	8	130	117	11

Tulipesässä $100\text{--}200 \text{ kW/m}^2$

Lämpöteho sulavirran funktiona



Rännin pituus	1	m
Rännin leveys	0,13	m
Rännin korkeus	0,14	m
Lämpövuo	200	kW/m ²
Sulan virtausnopeus	1,5	m/s

Tässä ripaefektiä
ei ole huomioitu

Sulakourun energiatase, muutostilanteet



- Sulasyöksy/rassaus aiheuttaa muutoksen
 - Sulamäärä kasvaa, nestemäistä sulaa jäähtyy ja jähmettyy rännin reunaan, lämpö pääasiassa jäähdytysveteen -> 1 kg jähmettyvää ja jäähtyvää sulaa nostaa lämpötehoa tietyn minuutin ajalta karkeasti 20 kW
 - Esimerkkirännillä (SK11) kyseinen tilanne kun sulavirta muuttuu 1 l/s -> 3 l/s, 4 mm jähmettyvä kerros
 - Riittääkö minuutin tarkkuus näissä tilanteissa?
 - Hetkellinen lämpövuoto?

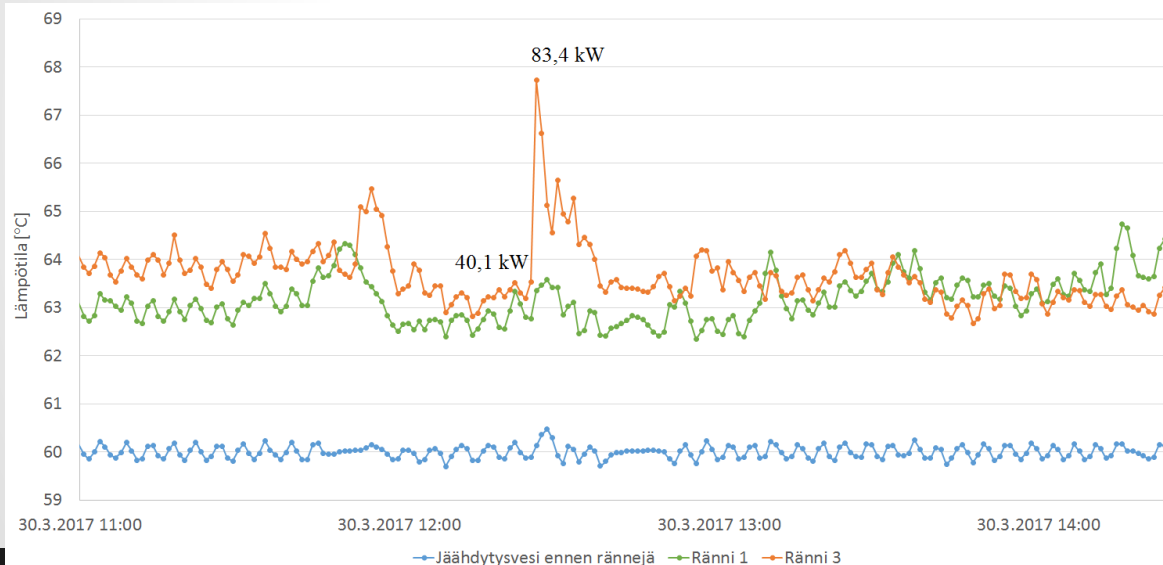


Mittausdatan analysointi

Lämpötehon määrittäminen



- $q = q_m \cdot c_p \cdot (T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}})$
 - Jokaiselle ajanhetkelle rännikohtaisesti





Tehdasvertailu - lämpörasitukset

Lämpötehon muutos yli 30 kW/min

		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	32	30	27	44	35	19	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	1	1	3	7	4	1	
Sunila SK10	Mill H1	18		14				
Sunila SK11	Mill H2	7	11	7	1			
Kaukas	Mill K	0	0	0	3	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	0	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		26	40	7	5			

Muokattu data

Sunila SK10	Mill H1	13		9				
Sunila SK11	Mill H2	0	3	4	0			



Tehdasvertailu - tukkeutumiset

		Tukkeutumiskerrat [kpl]						
		(Ränniveteen siirtynyt teho alle 5 kW)						
		Ränni 1	Ränni 2	Ränni 3	Ränni 4	Ränni 5	Ränni 6	Ränni 7
Joutseno	Mill B	0	0	0	0	0	0	
Äänekoski	Mill A	0	0	0	0	0		
Enocell	Mill E	78	28	20	159	130	107	
Sunila SK10	Mill H1	69		8				
Sunila SK11	Mill H2	251	57	48	211			
Kaukas	Mill K	0	0	0	0	0	0	
Kymi SK3	Mill L							
Pietarsaari	Mill M	0	3	0	0	0	0	0
Sunila SK11 2016		131	90	84	120			



Viimeaikaiset mittaukset

Sulan videokuvaus

Mittausjakso 30 min lukuun ottamatta
SK11 ränniä 3, jolla jakso oli 13 min

		SK10		SK11	
		1	3	2	3
Lämpötilan nousu	°C	3,9	3,2	2,6	2,1
Lämpöteho	kW	41,8	35,1	29,7	24,0
Sulan leveys	cm	7,7	8,5	9	5,1
Kosketuspinnan leveys	cm	8,2	9,3	9,9	5,2

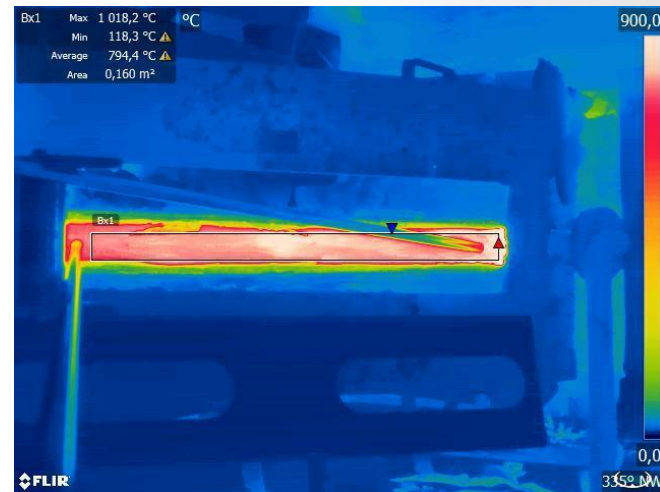
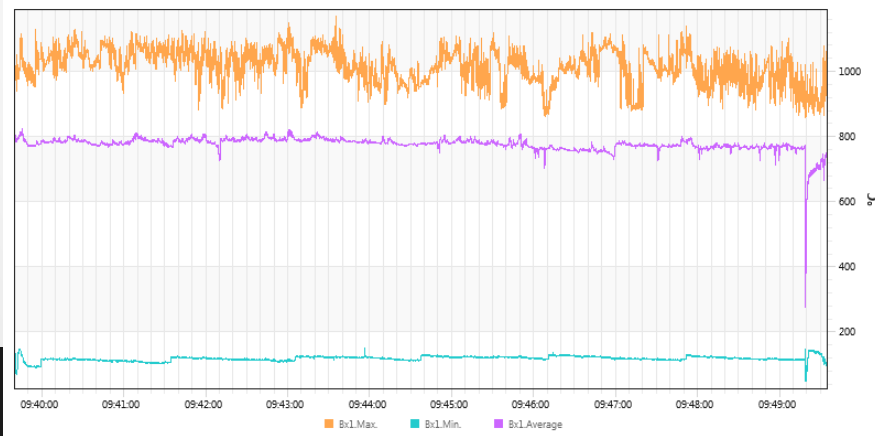
Sulan nopeus luokkaa 1,5 m/s,
epävarmuus merkittävä



Sulan lämpötilan mittaus ja lämpökamerakuvaus



- 19.9. mittauspäivä, kaksi termoelementtiä ja kaksi lämpökameraa
- Mittausjakso 10 min/ränni
 - Lämpökameralla kuvattiin videota
 - Termoelementit rännin ylä- ja alapäässä
- Lämpötilaprofiili, sulan nopeus ja emissiviteetti



Pohdintaa



- Lämpökamera- ja termoelementtikuvaukset toisella kattilalla?
- Lämpötehojen muutosten erittely (kasvava/vähenevä)?
- Kuukausi ajojaksona?
- Rännien kunnon dokumentointi vaihdon yhteydessä?

LIITE 6

Sularännisuositus 28.9.2017

SISÄLLYSLUETTELO

2	YLEISTÄ	2
3	SULARÄNNEIHIN LIITTYVÄT RISKIT	3
3.1	Rännien tukkeutuminen	3
3.2	Sulavuoto	3
3.3	Jäähdytysvesivuoto / sulavesiräjähdys	3
3.4	Liuottajaräjähdykset	4
4	SULARÄNNIEN PUHDISTUS JA TYÖVÄLINEET	6
5	SULARÄNNIEN MATERIAALIT JA TARKASTUKSET.....	8
5.1	Materiaalit.....	8
5.2	Tarkastukset.....	8
6	SULARÄNNIEN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ.....	10
6.1	Jäähdytysvesi	10
6.2	Jäähdytysjärjestelmän suunnittelukriteerit	11
6.2.1	Lappojärjestelmä	12
6.2.2	Alipainejärjestelmä.....	13
7	SULARÄNNIEN VAURIOT.....	15
7.1	Tyypilliset vauriot.....	15
7.2	Esimerkkejä raportoiduista vaurioista	15
7.2.1	Sulavuoto kattilahuoneeseen	16
7.2.2	Sulavuoto kattilahuoneeseen	17
7.2.3	Sulavuoto kattilahuoneeseen	18
7.2.4	Sularännin jäähdytysvesivuoto.....	19
7.2.5	Sularännin jäähdytysvesivuoto.....	20
7.2.6	Sulavuoto kattilahuoneeseen	21
7.2.7	Sularännin jättöreunassa vuoto.....	22
7.2.8	Sularänni jättöreuna syöpynyt.....	23
7.3	Esimerkkikuvia vaurioista	25

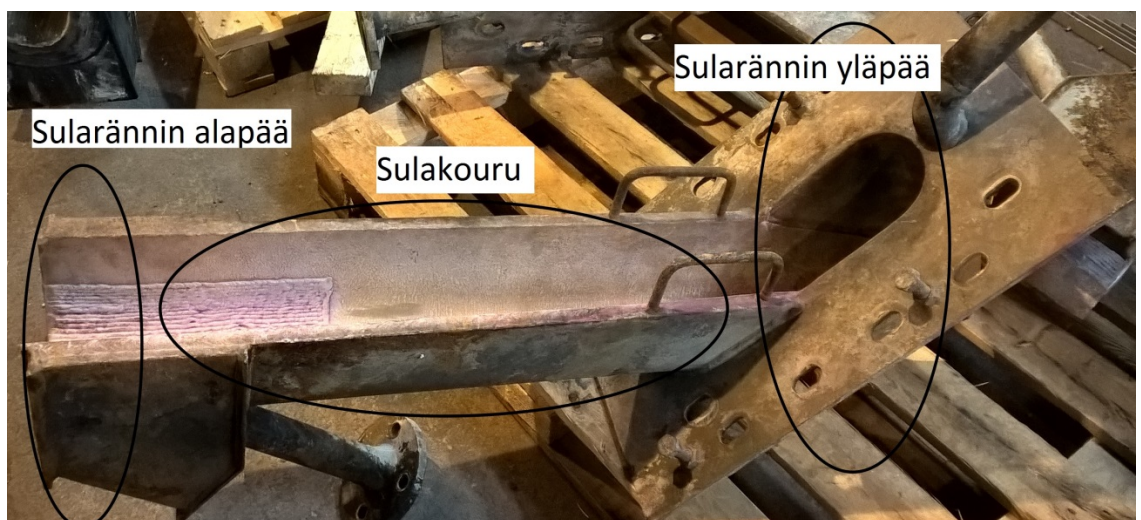
1 YLEISTÄ

Sularännit (sulakourut) ovat oleellinen osa soodakattilan rakennetta ja niiden toiminta erittäin tärkeää. Mustalipeän poltossa syntynyt sula kemikaalituhka valuu huokoisen keon läpi tulipesän pohjalle, josta se johdetaan ylijooksuna vesijäähdytettyjen sulakourujen kautta liuottimeen. Liuottimessa sula liuotetaan kaustistamolta saatavaan laihavalkolipeään. Näin muodostunut viherlipeä pumpataan kaustistamoon.

Suomen Soodakattilayhdistyksen jäsenistö on kaivannut suositusta soodakattilan sularännien suunnitteluun, käyttöön ja kunnossapitoon. Taustalla on huoli turvallisuudesta ja raportoidut sularännivauriot. Sularännien kestävyys on viime vuosina korostunut sellutehtaiden pidentyneiden ajoaikojen seurauksena.

Tässä suosituksessa sularännien osista käytetään seuraavia nimityksiä:

- sularännin yläpää kiinnitetään kattilaan. Tästä kohdasta sula tulee sisään ränniin.
- kouru on rännin kalteva osuus (jossa sula juoksee)
- sularännin alapää on liuottajan puoleinen pää. Sula jättää rännin ja juoksee liuottajaan.



Kuva 1-1. Sularännin eri osat

Yhdistys ei vastaa tämän suosituksen virheistä eikä tästä johtuvista mahdollisista ongelmista.

2 SULARÄNNEIHIN LIITTYVÄT RISKIT

2.1 Rännien tukkeutuminen

Tukkeutuneen rännin avaamiseen liittyy erittäin suuri riski. Tukoksen auettua ja sulamäärän ollessa suuri saattaa liuottajassa tapahtua voimakas sula-vesiräjähdyks.

Työn suorittamisesta tulee olla kirjalliset ohjeet ja työhön osallistuvilla henkilöillä aiempaa kokemusta tukkeutuneen sularännin avaamisesta. Henkilöstön on käytettävä tähän työhön ja tarkoitukseen suunniteltuja välineitä, suojaimia ja vaatteita. Suositeltavaa on, että kattilan käytönvalvoja saa asiasta tiedon ennen työn aloittamista.

2.2 Sulavuoto

Sulavuoto rännin ohi voi johtua monesta syystä kuten esimerkiksi kiinnityskehysten irtoamisesta, massauksen sulamisesta tai asennusvirheestä (massauksen unohtaminen tai sen riittämättömästä tiiveydestä vajavaisen tärytyksen vuoksi).

Sulan kertyminen seinien viereen esimerkiksi tulistin nuohouksen aikana voi johtaa tilanteeseen jossa sulaa pääsee primääri-ilma-aukkojen kautta ilmakanaavaan ja sitä kautta kattilan ulkopuolelle.



Kuva 2-1. Esimerkkejä sulavuodosta kattilan ulkopuolelle

2.3 Jäähdytysvesivuoto / sulavesiräjähdyks

Sularännien sijainnista johtuen ränneissä kiertävä jäähdytysvesi aiheuttaa sulavesiräjähdyksen vaaran. Vuodon seurauksena vettä voi joutua suoraan tulipesään tai sulavirtaan.

Sularännin jäähdytysvesivuoto voi johtua monesta eri syystä kuten esimerkiksi rännin ennenaikaisesta kulumisesta, jäähdytysvesivirtauksen katkeamisesta, jäähdytysveden liiallisesta höyrystymisestä/tulistumisesta, jäähdytysveden liiallisesta lämpötilavaihtelusta, liiallisista vesipuolen kerrostumista, katkonaisesta sulavirtauksesta, valmistusvirheestä tai virheellisestä asennuksesta/huollosta.

Jäähdytysvesivuodon sattuessa sularännissä jäähdytysvesi on katkaistava vuotavasta rännistä ja kattila on ajettava alas rännin vaihtoa varten.

Vuotava ränni voidaan tulpata hetkellisesti turvallisen alasajon takia jos riskiä veden joutumisesta kosketuksiin sulan kanssa ei ole ja rännin jäähdytyskierto toimii suunnitellusti. Tulppauksen tekemistä suositellaan harjoiteltavan etukäteen. Tulppausta voi harkita jos vesivuoto sijaitsee sularännin alapäässä (liuottajan puoleinen pää) eikä vuoto ole niin suuri, että se haittaisi sularännin yläpään (tulipesän puoleinen pää) jäähdytystä. Mikäli vesivuoto sijaitsee sularännin yläpäässä, riski veden joutumisesta tulipesään on olemassa ja tulppaus ei todennäköisesti pysy paikallaan jäähdytysveden ja sulan räjähtelyn takia.

~~Tulppauksen jälkeen ränniin palautetaan vesikierto rännin kattilan sisään työntyvän osuuden suojelemiseksi ns. pakkokierron avulla. Pakkokierron avulla voi myös havaita mikä ränneistä vuotaa, mutta sen käyttöön liittyy riskejä.~~ Alipaineeseen perustuvissa järjestelmissä jäähdytysvesijärjestelmään voi vuodon sattuessa päästä sulaa, joka näkyy kohonneena pH:na ja johtokykynä.



Kuva 2-2. Räjähdysten voimasta irronnut ränni

2.4 Liuottajaräjähdykset

Liuottajassa tapahtuu jatkuvasti pieniä räjähdyksiä 800-1000 °C sulan virratessa 90-100 °C nesteeseen. Sulan hajottaminen pisaroiksi höyryllä vähentää "paukahtelua". Liuottajaräjähdys voi olla seurausta useammasta tapahtumaketjusta. Seuraavassa on esitetty syitä, jotka voivat johtaa liuottajaräjähdykseen:

- Sellutehtaan prosessihäiriöiden seurauksena polttoliipeän ja siten sulan laatu voi muuttua niin, ettei sulan liuotus toimi suunnitellusti. Ominaista näille häiriöille on mustaliipeän orgaanisen aineen alhainen osuus ja/tai alhainen valkoliipeän sulfiditeettitaso. Erityisen riskitekijän muodostaa soodakattilan pesuveden johtaminen haihduttamoon. Soodakattilan tulipesän pesuvedet tulisi käyttää mieluummin laiha-valkoliipeäksi ja johtaa matalapitoiset vedet jätevesijärjestelmään tehtaan ympäristöluvan salliessa.

- Sularänniaukon tukkeutuessa tulipesän pohjalle kerääntyy ylimääräistä sulaa. Sularänniä avattaessa on sulan virtaus jonkin aikaa erittäin voimakasta ja muodostaa liuottajan räjähdysmahdollisuuden. Mahdollisuus tähän on erityisen suuri kattilan vesipesun jälkeen pohjalle kertyneen suolan takia, joka voi aikaansaada sulan kertymää. Vesipesun jälkeen tulee primääri-ilma-aukkojen edusta tulipesän sisäpuolella puhalttaa vapaaksi irtosuolasta.
- Suolaa (kekosulaa alemmassa lämpötilassa) voi kertyä myös tulipesän pohjalle tulistimia nuohotessa. Jossain tapauksissa määrä voi olla niin suuri että suolaa kertyy seinien viereen primääri-ilma-aukkojen eteen. Tällöin lipeäpolttoa tulisi rajoittaa ja aukot saatava auki. Esimerkiksi lipeäruiskujen sijoituksilla sekä lipeän lämpötilalla voidaan vaikuttaa keon kasvamiseen.
- Voimakas sulavirtaus saattaa myös muodostaa liuottajaan pohjalle sulakasauman, koska kaikki sula ei ehdi liueta nesteeseen. Liuottajan sekoittimet on pidettävä toiminnassa tehokkaan sekoittumisen ja liukenemisen varmistamiseksi. Riittävällä sekoituksella estetään liukenemattoman aineen kerääntyminen liuottajan pohjalle ja sulamöykkyjen (kamien) kertyminen sulantuloaukkoon.
- Sularännien huuvien seinille sekä liuottimen seinille ja kattoon kerääntyy kuumia sulamöykkyjä, jotka riittävästi kasvaessaan putoavat tai niitä pudotetaan hehkuvina nesteeseen ja saattavat aiheuttaa liuottajaräjähdysten.
- Liuottajan nestepinnan ollessa liian korkea, sulan hajotus ei toimi halutulla tavalla. Tästä saattaa aiheutua liuottimen nesteen ja sulan räjähdysmäinen ryöpsähtäminen liuottimen hoitotasolle.
- Mikäli tulipesän pohjalla on keko, tulee ennen apupolttoaineen polttimen sytytystä varmistaa, että liuottajassa on riittävästi nestettä sekä sularännien jäähdytyskierto on päällä, sillä sulavirtaus saattaa alkaa nopeasti polttimen sytytyksen jälkeen. Liuottajan nestetäytön aloittaminen sen jälkeen, kun sulavirtaus on jo alkanut, johtaa todennäköisesti liuottajaräjähdykseen.
- Lipeän polton aloitus täytyy estää liuottimen pinnan ollessa alle lukitusrajan. Ennen lipeän polton aloitusta tulee varmistaa ilma-aukkojen olevan auki. Liuottajan pinnan mittauksen oikeellisuus on varmistettava säännöllisesti.



Kuva 2-3. Rassausta kaipaava ränni

3 SULARÄNNIEN PUHDISTUS JA TYÖVÄLINEET

Soodakattilaoperaattorin työtehtäviin kuuluu 1-2 tunnin välein tehtävä tarkastuskierros soodakattilarakennuksen eri kerroksissa, jolloin suoritetaan muun muassa lipeäsuuttimien/-ruiskujen, ilma-aukkojen/-suuttimien tarkastus ja sularännien mekaaninen puhdistus ja rassa.

Sularännin säännöllinen puhdistus/rassaus on erittäin tärkeää. Mikäli puhdistusväli on liian pitkä, ränni ehtii tukkeutua ja seurauksena voi olla voimakas sulavirtaus, sulasyöksy. Sularännin puhdistus/rassaus suoritetaan operaattorin toimesta useita metrejä pitkällä rautakangilla. Kangen pään tulisi olla pyöristetty ja rassaus suoritettava oikea-oppisesti ränniin kohdistuvan rasituksen minimoimiseksi.

Soodakattilan tulipesän vakaa ja häiriötön toiminta on perusedellytys sularännien toiminnalle. Esimerkiksi liian suuri palamattoman aineksen osuus sulassa vähentää sulan juoksevuutta, mikä edesauttaa sularännien tukkeutumista. Tasainen sulavirtaus ilman häiriöitä on paras toimintaympäristö ränneille.



