

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. & Nykänen, A. 2022. Austeniittis-ferriittisten ruostumattomien terästen eli duplex-terästen hitsauksen haasteita. Hitsaustekniikka. 75 (2), 14-20.

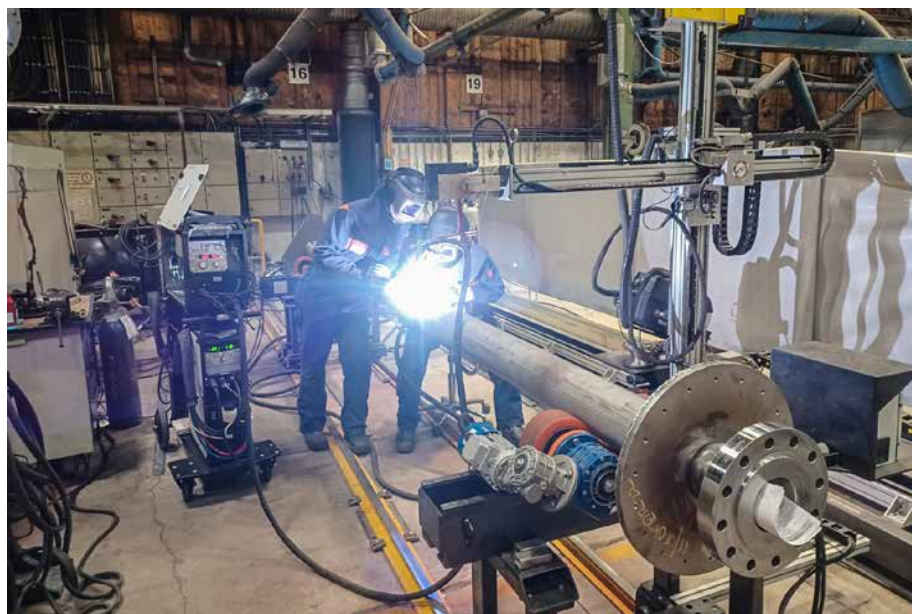


Austeniittis-ferriittisten ruostumattomien terästen eli duplex-terästen hitsauksen haasteita

■ Timo Kauppi ja
Antti Nykänen



Austeniittis-ferriittisiä ruostumattomia teräksiä eli duplex-teräksiä käytetään nykyisin yllättävän paljon, koska niillä on kaksi ainutlaatuista ominaisuutta: Erittäin hyvä korroosionkestävyys tekee niistä hyvinkin aggressiivisiin olosuhteisiin soveltuvan materiaalin ja korkea lujuus mahdollistaa korkeaseostaisia austeniittisiä ruostumattomia teräksiä huomattavasti keveämmät rakenteet. Nii- den hitsauksessa kuitenkin pitää tuntea tietyt perusasiat, jotta välttyään mm. yllättäviltä korroosio-ongelmilta käyttökohteissa.



Ensimmäiset kaupalliset ferriittis-austeniittiset ruostumattomat teräokset kehitettiin vuonna 1930 Ruotsissa Avestan terästehtaalla hyvää pistekorroosionkestävyyttä vaativiin käyttökohteisiin (Outokumpu 2023). Alkuaikoina ferriitin osuus rakenteessa oli noin 80 % ja loput austeniittia, mistä syystä teräksiä kutsuttiin ferriittis-austeniittisiksi teräksiksi. Nimitys ferriittis-austeniittinen ja austeniittis-ferriittinen tulevat teräksen mikrorakenteesta, jossa on tilakeskistä kuutiollista (tkk) ferriittia ja pintakeskistä kuutiollista (pkk) austeniittia. Nykyisin näiden ruostumattomien terästen mikrorakenteessa on ferriittinen matriisi, jossa on noin 45-60 % austeniittia, mistä syystä teräksiä kutsutaan nykyisin austeniittis-ferriittisiksi teräksiksi ja usein lyhyesti duplex-teräksiksi. Tällainen rakenne saadaan, kun teräkselle tehdään liuotusherkutus lämpötilassa 1020-1100 °C ja nopea jäähdytys huoneenlämpötilaan. Näissä teräksissä on aina korkea kromipitoisuus ja yleensä myös molybdeenin, typpi- ja kupariseostus.

