

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. 2021. Teräsrakenteiden vauriot ja niiden analysointi. Hitsaustekniikka. 73 (5), 4-8.



Teräsrakenteiden vauriot ja niiden analysointi

Timo Kauppi

Tässä artikkelissa poraudutaan teräsrakenteiden vaurioihin ja niiden analysointiin. Harvalla teollisuudessa toimivalla on käsitystä siitä, että mitä vaurioiden syiden selvittäminen vaatii. Nykyään puhutaan paljon juurisyyanalyyseistä (RCA) ja käyttövarmuudesta, mutta harvemmin niiden yhteydessä hyödynnetään tässä läpikäytävää vaurioanalyysiprosessia. Tämä johtuu osaltaan siitä, että vaurioanalyysin asiantuntijoita on enää harvassa ja toisaalta siitä, että vaurioanalyysin tekemiseen vaaditaan kalliita mikroskooppeja ja analysointilaitteistoja. Osaltaan se johtuu valitettavasti korkeakoulujen ohuesta tarjonnasta vaurioanalyysin perusteiden koulutukseen liittyen.

Teräksiä on käytetty niiden 166 vuotisen historiansa aikana niiden ainutlaatuisten ominaisuuksien ansiosta. Ne ovat lujia, sitkeitä, kierrätettäviä, uudelleenkäytettäviä - niitä voidaan helposti muovata, valaa, hitsata ja koneistaa. Tämä pitää paikkaansa niin kauan, kun ne eivät vaurioidu käytössä. Teräsrakenteiden vaurioituminen on tosiasiaa hyvin tavallista, yksittäisten vaurioiden aiheuttamassa suurimmillaan miljoonien eurojen kustannuksia ja pahimmillaan henkilövahinkoja. Vaurioiden aiheuttamista kustannuksista on vaikeaa löytää tilastoitua tietoa. Kuitenkin esimerkiksi pelkästään korroosiovauriot aiheuttivat v. 2011 USA:ssa yli 270 miljardin dollarin kustannukset vuositasolla, mikä on n. 3 % bruttokansantuotteesta.

Vaurioiden syistä ollaan kiinnostuneita nykyään enenevässä määrin. Suuressa osassa suurteollisuuden organisaatioista on nykyään resursseja käyttövarmuuden hallintaan ja kehittämiseen liittyen. Silloin kun on kyse teräsrakenteista, niin kuin yleensä teollisuudessa on, tulisi kaikkien niiden kanssa tekemisissä olevien ymmärtää vaurioiden syntyminen ja ennaltaehkäisy perusteet. Näin asia ei kuitenkaan valitettavasti ole,

vaan useasti vaurioanalyysi on yhtä vieras aihepiiri kuin hitsausmetallurgian perusasiat, joita tämän lehden metallurgia-artikkelisarjan osissa on käsitelty.

Teräsrakenteiden vauriot

Hitsaustekniikkalehden numerossa 2/1997 Antti Hynnä kirjoitti ansiokkaasti vaurioanalyysin suorituksesta. Seuraavassa on referoitu ydinkohtia artikkelista.

Metallirakenteiden vauriot voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään:

1. Ylikuormitusten ja sisäisten jännitysten aiheuttamat vauriot sekä mahdollisen alentuneen lujuuden seurauksena syntyneet muodonmuutokset.
2. Murtumat, joiden syinä ovat mm. ylikuormitukset, väsyminen, viruminen, jännityskorroosio jne. Murtumat voivat olla luonteeltaan sitkeä- tai haurasmurtumia tai näiden yhdistelmiä eli nk. sekamurtumia.
3. Korroosion, kulumisen yms. sellaisen aiheuttamat vauriot.

Vaurioiden syyt voivat olla hyvinkin moninaisia ja voivat johtua usean tekijän yhtäaikaista esiintymisestä. Vauriosyyt voidaan jakotella mm. seuraavalla tavalla:

1. Muotoilun ja konstruktion puutteellisuudet (lovet ym. epäjatkuvuuskohdat, osien epäasiallinen vaihtaminen jne.)
2. Virheellinen materiaalinvalinta, esim. virheelliset valintakriteerit tai käytettyjen valintakriteerien virheelliset raja-arvot.
3. Materiaalivirheet, esim. valuvirheet, liitosvirheet ja muokkauksessa syntyneet virheet.
4. Materiaalien käsittelyvirheet, esim. kylmämuokkauksen tai hitsauksen aiheuttamat sisäiset jännitykset ja niiden vaikutus haurasmurtumistaipumukseen, korroosio-ominaisuuksiin ja väsymiskestävyYTEEN; pinnanlaadun vaikutus esim. väsymiskestävyYTEEN; hitsaus ja hitsausvirheet sekä niiden vaikutus väsymiskestävyYTEEN ja kylmähaurauteen.
5. Asennusvaiheessa syntyneet virheet, esim. virheelliset sovitukset ja niiden parantaminen väkivalloin.
6. Väärät toimintaolosuhteet, esim. käynnistys- ja sammutusjaksojen sekä ylös- ja alasajojen virheellinen suoritus, väärät prosessin toiminta-arvot tai puutteellinen huolto.