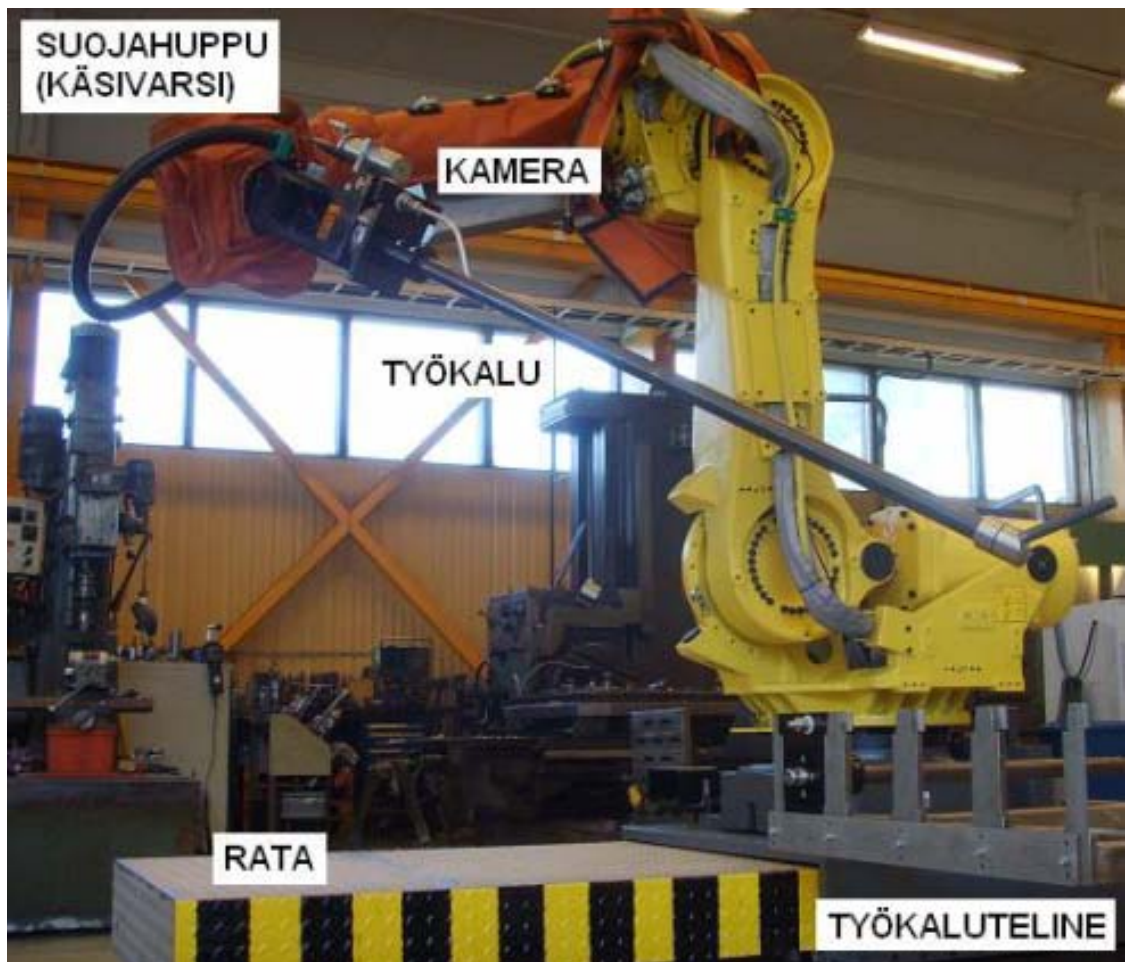
Kuva 3-1. Rännien rassausta soodakattilalla

Kuuman sulan (800-1000 °C) roiskumisvaarasta johtuen tehtävään liittyy työturvallisuusriski. Roiskeet ovat aiheuttaneet vaaratilanteita ja palovammoihin johtaneita tapaturmia. Työtapaturman riski on erityisen suuri häiriötilanteessa (tukkeutuneiden kourujen avaaminen, yllättävä sulasyöksy, kamin putoaminen liuottimeen, vesivuoto kourussa).

Normaali yksikerroksinen suojavaatetus ei suojaa työntekijää roiskeiden aiheuttamilta palovammoilta. Tehtailla onkin käytössä sularännialueella työskentelyä varten erityisiä suojavaatetuskokonaisuuksia.

Työturvallisuuden parantamiseksi joillakin tehtailla on otettu käyttöön automaattinen sulakourujen puhdistus ns. sularännirobotti. Robotin toimintoja ovat:

- mekaaninen rassa
- huuvan alapuolisten pintojen pesu
- hajoitushöyrysuuttimen pesu
- huuvan ulkopuolisten alueiden pesu
- sulakourualueen kameravalvonta
- sulakourun tulppaus



Kuva 3-2. Esimerkki sularännirobotista

4 SULARÄNNIEN MATERIAALIT JA TARKASTUKSET

4.1 Materiaalit

~~Parempaan Seostetumman~~ materiaalin käyttö voi pidentää rännin käyttöikää mutta ei välttämättä ratkaise kaikkia ongelmia. Rännejä voidaan valmistaa eri materiaaleista kuten esimerkiksi:

- runko ja kouru hiiliterästä (P265GH / S235JR)
- runko ja kouru hiiliterästä, kourun alapää (~~liuottajan puoleinen pää~~) ja/tai yläpää (~~tulipesän puoleinen pää~~) päällehitsattu ruostumattomalla teräksellä (304L) tai nikkelpohjaisella seoksella (625). Myös koko kouru voidaan päällehitsata.
- runko ja kouru hiiliterästä, kouru pinnoitettu (~~ns. compound-rännieläplate~~) ruostumattomalla teräksellä (304L).

4.2 Tarkastukset

Uudet rännit

Sularännit on valmistuksen jälkeen koeponnistettava konepajalla ja niille on suoritettava kattava visuaalinen tarkastus (VT) sekä pintatarkastus (PT). Lisäksi voidaan suorittaa röntgentarkastus (RTG) esimerkiksi rännin yläpään (tulipesän puoleinen pää) jossa todetaan että rakenneratkaisut ja hitsimitoitukset ovat sovitun mukaiset. ~~Kaikkia rännejä ei tarvitse kuvata.~~ Valmistajalta on saatava jokaisesta sularännistä yksilöllinen tarkastus-/testaustodistus, jossa esitetään muun muassa käytetyt materiaalit, hitsaajan tiedot ja tehdyt tarkastukset.

Käyttöönottotarkastuksen helpottamiseksi tehtaalla, ~~r~~Rännejä ei suositella maalattavaksi konepajalla. Suojaus voidaan tehdä esimerkiksi Tectylillä tai vastaavalla.

Rännit on tarkastettava visuaalisesti ennen käyttöönottoa ja asennettava keskenään samalle korkeudelle.

Sularännin suositeltu käyttöikä on 12 kuukautta, jonka jälkeen ne on korvattava uusilla.



Kuva 4-1. Vasemmalla: esimerkki röntgenkuvasta, jossa näkyy sisäpuolen vajaa juuri. Oikealla: esimerkki valmistuksenaikaisista hitsausvirheistä, mm. jyrkät liittymät näkyvät selvästi

Käytetyt rännit

Sularännit suositellaan tarkastettavaksi vähintään visuaalisesti aina kun mahdollista. Jos ränni ei läpäise tarkastusta, se tulee vaihtaa.

Käytöstä poistetut sularännit on romutettava. Sularännejä ei saa korjata tarkoituksena, että ne voitaisiin ottaa uudelleen käyttöön.

Yksi käytöstä poistettu ränni suositellaan tarkastettavaksi tunkeumanesteellä. Lisäksi suositellaan yhden rännin leikkaamista palasiksi. Tarkista leikatusta rännistä jäähdytysvesivaipan sisällä olevat alueet korroosion/kerrostumien havaitsemiseksi. Lisäksi jäähdytysvesiputkisto ja säiliöt tulisi tarkastaa määräajoin kerrostumien varalta.



Kuva 4-2. Tunkeumanestetarkastuksessa havaittuja säröjä

5 SULARÄNNIEN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ

5.1 Jäähdytysvesi

Jäähdytysveden tulee täyttää seuraavat kriteerit:

1. **Laatu:** Koska sularännit joutuvat kovalle rasitukselle (suuri lämpötilaero, suuret lämpötilavaihtelut, vesipuolen korroosio, sulapuolen korroosio ja eroosio), jäähdytysveden on oltava laadukasta. Jäähdytysveden tulee olla lauhdetta tai täyssuolanpoistettua lisävetä. Huonon vedenlaadun seurauksena voi esiintyä sisäpuolista kerrostumista, happikorroosiota tai sakan muodostumista, joka heikentää lämmönsiirtoa. Lämmönsiirron heikentyminen johtaa rännin ylikuumenemiseen ja säröilyyn ja mahdollisesti vuotoon.
2. **Lämpötila:** Sularännin jäähdytysvesi on pidettävä valmistajan suositusten mukaisena (alipainejärjestelmissä sisäänmenolämpötila on tyypillisesti 50-65 °C:n välillä ja ei-alipainejärjestelmissä 75-80 °C luokkaa). Erittäin tärkeää on pitää sekä sisään- että ulostulevan veden lämpötilat tasaisena, koska lämpötilapiikit aiheuttavat säröilyä kun kuormituskertoja on riittävästi.

Jos sularännin jäähdytysveden lämpötila on suositusta alhaisempi, rännin sivuille voi kondensoitua vesipisaroita, josta seuraa sulan roiskumista ja pieniä sulavesiräjähdyksiä jotka aiheuttavat eroosiota. Sulan roiskumisesta voi seurata sulan kerrostumista rännin koteloon, kourun huuvaan, rännitasolle ja kaikille ympäröiville pinnoille. Roiskumisesta voi aiheutua myös henkilövahinkoja. Kosteaa ympäristö voi lisäksi edesauttaa happojen muodostumista.

Suosituksista korkeampi jäähdytysveden lämpötila voi taas aiheuttaa jäähdytysveden höyrystymistä voimakkaan sulavirtauksen aikana. Höyrystymisen seurauksena rännin jäähdytysvesivirtaus voi hetkellisesti pysähtyä, mikä taas ylikuumentaa ja vaurioittaa ränniä.

Jokaiseen rännin jäähdytysveden ulostulolinjaan tulee asentaa lämpötilamittaus sekä hälytys valmistajan määrittämälle lämpötila-alueelle (esimerkiksi 65-70 °C). Alipaineperiaatteella toimivissa järjestelmissä on huomattava, että hälytyspiste on asetettava suhteessa veden todelliseen kiehumispisteeseen mitattuna vedenulostulopaineesta.

3. **Virtaus:** Rännin jäähdytysvesijärjestelmä on suunniteltava valmistajan määrittämän jäähdytysveden minimivirtauksen aikaansaamiseksi. Alhaisesta virtauksesta seuraa ajan myötä lämpötilavaihteluita, jotka johtavat vaurioon. Virtausmittaus tulee asentaa jokaisen sularännin ulostulolinjaan. Sen tulee hälyttää valmistajan määrittämästä minimivirtauksesta.
4. **Paine:** Jäähdytysvedenpaineen tulee olla mahdollisimman pieni virtaukseen nähden. Pieni vedenpaine kourun yläpäässä ja kiertojärjestelmän yläosassa vähentää vesimäärää, joka voisi päästä tulipesään mahdollisen vuodon yhteydessä. Lisäksi suuri painehäviön laskee veden kiehumislämpötilaa. Veden höyrystyminen heikentää jäähdytysvesivirtausta ja pahimmassa tapauksessa pysäyttää sen, mikä taas ylikuumentaa ja vaurioittaa ränniä. Pieni vedenpaine saavutetaan pitämällä virtausnopeus suositusten mukaisena ja minimoimalla painehäviö ulostulolinjan puolella.

5.2 Jäähdytysjärjestelmän suunnittelukriteerit

Jäähdytysjärjestelmää suunniteltaessa tulee noudattaa seuraavia suunnittelukriteerejä:

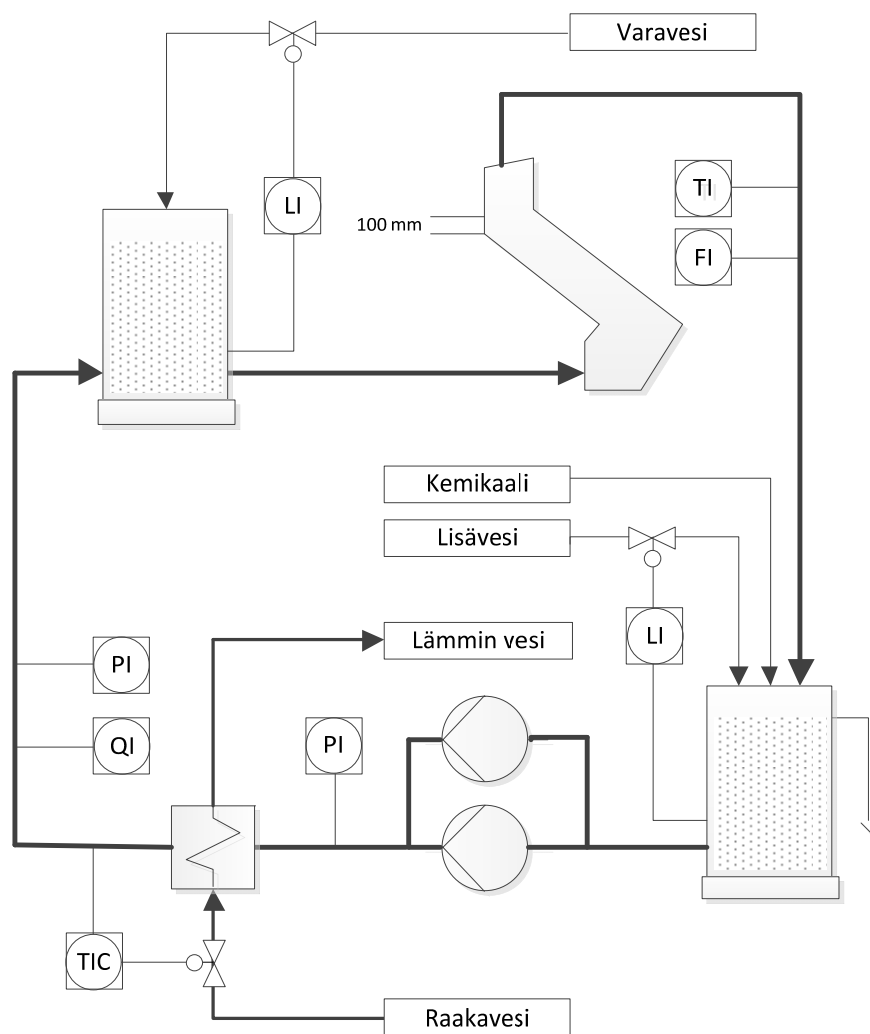
1. Sularännien jäähdytysjärjestelmän an suljettu kierto on rakennettava lappo- tai alipaineperiaatteella toimivaksi.
2. Jäähdytysvesijärjestelmä on varustettava kahdella pumpulla, joista toinen on normaalisti toiminnassa ja toinen varalla. Varapumpun on käynnistytävä automaattisesti.
3. Jäähdytysvesijärjestelmän toiminta on varmistettava automaattisella varavesijärjestelmällä mikäli jäähdytysvesisäiliön pinta tai järjestelmän paine laskee alle minimin. Veden riittävyys varavesijärjestelmästä on varmistettava myös sähkö- ja ilmakatkon varalta.
4. Jäähdytysvesijärjestelmä suositellaan varustettavan virtaus-, lämpötila-, (pH-) ja johtokyky mittauksella. Jokaisen rännin jäähdytysvesiulostulo linjaan on asennettava sekä lämpötila että virtausmittaus. ja sisääntulolinjaan lämpötilamittaus.
5. Järjestelmän korkeasta lämpötilasta, pienestä virtauksesta, pienestä paineesta, jäähdytysvesisäiliön matalasta pinnasta ja jäähdytysvesipumpun pysähtymisestä on annettava hälytys.
6. Jäähdytysvesisäiliön tasoa tulee säädellä täyssuolanpoistettua vettä tai lauhdetta lisäämällä ja alhaisesta tasosta on annettava hälytys.
7. Rännin valmistajan suosittelemien jäähdytysveden tulolämpötilojen ylläpitämiseksi tarvitaan jäähdytysveden lämmönvaihdin.
8. Jokaiselle rännille on oltava jäähdytysvesivirtauksen pysäyttävä sulkuventtiili. Sulkuventtiilit on merkittävä SELVÄSTI JOKAISEN rännin yhteydessä, jotta hätätilanteessa jäähdytysvettä ei vahingossa katkaistaisi väärästä rännistä.
9. Uusiin ränneihin tulee merkitä selvästi rännin sisäänmeno- ja ulostuloliitännät.
10. Sularännit täytyy varustaa tehokkailla sulanhajottajilla, ja rännien toimintaa on seurattava kameroiden välityksellä valvomosta.
11. Putkistot suositellaan valmistettavan ruostumattomasta teräksestä ja liitoskohdat tehtävän hitsaamalla. Kierteellisten putkien, kiinnikkeiden ja venttiilien käyttö tulee minimoida tyhjiötä mahdollisesti pienentävien vuotojen vähentämiseksi, jotka voisivat vaikuttaa myös jäähdytysvesivirtaukseen.
12. Jotta sularännin jäähdytysvesijärjestelmä saadaan varmasti pidettyä toiminnassa, mahdolliset muutokset tulee teettää jäähdytysvesijärjestelmän suunnittelijalla tai hänen neuvojensa mukaisesti.

5.2.1 Lappojärjestelmä

Lapposysteemissä jäähdytysveden jättopuolen vesipatsaskorkeus on suurempi kuin tulopuolen, kuva 5-1. Tampellan kehittämässä lapossa ylemmän säiliön vesipinta on 100 mm alempana kuin kourun yläpään alareuna/nurkka, jossa on vettä. Jos vesikiertoon syntyy reikä, josta vesikiertoon pääsee ilmaa, lappovirtaus katkeaa ja yhtyvissä astioissa pinnat tasaantuvat. Näin varmistetaan se, että pesään/kekoon ei mene vettä.

Maailmalla on kuitenkin sattunut vaaratilanteita rännin yläpäähän tulleen vuodon seurauksena. Järjestelmä toimii kuten suunniteltu eli vesipinta laskee mutta samalla vesitilaan pääsee sulaa, joka voi aiheuttaa räjähdyksen kourulevyn ja ulomman vesivaipan sisällä. Räjähdys voimasta ränni voi irrota aiheuttaen vaaraa rännitasolla oleville henkilöille.

Mikäli rännin yläpäässä havaitaan vuoto, kattila tulee ajaa alas ja estää rännitasolle meneminen ilman asiamukaisia suojavaarusteita.



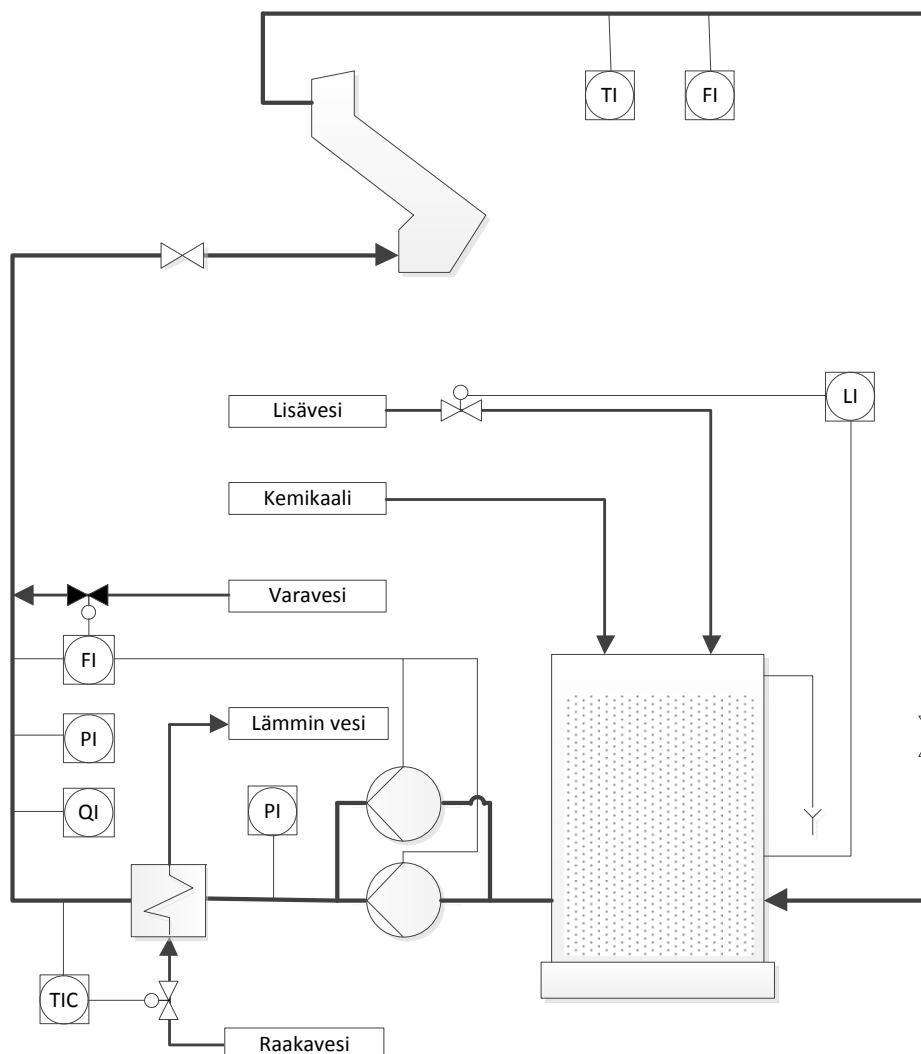
Kuva 5-1. Yksinkertaistettu esimerkki lappojärjestelmästä

5.2.2 Alipainejärjestelmä

Alipainejärjestelmässä muodostetaan pieni tyhjä rännin jäähdytysvesivaipan sisään esimerkiksi venttiileillä (kuva 5-2) tai ejektorilla (kuva 5-3). Tällöin vuodon sattuessa ilman/sulan pääsy ränniin katkaisee vesikierron estäen veden pääsyn tulipesään.