Euroopassa on standardisoitu 15 korroosionkestävää ja 2 tulenkestävää duplex-terästä. Standardiin SFS-EN 10028-7:2016 (Painelaiteteräokset. Levytuotteet. Osa 7: Ruostumattomat teräokset) sisältyy yhdeksän ruostumatonta duplex-terästä, taulukko 1. Yleinen levyterässtandardi SFS-EN 10088-2:2014 (Ruostumattomat

teräokset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot) sisältää puolestaan 12 duplex-teräslajia.

Amerikkalainen ASTM A240/A240M (Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications) määrittelee kemiallisen koostumuksen vaatimukset puolestaan 17 eri duplex-laadulle, taulukko 2.

Standardin SFS-EN 10028-7:2016 vaatimusten mukaisten ruostumattomien duplex-terästen kromipitoisuudet vaihtelevat välillä 19,5-26,0 %, nikkelipitoisuudet välillä 1,0-8,0 % ja molybdeenipitoisuudet välillä 0,1-4,5 %. Niiden myötölujuudet vaihtelevat välillä 400-550 MPa. Käyttölämpötila-alue on yleensä välillä -50...+250 °C.

Ruostumattomien duplex-terästen hitsattavuus

Kun puhutaan metallisten materiaalien hitsauksesta, on standardisarja SFS-EN 1011 (Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset) ehdottoman tärkeä ja hyvä tiedonlähde. Standardisarjan kolmas osa SFS-EN 1011-3:2018 (Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 3: Ruostumattomien terästen kaari-

Taulukko 1. Standardissa SFS-EN 10028-7:2016 olevien austeniittis-ferriittisten ruostumattomien terästen (duplex-terästen) kemialliset koostumukset.

Teräksen nimike		Paino-%									
Nimike	Numero-tunnus	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu
X2CrNiN22-2	1.4062	0,030	1,00	2,00	0,040	0,010	21,5 - 24,0	0,45	1,00 - 2,90	0,16 - 0,28	-
X2CrNiN23-4	1.4362	0,030	1,00	2,00	0,035	0,015	22,0 - 24,5	0,10 - 0,60	3,5 - 5,5	0,05 - 0,20	0,10 - 0,60
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	0,04	1,00	4,0 - 6,0	0,040	0,015	21,0 - 22,0	0,10 - 0,80	1,35 - 1,90	0,20 - 0,25	0,10 - 0,80
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	0,030	1,00	4,0 - 6,0	0,035	0,030	19,5 - 21,5	0,10 - 0,60	1,5 - 3,5	0,05 - 0,20	1,00
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	0,030	1,00	2,00	0,035	0,015	21,0 - 23,0	2,50 - 3,5	4,5 - 6,5	0,10 - 0,22	-
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	0,030	0,70	2,50 - 4,0	0,035	0,005	23,0 - 25,0	1,00 - 2,00	3,0 - 4,5	0,20 - 0,30	0,10 - 0,80
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	0,030	0,70	2,00	0,035	0,015	24,0 - 26,0	3,0 - 4,0	6,0 - 8,0	0,20 - 0,30	1,00 - 2,50
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	0,030	1,00	2,00	0,035	0,015	24,0 - 26,0	3,0 - 4,5	6,0 - 8,0	0,24 - 0,35	-
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	0,030	1,00	1,00	0,035	0,015	24,0 - 26,0	3,0 - 4,0	6,0 - 8,0	0,20 - 0,30	0,50 - 1,00

Taulukko 2. Standardissa ASTM A240/A240M – 05a olevat austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset (duplex-teräkset).