Vaurioihin liittyvä tilastotietoa on erittäin vaikeaa löytää. Yksi harvoista tilastoista on julkaistu Findlayn ja Harrisonin "Materials today" aikakausjulkaisuun kirjoittamassa artikkelissa "Why Aircraft Fail", taulukko 1. Tilaston mukaan teollisuussektorissa käytettävissä komponenteissa yli 50 % vaurioista johtuu korroosioista tai väsymisestä. Ilmailu-

puolella väsyminen on ylivoimaisesti yleisin vaurioiden syy.

Göran Alpsten on tutkinut neljänkymmenen vuoden aikana Ruotsissa tapahtuneita noin neljänsadan teräsrakenteen vaurioitumisen syytä. Tutkimuksen mukaan staattinen kuormitus ja rakenteiden epästabiilius aiheuttivat eniten vaurioita. Vaurioiden juurisyynä oli useammin inhimillinen virhe kuin käytön aikaiset ”normaalit” vaihtelut kuormitusten kantokyvyssä, jota käytetään yleensä oletuksena rakenteiden suunnittelussa. Tärkeä havainto tutkimuksessa oli se, että rakenteiden hitsit eivät olleet läheskään niin kriittisiä vaurioitumaan kuin yleensä oletetaan. Göran Alpsten (2017).

Hitsausliitos on kriittinen vaurioitumisen kannalta, koska se muodostaa aina vähintäänkin geometrisen epäjatkavuuskohdan rakenteeseen. Lisäksi erilaiset hitsausvirheet heikentävät mm. väsymis- ja korroosionkestävyyttä. Somersin ja Pensin mukaan hitsatun rakenteen vaurioitumisen syyt voidaan jakaa yleensä viiteen luokkaan: 1. Suunnittelu/mitoitus, 2. Hitsausarvot, 3. Materiaali, 4. Hitsauksen suoritus ja 5. Ennakoimattomat käyttöolosuhteet. Taulukosta 2 nähdään miten teräsrakenteissa esiintyvät vauriot jakaantuvat näihin luokkiin. (Somers & Pense 1994).

Eryteisesti väsymiseen liittyen hitsatulla rakenteella on kaksi tärkeää erityispiirrettä, joita läheskään kaikki eivät tiedä tai tiedosta:

1. Kestoiäkä määräytyy ensisijaisesti kuormitusyökkien lukumäärästä, koska väsymismurtuman ydintymisen vaihe on lyhyt verrattuna perusaineeseen.
2. Teräksen lujuus ei vaikuta kestoikään, vaan määräytyy nk. FAT-luokan mukaan.

Yksi vaurioitumisen perusedellytys on se, että rakenteeseen vaikuttaa särön ydintymiseen vaadittava ja sen kasvamisen mahdollistava jännitystilä. Se voi olla sisäisten tai ulkoisten jännitysten aikaansaama ja hyvinkin paikallinen.

Vauriomekanismin tunnistaminen

Vaurion tapahduttua on tärkeää pyrkiä tunnistamaan vauriomekanismi mahdollisimman nopeasti tai ainakin tehdä alustava arvio eli valistunut arvaus siitä, minkä tyyppisestä vauriosta on kysymys. Siinä vaiheessa tietenkään ei yleensä ole käytettävissä esim. murtopintojen analysointiin vaadittavia laitteita, vaan toimeen on tultava varsin yksinkertaisilla apuvälineillä. Tässä yhteydessä silmämääräinen tarkastus on yllättävän tehokas ja sillä voidaan saada selville paljon tapahtuneesta vauriosta ja sen luonteesta. Tämä edellyttää tietenkin sen, että tarkastusta tekevällä henkilöllä on käsitys erityyppisten murtopintojen makroskooppisista ominaispiirteistä.

Taulukko 1. Erityyppisten vaurioiden esiintyminen (Findlay & Harrison 2002).