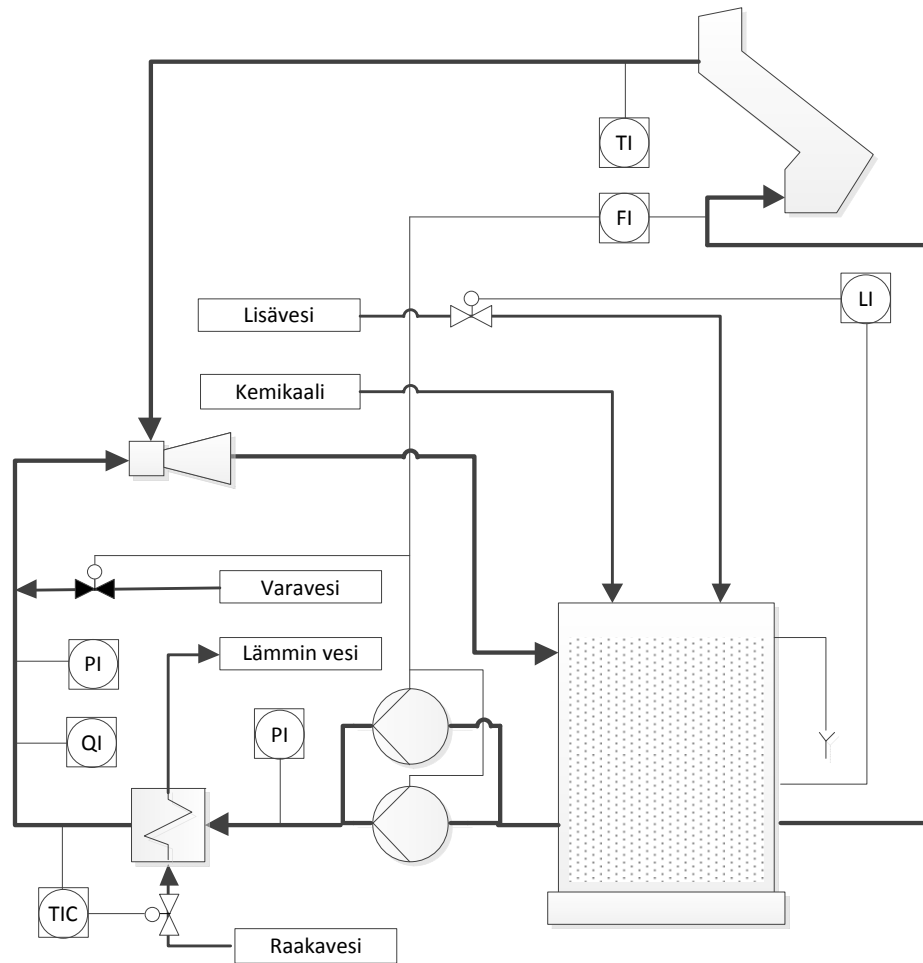
Jäähdytysveden lämpötilaa lämmönvaihtimen jälkeen säädetään kylmällä raakavedellä. Kiertovedestä mitataan johtokyky (mahdollisesti myös pH). Jäähdytysvesivirtausta valvotaan virtausmittauksella, joka avaa varavesilinjan varavesisäiliöstä, mikäli virtaus loppuu. Sulakourujen ennen/jälkeen mitataan lämpötilat ja virtaukset. Sulakouruilta vesi johdetaan takaisin jäähdytysvesisäiliöön. Jäähdytysvesisäiliön pinnanmittaus ohjaa säiliöön tarvittaessa ioninvaihdettua lisävetä.

Venttiileihin perustuvassa systeemissä vesi pumpataan jäähdytysvesisäiliöstä lämmönvaihtimen kauttalaipi sularänneille. Ennen rännejä olevilla venttiileillä säädetään rännien alipaine ja jättöpuolen venttiilillä virtaus rännin läpi.



Kuva 5-2. Yksinkertaistettu kuva venttiileihin perustuvasta alipainejärjestelmästä

Ejektoriin perustuvassa systeemissä vesi imetään jäähdytysvesisäiliöstä sularännien läpi ejektoriin. Jäähdytysvesipumppu pumppaa vettä lämmönvaihtimen läpi ejektorille, jonka tuottamasta paineesta ejektori saa käyttövoimansa. Virtaukset sekoittuvat ejektorissa ja virtaavat takaisin jäähdytysvesisäiliöön.



Kuva 5-3. Yksinkertaistettu kuva ejektoriin perustuvasta alipainejärjestelmästä

6 SULARÄNNIEN VAURIOT

6.1 Tyypilliset vauriot

Tyypillisiä vaurioita ja niiden ehkäisykeinoja [on listattu alla olevaan taulukkoon.](#) Yleisesti voidaan sanoa että kouruosan säröily syntyy lämpötilamuutoksista (pintamateriaali tyssääntyy) yhdistettynä jännityskorroosioon.

Vauriokohta:

1. rännin alapään/jättöreunan syöpyminen/eroosio
2. rännin yläpään/sisääntuloreunan säröily/korroosio/syöpyminen
3. rännin termisestä väsymisestä johtuva säröily (sulavirtauksen pohjalla/rajalla)
4. Jäähdytysvesipuolen korroosio
5. Massauksen pettäminen
6. Kourun vaipan eroosio
7. NaOH-korroosio

Syy/seuraus:

- sulanhajotus suunnattu oikein nestepintaa kohti
- liuotinhölkien/huuhteluvesien kondensoituminen sularännin pinnalla
- [rännin pitäminen kuivana](#)
- liian korkea liuottajan pinta
- riittämätön ilmanpoisto liuottajasta esimerkiksi liuotinhölkäputken tukkeutumisen takia
- jättöreunan pinnoitus
- liian korkea jäähdytysveden lämpötila
- liian suuri alipaine lisää kavitaatoriskiä
- liian korkea liuottajan pinta
- etureunan pinnoitus
- lämpötilan vaihtelut (sula tai vesi)
- pH mittaus / hälytys
- kemikaalin syöttö
- veden laatu
- hapenpoiston toiminta
- massan riittävä kuivumisaika
- kourualueen huuhtelusuihkujen tarkkailu
- kourualueen huuhteluun käytettävän laihavalkolipeen roiskuminen kuumille pinnoille



Kuva 6-1. Esimerkki jättöreunan syöpmisestä

6.2 Esimerkkejä raportoiduista vaurioista

6.2.1 Sulavuoto kattilahuoneeseen

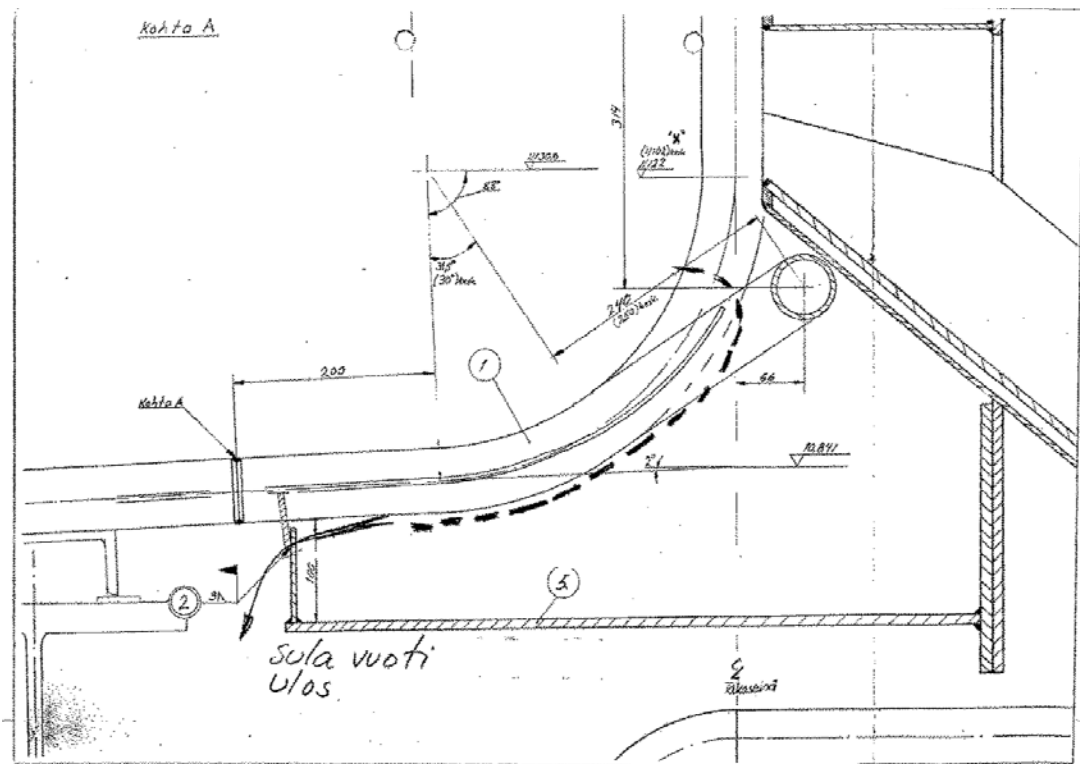
Seisokkiaika: 31 tuntia

Vaurioitunut osa: Tulipesän kamparauta

Tapahtumat

Kenttämies huomasi 7.5. klo 8.45 kierroksella, että sulaa tulee kattilan pohjasta sularännien alta runsaasti. Soodakattila oli normaalilla lipeänpolton kuormalla, kun havaittiin sularänni n:o 3 lähettyviltä tulevan runsaasti sulaa. Sulan tulo oli niin runsasta, että täytyi tehdä hiekasta n. 500 mm:n korkuinen valli estämään sulan valumisen kanaaleihin. Soodakattilan alasajon jälkeen, kun sulan tulo oli loppunut, poistettiin sularänni sekä sularännin massakotelosta etulevy. Eristyksen poistamisen jälkeen saatiin lopullinen varmuus, että sula oli tullut sularännin aukon massakotelon ja pohjan tiivistävän kamparaudan välistä. Kamparauta, joka tiivistää pohjan ja massakotelon, oli hitsattu evään ilmeisesti liian heikosti kiinni.

Kamparaudan ja pohjan väli oli liian suuri sekä massa massakotelon sisällä oli irronnut pohjasta aiheuttaen raon. Soodakattilan vesipesut aiheuttavat myös sen, että massakotelon rakojen kautta vesi syövyttää ja heikentää massauksia, jos ko. rakoja on kotelossa. Sularännin massakotelon etureunan kautta poistettiin kaikki massa kotelosta, massa massakotelon sisäpuolelle asennettiin lisäkamparauta tiiviisti pohjaputkia myötäillen. Sularännin etulevy asennettiin sekä sularänni ja lopuksi massakotelo massattiin yhdellä kertaa. Sularännin massauksissa on tärkeää tehdä työvaiheet massauksien kannalta oikein sekä käyttää sellaista massaa, joka ei kutistu eli ei tee rakoja. Soodakattilalla päästiin lipeän polttoon 8.5. klo 17.00.



Kestoisuustyöryhmän lausunto

Kamparauta hitsattu liian heikosti kiinni. Konstruktiosta aiheutuva normaali häiriö.

6.2.2 Sulavuoto kattilahuoneeseen

Seisokkiaika: 21 tuntia

Vaurioitunut osa: Sularännin höyryhajoittaja ja liuottajan ympäristöä

Vaurion sattuessa ilmeni: Sulavuoto kattilan ulkopuolelle

Tapahtumat:

Kattila oli normaalissa ajossa lähes täydellä kuormalla kun 4-rännistä tuli sula yli liuottajan katolle. Siitä sula valui alas polttaen mennessään kolmen sekoittajan kaapelit ja hieman lattian kaakelointia irtosi. Syynä ylituloon oli rännin höyryhajoittajan kulumisen ylälaidasta puhki joten se roiski sulaa ylöspäin muodostaen ”kannen” rännin päälle ja rännin reikä muurautui umpeen.

Samaan aikaan sattuneen liuottajan toisenkin pintamittauksen tukkeutuminen sotki osaltaan tilannetta aiheuttaen aluksi epäilyn että liuottaja olisi tullut yli. Uimurimittausta ei liuottajassa ollut. Toinen liuottajan pinnanmittaus oli tukkeutunut jo aikaisemmin syksyllä ja toisella piti päästä joulun asti, mutta jäi hiukan auki. Siis liuottaja ei tullut yli, vaan ränni 4 vain oli tukossa. Toisenkin pinnanmittauksen vikaantuminen vain sattui samoihin aikoihin. Sulan valuminen lattialle sekoittajien kaapelit polttaen meni reittiä: kattila -> tukkeutunut ränni -> liuottajan katto -> kaapelihylly -> alakerran lattia.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

6.2.3 Sulavuoto kattilahuoneeseen

Seisokkiaika: - tuntia

Vaurioitunut osa: sularänni

Tapahtumat:

Kattila oli normaalissa ajossa 22.7 ja normaalilla polttokuormalla. Yövuoron alussa tuli hälytys valvomoon sularänni 4:n lämpötilasta ja virtauksesta. Kattilanhoitajan käydessä tarkastamassa tilanteen paikan päältä oli ränni paukkunut ja ampunut sulaa. Yövuoro tulppasi rännin ”narutulpalla”, samalla oli aloitettu kuorman pienennys. Seuraavana aamuna 23.7 yritettiin tutkia tulpattua rännin tarkemmin, mutta lipeätulien johdosta se oli vaikeaa. Tulppausta parannettiin ja lisättiin paineilma jäähdytystä tulpalle. Yövuorolla 24.7 sula alkoi vuotaa rännin alta ulos liuottajan kannelle ja siitä sitten alakerran lattialle. Kattila otettiin apupolttoaineelle ja laitettiin alasajo käyntiin.

Aamulla 24.7 päästiin korjaajien kanssa purkamaan vaurioitunutta ränniä. Kun ränni oli saatu irroitettua paikoiltaan, havaittiin sen menneen melkein poikki, siitä kohdasta ränniä mikä on kattilan sisällä. Samoin rännikotelo oli palanut alalaidastaan pahoin. Korjaustyöstä olisi tullut aika mittava, joten kun oli oltu yhteydessä laitetoimittajaan, päätettiin massata koko ränni aukko umpeen. Lokakuun alussa on kattilan suunniteltu seisokkiviikko, jolloin vaihdetaan kaikki rännit. Edellisen kerran kaikki rännit oli vaihdettu edellisen vuoden joulukuussa. Kattilalla on 4 sularänniä.



Kestoisuustyöryhmän lausunto

-

6.2.4 Sularännin jäähdytysvesivuoto

Seisokkiaika: 9 tuntia

Vaurioitunut osa: sularänni ja rännin ympäristön kaapelointia

Tapahtumat:

Kattila normaalisti lipeätulilla 21.8. Käyttömies kiinnitti kierroksellaan huomiota sularännin nro 3 räiskeisiin ja ääneen ja kutsui toisen käyttömiehen kaveriksi, jolloin alkoivat tutkimaan tilannetta kahdelleen. Kattilan lipeätulet sammutettiin ja hivenen myöhemmin myös öljytulet seis. Sulaa ja räiskeitä lensi ja paukkui, joten homma oli vaarallista. Kokeneempi käyttömies huomasi, että 3. rännin jäähdytysveden rotametrin yläpuolella oleva ilmaus oli auki. Venttiili suljettiin ja räiskäminen ja paukkaminen vähenivät niin paljon, että rännin lähelle päästiin.

Rännin kourun pohjassa n. 200 mm päässä (poistopäästä) oli halkeama ja reikä. 3. rännin aukko tukittiin betonisella tulpalla. Lipeäräiskeiden takia takaseinällä olevat 3 rännin läheisyydessä olevat primääri-ilma-aukon rassarien yms. kaapeloinnit paloivat ja kärsivät ylikuumenemisesta.

Kattila takaisin apupolttoaineelle klo 02.30 ja lipeä palamaan klo 09.00.

Sularänni oli vaihdettu toukokuun seisokissa.

Kestoisuustyöryhmän lausunto

-

6.2.5 Sularännin jäähdytysvesivuoto

Seisokkiaika: 8 tuntia

Vaurioitunut osa: sularänni

Tapahtumat:

Valvontakamerasta havaittiin Sulakouru-6:lla tavallisuudesta poikkeavaa räiskintää. Havainnon perusteella ryhdyttiin epäilemään vesivuotoa sulakourussa. Epäily sai vahvistusta siitä seikasta, että jäähdytysvesisäiliön täyttöautomaattiikka käynnistyi tiheämmin kuin normaalisti. Myös jäähdytysvesikierron sähkönsäilyky oli kohonnut. Asianmukaisesti varustautena tehdyt havainnot paikan päällä antoivat 100% varmuuden vuodosta.

Välittömät toimenpiteet

Kun vuoto oli varmistunut, ryhdyttiin välittömästi siirtymään lipeän poltosta apupolttoaineen polttoon. Kattilassa oli keskikokoinen keko. Sen poispolttaminen kesti noin 2 tuntia, jonka jälkeen sulan valuminen sulakouruissa loppui 10:30. Tällöin ryhdyttiin kuonanpoistotoimenpiteisiin.

Kouru oli kuonasta puhdas 12:00. Kun tulppaamistarve varmistui 9:30, tilattiin varastosta varakouru valumuotiksi. Rakennustekninen alihankkija valoi muotissa tulpan. Tulppa kovettui asennusvalmiiksi klo 15:00. Tulppa asetettiin paikoilleen.

Mahdollista ohivirtausta silmälläpitäen asetettiin kouruun lisäksi valkoista palovillaa. Tulppa piti siinä määrin hyvin ettei ohivirtausta ilmennyt. Jäähdytyskierto jätettiin päälle, jottei kourun kattilan sisään työntyvä osuus vaurioituisi.

Kourun lisätutkimuksissa selvisi että osa kourunlevyn kärjestä oli jäänyt päällehitsaamatta, joka on edesauttanut eroosion etenemistä kourun kärjessä. Sama asia ilmenee myös muista kouruista.

Kestoisuustyöryhmän lausunto:

Vuodot ovat rännin alapäässä, rännin ja päätylevyn yhtymäkohdassa joka oli syöpynyt. Kourun alapään olosuhteet ja riittämätön päällehitsaus ovat aiheuttaneet vuotoon asti edenneen vaurion.



6.2.6 Sulavuoto kattilahuoneeseen

Seisokkiaika: 56 tuntia

Vaurioitunut osa: sularänni

Tapahtumat:

Kattila oli normaalissa käytössä 5.7 kun huomattiin vuoto ränniveden johtokyvystä ja tulpattiin ränni, olettaen vuotokohdan rännissä sijaitsevan rännin alapäässä. Korroosiota esiintynyt aiemmin juuri tuossa kohtaa ränniä. Samanaikaisesti johtokyky sularännien jäähdytysvesikierrossa oli korkealla ja rännikohtaisessa virtausmittauksessa näkyi heiluntaa verrattuna muihin ränneihin.

Yöllä tulppa irtosi kun sula ja rännin kiertovesi poksahdelti, jonka seurauksena ajettiin kattila alas. Aamuvuorossa ke. 6.7. n. klo. 07.30 sulaa tuli vielä muutamasta rännistä, kun sularänni 2:sen kiinnityskehyksestä alkoi vuotaa sulaa liuottajan kannelle ja siitä edelleen lattialle alakertaan. Rännin päässä oli reikä, joka havaittiin kun ränni oli irroitettu. Lisätutkimuksissa selvisi että sularännikotelossa ollut liian suuri tyhjä joka edesauttanut vaurion syntymistä.



Kestoisuustyöryhmän lausunto

Rikkoutuneessa kourussa kavitaation merkkejä, jäähdytysveden lämpötila ollut 70 C, jolloin on mahdollista että vesi höyrystyy silloin tällöin.

Hapenpoistokemikaalin puuttuminen sekä sularännikotelon liian suuri tyhjä edistivät vaurion syntymistä.

6.2.7 Sularännin jättöreunassa vuoto

Seisokkiaika: 24 tuntia

Vaurioitunut osa: hajotushöyrysuuttimet ja sularänni

Tapahtumat:

Kattilan sularännien 3 ja 4 hajotushöyrysuuttimet olivat palaneet poikki. Kattilalla oli huoltoseisokki jolloin vaihdettiin uudet paksuseinämäiset putkisuuttimet, ja tarkastettiin muut että niillä päästään seisokkiin asti. Syksy seisokissa vaihdettiin sularännit ja todettiin että 2:sta rännistä jättöreuna oli puhki ja kahdesta lähes puhkeamassa.

Koskaan aikaisemmin rännit eivät ole olleet näin huonossa kunnossa vuoden käytön jälkeen. Poltto-olosuhteet ennallaan, rännimateriaalin laatu/tekotapa?



Kestoisuustyöryhmän lausunto

Hajotushöyryn puuttuminen edesauttanut sularännienpinnoitteen vaurioitumista.

Muissakin kattiloissa on vaurioraportoitu vastaavanlaisia vaurioita. Lisääntynyt sularännikoteloiden huuhtelu on mahdollisesti edesauttanut näitä vaurioita (rännin pinnassa enemmän kosteutta)

6.2.8 Sularänni jättöreuna syöpynyt

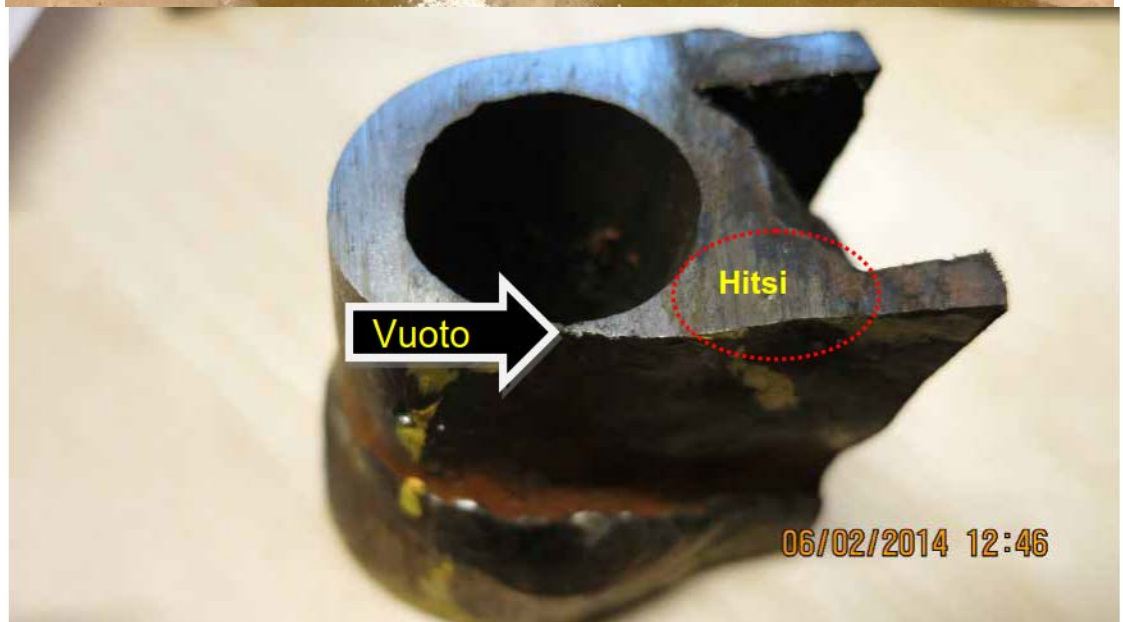
Seisokkiaika: 17 tuntia

Vaurioitunut osa: sularänni x 2

Tapahtumat:

25.01 yöllä todettiin sularännin vuotavan pesän puolella. Koeponnistuksessa todettiin kahden rännin vuotavan, 1 ja 7 ränni vaihdettiin. Ränneillä ajettu 16kk. Vuodon syy oli ulkopuolinen syöpymä mustassa materiaalissa, kuvat alla.