UNS nimike	tyyppi	vastaava EN	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	muut
S31200	-	-	0,03	2,00	1,00	24,0–26,0	5,5–6,5	1,20–2,00	0,14–0,20	-	-
S31260	-	-	0,03	1,00	0,75	24,0–26,0	5,5–7,5	2,5–3,5	0,10–0,30	0,20–0,80	W 0,10–0,50
S31803	-	-	0,03	2,00	1,00	21,0–23,0	4,5–6,5	2,5–3,5	0,08–0,20	-	-
S32001	-	-	0,03	4,0–6,0	1,00	19,5–21,5	1,00–3,00	0,60	0,05–0,17	1,00	-
S32003	-	-	0,03	2,00	1,00	19,5–22,5	3,0–4,0	1,50–2,00	0,14–0,20	-	-
S32101	-	1.4162	0,04	4,0–6,0	1,00	21,0–22,0	1,35–1,70	0,10–0,80	0,20–0,25	0,10–0,80	-
S32205	2205	1.4462	0,03	2,00	1,00	22,0–23,0	4,5–6,5	3,0–3,5	0,14–0,20	-	-
S32304	2304	1.4362	0,03	2,5	1,00	21,5–24,5	3,0–5,5	0,05–0,60	0,05–0,20	0,05–0,60	-
S32506	-	-	0,03	1,00	0,90	24,0–26,0	5,5–7,2	3,0–3,5	0,08–0,20	-	W 0,05–0,30
S32520	-	1.4507	0,03	1,50	0,80	24,0–26,0	5,5–8,0	3,0–4,0	0,20–0,35	0,50–2,00	-
S32550	255	1.4507	0,04	1,50	1,00	24,0–27,0	4,5–6,5	2,9–3,9	0,10–0,25	1,50–2,50	-
S32750	2507	1.4410	0,03	1,20	0,80	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	0,24–0,32	0,50	-
S32760	-	1.4501	0,03	1,00	1,00	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–4,0	0,20–0,30	0,50–1,00	W 0,50–1,00
S32900	329	(1.4480)	0,08	1,00	0,75	23,0–28,0	2,0–5,00	1,00–2,00	-	-	-
S32906	-	1.4477	0,03	0,80–1,50	0,50	28,0–30,0	5,8–7,5	1,50–2,60	0,30–0,40	0,80	-
S32950	-	-	0,03	2,00	0,60	26,0–29,0	3,5–5,2	1,00–2,50	0,15–0,35	-	-
S39274	-	-	0,03	1,00	0,80	24,0–26,0	6,0–8,0	2,5–3,5	0,24–0,32	0,20–0,80	W 1,50–2,50

hitsaus) käsittelee ruostumattomien terästen kaarihitsausta ja sen liite C austeniittis-ferriittisiä ruostumattomia teräksiä eli duplex-teräksiä. Standardi SFS-EN 1011-3 jakaa austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset eli duplex-teräkset seostuksensa perusteella kolmeen ryhmään:

1. Vähäseosteiset duplex-teräkset, esim. EN 1.4362 (X2CrNiN23-4). Näiden terästen pääkäyttökohde on tavanomaisten austeniittisten ruostumattomien terästen korvaaminen silloin, kun nämä teräkset kärsivät jännityskorroosiosta. Teräksistä käytetään myös nimitystä "Lean-duplex".
2. Keskiseosteiset duplex-teräkset, esim. EN 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3). Näitä teräksiä käytetään yleisteräksinä pääasiassa kemian ja petrokemian teollisuudessa sekä offshore-teollisuudessa.
3. Runsasseosteiset duplex-teräkset, esim. EN 1.4410 (X2CrNiMoN25-7-4). Nämä teräkset sisältävät enemmän kromia, molybdeenia ja tyyppä kuin vähemmän seostetut duplex-teräkset. Tästä syystä näitä teräksiä käytetään vaikeissa korroosioympäristöissä.

Ruostumattomien duplex-terästen hitsattavuutta on kehitetty optimoimalla austeniitin ja ferriitin suhdetta ja lisäämällä tyyppiseostus. Vaara rakeenkasvusta tai liian suuresta ferriitin määrästä muutosvyöhykkeellä hitsauksessa on pieni. Hitsausta ilman lisäainetta ei suositella, ellei liittoksele tehdä hitsauksen jälkeistä liuotushehkutusta ja nopeaa jäähdystystä huoneenlämpötilaan. Hitsaus ilman lisäainetta ja jälkilämpökäsittelyä voi antaa tyydyttävät ominaisuudet hitsissa, jos käytetään tyyppä sisältävää suojakaasua edistämään austeniitin muodostumista. (SFS-EN 1011-3 2018, s. 18 ja 19).