Vauriomekanismi	Teollisuus	Ilmailu
Korroosio	29 %	16 %
Väsyminen	25 %	55 %
Hauras murtuma	16 %	-
Ylikuormitus	11 %	14 %
Korkean lämpötilan korroosio	7 %	2 %
SCC/korroosioväsyminen/HE	6 %	7 %
Viruminen	3 %	-
Kuluminen/eroosio	3 %	6 %

Taulukko 2. Teräsrakenteiden hitsien vauriosyyt (Somers & Pense 1994 mukailen).

Rakenne	Vaurioiden aiheuttaja				
	Suunnittelu ja mitoitus	Hitsausarvot	Materiaali	Hitsaus	Käyttöolosuhteet
Rakennukset (6 kpl)	17 %	33 %	83 %	17 %	-
Sillat (26 kpl)	31 %	19 %	35 %	46 %	19 %
Muut teräsrakenteet (13 kpl)	15 %	38 %	15 %	62 %	23 %

Ylikuormituksen aiheuttaman sitkeän murtuman tunnistaa helposti siitä, että siihen liittyy lähes poikkeuksetta pysyvää muodonmuutosta eli murtuman läheisyydessä on selvästi havaittavia muutoksia komponentin/rakenteen muodossa, kuvat 1 ja 2.

Hauraan murtuman taas tunnistaa alustavasti siitä, että siihen ei liity poikkipinnan ohentumista tai kuroutumista. Yleensä se etenee suoraan rakenteen läpi. Silmällä havaittavia makroskooppisia piirteitä ovat

säteittäisharjut (engl. radial ridges), jotka muodostavat viuhkakuvion (engl. fan-shaped pattern), kuva 3. Levyrakenteissa on usein murtuman etenemismerkkeinä ns. Chevron-merkit (”kersantin merkit”), kuva 4.

Haurasmurtuman pinta on karhea sitkeän murtuman murtopintaan verrattuna ja usein kimalteleva (väsymismurtumalla on silkkimäinen, tumma pinta).

Väsymisvaurion synnyssä voidaan erottaa väsymissärön ydintymisen, sen kasvu



Kuva 1. Vaurioitunut syöttökierputki.



Kuva 2. Vaurioituneita vaarnaruuveja.



Kuva 3. Haurasta murtopintaa S355J2 tyyppisessä rakenneteräksessä.



Kuva 4. ”Kersantin” merkkejä HEB-500 palkin murtopinnassa.

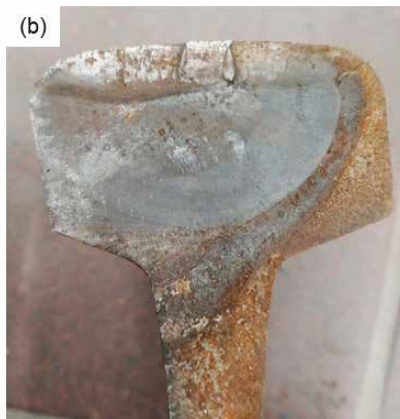
ja lopullinen murtuminen ylikuormittumalla, kun kuormituksia kantava poikkipinta-ala pienentynyt tarpeeksi. Väsymismurtuma on luonteeltaan hauraan kaltainen, koska plastinen muodonmuutos on pientä ja keskittyy aivan särön kärkeen. Murtuman eteneminen tapahtuu dislokaatioiden liikkeen välityksellä eli se on sitkeää. Loppumurtuma voi olla luonteeltaan sitkeä tai hauras olosuhteista riippuen.

Väsymismurtopinnalla on usein nähtävissä makroskooppisia piirteitä, joista voidaan päätellä etenemissuunta ja siten ydintymispaikka. Näitä ovat säteittäismerkit (engl. radial ledges), pysähtymismerkit, "rantajuovat" (engl. beach marks), kuva 5 a. Muita merkkejä ovat esim. hakasmerkit (engl. ratchet marks), joita voi esiintyä pyörötaivutusväsymismurtopinnalla, kuva 6.

Väsymismurtuma lähtee liikkeelle lähes poikkeuksetta kappaleen pinnalta siinä olevista lovista (pintavika, suuri pinnankarheus, kiilaura, ruuvin kierre jne.). Särön kasvaessa se tulee normaalijännityksen kontrolloimaksi, joten sen suunta muuttuu kohtisuoraksi vaikuttavaan normaalijännitykseen nähden, kuva 7. Kuvassa 8 nähdään henkilöauton murtunut kampiakseli, jossa väsymismurtuma on ydintynyt pinnassa olleeseen valmistusvikaan.



Kuva 5. Väsymismurtumia, a) meesauunin kannatinrullan akseli ja b) rataakseli.