26.02 todettiin taas rännin vuotavan. 6 ränni vuoti ponnistuksessa. Vaihrettiin samalla kaikki loput 5 ränniä. Ajo-olosuhteissa tai rännimallissa ei muutoksia aikaisempaan. Sularännien jäähdytysveden lämpötila 52 C.



Toukokuussa liuottajan pinta laskettu 75% -> 60%, tarkoituksena varmistaa että pisaroita ei pääse imeytymään sularänneihin. Lisäksi puhdistettu hönkäputki.

Seisokissa havaittiin syöpymistä 3kk ajetuissa ränneissä, katso kuva alla -> vaihdettu sularännit joissa kokonaan pinnoitetut suuaukot.



Kestoisuustyöryhmän lausunto:

Mahdollisia syitä sularännin ulkopuolisen syöpymiseen:

1. Liuottajan höngän kondensoituminen joka voi aiheutua esim. korkeasta liuottimen pinnasta, liuottajan höngän poistokyvystä (hönkäputki tukossa), sularännin pinnan matalasta lämpötilasta tai tulipesästä lauhtuvasta höyrystä.
2. Materiaalin lämpötila noussut suunniteltua korkeammaksi esim. sisäpuolisen kerrostuman tai puutteellisen jäähdytyksen takia

6.3 Esimerkkikuvia vaurioista



Kuva 6-2. Vuoden kattilassa ollut pinnoittamaton ränni



Kuva 6-3. 1 ½ vuotta kattilassa ollut pinnoitettu ränni



Kuva 6-4. Esimerkki pintatarkastuksessa havaituista vioista.

LIITE 7

Sodahuskommittén: Löprännestudie – Rapport 2016-2

Sodahuskommittén

Sodahuskommitténs Rapport 2016-2 Anonymiserad Löprännestudie Januari 2017

Detta är en anonymiserad version av Sodahuskommitténs rapport 2016-2. Trots att den är anonymiserad så får den inte spridas vidare.

Sodahuskommitténs medlemmar har olika erfarenhet kring löprännorna i sina sodapannor. Hos de allra flesta bruk fungerar löprännorna bra eller till och med utmärkt för minst 12 månaders drift, men andra bruk känner sig tvungna att byta sina löprännor var 6:e månad. Trots ett kort bytesintervall händer det ändå att läckage uppstår.

I detta arbete har ett omfattande frågeformulär utarbetas och skickats ut till bruken. Svaren har sammanställts och viktiga slutsatser har utkristalliserats. Det visar sig att det finns många parametrar att laborera med för att förbättra prestandan på sina löprännor.

David Good, DEKRA

Innehållsförteckning

Detta är en anonymiserad version av Sodahuskommitténs rapport 2016-2. Trots att den är anonymiserad så får den inte spridas vidare.

1	Bakgrund	4
2	Studiens upplägg och genomförande	5
3	Identifierande problemrännor	6
3.1	<i>Panna D</i>	6
3.2	<i>Panna I</i>	8
3.3	<i>Panna V</i>	8
4	Resultat	9
4.1	<i>Förbränning per löpränna</i>	9
4.2	<i>Lutande eller dekanterande botten</i>	10
4.3	<i>Brännlutens temperatur och torrhalt</i>	10
4.4	<i>Läppsprutor alternativt beer-cans</i>	10
4.5	<i>Styrning av luttemperatur och torrhalt</i>	10
4.6	<i>Smältatemperaturen</i>	12
4.7	<i>Sulfiditet</i>	12
4.8	<i>Höjden på löphålen</i>	13
4.9	<i>Originalrännor (Valmet eller Andritz) eller lokalt tillverkade?</i>	13
4.10	<i>Längden på löprännorna.</i>	13
4.11	<i>U-formad löpränna alternativt mjukt "V"</i>	13
4.11.1	<i>Tillverkningsmetod för rännan</i>	14
4.11.2	<i>Detaljutförande vid smältautloppet</i>	14
4.12	<i>Konicitet och bredd på rännorna</i>	15
4.13	<i>Insticksränna eller utanpåliggande ränna?</i>	15
4.14	<i>Kolstål jämfört med vit ränna</i>	15
4.15	<i>Godstjocklek i rännan</i>	16
4.16	<i>Lutningen på löprännan</i>	16
4.17	<i>Nya eller renoverade löprännor?</i>	16
4.18	<i>Temperatur på kylvattnet</i>	17
4.19	<i>Kylvattenflöde</i>	17
4.20	<i>Kylvattenkvalitetens betydelse</i>	18
4.21	<i>Manuell eller automatisk spettnig</i>	18
4.22	<i>Val av korrosionsskyddslegering</i>	18
4.23	<i>Utbredning av påsvetsningen</i>	19
4.24	<i>Utförandet av påsvetsningen</i>	20
4.25	<i>Slipning i gränsen mellan kolstål och påsvetsning</i>	21
4.26	<i>Normalt smältaflöde respektive smältarusningar</i>	21
5	Jämförelse med BLRBAC	22
5.1	<i>BLRBAC - Materials and welding guidelines for black liquor recovery boilers</i>	23

5.2	<i>Good practice från BLRBAC – Safe firing of Black liquor in black liquor recovery boilers</i>	24
6	Övrig läsning	24
6.1	<i>Examensarbete 2001 av Per Johansson vid AssiDomän Kraftliner, Piteå</i>	24
6.2	<i>Sodahuskommitténs Rapport 2006-1 "Säkerhet vid lösarplanet"</i>	24
6.3	<i>Arbete inom Finska Sodahuskommittén</i>	24
6.4	<i>Sodahuskonferensen 1974 och 1975</i>	25
7	Slutsats	25
8	Ansvarsfriskrivning	27

Bilagor:

Bilaga 1: Frågeformulär

1 Bakgrund

Bland Sodahuskommitténs medlemmar skiljer sig livslängden på sodapannornas löprännor irriterande mycket. Några få pannor har så omfattande problem med sina löprännor så de väljer att byta löprännor var 6:e månad. Det stora flertalet medlemmar byter sina löprännor var 12:e månad och är nöjda med det. Några medlemmar tycker att deras löprännor ser närmast oskadade ut efter 18 månaders drift.

Bedömningen är att en acceptabel minsta livslängd för löprännor är 12 månader. Detta torde gå att uppnå för alla pannor eftersom de flesta redan har uppnått denna livslängd, eller längre.

Inom medlemsbruken förekommer följande huvudtyper av löprännor:

- Kolstålsrännor med påsvetsning och/eller påsprutning av korrosionsskydd
- Homogena vita löprännor
- Homogena kolstålsrännor
- Löprännor utförda i compoundplåt (en kärna i kolstål och med rostfri plåt som korrosionsskydd på utsidan)
- Panna M och Panna N använder löprännor med två separata kylsystem, Figur 1. Den största delen av rännan, från smältainloppet ned till 1-2 dm från smäلتautloppet, kyls med undertryckssystem med totalavsaltat vatten. De nedersta 1-2 dm kyls med ett övertryckssystem då det inte är någon risk att kylvattnet kommer in i eldstaden vid läckage.



Figur 1 Panna M och Panna N använder ett extra kylsystem cirka den nedersta decimetern

Om eller när den nedersta delen av löprännorna springer läck stängs noskylningen av. Därmed kan man köra pannorna vidare eftersom löprännornas undertryckssystem är intakt, Figur 2.



Figur 2 När/om det nedersta kylsystemet springer läck stänger man av kylvattenflödet till denna del låter "nästippen" brinna upp.

Syftet med detta arbete är att identifiera bättre respektive sämre utföranden av löpränneutföranden.

2 Studiens upplägg och genomförande

Arbetet har genomförts på det sättet att ett frågeformulär togs fram och skickades ut till alla Sodahuskommitténs pannägare, bilaga 1.

Panna A och Panna B är också med, men man ska vara medveten om att de använder sulfitolut. Smältatemperaturen och viskositeten på smältan har andra egenskaper än för övriga sulfatsodapannor. Trots skillnaden behandlas panna A och panna B lika som alla övriga sulfatsodapannor i denna undersökning.

Det visade sig att frågeformuläret blev ganska omfattande. I huvudsak ingick det följande kapitel i frågeformuläret

- **Pannlayout:** Till exempel förbränningskapacitet och antalet löprännor...
- **Drifts- och smältaegenskaper:** Till exempel luttorrhalt, vilken lutsprutuppsättning samt temperaturen på smältan i löprännorna....
- **Löprännedesign:** Till exempel dimensioner på löprännor, val av legering hur löprännorna ser ut efter att ha varit i drift....
- **Driftstörningar:** Till exempel om pannan är utsatt för smältarusning och om det finns något system i smältarusningarna....

Svaren har lagts in en excelfil, bilaga 2. Ur excel-filen kan information om de olika pannorna jämföras, summeras och medelvärden beräknas etc.

Även Andritz och Valmet har tillfrågats om de vill bidra med kunskap och information.

3 Identifierande problemrännor

Det visade sig att det är tre pannor som har rapporterat in problem med sina löprännor och inte kan köra 12 månader på ett tryggt sätt.

- Panna D byter sina löprännor var 6:e månad, men kan ändå drabbas av läckor på sina löprännor.
- Panna I byter löprännorna var 6:e månad för att inte riskera läckor. En viktig orsak är troligtvis att kylvattenet endast är mekaniskt renat.
- Panna V byter sina löprännor var 12:e månad, men det har ändå hänt vid flera tillfällen att löprännorna har börjat läcka redan innan de har varit i drift ett år. En parameter som sticker ut är att löprännorna är flacka. Lutningsvinkeln är uppgiven till $21,375^\circ$. Flera bruk har löprännor som lutar 30° , men inga andra rännor än Panna V lutar mindre än 30° .

3.1 Panna D

Panna D är den minsta sodapannan inom Sodahuskommittén (endast Panna E är mindre, men denna panna fungerar mer som en destruktionspanna).

Panna D använder påsvetsad kolstålsränna. Hittills har de haft två olika utförande på påsvetsningen:

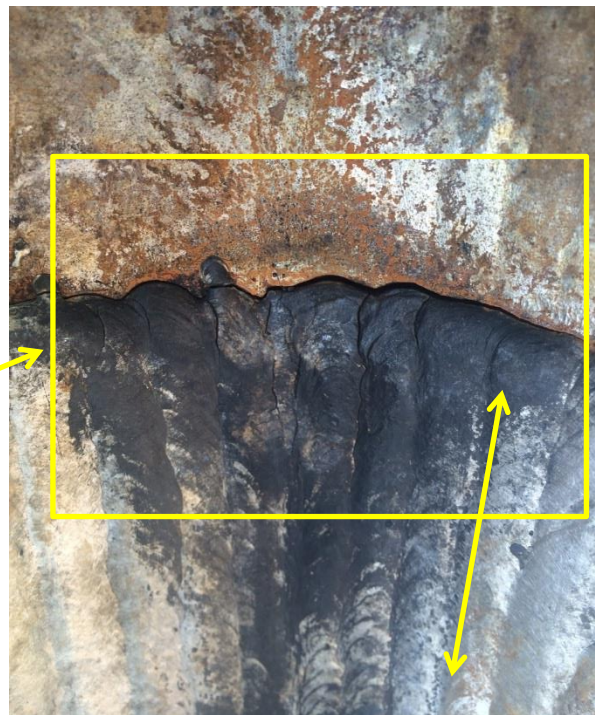
1. Ett utförande med bredare/grövre strängar av påsvetsat material, Figur 3 och Figur 4.
2. Ett utförande med smalare strängar av påsvetsat material, Figur 5.

Det är osäkert om det är samma påsvetslegering i de båda utförandena.

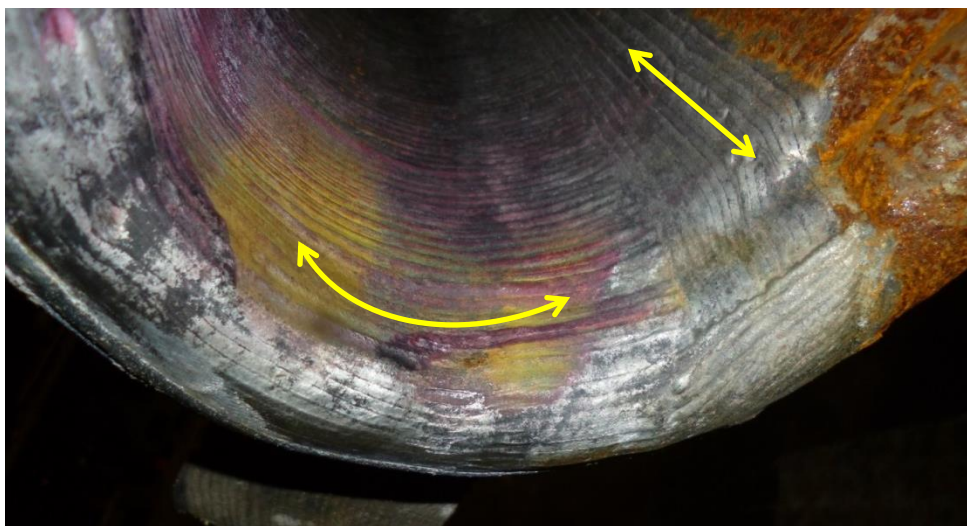
Läckage har inträffat vid avslut på påsvetsningar. Om dessa svetsavslut slipas till bör risken för läckage minska.



Figur 3 Ena varianten av Löprännorna från Panna D ...



Figur 4... hade grövre strängar av påsvetsning längs med rännan

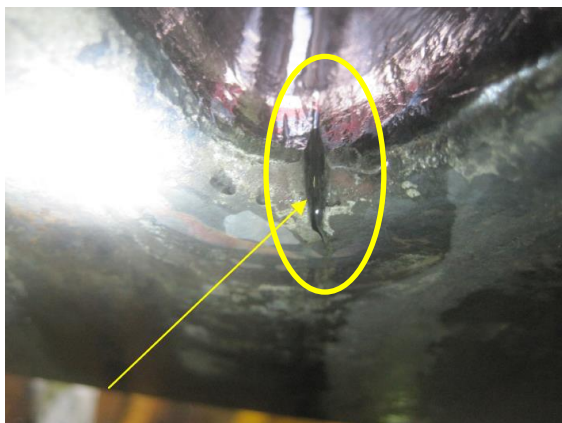


Figur 5 Den andra varianten av löprännor som Panna D använde sig av har smalare strängar av påsvetsningen samt att i botten på rännan var strängarna lagda tvärs rännan

Panna D byter sina löprännor var 6:e månad.

3.2 Panna I

Löprännorna i denna panna byts så ofta som var 6:e månad. Dessa rännor slits mest genom att sprickor uppstår längst ner i insticksdelen, Figur 6. Denna panna använder endast mekaniskt renat kylvatten i löprännorna vilket medför att smuts ansamlas på vattensidan, Figur 7. Dessa beläggningar minskar värmeöverföringen väsentligt och höjer därmed temperaturen på rännalens plåt i löprännorna.



Figur 6 Spricka i rännalens längst ner emot pannan i insticksdelen



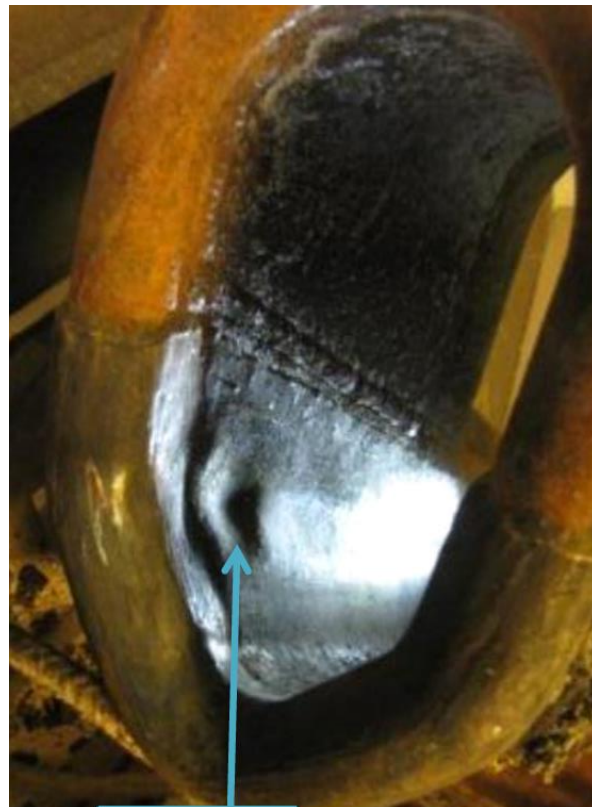
Figur 7 Beläggningar inuti löpränna efter drift på Panna I som har mekaniskt renat kylvatten.

3.3 Panna V

I löprännorna på Panna V har en ovanlig form av skada uppstått. Det har uppstått hål alternativt godsavgång på sidorna i löprännorna, Figur 8 och Figur 9. Löprännorna är tillverkade av kompositplåt i rännalens, mellan omkring klockan 3 till klockan 9.



Figur 8 Hål i en ränna cirka 1 dm in, räknat från smältainloppet



Figur 9 Grop i ränna, dock ej hål

4 Resultat

4.1 Förbränning per löpräanna

Pannans totala förbränning dividerad med antalet löprännen i drift varierar stort. Enligt enkätsvaren så har den genomsnittliga löprännen en belastning om 461 tts/dygn.

Lägst belastning per löpräanna ligger Panna D (165 tts/dygn och löpräanna) samt Panna A och Panna B (cirka 215 tts/dygn och löpräanna). Panna Q är en annan ytterlighet som ligger på 700 tts/dygn och löpräanna.

Panna D är en av de pannor som har problem med sina löprännen samtidigt som Panna Q är nöjda med livslängden på sina löprännen.

De tre problempannorna har löprännen med följande specifika belastning:

Panna D: 165 tts/dygn

Panna I: 660 tts/dygn

Panna V: 411 tts/dygn

Konklusionen är att en hög belastning per löpräanna INTE per automatisk leder till större problem.

Det finns snarare möjlighet att prova att inte använda alla löprännorna om en panna har lågt belastade löprännor.

4.2 Lutande eller dekanterande botten

Av de anläggningar som svarat anger 10 stycken att de har lutande botten och 12 stycken att de har dekanterande botten.

De sodapannor som tillkommit sedan år 2000 har alla haft dekanterande bottenar.

Utförandet av botten bedöms inte vara avgörandeför löprännornas livslängd.

4.3 Brännlutens temperatur och torrhalt

Temperaturen på brännluten varierar mellan Panna D 113-115°C upp till Panna S 140°C. När Panna Q bränner barrlut är temperaturen 140°C, vid lövlut minskas temperaturen till 132°C.

Torrhalten på brännluten varierar mellan 68% upp till 80%.

Värdet av att räkna ut medelvärdet för temperaturen och torrhalten är tveksamt, men det är snabbt gjort

- Ett medelvärde för (barr-)luttemperaturen är 129,7°C. (Panna Q anger olika luttemperaturer för barrlut (140°C) respektive lövlut (132°C))
- Medelvärde för (barr-)luttorrhalten är 73,0% (Panna Q anger olika torrhalter för förbränningen vid barrlut (77-78%) och lövlut (80%)).

Panna D ligger på 68% luttorrhalt och Panna U ligger på 69,8% luttorrhalt vilket är en bit under medel. Däremot ligger luttorrhalten i Panna I på 76,5%, vilket är över medelvärdet.

Med andra ord kan inte lutens temperatur och torrhalt allena vara orsaken till problem med löprännorna.

4.4 Läppsprutor alternativt beer-cans

I enkätsvaren använder 16 st pannor sig av enbart läppsprutor. Fem pannor använder sig av enbart beer-cans. Två pannor använder sig samtidigt av både läppsprutor och beercans

En panna använder läppsprutor som de vänt upp och ned, dvs läppen sitter ovanför strålen med brännlut.

4.5 Styrning av luttemperatur och torrhalt

I delen som handlar om förbränningsteknik i utbildningsmaterialet för certifieringsutbildningen finns en "förbränningskurva" som ska underlätta att hitta förbränningsparametrar som ska leda till stabil lutförbränning och därmed stabilt smältaflöde, Figur 10. Till grund för förbränningskurvan är uppgifter från sex svenska bruk som upplever att de har stabil förbränning. I kurvan visas både brännlutstemperaturen och luttorrhalten.