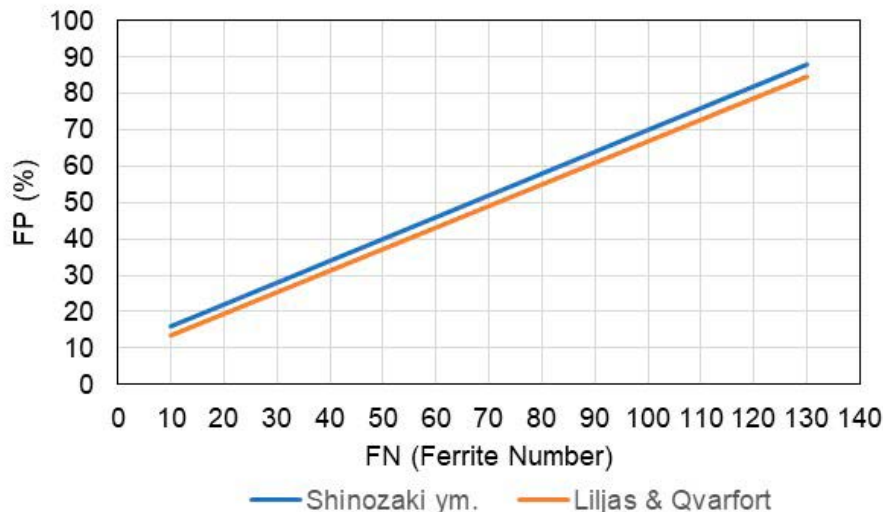
Ruostumattomien duplex-terästen suuren lujuuden takia siltahitsien olisi sijaittava lähekkäin. Esikuumennus ei ole tarpeen. Hitsauksessa lämmöntuonnin pitää olla tiettyjen rajojen sisällä. Liian pienen lämmöntuonti johtaa suureen jäähtymisnopeuteen, minkä tuloksena ferriittipitoisuus voi tulla korkeaksi. Liian suuresta lämmöntuonnista voi seurata puolestaan metallien välisten yhdisteiden erkautumisia. Vähä- ja keskiseosteisten duplex-terästen hitsauksessa sopiva lämmöntuonti on yleensä 0,5-2,5 kJ/mm ja välipalko-

lämpötila alle 250 °C. Runsasseosteisten duplex-terästen lämmöntuonti on yleensä 0,2-1,5 kJ/mm ja välipalkolämpötila välillä 100-150 °C.

Hitsin kovuudelle ei anneta yleensä vaatimuksia. Kuitenkin käytettäessä keski- ja runsasseosteisia duplex teräksiä rikkivetyolosuhteissa niin hitseille asetetaan usein seuraavat kovuusrajat, max. 282 HV 30 (kokeessa käytetty kuorma) keskiseosteisille ja max 318 HV 30 runsasseosteisille duplex-teräksille. Hitsien iskutkeys on matalampi kuin perusaineen sitkeys, mutta yleensä riittävä. Iskutkeyteen vaikuttavat pääasiassa hitsiaineen ferriittipitoisuus, hitsausprosessi ja lisäaine.

Ferriittipitoisuus

Ruostumattomien duplex-terästen korroosionkestävyyteen vaikuttavat niiden mikrorakenne ja kemiallinen koostumus. Teräksiä käytetään yleensä niiden hyvän pistekorroosion- ja jännityskorroosionkestävyyden takia. Tärkeätä on käyttää sellaisia perusaineita ja lisäaineita, jotka antavat hyväksyttävän austeniitti/ferriittitasapainon sekä muutosvyöhykkeelle että hitsiaineeseen. Hyväksyttävät ominaisu-



Kuva 1. Ferriittiluvun (FN) ja ferriitin %-pitoisuuden (FP) välinen yhteys.

det saadaan yleensä hitseihin, kun ferriittipitoisuus on 30-100 FN.

Painesäiliöiden tuotestandardissa SFS-EN 13445-4:2021 (Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 4: Valmistus) on myös vaatimukset ferriittipitoisuudelle, 30-70 % ferriittipitoisuus. Ferriittipitoisuus pitää mitata metallografisin menetelmin ja se koskee hitsiainetta sekä muutosvyöhykettä. Se pitää testata myös menetelmäkokeessa.

Ferriittipitoisuus voidaan ilmoittaa ferriittilukuna (FN, Ferrite Number) tai ferriitin %-osuutena (FP, Ferrite Percent). Näiden välinen riippuvuus on useasti epämääräinen ja riippuu mm. teräksen mikrorakenteen tyypistä. Koteckin kirjallisuusselvityksessä esitetään ruostumattomille duplex-teräksille kaksi toisistaan hieman poikkeavaa kaavaa:

- (Shinozaki ym.)
- (Liljas & Qvarfort)

Kuvasta 1 nähdään, miten ferriitin osuus FP riippuu FN luvusta esitetyillä kaavoilla laskettuna. Käytännössä on tärkeää, että mittaus tehdään vaadittavassa yksikössä. Mittalaitteissa voidaan yleensä valita yksikkö, joka näytetään tuloksena ja esim. Ferritscope FMP30 voi näyttää tuloksen FN-lukuna tai ferriitin %-osuutena FP.