Kuva 6. Hakasmerkkejä väsymismurtuman murtopinnassa.



Kuva 7. Vetojännitykset vaikuttavat kohtisuoraan särön etenemissuuntaan nähden.



Kuva 8. Murtunut kampiakseli. Nuoli osoittaa väsymismurtuman ydintymiskohtaan.

Vaurioanalyysin vaiheet

Vaurion tapahduttua riittävän monipuolinen taustatiedon kerääminen on ensiarvoisen tärkeää, jo yksinomaan lähtöoletusten oikeellisuuden varmistamiseksi. Selvitettäviä lähtötietoja ovat: materiaalitiedot (mieluiten aineostodistus), käyttöolosuhteet, epänormaalien käyttöolosuhteiden esiintymistodennäköisyys, vaurion esiintymistajuuus jne. Vauriopaikalla tulee ottaa riittävästi valokuva-aineistoa myöhempiä analysointia varten. Käytännössä tämä ei toteudu tässä laajuudessa kuin poikkeustapauksessa. Yleensä vaurioanalyysistä riittävästi ymmärtävä henkilö saapuu paikan päälle huomattavalla viiveellä ja pahimmassa tapauksessa ei ollenkaan.

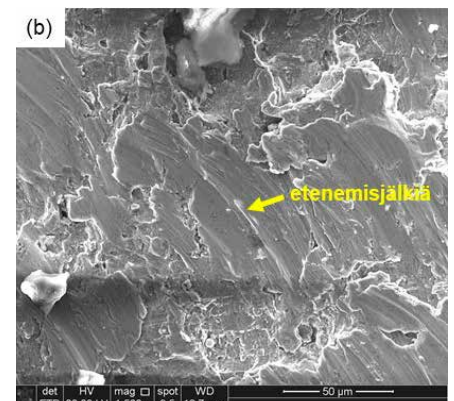
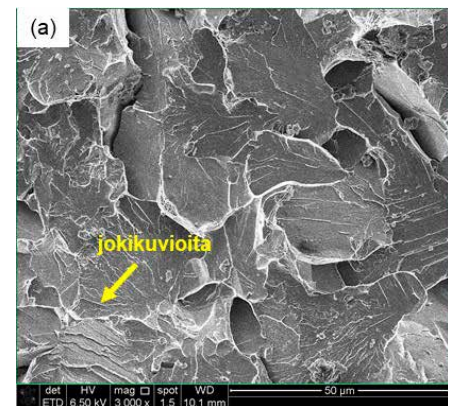
Kun vauriopaikalta on kerätty tarpeelliset näytteet, niin jatkotoimenpiteet siirtyvät yleensä vaurioanalyysiin erikoistuneisiin laboratorioihin. Näitä löytyy Suomessa tällä hetkellä reilut puolikymmentä. Laboratorioissa ensimmäisiä töitä ovat silmäämäräinen tarkastelu ja näytteiden valokuvaus laboratorio-olosuhteissa.

Murtopinnat ovat vaurioselvityksen kannalta suoranaista informaation runsaudensarvi. Murtopinnoilta nähdään vauriomekanismi

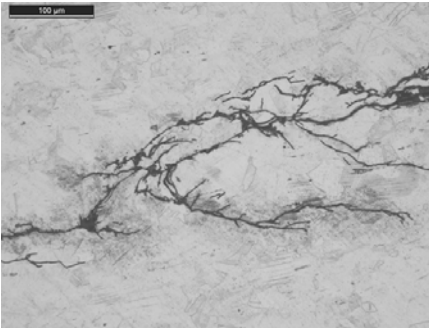
(sitkeä- vai haurasmurtuma, väsyminen, ylikuormitus jne.). Murtopintoja tulee siis kohdella huolella, niitä ei saa kolhia, ne eivät saa korrodoitua jne. Tosin useasti tilanne on se, että vaurionäytteet ovat "ruskettuneita" jo saapuessaan tutkittavaksi ja tällöin ensimmäinen toimenpide on niiden puhdistus jollain sopivalla menetelmällä. Pahimmassa tapauksessa murtopinnat ovat huolimattomalla menettelyllä ja suoranaishalla välinpitämättömyydellä saatettu sellaiseen kuntoon, että niistä on vaikeaa tai mahdotonta saada mitään irti.