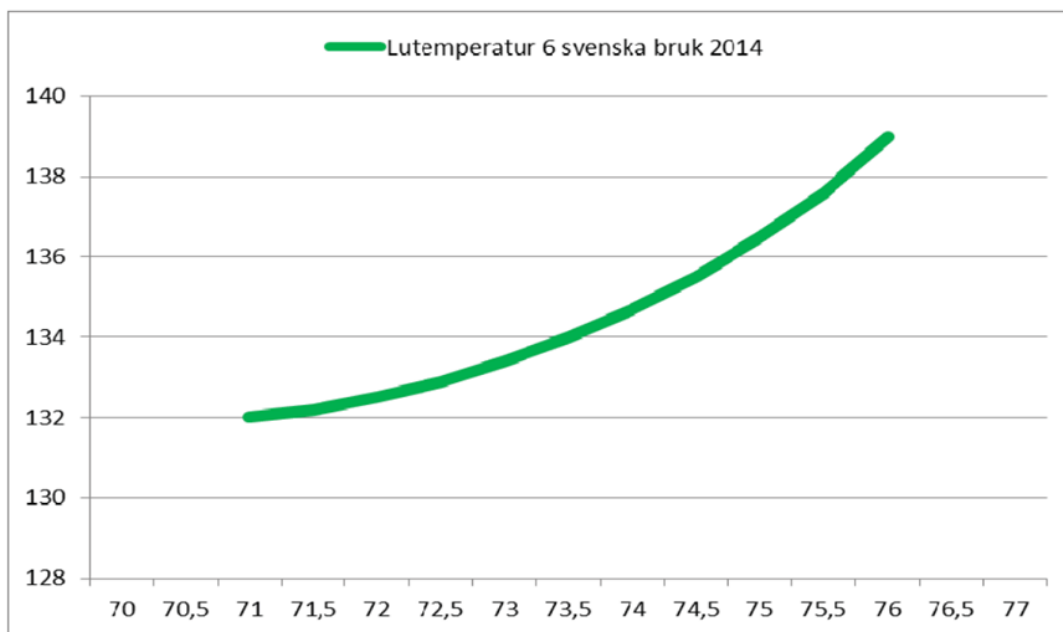


Bild 54: Luttemperatur vid olika torrhalter baserat på uppgifter från 6 svenska bruk 2014.

Figur 10 Förbränningskurva: Utdrag från kursen i förbränningsteknik

I Figur 11 visas hur ett av de sex bruken styr brännlutstemperaturen efter torrhalten.

Luttemperaturstyrning

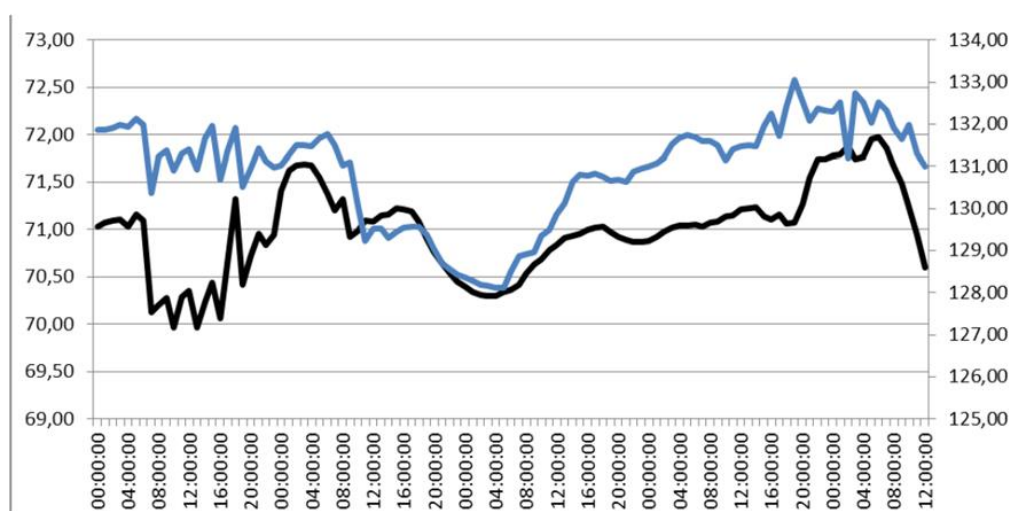


Bild 53: Panna med luttemperaturstyrning efter torrhalt. Svart=torrhalt, Blå=luttemperatur.

Figur 11 Temperaturstyrning efter torrhalten: Utdrag från kursen i förbränningsteknik

I enkätsvaren framkommer det att det är nio pannor som ligger på eller "nära" förbränningskurvan. Bedömningen av "nära" i denna rapport innebär att brukets luttemperatur skiljer mindre än 3°C från förbränningskurvan. Dessa 3°C kan vara alltför generöst (eller för snävt).

Nio pannor anger att de kör efter en egen formel som dock ligger utanför förbränningskurvan.

Fem pannor körs manuellt av skiftlagen mot t.ex. bäddstorlek och efter egen erfarenhet.

Panna I är en av pannorna som anses ligga inom förbränningskurvan.

Förbränningsparametrarna för Panna D och Panna V ligger alltför lågt i brännlutstemperatur för att komma upp till förbränningskurvan.

Konklusionen är att bara genom att följa förbränningskurvan garanteras inte att löprännorna håller länge.

4.6 Smälttemperaturen

Mätning av smälttemperaturen sker endast vid ett fåtal pannor. Smälttemperaturen verkar ligga mellan 800-900°C och mer specifikt mellan 860 till 870°C.

T.ex. Panna S mäter temperaturen på sin smälta i löprännorna. Något förvånande är att Bruk S har konstaterat att en mörk smälta innebär att smältan har HÖGRE temperatur, uppåt 950°C. Det som skulle vara mest logiskt är att en ökande temperatur innebär ljusare smälta, men så är det alltså inte.

Bruk S erfarenhet är att en smälttemperatur på 825°C medför en lugn smältaavrinning.

Att börja mäta smälttemperaturen i löprännorna är ytterligare ett sätt att få information om hur pannans körsätt påverkar smältaavgången.

Olika metoder för uppmätning av smälttemperaturen skulle kanske kunna utredas åt Sodahuskommitténs medlemmar? Genomförs uppmätning av smälttemperaturen bäst med strålningspyrometer alternativt med instickstermoelement eller med annan metod eller spelar det ingen roll?

4.7 Sulfiditet

De svar som bruken ger är att sulfiditeten varierar mellan som lägst 30% upp till 43%. Den genomsnittliga sulfiditeten för smältan är 36,3%. Bruken svarar ofta att sulfiditeten ligger inom ett intervall. För t.ex. Panna C mellan 36-39%. För att räkna ut medelvärdena användes mittenvärdet i spannet, dvs. i Panna C:s fall användes 37,5%.

Denna rapport tar inte ställning till sulfiditetens påverkan på livslängden på löprännorna.

4.8 Höjden på löphålen

Höjden för gipen på löphålen varierar stort inom pannbeståndet. Panna D och Panna X har båda lutande botten. Löphålets gip sitter cirka 5 cm från pannbottens gip.

Panna I och Panna Y har lutande botten, men ”högt” placerat löphål, cirka 4 dm ovanför gjutningen.

Panna H har dekanterande botten. Löphålets gip sitter cirka 4 dm ovanför gjutningen. Annars är den vanligaste höjden cirka 2-3 dm ovanför bottertuberna för dekanterande botten.

Panna B (dekanterande botten) hade stora problem med smältarusningar. Efter att de höjt löphålen med cirka 1,5 dm upplever de att smältarusningarna har minskat, dock ej upphört.

Det spelar uppenbarligen roll på vilken höjd löprännorna sitter, men höjden kan inte vara helt avgörande för hur löprännorna presterar.

4.9 Originalrännor (Valmet eller Andritz) eller lokalt tillverkade?

Endast Bruk P anger att de köper löprännor från en lokal tillverkare. Bruk P rapporterar att de är nöjda med prestandan för sina löprännor.

4.10 Längden på löprännorna.

Längderna på löprännorna varierar mellan 48,5-165 cm med ett medelvärde på 108 cm för de bruk som har svarat.

De allra flesta problem med löprännorna sker vid smältainloppet eller vid smältautloppet. Alla löprännor har dessa. Det är i och för sig få problem med läckor i rännan, men ändå, om man har möjlighet att påverka längden bör man välja kortare rännor eftersom en kortare ränna har ”kortare risk” för läckage än längre löprännor.

4.11 U-formad löpränna alternativt mjukt ”V”

Det kan vara en fördel med U-form på rännorna. Även om man har en mjuk V-form så kan det uppstå sprickor i något av de tre ”hörnen” som skapar den mjuka V-formen.

I undersökningen angavs av 12 pannor använder U-formad profil och 11 pannor att de har en ”mjuk V-form”

Med andra ord klarar sig nästan alla som använder mjuk V-form, trots att utförandet borde innebära en något högre risk för sprickor.

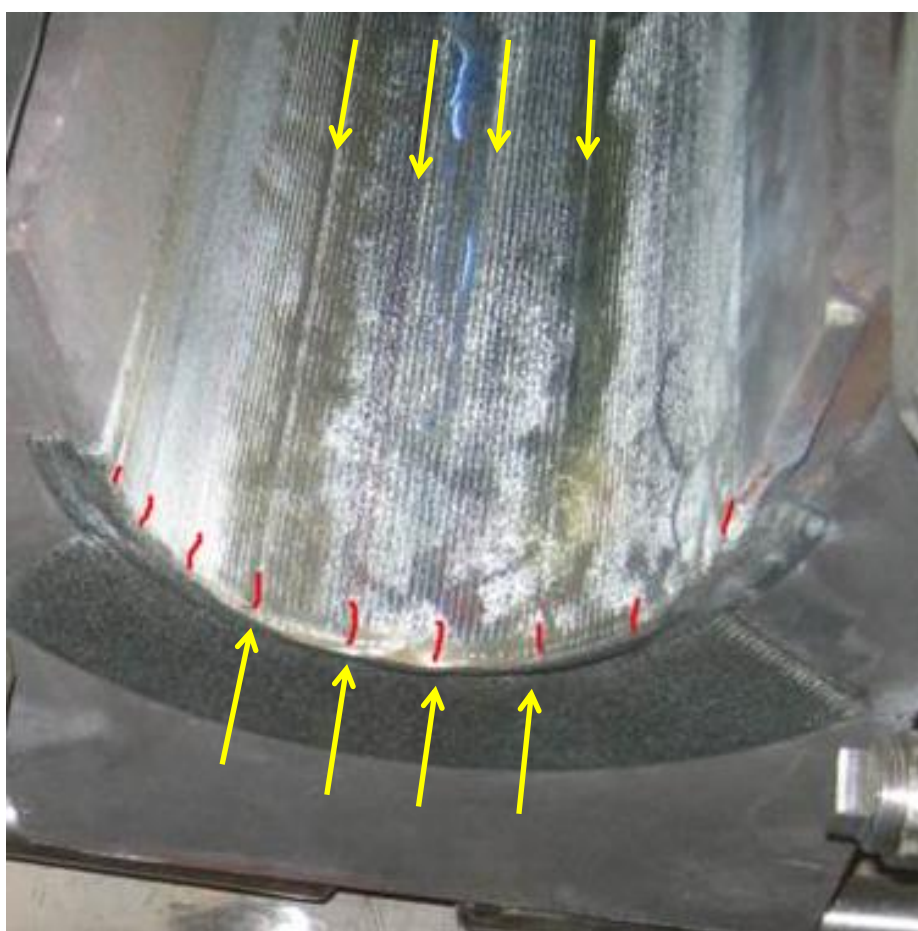
Desto större radie på U-formen desto mindre blir spänningarna. Längs löprännornas längsaxel minskar alltså spänningarna i omkretsled med ökande radie. (Tjockare godstjocklek på plåten i rännan ökar också spänningarna).

Panna I har haft problem med sprickbildning längst ner i insticksdelen. Löprännorna är också ”V-formade”.

Panna M och Panna N har U-formade löprännor i homogen rostfri legering. I dessa löprännor uppträder spricktillväxt i insticksdelen, dvs. där smältan först kommer in i rännan. Sprickorna uppträder längst ner i insticksdelen. I normalfallet uppstår dock inte läckage innan det har gått 12 månader och det är dags för byte.

4.11.1 Tillverkningsmetod för ränn dalen

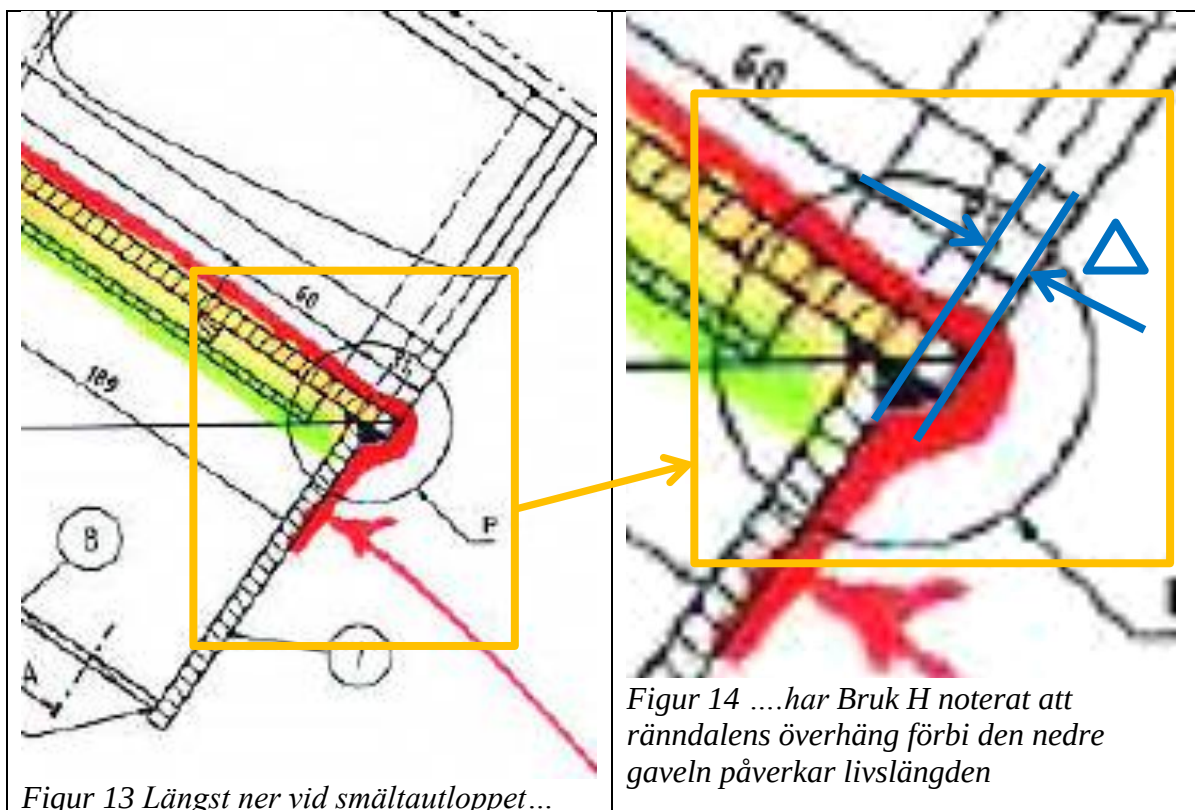
Panna H använder U-formade löprännor. Nu för tiden tillverkas U-formen genom att plåten rullas. Dessa löprännor fungerar bra. Tidigare tillverkades U-formen med hjälp av bockning, men då uppstod sprickor i vecken efter bockningen, Figur 12.



Figur 12 De röda strecken visar var sprickor återfanns efter drift. De gula pilarna visar märken efter bockningen vid rännans tillverkning

4.11.2 Detaljutförande vid smäلتautloppet

Panna H har också noterat att ränn dalens överhäng nedanför löprännans gavel påverkar livslängden på löprännan, Figur 13 och Figur 14. Om överhängen blir för långt försämras kylningen och det uppstår skador.



Bilderna ovan visar det befintliga överhänget. Tidigare var överhänget större och därmed kylningen sämre vilket resulterade i sprickor/korrosion.

4.12 Konicitet och bredd på rännorna

Bruk A anger att de behöver ha lite koniska löprännor för att få en bättre smältaavrinning. Med konisk menas att lite löprännorna är som bredast nere vid smältautloppet.

Även Panna J upplever att de fått en bättre smältaavgång efter att de hade installerat en bredare löppöppning och även bredare löprännor.

Det finns uppgifter från 1966 om att konicitet minskar slitaget på löprännorna, se kapitel 6.4.

4.13 Insticksränna eller utanpåliggande ränna?

Det är 13 pannor som använder insticksrännor. Det är 10 pannor som använder sig av utanpåliggande rännor.

Av de pannor som tillkommit under 2000-talet har 4 av 5 insticksrännor. Om trenden håller i sig kommer insticksrännor bli helt dominerande.

4.14 Kolstål jämfört med vit ränna

De flesta pannor har en kolstålsränna som på ett eller annat sätt har korrosionsskydd i form av påsvetsning eller compoundplåt. Kolstålsrännor är inte lika känsliga för sprickbildning som homogena vita rännor. Homogent vita rännor används på 6 pannor och för dessa sex

pannor verkar prestandan vara tillfredställande.

Kolstål har högre termisk ledningsförmåga än rostfria legeringar. För att minska temperaturspänningarna på plåten i rännan är hög termisk ledningsförmåga positivt, se vidare kapitel 6.4.

4.15 Godstjocklek i rännan

Alla bruk vet inte godstjockleken på sina rännor.

Den tunnaste rännan rapporteras från Panna K med 5,6 mm + påsvetsning om 2,5-3,0 mm vilket ger sammantaget 8 - 9 mm. Den vanligaste uppgivna tjockleken är 8 mm (Minst sju stycken pannor). Den tjockaste angivna är Panna D med 12 mm godstjocklek.

Medelvärde för löprännornas tjocklek är 8,2 mm

Tjockare godstjocklek medför större temperaturspänningar och därmed större risk för sprickor. Om man har en stor godstjocklek (10 mm eller mer) och upplever sprickbildning i sina löprännor kan alltså en tunnare godstjocklek vara att föredra. En ansats för tjockleken kan vara 8 mm (kolstålsdel utan påsvetsning).

Panna C använder utanpåliggande löprännor. Tidigare har de haft problem med sprickor, bland annat i plåten som ligger emot pannan. Efter att de har reducerat godstjockleken på plåten har sprickorna reducerats och de uppges nu fungera bra.

4.16 Lutningen på löprännan

De bruk som svarat anger att deras löprännor lutar 30-40°.

Den enda panna som går utanför detta är Panna V vars löprännor lutar 21,3°. Eftersom Pannan V är en problemränna kan det vara relevant att pröva en större lutning. Innan Pannan V prövar att förändra lutningen på rännan kan de pröva att installera en konisk ränna. Att installera en konisk ränna bedöms vara enklare/billigare än installera att rännor med förändrad lutning.

4.17 Nya eller renoverade löprännor?

Enkätvaren visar att endast Panna I och Panna J renoverar löprännor och återmonterar dem för normal drift. Löprännorna renoveras dock till nyskick innan återmonteringen.

Panna T har sex löphål. Två är pluggade varpå man alltså använder fyra löprännor i normal drift. Till de två löphål som är pluggade sätter Bruk T in renoverade löprännor. Det finns inga rapporter från Panna T att detta skulle ha orsakat dem några problem.

Bedömningen är att en renoverad löpränna kan se ut ”som ny”, men risken är att en renoverad löpränna innehåller fler svetsar än en helt ny löpränna. Det är betydligt vanligare att sprickor uppträder i och omkring svetsar jämfört med opåverkad plåt. Det är därför viktigt att den firma ska genomföra en renovering får information om att svetsar ska i möjligaste mån undvikas där smälta kommer i kontakt med rännan.

Givetvis är påsvetsning av korrosionsskydd undantaget.

4.18 Temperatur på kylvattnet

Inom Sodahuskommitténs rekommendation B1 anges en lägsta in-temperaturen för kylvattnet till 55-60°C. Den högsta uttemperaturen i samma rekommendation anges till 75-85°C.

Genomsnittet för inkommande kylvattentemperaturen var 57,0°C. I löprännan uppger de flesta bruk en temperaturstegring på 3-5°C på kylvattnet.

Kylvattnets temperatur in till löprännorna ska vara ”lagom” varmt. Ett kallare kylvatten medför risk för kondensation och därmed korrosion på kolstålsdetaljer. Ett kallare kylvatten innebär ökade temperaturgradienter i plåten. Kondensation innebär också att smälta sprätter då den kommer i kontakt med vattendropparna.

Ett alltför varmt kylvatten har lägre säkerhetsmarginal till kokning. Om vattnet börjar koka tappar vattnet sin kylfunktion. Eftersom de allra flesta pannor har undertryckssystem på sina löprännor ligger koktemperaturen under 100°C. En tabell över vattnets kokpunkt vid olika (under)tryck visas enligt:

Absoluttryck		Temperatur
bar	kPa	°C
0,3	30	69,1
0,4	40	75,9
0,5	50	81,3
0,6	60	86,0
0,7	70	90,0
0,8	80	93,5
0,9	90	96,7
1,0	100	99,6

Det verkar som om kylvattnets in-temperatur in till rännan inte är avgörande. Till exempel anger Bruk A att de har en ingående kylvattentemperatur om 10-20°C beroende på årstid. Bruk A använder homogent rostfria löprännor som trots den låga temperaturen håller ett år utan att spricka. Eftersom Bruk A använder rostfria löprännor drabbas de inte av korrosion orsakad av kondensation.

4.19 Kylvattenflöde

De bruk som mäter vattenflödet uppger ett kylvattenflöde om 0,8-2,83 l/s och ränna. Medelvärde är 2,08 l/s och ränna.

I Sodahuskommitténs rekommendationer anges att tillverkarens rekommendationer av kylvattenflödet ska följas. Andritz har för en sodapanna angett ett minflöde om 1,0 l/s, men ett börvärde om minst 1,5 l/s och ränna.

Ett exempel på ”lågt” kylvattenflöde är Panna Z med 1,33 l/s. Panna Z uppger att de är

nöjda med prestandan för sina löprännor, men de har automatisk löprännespettning som går kontinuerligt vilken torde vara gynnsamt för att hålla löprännornas driftsförhållanden konstanta.

Panna D anger att kylvattenflödet är 0,8 l/s och ränna. Ett sätt att närma sig övriga pannors driftsförhållanden är att öka kylvattenflödet.

4.20 Kylvattenkvalitetens betydelse

I Sodahuskommitténs rekommendation B1 anges att kylvattnet bör vara avhärdat, totalavsaltat alternativt ångkondensat.

De allra flesta pannor, 18 stycken, använder totalavsaltat/dejonat kylvatten i löprännorna. Två pannor använder avhärdat vatten. Panna A och Panna B använder kylvatten med råvattenkvalitet. Pannan I och Panna T har mekaniskt renat vatten. Panna I rapporterar också om omfattande beläggningar i löprännorna som försämrar kyleffekten.