Ferriittipitoisuuden mittaamiseen liittyy kansainvälinen standardi EN ISO 8249 (Welding. Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel weld metals). Se käsittelee ferriittiluvun määrittämistä ja siitä syystä FN lukua tulisi käyttää, kun esitetään vaatimuksia hitsien ferriittipitoisuudelle.

Käytännön haasteita

Kuvassa 2 nähdään syöpymien aiheuttamia näyttämiä 3 mm paksusta X2CrNi-MoN25-7-4 (EN 1.4410) teräksestä eli superduplex-teräksestä tehdystä akselin vuorauksessa. Vuorauslevy oli mankeloi-



Kuva 2. Näyttämiä EN 1.4410 superduplex-teräksestä tehdystä akselin vuorauksessa.

tu työkaluilla, joilla oli käsitelty hiiliteräksiä. Ensimmäisten syöpymien korjauksen jälkeen seuraavassa tarkastuksessa niitä löytyi lisää. Vierasuoste painautuu teräksen pintaan tietysti sitä syvempään ja tiukempaan, mitä suurempi on mankeloinnista aiheutuva pintapaine. Koska ruostumattomia duplex-teräksiä käytetään erittäin aggressiivisissa olosuhteissa, korostuvat pinnan puhtausvaatimukset.

Kyseessä on asia, joka otetaan esille yleensä aina ruostumattomia teräksiä yleisesti käsittelevissä koulutuksissa. Se on myös hyvä esimerkki ilmiöstä, jonka mer-

kitystä voi olla haastava ymmärtää ennen kuin näkee sen aiheuttamia korroosio-ongelmia. Standardi SFS-EN 1011-3 kertoo asiasta mm. seuraavaa:

"Ruostumattoman teräksen valmistukseen käytettävät tuotantotilat erotetaan muista tuotantotiloista. Ruostumaton teräs pidetään erillään haitallista materiaaleista, kuten lyijystä, sinkistä, kuparista, seostamattomasta teräksestä jne. Muovaavat työkalut puhdistetaan haitallisista aineista ennen käyttöä. Voiteluaineet yms. puhdistetaan huolellisesti työn jälkeen työkalupileiden pinnoilta. Ruostumattomalle teräkselle saadaan käyttää vain sellaisia työkaluja, jotka on tarkoitettu sille."

Selkeitä käytännön neuvoja siis, joita soveltamalla kuvan 2 kaltainen ongelma on vältettävissä.

Osa kuvan 2 näyttämistä sijaitti vuorauslevyissä olleessa kehähitsissä. Hitsaus oli tehty TIG:llä, mutta lisäainetta ei ollut käytetty ollenkaan tai hyvin vähäisesti. Tästä standardin SFS-EN 1011-3 liitteessä C todetaan:

"Hitsausta ilman lisäainetta ei suositella, ellei liitokselle tehdä hitsauksen jälkeistä liuotushehkutusta ja nopeaa jäähdytystä huoneenlämpötilaan. Hitsaus ilman lisäainetta ja jälkilämpökäsittelyä voi antaa tyydyttävät ominaisuudet hitsissä, jos käytetään tyyppiä sisältävää suojakaasua edistämään austeniitin muodostumista."

Tämä johtuu siitä, että hitsiin tulee perusainetta selvästi korkeampi ferriittipitoisuus ja sen takia hitsisulassa voi tapahtua typenkatkoa (mikäli suojakaasussa ei ole tyyppiä), mikä heikentää korroosio-ominaisuuksia. Hitsaukseen käyttäen lisäainetta standardin SFS-EN 1011-3 liitteessä C on annettu seuraava suositus:

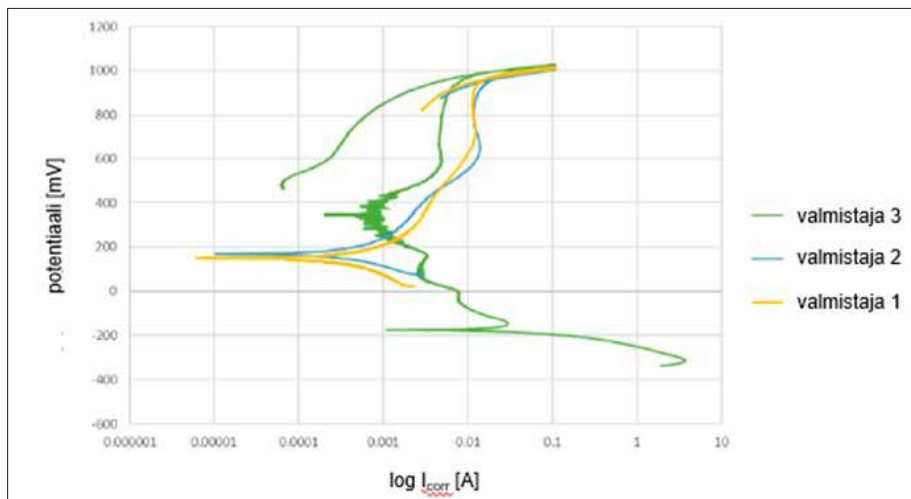
"Jotta hitsiaineeseen saadaan oikea mikrorakenne, käytettävän lisäaineen pitää olla yliseostettu nikkelillä. Tällaisella koostumuksella voidaan eliminoida hitsauksen jälkeisen nopean jäähtymisen ja pohjapalossa tapahtuvan suuren sekoittumisen vaikutukset."

Korroosio on pienestä kiinni

Harvalla on käsitystä siitä, miten hitsausprosessi voi vaikuttaa duplex-terästen hit-

Taulukko 3. Kolmen valmistajan duplex-hitsien korroosioarvoja.

Valmistaja	teräs		PRE	testaus- lämpötila [°C]	OCP [V]	korroosio- nopeus mm/a
1	1.4362	2304	26	50	-0.13	0.0081
2	1.4362	2304	26	50	-0.03	0.0021
3	1.4362	2304	26	50	0.23	0.0199
1	1.4410	2507	43	70	0.12	0.0045
2	1.4410	2507	43	70	-0.23	0.2286
3	1.4410	2507	43	70	0.16	0.0045



Kuva 3. EN 1.4410 super-duplex-teräksen päittäishitsien potentiodynaamiset polarisaatiokäyrät. (Nykänen 2023)

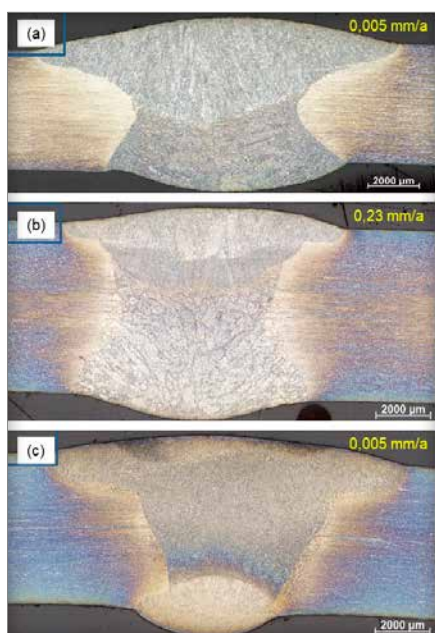
sattavuuteen. Standardissa SFS-EN 1011-3 todetaan tähän liittyen seuraavasti:

”Ruostumattomien duplex-terästen hitsaukseen soveltuvat kaikki standardissa SFS-EN 1011-1 luetellut hitsausprosessit. Hitsausprosesseja, joissa ei yleensä käytetä lisäainetta tai joiden yhteydessä hitsin jäähtymisnopeus on hyvin suuri, esim. plasma-, laser-, elektronisuihku- ja vastushitsaus, voidaan käyttää ainoastaan erityistoimenpitein.”

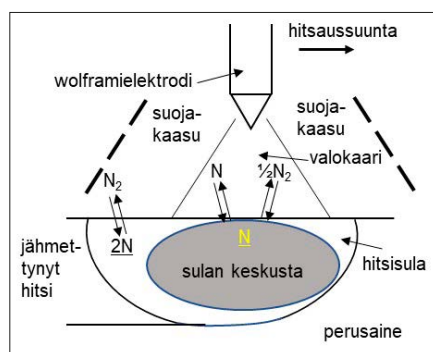
Taulukossa 3 on annettu kolmen valmistajan vähäseosteisen duplex-teräksen EN 1.4362 (2304) ja runsasseosteisen duplex-teräksen EN 1.4410 (2507) teräsiin hitsaamista päittäishitsioksista 0,2 % NaCl-liuoksessa mitattuja korroosiopotentiaaleja (OCP) ja mitatuista potentio-

dynaamisista polarisaatiokäyristä ekstrapoloituja korroosionopeuden arvoja. Kun korroosionopeus on alle 0,1 mm vuodessa (0,1 mm/a), niin sitä pidetään pienenä ja materiaalia korroosionkestävänä tutkitussa olosuhteessa (Outokumpu 2015). Yhdessä tapauksessa (valmistaja nro 2, EN 1.4410) korroosionopeus on huomattavasti suurempi eli n. 0,23 mm/a.