Seuraavassa vaiheessa vaurionäytteitä tutkitaan eri menetelmillä. Yleensä murtopintoja tutkitaan elektronimikroskopian avulla ja mikrorakenteita valo- tai lasermikroskooppilla. Useat NDT-menetelmät ovat myös hyödyllisiä vaurioselvitysten yhteydessä. Näytteille voidaan tehdä myös mekaanista testusta, kuten kovuusmittauksia sekä veto- ja iskukokeita.

Murtopintatarkastelut muodostavat useassa vaurioselvityksessä tarkastelun tärkeimmän osa-alueen. Mikroskooppitarkastelu vahvistaa useimmiten vauriomekanismien. Pyyhkäisyelektronimikroskoopi (SEM tai FESEM) on murtopintatarkastelujen perustyökalu, jolla päästään riittävän suuriin suurennuksiin ja resoluutioon. Kuvassa 9 on esitetty esimerkkejä FESEM:illä kuvatuista murtopinnoista. Kuvassa 9 a nähdään haurasmurtuman murtopintaa, jossa on näkyvissä hauraalle lohkomurtumalle ty-



Kuva 9. Murtopintojen FESEM SEI -kuvia, a) lohkomurtuma ja b) väsymismurtuma.



Kuva 10. Jännityskorroosion (SCC) aiheuttama särö paperikoneen kuivausosan tuorevoiteluöljyputkessa.

pillisiä jokikuvioita ja kuvassa 9 b väsymismurtumalle ominaisia etenemisjälkiä (engl. striations).

Kuvassa 10 on esitetty esimerkki vaurionäytteen poikkipinnasta valomikroskooppilla otetusta kuvasta. Siinä nähdään kloridien aiheuttama, rakeiden läpi etenevä ja voimakkaasti haarova jännityskorroosiosärö ruostumattomalla teräksellä.

Poikkipinnanäytteitä tarkastellaan yleensä joko valomikroskooppilla tai elektronimikroskooppilla. Tarkoituksena on lähinnä saada tietoa lähinnä materiaalin mikrorakenteesta ja sen vaikutuksesta murtuman ydintymiseen, sen etenemiseen jne.

Vaurionäytteille tehdään myös kemiallisia analyysejä. Murtopinnoissa mahdollisesti olevia korroosiotuotteita analysoidaan tavallisimmin pyyhkäiselektronimikroskooppiin yhdistetyllä EDS- tai WDS-alkuaineanalysaattorilla. Teräksen kemiallinen koostumus määritetään tavallisesti esim. kipinäherätteisellä OES-analysaattorilla. Epäpuhtaudet, kuten fosfori ja rikki, vaikuttavat ratkaisevasti terästen ominaisuuksiin. Jos on syytä epäillä epäpuhdasta materiaalia, on se syytä tarkistaa kemiallisen koostumuksen analysoinnilla.

Tässä esiteltyn tutkimusmenetelmien lisäksi voidaan tehdä esim. simulointikoikeita ja erilaisia mallinnuksia. Mikäli vaurioselvityksen yhteenvetovaiheessa ei ole vielä täyttä selvyyttä vaurion syistä, voidaan painavista syistä ja suurten taloudellisten arvojen ollessa kyseessä turvautua vaurio-olosuhteita simuloiviin koejärjestelyihin. Tällaisia ovat esim. korroosiotestit mahdollisimman todennäköisissä ympäristöissä tai väsytyksokeet.

Viimeisessä vaiheessa tehdään tekninen raportti, jossa kootaan yhteen tutkimuksen eri osa-alueista koottu informaatio, sovitetaan kerätty tieto yhteen ja näin muodostuneen kokonaisnäkömyksen pohjalta muodostetaan johtopäätös vaurion syistä. Tuloksen onnistuminen riippuu tässä vaiheessa eniten teknisen raportin laatijan kokemuksesta ja harjaantumisesta. Työ muistuttaa hyvin paljon "salapoliisityötä", jossa tarvitaan monialaista syvällistä osaamista niin fyysikaalisen metallurgian, lujuusopin kuin standardien vaatimustenkin osalta.

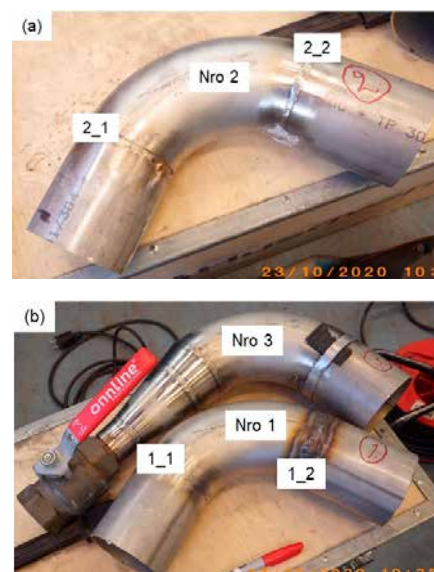
Esimerkki tehdystä vaurioselvityksestä

Vaurioselvitykset voidaan karkeasti jakaa kolmeen päätyyppiin:

1. Sisäiset tapaukset, joissa tilaaja haluaa selvitykset vaurion syistä lähinnä siksi, että saa jatkossa estettyä vastaavat vahingot. Usein halutaan myös parannussuosituksia sekä tarkastus- ja korjausohjeita.
2. Riitatapaukset, joissa tarvitaan puolueetonta lausuntoa vaurion syistä siihen liittyvien taloudellisten kysymysten selvittämiseksi.
3. Onnettomuustapaukset, joihin liittyvät selvitykset tehdään viranomaisten vaatimuksesta. Näissä poliisi- tai työsuojeluviranomaisten edellyttämässä selvityksissä välitön syy on yleensä muu kuin taloudellinen.

Käydään esimerkkinä läpi tyyppiä 1 ja 2 edustava, ns. "helppo tapaus", jossa on kyse uimahallin käyttöveden putkiinjan korroosiovauriosta. Se on samalla opettavainen tarina ruostumattomien terästen hitsauksen haasteista.

Tässä tapauksessa tutkittavaksi toimitettiin kolme päittäishitsattua 90°-putkikäyrää, kuva 11. Näyteputkista nro 1 ja 2 tutkittiin hitsit nro 1 ja 2. Seuraavat lähtötiedot olivat käytössä: putkimateriaalina oli käytetty standardin SFS-EN 10217-7 vaatimusten mukaan EN 1.4307 (X2CrNi18-9) austeniittista ruostumatonta terästä ($\varnothing = 88.9$ mm ja $t = 2.0$ mm) ja hitsauksessa käytetystä lisäaineesta ei ole tietoa. Putkisto oli vuotanut useammasta kohdasta ja vuodot olivat olleet kehähitsien alueella.



Kuva 11. Tutkittavaksi toimitetut näyteputket.

Näyteputkista leikattiin erikokoisia aihioita metallografisia tutkimuksia varten. Hitsin poikkileikkauksen mikrorakennetarkastelua varten näyteputkesta irrotettiin metallografisen näytteen aihio. Osa näytteistä kuumaletettiin Polyfast hartsiin, hiottiin, kiillotettiin mekaanisesti ja syövytettiin elektrolyttisesti 10 % oksaalihapon vesiliuoksessa ($I = 1.5$ A/cm², $t = 15 - 30$ s). Hitsien juuren puolella ollutta korroosiotuotetta analysoitiin Quanta 450 FEG -kenttäemissiopyyhkäiselektronimikroskoopin (FESEM) EDS-analysaattorilla. Hitsien poikkileikkauksia tutkittiin ja valokuvattiin Leica IDM 5000 käänteismikroskooppilla.

Silmämääräisellä tarkastuksella havaittiin, että näyteputken nro 1 kehähitsi 1_2 ja muutosvyöhyke olivat pahoin hapettuneita ja osin korroosiotuotteiden peittämiä. Kaikkien toimitetuissa näyteputkissa olleiden kehähitsien juurenpuoli oli samankaltainen. Hitsauksessa ei oltu käytetty kunnollista juurensuojausta eikä niille oltu tehty minkäänlaista jälkikäsitteilyä. Valkoinen väri viittaa juurensuojatadhan käyttöön. Korroosionkestävyyden varmistamiseksi hitsauksen yhteydessä pitäisi käyttää ensisijaisesti juurensuojakaasua (puhdas Ar tai esim. Formier-kaasu).

Kuvassa 12 on esitetty näyteputken nro 1 hitsin 1_2 juuren puolta, jossa näkyy selkeästi valkoista väriä ja se, että hitsi ei ole myöskään paikoin tunkeutunut kunnolla läpi. Tällaisen suojaamattoman ja jälkikäsittelemättömän hitsin korroosionkestävyys on huomattavasti huonompi kuin perusaineen ja riski erityisesti paikalliseen korroosioon (esim. pistekorrosio) on suuri.