De tre bruken som har mer problem med sina löprännor än övriga har vattenkvaliteter enligt:

Panna D använder sig av avhärdat vatten

Panna I mekaniskt renat

Panna V använder totalavsaltat vatten

Att använda totalavsaltat kylvatten i löprännorna är således ingen garanti för att undvika problem med löprännorna.

4.21 Manuell eller automatisk spettning

En fungerande automatisk spettning medför att löprännorna hålls rena och därmed har konstanta driftsförhållanden. Konstanta driftsförhållanden är gynnsamt för löprännornas livslängd.

Cirka sju pannor använder sig av automatisk spettning jämfört med 16 som i huvudsak använder manuell spettning. Något bruk har tröttnat på sin utrustning för automatisk spettning då den inte har fungerat tillfredställande. Om den inte fungerar behöver man spetta manuellt. Den manuella spettningen kan bli svårare att genomföra om spettrboten försvårar åtkomsten.

Det manuella spettningsintervallet varierar mellan pannorna. Den mest arbetsintensiva pannan är Panna D. Pannan har endast manuell spettning som genomförs upp till tre gånger per timme. De flesta bruk som har manuell spettning uppger att det genomförs varje eller varannan timme.

Panna X är den panna som har mest glest mellan spettningarna med endast ett par gånger per skift.

4.22 Val av korrosionsskyddslegering

Många/alla kolstålsrännor har påsvetsning nere vid smältautloppet. Några material som anges är Alloy 625, Celsit 706, Castolin 6804 XHD och Stellite 6. Det verkar som om

samtliga verkar fungera tillfredställande för 12 månaders drift.

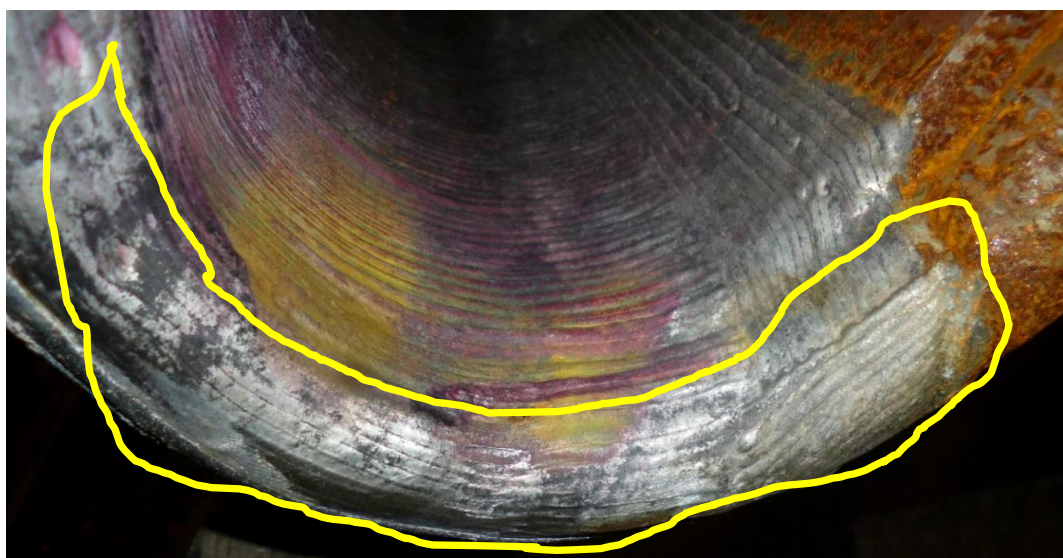
Panna V använder compoundplåt istället för påsvetsning. Den yttre komponenten är Sanicro 38/Incoloy 135. De skador Panna V har haft på sina löprännor i ränn dalen skulle kunna vara ett resultat av att de använder compoundplåt.

4.23 Utbredning av påsvetsningen

De flesta bruk som använder sig av påsvetsning i löprännorna väljer att påsvetsa de nedersta 1-3 dm, men vissa löprännor har hela ränn dalen påsvetsad (eller påsprutad), eller åtminstone så långt upp man kan komma åt att påsvetsa.

Påsvetsningen kan läggas mellan kl. 3 till kl. 9.

Det är oftast viktigt att även den nedre gaveln behandlas, Figur 15.



Figur 15 Även den nedre gaveln (smältautloppet) är påsvetsad med korrosionsskyddslegering

Panna D har även varit tvungen att skydda undersidan vid smältautloppet, Figur 16. Det beror på hur mycket löprännan lutar. Om lutningen är brant/stor är risken mindre att smältan hänger kvar.

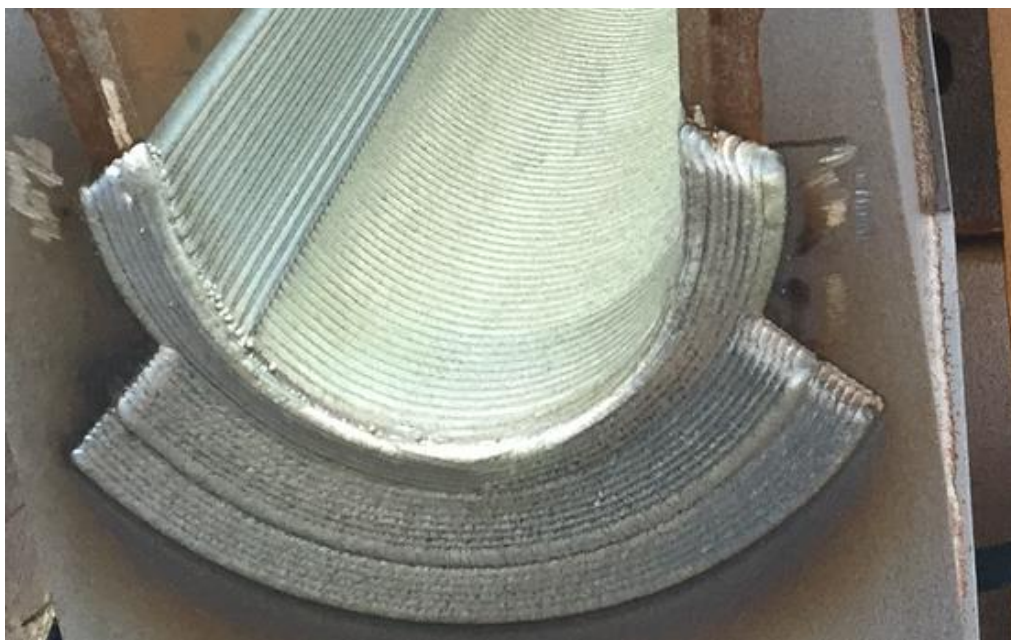


Figur 16 Detta fotografi är taget underifrån löprännan vid smältautloppet för att visa att den är korrosionsskyddad även cirka 5 cm på underkanten eftersom smältan inte släppte

4.24 Utförandet av påsvetsningen

Det är troligt att även utförandet av påsvetsningen påverkar slutresultatet.

En smalare svetselktrod leder till att grundmaterialet inte påverkas i så stor grad, Figur 17.

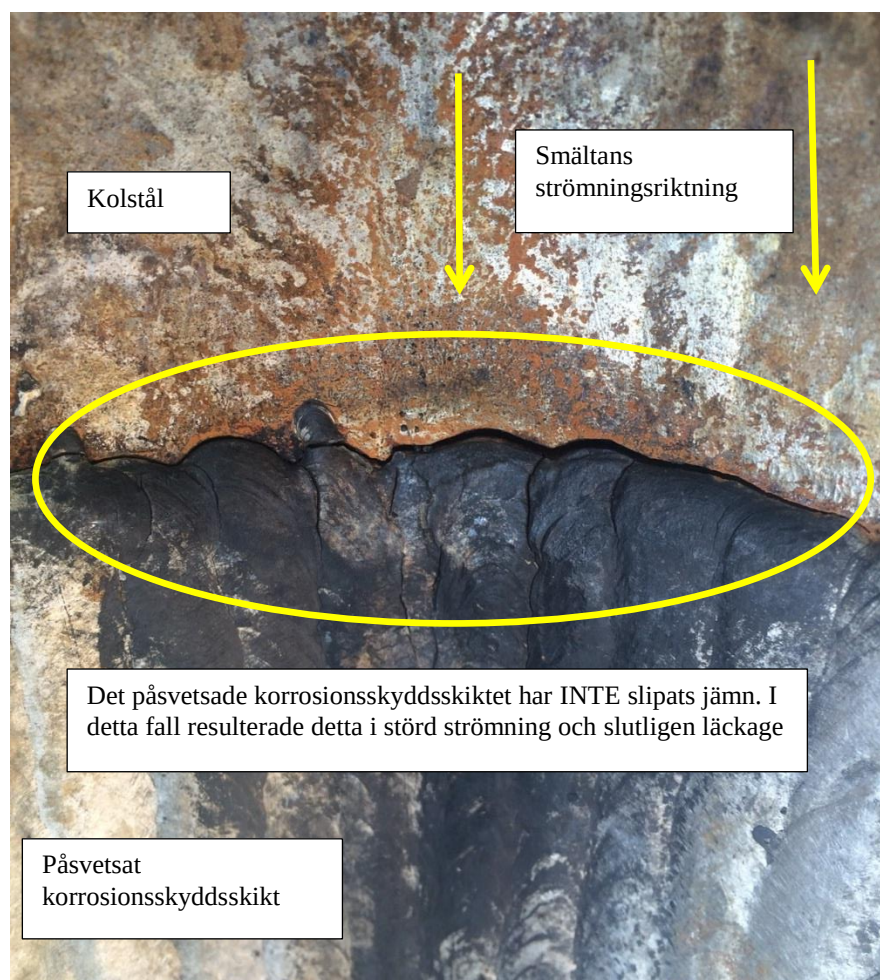


Figur 17 Vid påsvetsningen gäller att desto smalare/tunnare strängar desto bättre.

Påsvetsningens funktion är att skydda underliggande kolstål, utan att förändra kolstålets struktur och egenskaper.

4.25 Slipning i gränsen mellan kolstål och påsvetsning

Om man har en kolstålsränna och genomför påsvetsning ner mot smältautloppet är det närmast ett krav att övergången mellan det påsvetsade materialet och kolstålrännan slipas jämn. Figur 18. Om inte detta genomförs finns en onödigt hög risk för korrosion/erosion då smältans strömning i rännan påverkas.



Figur 18 I denna bild har gränsen mellan kolstål och påsvetsningen INTE slipats jämn

Skarpa kanter på påsvetsningen och därtill skillnader i godstjocklek ökar också spänningarna i området.

4.26 Normalt smältaflöde respektive smältarusningar

Sprickor i löprännor orsakas till största delen av termiska spänningar. Detta medför att en löpränna håller bäst när den arbetar under stabila förhållanden, utan smältarusningar. I enkäten till bruken ingick frågor på hur ofta och hur kraftiga eventuella smältarusningar är. Brukens svar på dessa frågor kan vara mer individuellt besvarade än många andra frågor i

enkäten.

När det gäller att värdera brukens svar på intensitet och periodisitet på smältarusningar har följande poängsystem använts:

Om ett bruk svarar att de har problem varje vecka med smältarusningar får bruket poängen "1" på smältarusningar.

Problem varje månad ger poängen "0,5".

Om bruken svarar att smältarusningar kan förekomma någon gång per år ger det poängen "0,1".

Summan för varje panna är 1. Det innebär att om ojämnt smältaflöde är "0,2" så är jämnt smältaflöde följaktligen "0,8".

Summan för "ojämnt smältaflöde" av bruken som svarat är 9,8.

Summan för "jämnt smältaflöde" av de bruk som svarat är 14,2.

Bedömningen är alltså att fler bruk har jämnt smältaflöde än ojämnt smältaflöde.

Två av de tre problempannorna (Panna D samt Panna V) får smältarusningspoängen "1".

Detta indikerar att förekomsten av smältarusningar är en viktig parameter för löprännors livslängd.

Kraftig smältarusning kan innebära att kylvattnet i löprännan börjar koka. Om det uppstår kokning i löprännan innebär det en väsentlig försämring av kylningen av rännan.

Temperaturen i plåten i rännan kommer att öka markant och närma sig smältans temperatur. Om/när smältan slutar att rusa kommer kylningen börja fungera som avsett igen varpå temperaturen på plåten i rännan momentant kan sjunka flera hundra grader. Sådana här temperatursvängningar leder högst troligen till sprickbildning.

Vissa bruk anger att det förekommer mer smältarusningar i vissa löprännor än andra. Vissa bruk anger att de kan se på löprännornas förslitning efter en driftsäsong om de har suttit i en position som är mer utsatt för smältarusningar. Å andra sidan kan andra bruk inte se någon skillnad på löprännorna efter drift vilken/vilka löpränna som har suttit inne i en mer utsatt position.

5 Jämförelse med BLRBAC

BLRBAC (Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee) har rekommendationer för både utförande av löprännor och även för löprännekylningen. Deras hemsida är: www.blrbac.org. Deras rekommendationer är öppna/gratis.

Sodahuskommitténs löpränneundersökning överensstämmer i stort med de slutsatser som BLRBAC har kommit fram till. BLRBAC anger att den inkommande temperaturen på kylvattnet ska ligga mellan 60°-65,5°C. Sodahuskommitténs rekommendationen B1 anges istället en inkommande kylvattentemperatur på 55°-60°C.

Både Panna A, Panna B och Panna K ligger ännu lägre och båda uppges fungera tillfredsställande

- Panna K anger en inkommande vattentemperatur på 45°C och de kör sina löprännor i 18 månader. Under de fyra år pannan har varit i drift har inga läckor skett.

- Panna A och Panna B klarar 12 månaders drift i sina rostfria löprännor med en inkommande temperatur på 10-20°C.

5.1 BLRBAC - Materials and welding guidelines for black liquor recovery boilers

I BLRBAC:s dokument "Materials and welding guidelines for black liquor recovery boilers" daterat april 2013 finns några tips för att undvika läckor på löprännor.

I kapitel "3.2.3 Causes of Corrosion" hävdas för smältautloppet i kolstålsrännor bland annat:

- Den ingående kylvattentemperaturen ska inte vara för låg på grund av risk för kondensation och därmed korrosion (Gäller endast kolstålsrännor)
- Hög(re) vätskenivå i smältalösartanken innebär en risk
- Imångventilationen ska vara tillräckligt hög för att reducera risken
- Smältasplitringen ska vara rätt inställd för att reducera risken för skador

När det gäller materilaval för påsvetsning av kolstålsrännor i ränn dalen gäller:

"3.2.4 Materials Solution – Weld Metal Overlay

The following materials applied in the form of weld overlay were reported to be successful in resisting corrosion and provide a minimum service life of twelve months.

- Austenitic Alloy Steel (18% Cr)
- Austenitic Alloy Steel (25% Cr)
- Inconel 625 (8 % Mo)
- Inconel 622 (12 % Mo)
- Hastelloy C276
- Alloy 72 (40 % Cr)

Weld overlay should be done from 3:00 to 9:00 positions on the spout to cover the tide line; overlay can be done over one foot at the discharge tip of the spout, and should cover the end plate, and wrap around to cover the bottom one inch of the outer trough. The transition inside the trough should be ground to provide a smooth transition of the different materials, or it can be applied the entire length of the spout trough.

The following material(s) applied in the form of weld overlay were reported to perform satisfactorily in some cases but not in others:

- Hastelloy C

The following material(s) applied in the form of weld overlay were reported to perform poorly:

- Inconel 600

Erosion at the transition from an eddy effect can cause early failure if a smooth transition is not prepared."

5.2 Good practice från BLRBAC – Safe firing of Black liquor in black liquor recovery boilers

I kapitel 9 i BLRBAC:s Recommended good practice ”Safe firing of Black liquor in black liquor recovery boiler” daterat april 2015 anges bland annat:

- Kvaliteten på kylvattnet i löprännor måste vara demineraliserat, ångkondensat eller motsvarande.
- Temperaturen på ingående kylvattnet till löprännor bör vara 60-65,5°C
- Maximala utloppstemperaturen bör vara 82°C
- Det bör finnas temperaturlarm om utgående kylvattentemperaturen blir för hög. (Omkring 85-93°C)
- Det ska finnas flödesmätare på rännorna för att upptäcka om kylvattenflödet blir för lågt.

6 Övrig läsning

6.1 Examensarbete 2001 av Per Johansson vid AssiDomän Kraftliner, Piteå

År 2001 genomförde Per Johansson ett examensarbete vid AssiDomän Kraftliner vid Piteå i Luleå Tekniska Universitet.

Detta examensarbete fokuserade på AssiDomän Kraftliner Piteås specifika löprännor. Löprännorna är korta instickrännor av Tampella modell. Det ingick beräkningar av kylvattenflödet. Detta är alltså till största delen en specifik studie, men den inkluderar även telefonintervjuer om löprännor från andra bruk.

Examensarbetet återfinns på Sodahuskommitténs hemsida: Rapporter/Övriga Dokument.

Vid en jämförelse mellan undersökningen 2016 och 2001 kan en tydlig trend bort från homogena rostfria löprännor konstateras. År 2001 hade 18 av 25 pannor löprännor i homogen rostfri legering vilket innebär 72% av antalet pannor. Vid undersökningen 2016 anges att endast sex av pannorna använder löprännor i homogen rostfri legering, vilket motsvarar kring 25%.

6.2 Sodahuskommitténs Rapport 2006-1 ”Säkerhet vid lösarplanet”

År 2006 slutförde Sodahuskommittén en studie ”Säkerhet vid lösarplanet”,

Detta arbete fokuserade mycket på smällar i löprännor och lösartankar. Endast ringa arbete ägnades åt skador respektive livslängd på löprännor.

Rapporten återfinns på Sodahuskommitténs hemsida, Rapport 2006-1.

6.3 Arbete inom Finska Sodahuskommittén

Finska Sodahuskommittén håller på med en studie av problemen med läckande löprännor. Hittills har de inte hunnit få fram så många slutsatser, men några slutsatser är:

- De största problemen var erosion vid smältautloppet.
- Ett bruk som hade haft problem med läckor i löprännan sänkte vätskenivån i lösartanken. Efter sänkningen har inga läckor rapporterats

- Ett bruk hade för stort undertryck på kylvattnet i löprännan vilket troligen medfört att vattnet kokat varpå kylningen upphört.
- Det har förekommit kvalitetsproblem med att svetsarna på nya rännor inte har varit tillfredsställande.

Studien är ännu inte slutförd. Hösten 2017 kommer den finska Sodahuskommittén att påbörja arbetet med en rekommendation i ämnet.

6.4 Sodahuskonferensen 1974 och 1975

Vid Sodahuskonferenserna 1974 och 1975 berördes löprännor. Denna dokumentation har samlats på Sodahuskommitténs hemsida under flik ”Rapporter/Övriga dokument”.

Enligt erfarenhet från Combustion Engineering är det bästa löprännematerialet rent järn, med en kolhalt om 0,02%. Combustion Engineers erfarenhet stöddes av att Armco-järn uppvisade låg korrosion. ARMCO-järn (American Rolling Mill Co) är rent järn med mycket låga halter av kol, kisel, mangan, svavel och fosfor.

I dokumentet finns en tabell med den termiska ledningsförmågan för knappt 20 olika legeringar. Den termiska ledningsförmågan spelar roll för temperaturspänningarna i rännan.

I sammanställningen anges att man redan 1966 hade provat att ha löprännor med viss konicitet, dvs att rännan är som smalast närmast pannan och bredare längre ner emot smältautloppet. Denna koniska utformning upplevdes som positiv.

Försök skulle genomföras på Domsjöns med ett omvänt compoundstål, en sida med austenitisk rostfri legering med tjockleken 1 mm in emot kylvattensidan och den del av rännan som är i kontakt med smältan utförd i 7 mm kolstål.

7 Slutsats

Om ett bruk upplever att de har problem med att löprännorna inte håller för drift under 12 månader ska de inte misströsta. De allra flesta bruken har kommit fram till ett löpränneutförande som står pall för en driftsäsong. Det gäller bara att ha modet att prova nya utföranden. Det finns gott om parametrar att laborera med.

Om ett bruk har problem med sina befintliga löprännor och de har möjlighet att fritt påverka förändrat utförande av sina löprännor med kringsystem skulle följande strecksatser vara informativa alternativt gynnsamma:

- I delen som handlar om förbränningsteknik i utbildningsmaterialet för certifieringsutbildningen finns en ”förbränningskurva” som ska hjälpa till att hitta förbränningsparametrar som ska leda till stabilt smältaflöde. Till grund för förbränningskurvan ligger data från sex bruk som upplever stabil förbränning. Om man upplever orolig förbränning/smältaavgång kan man försöka närma sig förbränningskurvan i sin panna, det vill säga anpassa torrhalten och brännlutstemperaturen. Om man har stabil förbränning ökar chanserna att även smältaavrinningen är stabil och skonsam mot löprännorna.