Näytteen, jonka laskettu korroosionopeus oli suurin eli valmistajan nro 2 EN 1.4410 hitsissä oli havaittavissa korroosiota hitsissä ja sularajan vieressä lämpövyöhykkeessä. Kuvassa 3 nähdään näytteistä ajatut potentiodynaamiset polarisaatiokäyrät. Kuvan perusteella valmistajan nro 3 hitsin käyrä poikkeaa selvästi kahdesta muusta. Kuvassa 4 on esitetty kuvia testattujen päittäishitsien mikrorakenteista. Kuvien perusteella valmistajan nro 2 hitsissä on karkea jäähdytysrakennne mikä viittaa siihen, että hitsauksessa on käytetty suurta lämmöntuontia. Käytetty lämmöntuonti on vaikuttanut heikentävästi hitsin korroosionkestävyyteen, mikä on yhteneväinen tulos standardin SFS-EN 1011-3 liitteen C suositusten kanssa. Tutkittu teräs EN 1.4410 (X2CrNiMoN25-7-4) on runsasseosteinen dup-



Kuva 4. Taulukossa 3 testattujen super-duplex-teräksen EN 1.4410 päittäishitsien mikrorakenteita: a) valmistaja nro 1, b) valmistaja nro 2 ja c) valmistaja nro 3 sekä vastaavia korroosionopeuksia mm/a (mm/vuosi). (Nykänen 2023)

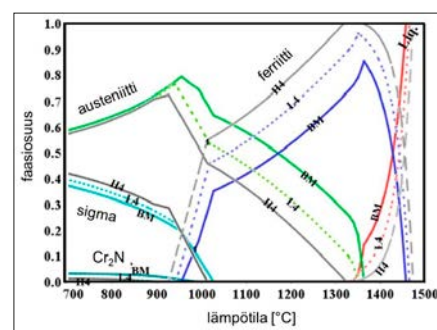


Kuva 5. Periaatekuva typen desorptiosta (typenkatoa) sulattavassa TIG-hitsauksessa (prosessi 142) Kuwana ym. mukaan. (Du Toit 2001, muokattu)

lex-teräs, jolle standardin SFS-EN 1011-3 mukaan lämmöntuonti saa vaihdella välillä 0,2-1,5 kJ/mm. Useassa tutkimuksessa on havaittu, että hidas jäähtyminen alentaa korroosiopotentiaalin (E_{corr}) ja pistekorroosiopotentiaalin (E_p) arvoja eli heikentää korroosionkestävyyttä (Cronemberger ym. 2015; Paulraj & Garg 2016; Gupta ym. 2018). Alentunut korroosionkestävyys voidaan selittää typenkadolla, jota tapahtuu helposti hitsattaessa TIG:llä ja käytettäessä suojakaasuna puhdasta argonia.

Typenkatoa hitsisulasta tapahtuu pääasiassa siinä vaiheessa, kun sula alkaa jäähmettyä ja typen liukoisuus teräkseen pienenee merkittävästi. Tällöin typpeä siirtyy sulasta ympäröivään atmosfääriin kuvassa 5 esitetyn periaatteen mukaisesti. Pintaan nousevien atomien vapautumista aineen pinnalta kutsutaan desorptioksi, jota siis typenkato ilmiönä on. Ajava voima typen desorptiolle tulee siitä, että liukoisuuden pienentyessä merkittävästi ferriittisenä jäähmettyvässä sulassa atomaarinen typpi (N) pyrkii siirtymään ympäröivään atmosfääriin typpikaasumolekyylinä (N_2). Kun suojakaasuna käytetään puhdasta argonia, niin ajava voima on suuri. Tyypiseosteisella suojakaasulla tilanne on tietysti toinen, koska siinä oleva typpi pienentää desorptiota ajavaa voimaa ja näin ollen jäähmettyvässä hitsissä ei tapahdu typenkatoa.