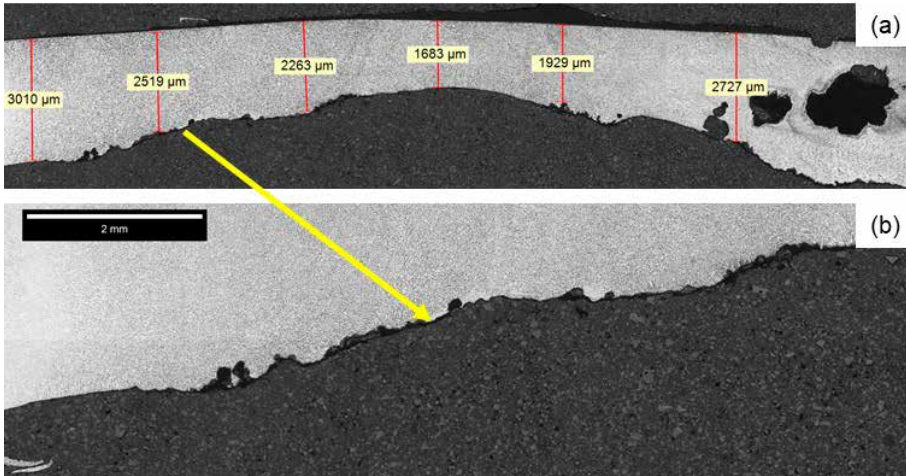


Kuva 12. Näyteputken nro 1 hitsin 1_2 juuren puoli.

Kuvassa 13 on esitetty näyteputken nro 2 hitsin 2_1 poikkileikkauksen mikrorakennetta. Kuvan perusteella korroosio on edennyt hitsin juuren puolella huomattavasti ja aineenpaksuus on pienimmillään enää luokkaa 1.7 mm.

Kehähitsien juuren puolella ollutta korroosiotuotetta analysoitiin FESEM-mikroskoopin EDS-alkuaineanalysaattorilla. Pintaan tehtiin satunnaisesti 60 kpl pisteanalysejä ja 60 kpl alueanalyysejä. Analyysien suurella lukumäärällä haettiin tilastollista luotettavuutta.

Korroosiotuotteessa huomiota kiinnittivät korkeat pii-, titaani-, kalkki- ja mangaanipitoisuudet (Si, Ti, Ca ja Mn). Juurensuojatadhan ohjeellinen kemiallinen koostumus on



Kuva 13. Näyteputken nro 2 kehähitsin 2_1 poikkileikkauksen mikrorakennetta.

seuraava: 35-45% SiO₂, 25-35% Ca(OH)₂, 10-20% TiO₂ ja 9-10% MnO, mikä selittää näiden alkuaineiden korkeat pitoisuudet. Näiden ei pitäisi kuitenkaan aiheuttaa korroosiota. Sen sijaan kloridit, fluoridit ja rikki voivat aiheuttaa korroosiota etenkin silloin, kun ruostumattoman teräksen passiivikalvo on vaurioitunut.

Taulukossa 3 on annettu poikkileikkauksesta analysoidun korroosiotuotteen EDS-analyysitulosten keskiarvot. Taulukon n-% tarkoittaa sitä, kuinka monesta alueesta ko. alkuainetta on löytynyt. Taulukon perusteella syöpyneen hitsiaineen korroosiotuotteessa on korroosiota aiheuttavia alkuaineita eli fluoria (F) ja klooria (Cl).

Juuren puolella hitsien pinnassa oli runsaasti korroosiotuotteita ja niissä oli havaittavissa materiaalihäviöitä sekä pistekorroosion aiheuttamia kuoppia. Korroosio oli ydintynyt hapettuneeksi jääneeseen hitsiin, mikä on hyvin todennäköistä jo lievästäkin korroosiotuotteesta aiheuttavissa olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että teräksen pinnassa ei ole sitä normaalisti suojaavaa passiivikalvoa. Hitsin pinnan hapettuneessa puutteellisen juurensuojauksen vaikutuksesta sen alapuolelle muodostuu kromiköyhä vyöhyke, jonka korroosionkestävyyden on perusainetta huomattavasti heikompi.

Käyttövedessä olleet kloridit ja fluoridit ovat todennäköisimmin aiheuttaneet putkistossa ilmenneet korroosiovauriot. Rikki voi aiheuttaa myös korroosiota, mutta yleensä se edellyttää tiettyntyyppisten mikrobien läsnäoloa. Vesijohtoverkostoon muodostuvissa biofilmeissä voi olla eri tyyppisiä mikrobeja, jotka aiheuttavat korroosiota. Tässä tapauksessa korroosiotuotteista ei löytynyt rikkiä.

Kehähitsien juuren puolen korroosio on selvä osoitus siitä, että juurensuojatama ei anna riittävää suojaa hitsin hapettumiselle ja näin ollen sille olisi tehtävä mekaaninen puhdistus ja kemiallinen käsittely (peittaus ja passivointi) hitsin korroosionkestävyyden varmistamiseksi, mikä lienee putkijohdeissa mahdoton tehtävä.