- Löprännan ska inte göras längre än vad som är nödvändigt. De största problemområdena är smältainloppet, gränsen mellan kolstålsränna/påsvetsningen samt vid smältaavrinningen. Dessa tre områden kommer man inte ifrån, men det förekommer sprickor i rännan. Ju kortare rännan man har desto mindre exponerad längd har man.
- Flera bruk rapporterar att smältan rinner olika bra i löprännorna beroende på smältans temperatur. Om ett bruk har problem med sina löprännor rekommenderas att utrustning för temperaturmätning införskaffas samt data börjar samlas in.
- I grunden en kolstålsränna eftersom kolstål inte är lika känsligt som vita rännor vad gäller sprickor. (Panna A och Panna B har dock provat kolstålsrännor, men fick problem med dem och har nu återgått till homogent rostfria rännor.)
- Om löprännan har U-form så finns inga uppenbara spänningskoncentrationer vid bockningar. Panna M och Panna N har U-formade rännor i vitt material. Under en driftsäsong spricker dessa rännor ändå, men inte hela vägen genom godset.
- U-formen bör tillverkas med rullning och inte genom bockning eftersom rullning ger mindre spänningskoncentrationer jämfört med bockning.
- Smältaavrinningen verkar gagnas av att löprännorna har en viss konicitet. Med konicitet menas i detta fall att rännan är som smalast närmast pannan. Ju längre ner emot smältautloppet desto bredare blir löprännan.
- Ner emot smältautloppet påsvetsas kolstålsrännan med korrosionsskyddande elektrod. En ansats kan vara de nedersta 1-3 dm. Påsvetsningen kan göras mellan kl. 3 och klockan 9. (Panna H med flera bruk påsvetsar eller påsprutar nästan hela löprännans längd)
- Även den nedre gaveln och ibland även på undersidan av löprännan påsvetsas.
- Det påsvetsade korrosionsskyddet ska påsvetsas på underliggande kolstål ”mjukt”. Med mjukt menas i detta fall att liten elektroddiameter används så att minimal strukturförändring skapas i det underliggande kolstålet. Hellre fler tunnare svetsstänger än färre och bredare.
- I rännan ner emot smältautloppet, där påsvetsningen börjar ska påsvetsningen slipas jämn så det inte uppstår virvelbildning/störd strömning på smältan vilket medför erosion.
- Svetsning skapar oftast kvarvarande spänningar och strukturförändringar. Om en löpränna renoveras ökar troligtvis mängden svetsfogar vilket går emot målet att hålla nere svetsningen till en låg nivå.
- Om man har ett varmare kylvatten in till rännan blir det en aning mindre temperaturgradient i godset. Å andra sidan ökar risken för att vattnet börjar koka och bilda en ångfilm inuti löprännan om det blir smältarusning. En låg temperatur på kylvattnet ökar risken för kondensation och därmed korrosion på kolstålsdelar. Sodahuskommitténs rekommendation B1 anger en lägsta in-temperatur för kylvattnet om 55-60°C). De bruk som har svarat och har temperaturmätning på inkommande kylvattentemperatur ger ett medel på 57,0°C. I detta medelvärde är Panna A och Panna B borträknade. Panna A och Panna B anger en inkommande temperatur på kylvatten om 10-20°C och det ligger så långt ifrån medelvärdet så att inkludera de vore inte helt korrekt. (Kylvattnet till löprännorna i Panna K har en inkommande temperatur om 45°C och det fungerar bra. BLRBAC rekommenderar inkommande temperatur om 60-65°C.
- Den genomsnittliga temperaturökningen på kylvattnet i rännorna uppges till

4,25°C. Troligtvis är detta i överkant eftersom två bruk anger en temperaturstegring på cirka 10°C. Dessa två drar upp genomsnittet. Om dessa två bruk dras bort hamnar den genomsnittliga temperaturhöjningen på 3,58°C vilket bedöms vara mer rimligt.

- Det genomsnittliga kylvattenflödet för rännorna i denna undersökning var 2,07 l/s och ränna. Panna D som har lågt belastade problemrännor låg på cirka 0,9 l/s och ränna. Panna Q som har högt belastade och ändå väl fungerande löprännor uppgav 2,17 l/s och ränna. Om en panna använder sämre kvalitet på matarvattnet kan man tänka sig att ett högre flöde i löprännan skulle vara positivt. Ett högre flöde skulle kunna tänkas "skölja bort" beläggningar.
- Kylvattenkvaliteten ska vara behandlat så det inte uppstår insidiga beläggningar i löprännorna. Detta är dock inte garanti för att inte få problem. (Panna V använder sig av totalavsaltat vatten, men får problem ändå, dock inte relaterade till kylvattnet.)
- Genom att använda en fungerande automatisk löprännespettning håller man löprännornas driftsmiljö konstant. Med det menas att smältan kan rinna jämnt utan de temperaturgradienter som kan uppstå vid igensättningar och efterkommande spettning.
- Förutom parametrarna i strecksatserna ovan finns ytterligare information om pannor/löprännor/driften i den tillhörande excel-filen, bilaga 2. Det rekommenderas att filen läses som en idébank för ytterligare förändringar om ett bruk har problem.

Vid en jämförelse med undersökningarna 2016 och 2001 kan det konstateras att användningen av löprännor i homogen rostfri legering är i avtagande. År 2001 hade 18 av 25 pannor löprännor i homogen rostfri legering vilket innebär 72%. Vid undersökningen 2016 anges att endast sex av pannorna har löprännor i homogen rostfri legering.

Sodahuskommittén tar även i fortsättningen gärna emot information om löprännor. Både information om löpränneförsök som medfört förbättrad funktion, men även försök som inte har fallit väl ut.

Skadegruppen tar gärna del av de skador som inträffar på bruken.

8 Ansvarsfriskrivning

Detta dokument utgör endast ett dokument över vad som förekommit vid möte med medlemmar i Sodahuskommittén. Informationen i detta dokument är enbart avsedd för Sodahuskommitténs medlemmar. Det är upp till varje medlem eller annan part som tar del av innehållet i dokument att på egen risk och eget ansvar följa de rekommendationer och riktlinjer som i förekommande fall kan anses följa av dokumentets innehåll. Sodahuskommittén franskriver sig allt ansvar för fel och skada oavsett orsak som kan följa av att rekommendationer eller riktlinjer följs. Det är upp till varje medlem eller annan part att själva, i sin riskbedömning, avgöra om man vill följa Sodahuskommitténs rekommendationer och riktlinjer. Det åligger varje medlem eller annan part att, vid tillämpningen av rekommendationer och riktlinjer, stämma av med tillämpliga myndigheter att rekommendationerna och riktlinjerna är i överensstämmelse med gällande rätt och andra föreskrifter.

LIITE 8

VTT: Sularännien materiaalianalyysi – tarjous 6.6.2017

6.6.2017

1 (3)

Suomen Soodakattilayhdistys ry
c/o Pöyry Finland Oy
Markus Nieminen
PL 4
01621 Vantaa

SULARÄNNIEN MATERIAALIANALYYSI

Kiitämme tarjouspyynnöstänne ja tarjoudumme tekemään alla olevan tutkimussuunnitelman mukaisesti sularännien materiaalianalyysia.

Tutkimuksen sisältö

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää sularännien vaurioitumismekanismeja metallurgisin keinoin.

Osio A, neljä (4) sularänniä; kaksi vaurioitunutta ja kaksi uutta/hyvin säilynyttä:

- Vauriomekanismin selvitys kahdesta eri materiaalista valmistetuista sularänneistä
- Vaurioituneiden kohtien vertailu samasta materiaalista valmistettuun uuteen tai mahdollisimman hyväkuntoiseen sularänniin
- Vauriokohdan/kohtien lisäksi jokaisesta sularännistä tutkitaan kriittiseksi koetut kohdat:
 - o sulakouru
 - o sularännin alapää
 - o sularännin yläpää
- Raportointi

Osio B, kaksi (2) sularänniä; yksi vaurioitunut ja yksi uusi/hyväkuntoinen:

- Vauriomekanismin selvitys sularännistä
- Vaurioituneiden kohtien vertailu samasta materiaalista valmistettuun uuteen tai mahdollisimman hyväkuntoiseen sularänniin
- Vauriokohdan/kohtien lisäksi jokaisesta sularännistä tutkitaan kriittiseksi koetut kohdat:
 - o sulakouru
 - o sularännin alapää
 - o sularännin yläpää
- Raportointi

Osio C:

- Osioiden (Osio A + x*Osio B) tulosten yhteenveto ja juurisyyn selvitys yhdessä soodakattilayhdistyksen ja kattilakäyttäjien kanssa

Hinta ja laskutus

Osion A (4 sularänniä, 2 vaurioitunutta sekä 2 uutta/hyvin säilynyttä) hinta 9 800 €

Osion B (2 sularänniä, 1 vaurioitunut sekä 1 uusi/hyvin säilynyt) hinta 4 600 €

Osion C hinta 4 000 €

6.6.2017

2 (3)

Hintaan lisätään kulloinkin voimassa oleva arvonlisävero sekä mahdolliset ulkomaiset verot ja viranomaismaksut.

Työ laskutetaan osioittain, kun ko. osion raportti on toimitettu asiakkaalle.

Lisäksi veloitetaan matka- ja majoituskustannukset sekä päivärahat valtion matkustussäännön mukaisesti.

- Maksuehdot** Maksuehto on 21 päivää laskun päiväyksestä. Viivästyskorko on korkolain mukainen.
- Aikataulu** Osio A; toteutetaan 6 viikon kuluessa näytteiden saapumisesta ja tilauksesta, ottaen huomioon Suomen lomakaudet
- Osio B; toteutetaan 5 viikon kuluessa näytteiden saapumisesta ja tilauksesta, ottaen huomioon Suomen lomakaudet
- Osio C raportoidaan 2 viikon kuluessa kaiken tarvittavan tiedon saapumisesta, mukaan lukien keskustelut osallistuvien kattilavalmistajien ja käyttäjien kanssa.
- Raportointi** Tulokset raportoidaan VTT:n asiakasraporttina.
- Muut ehdot** VTT:llä on oikeus mainita toimeksiannon ja toimeksiantajan nimet referenssinään.
- Tätä tarjousta tai sen sisältämiä tietoja saa hyödyntää vain VTT:n ja tarjouksen saajan välisessä suhteessa. Tämän tarjouksen osittainenkin kopioiminen, muuttaminen, edelleen luovuttaminen tai käyttäminen muuhun tarkoitukseen ilman VTT:n lupaa on kielletty.
- Toimeksiannon ulkopuoliset työt veloitetaan erikseen VTT:n laskutushintojen mukaan. Muutoin noudatetaan VTT:n yleisiä sopimusehtoja (liite 1).
- Yhteyshenkilö** VTT:ssä asiaa hoitaa:
Sanni Yli-Olli
Puh. 020 722 6842
Sähköposti: sanni.yli-olli@vtt.fi
- Voimassaolo** Tarjouksemme on voimassa edellä mainituin ehdoin 30 päivää tarjouksen päiväyksestä. VTT laatii tilausvahvistuksen, jos tilaus poikkeaa tarjouksesta tai tilaus on suullinen. Näissä tapauksissa tilaus astuu voimaan, kun VTT on sen vahvistanut.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy



Satu Tuurna
Tiiminvetäjä



TARJOUS
LUOTTAMUKSELLINEN

Nro VTT-CRM-153080-17

6.6.2017

3 (3)

LIITTEET

1

VTT yleiset sopimusehdot

Hyväksyminen

Hyväksymme yllä olevan tarjouksen ja teemme tarjouksen mukaisen tilauksen:

VTT:N YLEISET SOPIMUSEHDOT 1.4.2016**1. SOVELTAMISALA**

- 1.1 Näitä VTT:n yleisiä sopimusehtoja (jäljempänä Sopimusehdot) sovelletaan osana Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (jäljempänä VTT) ja VTT:n asiakkaan (jäljempänä Asiakas) välistä toimeksiantosopimusta (VTT ja Asiakas jäljempänä erikseen Sopijapuoli ja yhdessä Sopijapuolet), jolla Sopijapuolet sopivat VTT:n tekemästä työstä tai tuottamasta palvelusta (jäljempänä Toimeksianto).
- 1.2 VTT Groupiin katsotaan kuuluvaksi VTT sekä organisaatiot, joissa VTT käyttää välitöntä tai välillistä määräysvaltaa.
- 1.3 Tarjous, johon Sopimusehdot on liitetty, on voimassa yhden (1) kuukauden tarjouksen päiväyksestä.
- 1.4 Toimeksiannosta johtuvia oikeuksia tai velvollisuuksia ei voida siirtää kolmannelle osapuolelle ilman toisen Sopijapuolen suostumusta.
- 1.5 Sopijapuolet voivat sopia kirjallisesti näiden ehtojen yksittäisten määräysten muuttamisesta tai poissulkemisesta.
- 1.6 Mikäli Toimeksiantoon liittyvät sopimusasiakirjat (jäljempänä Sopimus) ovat sisällöltään ristiriitaisia, on niiden pätevyysjärjestys seuraava: 1) toimeksiantosopimus, 2) tilausvahvistus, 3) tarjous, 4) tilaus, 5) Sopimusehdot ja 6) tarjouspyyntö. Mikäli VTT saa Toimeksiannon suorittamista varten rahoitusta Asiakkaan lisäksi joltakin kolmannelta taholta (kuten Tekes, Suomen Akatemia, EU tms.), sovelletaan rahoitukselle annettuja rahoitusehtoja ensisijaisesti suhteessa Sopimukseen.

2. YHTEISTOIMINTAORGANISAATIO

- 2.1 Sopijapuolet nimittävät Toimeksiantoa varten omat vastuuhenkilönsä. Vastuuhenkilön muutoksesta on ilmoitettava toiselle Sopijapuolelle.
- 2.2 Mikäli Sopimuksen mukaan Toimeksiantoa ohjaa johtoryhmä (tai vastaava Sopijapuolten edustajista koostuva ohjaava elin), silloin kumpikin Sopijapuoli nimeää johtoryhmään saman verran edustajia.
- 2.3 Johtoryhmän tehtävänä on käsitellä Toimeksiantoa koskevia asioita sekä erityisesti valvoa ja ohjata Toimeksiannon toteuttamista Sopimuksen rajaamissa puitteissa. Tätä varten johtoryhmä:
- täsmentää Toimeksiannolle asetetut tavoitteet ja hyväksyy Toimeksiantoa koskevat suunnitelmat,
 - käsittelee projektisuunnitelman tarkistukset ja muutokset sekä tarvittaessa esittelee ne Sopijapuolten hyväksyttäväksi,
 - valvoo Toimeksiannon edistymistä ja tukee projektipäällikön toimintaa,
 - hyväksyy Tulokset ja toteaa Toimeksiannon loppuun suoritetuksi
- 2.4 Johtoryhmä ei voi tehdä muutoksia Sopimukseen, ellei Sopijapuolten kesken siitä erikseen kirjallisesti sovita.

3. VELOITUS

- 3.1 Sopimuksessa sovitaan Toimeksiannon veloituksista. Hinta ilmaistaan euroina.
- 3.2 Arvonlisävero sekä mahdolliset ulkomaiset verot ja viranomaismaksut lisätään sovitettuun hintaan.
- 3.3 Mikäli Toimeksiannon tavoitetta tai aikataulua muutetaan, taikka Sopimuksen voimassaoloaikana tapahtuu Asiakkaan ja VTT:n yhteisesti toteamia olennaisia kustannustason muutoksia, tarkistetaan veloitusta vastaavasti ko. muutoksen ajankohdasta lukien.
- 3.4 Ellei laskutusaikataulusta ole muuta kirjallisesti sovittu, VTT laskuttaa sovitun hinnan Toimeksiannon aikataulua vastaavissa kuukausierissä.
- 3.5 VTT:llä on oikeus pitää hallussaan Tulokset, kunnes Toimeksianto on kokonaan maksettu.
- 3.6 Maksu on suoritettava 21 päivän kuluessa laskun päiväyksestä. Viivästyskorko on voimassaolevan korkolain (20.8.1982/633) mukainen viivästyskorko. Laskuun lisätään mahdolliset perintäkulut. Laskun huomautusaika on 8 päivää laskun päiväyksestä.

4. LUOTTAMUKSELLISUUS

- 4.1 "Salassapidettävällä Tiedolla" tarkoitetaan kaikkea tietoa (mukaan lukien tietämys, tietotaito, liikesalaisuudet, teknologinen tai kaupallinen tieto, laitteet ja ohjelmistot (mukaan lukien lähdekoodi) riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai voitaisiinko niitä suojata tekijänoikeudella, patentilla, tavaramerkillä tai muulla immateriaalioikeudella), joka liittyy Toimeksiantoon ja jonka tietoa luovuttava Sopijapuoli (jäljempänä Luovuttava Sopijapuoli) on luovuttanut (tai jonka puolesta luovutus on tehty) tietoa vastaanottavalle Sopijapuolelle (jäljempänä Vastaanottava Sopijapuoli) riippumatta tiedon luovutuksen tavasta (mukaan lukien kirjallinen, suullinen, elektroninen tai havainnoimalla tapahtunut luovutus). Vastaanottava Sopijapuoli sitoutuu pitämään Salassapidettävän Tiedon salassa ja olemaan luovuttamatta sitä kolmansille ilman Luovuttavalta Sopijapuolelta saatua etukäteistä kirjallista suostumusta. Vastaanottavalla Sopijapuolella on oikeus käyttää Salassapidettävää Tietoa ainoastaan Toimeksiantoon liittyvien tehtävien, sekä Sopimuksesta johtuvien oikeuksiensa ja velvollisuuksiensa toteuttamiseen.

- 4.2 Luovutettua tietoa ei katsota Salassapidettäväksi Tiedoksi siltä osin, kun Vastaanottava Sopijapuoli pystyy näyttämään toteen, että:

- a) tieto on ollut tai tulee julkiseksi tai muutoin yleisesti saataville ilman tämän Sopimuksen rikkomista; tai
- b) tieto on jo Vastaanottavan Sopijapuolen tiedossa tiedon luovutuksen hetkellä; tai
- c) Vastaanottava Sopijapuoli on laillisesti saanut tiedon kolmannelta osapuolelta ilman salassapitovelvoitteita; tai
- d) Vastaanottava Sopijapuoli on kehittänyt tiedon ilman Salassapidettävän Tiedon käyttämistä.

Mikäli Vastaanottava Sopijapuoli velvoitetaan hallinnollisen tai juridisen määräyksen tai päätöksen perusteella luovuttamaan Salassapidettävää Tietoa, Vastaanottavalla Sopijapuolella on oikeus tehdä luovutus, edellyttäen että se ilmoittaa lainsäädännön sallimissa tilanteissa luovutuksesta etukäteen Luovuttavalle Sopijapuolelle ja antaa Luovuttavalle Sopijapuolelle mahdollisuuden turvautua tarpeellisiin vastakeinoin Salassapidettävän Tiedon suojaamiseksi.

- 4.3 Salassapitovelvoite on voimassa Sopimuksen keston ajan, sekä kymmenen (10) vuotta sen päättymisen jälkeen, ellei Sopimuksessa ole sovittu tästä poikkeavaa salassapitoaikaa.
- 4.4 Salassapitovelvoitteesta huolimatta VTT:llä on tarvittaessa oikeus antaa luottamuksellisia tietoja hyväksytyille ali-hankkijoilleen sekä VTT Groupiin kuuluville organisaatioille edellyttäen, että VTT huolehtii näiden sitoutumisesta vastaavan laajuisiin salassapitovelvoitteisiin kuin mitä Sopimuksessa on sovittu.
- 4.5 VTT:llä on oikeus mainita Toimeksiannon ja Asiakkaan nimet referenssinään.

5. OMISTUS- JA KÄYTTÖOIKEUDET

- 5.1 Sopijapuolen toiselle Sopijapuolelle luovuttama tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka ovat syntyneet Toimeksiannon ulkopuolella (jäljempänä Tausta-aineisto), kuuluvat luovuttavalle Sopijapuolelle. Mikäli VTT:n Tausta-aineistoa tarvitaan Tulosten hyödyntämiseen, Tausta-aineiston käyttöoikeuden ehtoista sovitetaan kirjallisesti erikseen.
- 5.2 Tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka VTT esittää ja/tai luo Toimeksiannon toteuttamista ja/tai tulosten saavuttamista varten, mutta jotka eivät tule osaksi Tulosta (esimerkiksi tutkimustyökalut, jotka tehdään Toimeksiannossa tietyn tuloksen saavuttamiseksi), ovat VTT:n omaisuutta.
- 5.3 Tieto, ideat, menetelmät, ratkaisumallit, laitteet, aineet ja muu aineisto, mukaan lukien syntyneet raportit ja selvitykset, riippumatta siitä ovatko ne suojattuja tai suojattavissa immateriaalioikeudellisesti, jotka ovat syntyneet Toimeksiannossa ja tulevat osaksi Toimeksiannon tulosta (jäljempänä Tulokset) ovat Toimeksiantajan omaisuutta, ellei
- a) Sopimuksessa ole todettu Toimeksiannon kohteena olevan VTT:n ydinteknologia (core technology), ja/tai
 - b) Toimeksiannon kohteena on tietokoneohjelmisto, tietokanta, integroidun piirin piirimalli ja/tai biotekninen löydös (esimerkiksi geenisekvenssi, mikro-organismi, tai kohdemolekyylit).
- Edellä mainituissa tapauksissa omistusoikeus Tuloksiin jää VTT:lle ja Asiakas saa Tuloksiin erikseen määriteltävän käyttöoikeuden Asiakkaan johtuullisten tarpeiden, sekä Toimeksiannon sovellusalueen kannaltaärkevässä laajuudessa.
- 5.4 Sopijapuolet saavat käyttää toisen Sopijapuolen Tausta-aineistoa vain Toimeksiantoon kuuluvien tehtävien suorittamiseen.
- 5.4 Toimeksiantoa varten VTT:n itselleen hankkimat työvälineet ja laitteet ovat VTT:n omaisuutta, paitsi sikäli kun kyseiset työvälineet ja laitteet ovat Asiakkaan Tausta-aineistoa.
- 5.6 VTT:llä on oikeus käyttää hyväkseen Toimeksiannon yhteydessä saavutettua ammattitaitoa ja kokemusta myös muussa kuin Sopimuksen ja Toimeksiannon piiriin kuuluvassa toiminnassa.

6. OIKEUS KEKSINTÖÖN

- 6.1 Asiakkaalla on oikeus saada Sopimusehtojen tämän kohdan mukainen omistusoikeus sellaisiin keksintöihin, jotka kuuluvat Tuloksiin, jotka tulevat Asiakkaan omaisuudeksi Sopimuksen mukaisesti.
- 6.2 VTT:n palveluksessa oleva keksijä, joka on tehnyt Tuloksiin kuuluvan keksinnön, tekee työsuhtekeksintölain (29.12.1967/656) mukaisen kirjallisen ilmoituksen työsuhtekeksinnöstä VTT:lle. VTT sitoutuu ilmoittamaan Asiakkaalle tällaisista keksinnöistä ilman aiheetonta viivytystä saatuaan yllä mainitun ilmoituksen keksijältä.