Edellä esitetyn perusteella voidaan todeta, että uimahallin käyttövesiputkiston korroosiovaurioiden juurisyytä oli hitsauksessa käytetty puutteellinen juurensuojaus ja hitsien juurenpuolen jälkikäsittelyn puuttuminen. Korjaussuositukseksi annettiin putkiston uusiminen ainakin siltä osin kuin siinä on hapettuneita ja jälkikäsittelymättömiä hitsejä.

Vaurioanalyysin haasteet

Artikkelin kirjoittaja on tehnyt vaurioanalyysijä noin viidentoista vuoden ajan, viime vuonna 5-10 kpl vuosivauhdilla. Kaikki tässä artikkelissa esitetyt kuvat ovat peräisin noista tehdyistä vaurioanalyysistä.

Näissä selvityksissä kertyneiden kokemusten perusteella voidaan todeta, että vaurioanalyysin onnistumisen kannalta selvästi suurimmat haasteet ovat:

1. Puutteelliset lähtö- ja historiatiedot
2. Ei-edustavat tai korroosion pilaamat vaurionäytteet
3. Puutteelliset tai väärät tiedot käyttöolosuhteista
4. Puutteet vaurioanalyysin tekijän prosessi- ja laitetietämyksessä.

Näistä kolme ensimmäistä johtuvat lähinnä vaurionäytteet lähettäneen organisaation riittämättömästä tiedosta vaurioanalyysiprosessiin liittyen eli siitä, että ei tiedetä, mitä edellä esitetyn mukaisesti pitäisi ottaa huomioon vaurionäytteitä otettaessa ja akuuttia tilanneselvitystä tehtäessä. Viimeinen tietysti riippuu lähinnä vaurioanalyysin tekijän kyvystä opiskella ja omaksua uutta tietoa. Yhden haasteen tähän liittyen muodostaa vaurioituneeseen komponenttiin liittyvän teknisen dokumentaation puutteellisuus tai puuttuminen, mikä on varsin tavallista kolmannen osapuolen toimittamien laitteiden ja prosessien kyseessä ollessa.

Suurella kuvassa tarkasteltuna tämä merkitsee sitä, että suomalaisen teollisuuteen koulutettaville insinööreille pitäisi antaa opetusta aihealueeseen liittyen. Kun opetuksen tarjontaa lähtee selvittämään Internetin kautta, niin hakusanalla "vaurioanalyysi, kurssit" tulee vastaan lähinnä ajoneuvoalaan liittyviä koulutuksia. Tilannehan pitäisi olla se, että jokaisella korkeakoululla pitäisi olla tekniikan alalle tarjolla ja mieluiten pakollisena ammattiaineena vaurioanalyysin perusteiden opettamiseen liittyvä kurssi. Kun Googlen hakukenttään vaihtaa sanan "metallien vauriomekanismit", niin saadaan seuraava tulos:

- Oulun yliopisto, "465113S Metallien vauriomekanismit", 5 op
- Metropolia AMK, "TQ00AB05 Materiaalien vaurioitumismekanismit", 3 op

Eli näyttäisi vahvasti siltä, että kurssitarjontaa ei juurikaan ole, mikä tietysti omalta osaltaan heikentää suomalaista insinööriosaamista. Tässä meillä on haastetta tuleville vuosille!

Lähteet

- Apsten G. 2017. Causes of Structural Failures with Steel Structures. Internet julkaisu. Haettu 9.10.2021. Ladattavissa <https://www.stbk.se/1662c-paper34-iabse-2017-01-24.pdf>.
- Somers B.R., Pense A. W. 1994. Welding Failure Analysis. Materials Characterization. Vol. 33. 295-309. Doi:10.1016/1044-5803(94)90049-3.

Timo Kauppi, IWE, IWI-C, TkL
Oulun yliopisto / Lapin ammattikorkeakoulu
timo.a.kauppi@oulu.fi

Taulukko 3. Näyteputken nro 2 kehähitsin 2_1 poikkileikkauksen korroosiotuotteiden EDS-analyysien keskiarvot.

Alkuaine	O-K	F-K	Na-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Ni-K
ka	5.52	0.85	2.34	5.77	1.8	0.558	11.59	15.23	8.23	5.83
n (kpl)	60	9	12	60	15	39	53	60	60	48
n (%)	100 %	15 %	20 %	100 %	25 %	65 %	88 %	100 %	100 %	80 %