- 6.3 Mikäli Asiakas haluaa omistusoikeuden VTT:n Toimeksiannossa tekemään keksintöön, Asiakkaan on ilmoitettava kirjallisesti VTT:lle vaatimuksensa keksintöön kahden (2) kuukauden kuluessa saatuaan VTT:ltä tiedon keksinnöstä uhalla, että VTT saa kaikki oikeudet keksintöön.
- 6.4 Sopijapuolet sitoutuvat toimimaan siten, että keksinnön ennakoinninen julkiseksi tulo estyy.
- 6.5 Keksijä tunnustetaan keksinnön tekijäksi. Keksijä on oikeutettu saamaan kohtuullisen korvauksen tehdystä keksinnöstä. Kaikki keksinnön mahdollisesta patentoinnista aiheutuvat kustannukset ja korvauksen keksijälle maksaa se Sopijapuoli, jolla on tai joka saa oikeuden keksintöön Sopimuksen mukaisesti. Kohtuullista korvausta määritettäessä noudatetaan työsuhtekeksintölakia, sekä sen Sopijapuolen työsuhtekeksinnosta maksettavaa korvausta koskevia käytäntöjä, jolla on tai, joka saa omistusoikeuden kyseiseen keksintöön Sopimuksen mukaisesti. Mikäli Asiakkaalla ei ole käytäntöjä koskien työsuhtekeksinnosta maksettavaa korvausta, noudatetaan VTT:n käytäntöjä.

7. ASIAKKAAN ASIAKIRJAT JA KOEMATERIAALI

- 7.1 Asiakkaan VTT:lle Toimeksiannon suorittamista varten toimittamaa koemateriaalia, näytettä tai koekappaleita säilytetään VTT:n toimesta enintään kolme (3) kuukautta Tulosten luovuttamisesta Asiakkaalle. Asiakkaalla ei ole oikeutta korvaukseen, jos Toimeksiannon asianmukainen suorittaminen on vaatinut toimenpiteitä, joiden seurauksena koemateriaali, näytteet ja/tai koekappaleet ovat tuhoutuneet, huonontuneet tai vähentyneet.

8. VTT:N ASEMA

- 8.1 VTT suorittaa Toimeksiannon sovittua aikataulua noudattaen. Mikäli aikataulua ei ole sovittu, Toimeksianto suoritetaan ilman aiheutonta viivästystä. VTT:llä on oikeus pidentää aikataulua sikäli kun viivästys johtuu Ylivoimaisesta Esteestä (Sopimusehdot, kohta 12), Asiakkaasta, tai Asiakkaan vastuulla olevasta syystä.
- 8.2 VTT suorittaa Sopimuksessa määritellyt tehtävät huolella ja ammattitaidolla. VTT huolehtii siitä, että Toimeksiannon suorittamiseen käytetään pätevyydeltään sopivia henkilöitä. Asiakkaan tulee vedota Toimeksiannon suorituksessa tapahtuneeseen virheeseen kahden (2) viikon kuluessa Tulosten luovuttamisesta. Virhetilanteessa VTT:llä on ensisijaisesti oikeus korjata tai uusia Toimeksiannon suoritukset/virheellisen Tuloksen.
- 8.3 VTT ei ole oikeutettu ilman Asiakkaan suostumusta käyttämään muuta kuin VTT Groupiin kuuluvaa organisaatiota alihankkijana Toimeksiannon tai sen merkittävän osan suorittamisessa.
- 8.4 Mikäli VTT:lle aiheutuu vahinkoa tai Toimeksiannon laajuus tai tavoite muuttuu, viivästyy tai työ keskeytyy Asiakkaasta johtuvasta tai tämän vastuulla olevasta syystä, VTT:llä on oikeus saada korvaus näin aiheutuneista kustannuksista ja vahingosta.
- 8.5 VTT ei anna toimittamalleen Tulokselle, Tausta-aineistolle, laitteelle, materiaalille tai tavaralle mitään takuuta.
- 8.6 VTT:n luovuttaman materiaalin tai tavaran toimitusehto on "Ex Works VTT (Incoterms 2010)".

9. ASIAKKAAN ASEMA

- 9.1 Asiakkaalla on oikeus seurata Toimeksiannon edistymistä.
- 9.2 Asiakas luovuttaa ajoissa VTT:n käyttöön Toimeksiannon suorittamista varten tarvittavat perustiedot sekä erikseen sovittaessa tarvittavat laitteistot ja muut resurssit.
- 9.3 Vaaranvastuu Tulosten tapaturmaisesta vahingoittumisesta siirtyy Asiakkaalle Tuloksen tai sen osan luovutushetkellä. Mikäli luovuttaminen viivästyy Asiakkaan syystä, vaaranvastuu siirtyy hetkellä, jolloin luovutuksen olisi pitänyt viimeistään tapahtua.
- 9.4 Mikäli Toimeksianto suoritetaan Asiakkaan tiloissa tai tiloissa, joista Asiakas on muuten vastuussa, Asiakas huolehtii työsuojelusta ja työturvallisuudesta VTT:n tai VTT:lle Toimeksiannossa töitä tekevän kolmannen osapuolen palveluksessa olevan henkilön osalta.

10. TULOSTEN JULKAISEMINEN

- 10.1 Tulosten omistajalla on oikeus oman harkintansa mukaan julkaista Tuloksiin kuuluva lopullinen tutkimusraportti kokonaisuudessaan. Tutkimusraportin osittainen julkaiseminen on kielletty ilman VTT:n kirjallista lupaa.
- 10.2 Tuloksia julkistettaessa VTT:n nimi on mainittava asianmukaisella tavalla.
- 10.3 VTT:n nimeä saa käyttää mainonnassa tai muussa myynninedistämässä vain VTT:n kirjallisella luvalla.
- 10.4 Julkisuudessa esitettyjen väitteiden tai Toimeksiantoa koskevien lausumien todentamiseksi ja/tai väärin väitteiden tai lausumien korjaamiseksi VTT:llä on oikeus antaa kolmannelle osapuolelle tai yleisölle tietoja Tuloksista siinä määrin, että julkisuudessa esitetyt väitteet tai lausumat tulevat todennetuiksi ja/tai väärät väitteet tai lausumat tulevat korjatuiksi.

11. VTT:N VASTUU

- 11.1 VTT vastaa Toimeksiannon suorittamisesta Sopimuksen mukaisesti. VTT vastaa alihankkijan työstä kuin omastaan.

- 11.2 VTT vastaa Asiakkaalle aiheutuneista välittömistä vahingoista, jotka johtuvat VTT:n tahallisesti tai tuottamuksellisesti tekemistä virheistä tai laiminlyönneistä.
- 11.3 VTT:n vastuu rajoittuu kaikissa tapauksissa Toimeksiannosta VTT:lle maksettavan palkkion määrään. VTT ei vastaa välillisistä tai epäsuorasta vahingosta.
- 11.4 Sopijapuolet vakuuttavat nimenomaisesti olevansa tietoisia niistä teknisistä ja muista riskeistä, joita tutkimus- ja kehitystyöhön liittyy ja tietoisesti hyväksyvät tällaiset epävarmuustekijät sekä sen, ettei tutkimus- ja kehitystyön tuloksia tai tavoitteita välttämättä saavuteta, tutkimus- ja kehitystyön luonteeseen kuuluvina.
- 11.5 Tausta-aineistoa ja/tai Tuloksia toisilleen luovuttaessaan Sopijapuolet pyrkivät siihen, että ne ovat mahdollisimman virheettömiä. Luovuttava Sopijapuoli ei kuitenkaan anna luovutuksen kohteelle mitään takuuta ja luovutetun aineiston käyttö tapahtuu yksin luovutuksensaajan vastuulla. Lisäksi erityisesti sovitaan, että Asiakas kantaa tuotevastuun kolmatta osapuolta kohtaan.
- 11.6 Ellei toisin ole sovittu, VTT:n vastuu päättyy yhden (1) vuoden kuluttua Tulosten luovuttamisesta Asiakkaalle. Mikäli luovuttaminen viivästyy Asiakkaan syystä, määräaika alkaa hetkestä, jolloin luovutuksen olisi pitänyt viimeistään tapahtua.
- 11.7 Vaatimukset VTT:tä kohtaan on esitettävä kuuden (6) kuukauden kuluessa VTT:n vastuuajan päättymisestä. Muussa tapauksessa Asiakas menettää oikeutensa vaatia korvausta.

12. YLIVOIMAINEN ESTE

- 12.1 Ylivoimaisena Esteenä pidetään tapahtumaa, joka estää tai tekee kohtuuttoman vaikeaksi Toimeksiannon suorittamisen määräajassa. Tällaisia ovat sota, kapina, luonnonmullistus, yleinen energianjakelun keskeytyminen, tulipalo, valtion talousarvion tai valtioneuvoston asettama oleellinen rajoitus VTT:n toiminnalle, lakko, saarto tai muu yhtä merkittävä ja epätavallinen Sopijapuolista riippumaton syy. Alihankkijan viivästys em. syistä katsotaan myös Ylivoimaiseksi Esteeksi.

13. SOPIMUKSEN PURKAMINEN

- 13.1 Mikäli Sopijapuoli rikkoo oleellisesti Sopimuksen ehtoja, toisella Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus.
- 13.2 Mikäli Asiakas rikkoo Sopimuksen ehtoja, VTT:llä on purkamisen sijasta oikeus väliaikaisesti keskeyttää Toimeksiannon suorittamisen, kunnes nähdään johtaako sopimusrikkomus Sopimuksen purkamiseen.
- 13.3 Kummallakin Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus, jos toinen Sopijapuoli on ilmeisen maksukyvytön, haetaan selvitystilaan, velkajärjestely- tai yrityssaneerausmenettelyyn taikka konkurssiin.
- 13.4 Kummallakin Sopijapuolella on oikeus purkaa Sopimus, jos Sopimuksen täyttäminen Ylivoimaiseen Esteen jatkumisen johdosta tulee mahdottomaksi tai viivästyy oleellisesti tai yli 12 kuukautta.
- 13.5 Mikäli Sopimus puretaan, Asiakas maksaa VTT:lle hyväksytysti suoritusta Toimeksiannon osasta korvauksen sovitun veloitusperusteen mukaisesti purkamispäivään tai töiden lopettamishetkeen saakka, mikäli töitä sovitun tehtäväksi purkamispäivän jälkeen.
- 13.6 VTT:llä on oikeus saada korvaus Sopimuksen purkamisesta aiheutuneista kustannuksista ja vahingosta, jos Sopimuksen purkaminen johtuu Asiakkaasta tai tämän vastuulla olevasta syystä.

14. ERIKESITYKSET

- 14.1 Sopimuksesta aiheutuvat riidat, joista asianomaiset eivät pääse keskenään sopimukseen, jätetään Helsingin käräjäoikeuden ratkaistavaksi.
- 14.2 Sopimuksen tulkinnaissa ja riitojen ratkaisemisessa sovelletaan Sopimuksen tekohetkellä Suomessa voimassa olevaa oikeutta, lukuun ottamatta sen lainvalintasäännöksiä.

LIITE 9

**VTT: Äänen käyttäytyminen soodakattiloiden ääninuohouksessa –
tutkimussuunnitelma 17.2.2017**

ÄÄNEN KÄYTTÄYTYMINEN SOODAKATTILOIDEN ÄÄNI- NUOHOUKSESSA, TUTKIMUSSUUNNITELMA

Tausta

Suomen Soodakattilayhdistys ry on teettänyt Tampereen teknillisessä yliopistossa tutkimuksen ”Soodakattilan ääninuohous”¹. Työn tavoitteena oli kartoittaa aiheesta jo tehtyä tutkimusta. Työhön on koottu ääninuohoinvalmistajien käyttökokemuksia ja tutkimustuloksia soodakattilan tuhkan koostumuksesta ja ominaisuuksista. Lisäksi työssä on käsitelty ääniaaltoa fysikaalisena ilmiönä ja pohdittu äänentaajuuden vaikutusta ääninuohouksen lopputulokseen. Tutkimuksen yhteenvedossa esitetään seuraavanlaisia jatkotutkimustarpeita:

”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 tuhkakkerrostuman irtoamisen. Jos ääninuohouksen aiheuttamat tuhkakkerrostuman hajoamismekanismit olisivat tiedossa, olisi helpompaa arvioida, miten tuhkakkerrostuman 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.”

Tämä tutkimussuunnitelma pyrkii antamaan vastauksia esitettyjen jatkotutkimustarpeiden akustisille kysymyksille. Ensin selvitetään äänen etenemiseen ja absorptioon liittyviä akustisia parametreja soodakattilaympäristössä laskennallisesti ja mittaamalla. Tulosten perusteella tarkastellaan nuohouksen fysikaalista toimintaa ja sen optimointia sekä simuloidaan ääninuohouksen aiheuttamaa värähtelyä kattilarakenteilla.

Tutkimussuunnitelma koostuu osista, jotka on tarkoitus toteuttaa peräkkäisinä erillisinä toimeksiantoina. Toteutettavaa toimeksiantoa seuraavien kokonaisuuksien suunnitelmia täsmennetään tarvittaessa. Osa niistä on tällä hetkellä vain otsikkotasolla.

¹ Peltola, Santeri, Soodakattilan ääninuohous. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto 2015. 44 s. + liitteet 6 s.

OSA 1. SOODAKATTILAYMPÄRISTÖN AKUSTISET PARAMETRIT

Lähtökohta

VTT:llä on tehty MATLAB-ohjelma, joka tuottaa ilman akustiset parametrit. Lähtötietoina se tarvitsee lämpötilan ja ilmanpaineen arvot sekä ilman koostumuksessa esiintyvien kaasujen suhteelliset osuudet. Nykyisillään koostumukseen voi sisällyttää seuraavat kaasut: typpi, happi, argon, hiilidioksidi, vesi, rikkidioksidi, typpioksidi, hiilimonoksidi, helium ja metaani. Jos kaasujen suhteellisia osuuksia ei anneta, oletusarvona on typpi 78.08 %, happi 20.95 %, argon 0.934 % ja hiilidioksidi 0.036 %. Ohjelma tuottaa seuraavat akustiset parametrit ilmalle: äänen nopeus, tiheys, adiabaattivakio, puristuvuus, karakteristinen impedanssi, viskositeettikerroin, lämmönjohtumiskerroin sekä ominaislämmöt vakiopaineessa ja -tilavuudessa. Ohjelman logiikka perustuu pääosin eri aineiden molekyylipainoihin ja rotaatiovapausasteiden lukumäärään.

Tilaaaja toimittaa seuraavat lähtötiedot soodakattilaympäristöstä

- Tyypilliset lämpötila-alueet
- Tyypilliset ilmanpaineet
- Ilman koostumuksessa esiintyvien kaasujen suhteelliset osuudet (tilavuussuhteet)

Tavoite

Tehtävän tavoitteena on määrittää tyypillisen kattilaympäristön akustiset parametrit. Näiden avulla on määriteltävissä tärkeimmät äänen etenemiseen liittyvät seikat.

Osatehtävä 1.A Ohjelman muuttaminen kattilaympäristöön sopivaksi

Ohjelmaa laajennetaan siten, että sillä voi käsitellä kattilaympäristössä esiintyviä kaasukoostumuksia. Tilavuusviskositeetti (bulk viscosity) sisällytetään laskentaan. Tämän ja joidenkin muiden parametrien osalta on tarvetta etsiä kirjallisuudesta relevantteja parametrien riippuvuuksia eri tekijöistä, erityisesti viskositeetin, lämmönjohtavuuden ja ominaislämpöjen lämpötilariippuvuus relevantissa kaasukoostumuksessa.

Osatehtävä 1.B Akustisten parametrien laskeminen tyypillisissä kattilaympäristöissä

Akustiset parametrit lasketaan tyypillisillä lämpötila- ja painealueilla kattilaympäristössä.

OSA 2. ÄÄNEN ETENEMISABSORPTION LASKENTA KATTILAYMPÄRISTÖSSÄ

Lähtökohta

Kansainvälinen standardi ISO 9613-1 sisältää menetelmän ilmakehän absorption aiheuttaman äänen etenemisvaimentumisen laskemiseksi. Siinä otetaan huomioon klassinen absorptio eli ilman viskositeetin ja lämmönjohtavuuden vaikutukset sekä hapen ja typen relaksaatioprosessien vaikutukset. Logiikka on koodattu MATLABille VTT:llä. Lähtötietoina se tarvitsee lämpötilan, ilmanpaineen ja suhteellisen kosteuden arvot.

Tilaaaja toimittaa seuraavat lähtötiedot soodakattilaympäristöstä osan 1 lähtötietojen lisäksi

- Tyypilliset suhteellisen kosteuden arvot
- Tyypillinen kattilageometria
 - o CAD-file ja/tai piirustukset
 - o Sisältää ainakin puhdistettavat lämmönvaihtimet (tulistimet, keittoputket, ekonomaiseri) ja tyypilliset nuohojen sijainnit

Osatehtävä 2.A MATLAB-koodin muokkaaminen kattilaympäristöön soveltuvaksi

MATLAB-koodia muokataan kattilaympäristöön paremmin soveltuvaksi. Viskositeetin ja lämmönjohtavuuden osalta hyödynnetään osatehtävän 1.B tuloksia. Relaksaatioprosessien osalta on tarvetta tutkia niitä kirjallisuuden avulla.

Osatehtävä 2.B Etenemisabsorption laskeminen tyypillisissä kattilaympäristöissä

Etenemisabsorptio taajuuden funktiona lasketaan tyypillisillä lämpötila-, paine- ja kosteusalueilla kattilaympäristössä tyypillisessä geometriassa tyypillisillä nuohoimien sijainneilla lämmönvaihtimiin nähden.

OSA 3. ÄÄNEN ABSORPTIO TUHKAKERROSTUMISSA

Osatehtävä 3.A Tuhkakerrostumien Biotin parametrien määrittäminen

Tyypillisten tuhkakerrostumien pintaimpedanssit mitataan impedanssiputkella. Biotin parametreista ominaisvirtausvastukset ja relevantit elastiset parametrit mitataan. Muut Biotin parametrit määritetään käänteisellä karakterisoinnilla FOAM-X -ohjelmaa ja mitattuja parametreja hyödyntäen.

Haaste

Tuhkakerrostumien saattaminen muotoon, jossa ne pysyvät pystyssä vaakasuuntaisen mittausputken poikkileikkaustasolla.

Osatehtävä 3.B Tuhkakerrostumien äänen absorptiokertoimen laskenta

Tuhkakerrostumien äänen absorptiokerroin taajuuden funktiona lasketaan. Ohjelmistona käytetään joko VTT:llä kehitettyä MATLAB-koodia tai kaupallista NOVA-ohjelmistoa. Osatehtävän 1.B tuloksia (3.A:n lisäksi) käytetään lähtötietoina.

Osatehtävä 3.C Tuhkakerrostumien vaikutus äänen etenemisabsorptioon

Osatehtävän 2.B tuloksia täydennetään tuhkakerrostumien absorption osalta.

OSA 4. NUOHOUKSEN FYSIKAALINEN TOIMINTA JA SEN OPTIMOINTI

Tehtävien 1 – 3 tuloksia hyödynnetään tässä tehtävässä.

Osatehtävä 4.A Tuhkakerrostumien irtoamisen fysiikka

Taajuuden ja taajuusjakauman vaikutus. Äänitason vaikutus. Äänen geometrisen etenemisvaimennuksen vaikutus.

Osatehtävä 4.B Nuohouksen tehokas etäisyys äänilähteestä

Osatehtävä 4.C Suolakerrostumien ominaisuuksien vaikutus nuohoustulokseen.

OSA 5. ÄÄNINUOHOUKSEN AIHEUTTAMA VÄRÄHTELY KATTILARAKENTEILLA

FEM-pohjainen mallinnus ja simulointi. Tehtävien 1 – 3 tuloksia hyödynnetään tässä tehtävässä.

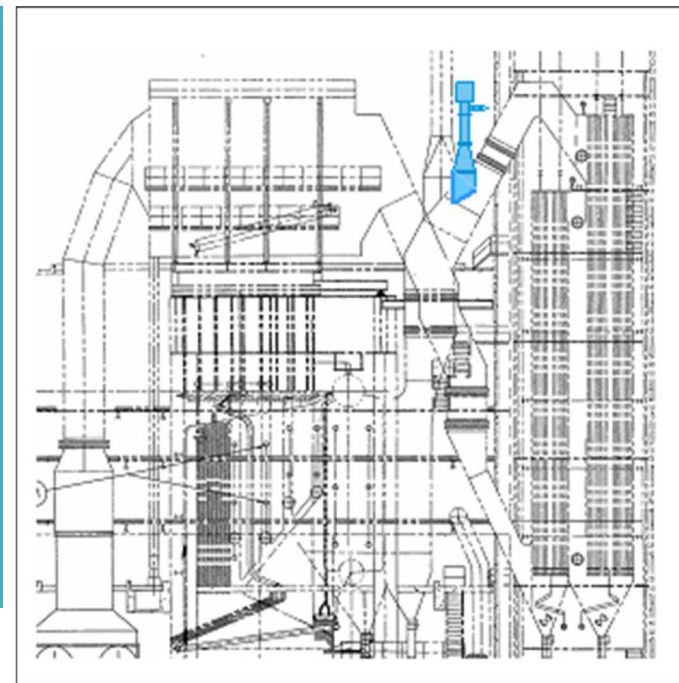
LIITE 10**Infrafone: Case study Körsnäs Frövi**

Case Study BLRB

Korsnäs, Frövi, Sweden

Installation specifications

Type of plant	Paper pulp/ Kvaerner boiler
Fuel	Black liquor
Capacity	2,130 metric tones DS/day
Particulate	Sodium sulphate, pH 10,5-11,5
Areas to keep clean	Duct between the generating bank and the economizer.
Commissioning date	APX 2000 February 2007



Infrafone Case Study

Korsnäs, Frövi, Sweden

The challenges

- Boiler production capacity limited due to soot build-up in the duct between the generation bank and the economizer
- Corrosion of the duct due to the use of water and steam for cleaning
Frequent replacement of the damaged areas (complete change of duct in 2003)
- Increase of Δp across the duct, making the ID fan work at its capacity limit

Prior to Infrafone's installation the duct was kept clean using the following methods:

- Four steam soot blowers
- On-line manual waterwashing 1-2 times/day
- Off-line waterwashing through the soot blowers noozles every 6 weeks

Infrafone Case Study

Korsnäs, Frövi, Sweden

Results after installing an Infrafone APX2000

- Elimination of the soot accumulation problem
- Elimination of the need of waterwashing, reducing the corrosion and the manpower needed for this task previously
- Reduction of the use of steam soot blowing, from 4 units to 2 units
- Low and stable Δp , leading to low and stable fan speed
- Direct impact on bottom line due to an increase in annual production

Our Solution

- We utilise the power of Infrasound to keep the ducts clean
- How do we do it-we model your boiler and then we model how the Infrasound will act inside it
- Based on this information we determine the number, size, location and the frequency of the Infrafone sonic cleaner