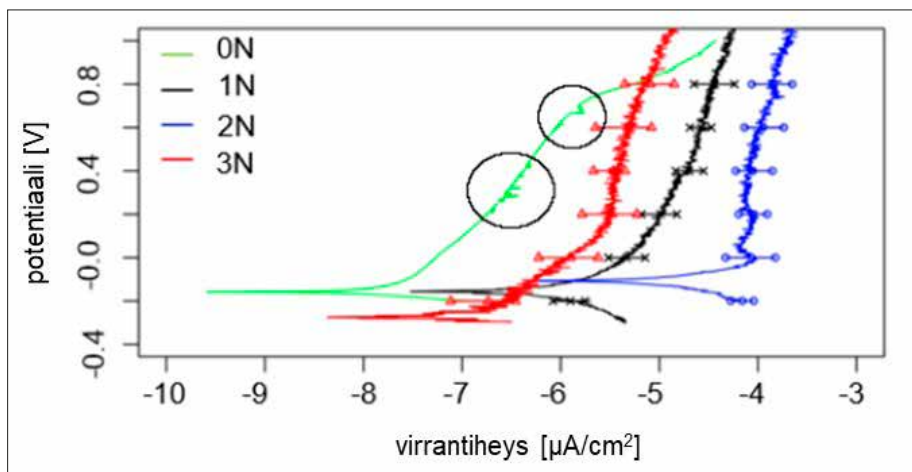
Perussy typenkatoon on hitsin jäähdytymisessä syntyvässä mikrorakenteessa. Kuvasta 6 nähdään, kuinka lämmöntuonti vaikuttaa jäähdytymisessä syntyvään ferriitin määrään. Korkealla lämmöntuonnilla ($Q = 0,87$ kJ/mm) jäähdytyneen hitsin mikrorakenne on täysin tai lähes täysin ferriittinen pitkään jäähtymisen alkaessa. Typen liukoisuus ferriittiin on korkeissa lämpötiloissa luokkaa 0,05 % ja Hosseinin ym. tutkimuksen mukaan typenkato oli pienellä lämmöntuonnilla ($Q = 0,37$ kJ/mm) 0,11 % ja suurella lämmöntuonnilla ($Q = 0,87$ kJ/mm) 0,18 %. Jos korroosionkestävyyttä arvioidaan PRE indeksin avulla, laskee se typenkadon johdosta 3,3-5,4 yksikköä eli merkittävästi.



Kuva 6. Lämpötilan vaikutus eri faasien osuuteen EN 1.4410 super-duplex teräksen perusaineessa (BM) ja hitsissä lämmöntuonneilla $Q = 0,37$ kJ/mm (L4) ja $Q = 0,87$ kJ/mm (H4). (Hosseinin ym. 2016, muokattu)



Kuva 7. Pahoin syöpynt super-duplex EN 1.4410 teräksen kehähitsi.



Kuva 8. Tribokorroosiokokeissa rekisteröityjä polarisaatiokäyriä. (Kenner ym. 2021, muokattu)

Kuvassa 7 nähdään pahoin syöpynt super-duplex EN 1.4410 teräsputken kehähitsi, jossa pistekorrosio on mennyt seinämän läpi kolmessa kohdassa. Kuten kuvasta näkyy, kehähitsi on syöpynt myös muualta hyvinkin pahasti. On harvinaista, että ruostumattomassa teräksessä tapahtuu yleistä korrosiota. Tässä tapauksessa kyse oli tribokorroosiosta, jossa pintaa suojaava passiivikalvo rikkoutuu kuluttavan aineksen osuessa siihen. Tällöin teräs altistuu korroosiolle, koska passiivikalvo ei pääse korjaantumaan missään vaiheessa. Kuluttavana aineena toimivat putkessa virranneessa hönkäkaasussa olleet hematiitipartikkelit (Fe_2O_3). Hematiitin kovuus on luokkaa 700-1000 HV eli huomattavasti suurempi kuin teräksen pinta.

Kuvassa 8 on esitetty miten tribokorroosiokokeissa käytetty voima, jolla näytettä painetaan kuluttavaa alustaa vastaan vaikuttaa virrantiheyteen potentiodynamiisessa polarisaatiokäyrässä. Kuluttavan kuormituksen eli käytännössä kulumisen lisääntyminen johtaa korkeampiin korroosiovirran arvoihin ts. korroosionkestävyyden heikentymiseen.

Duplexien hitsausta Turula Engineeringin Outokummun konepajalla

IWE, IWI-C Antti Nykänen toimii Turula Engineering Oy:n Outokummun konepajan hisauskoordinaattorina. Seuraavassa on

koottu hänen ajatuksiaan vaativien materiaalien hitsaukseen liittyen.

Miten vaativien materiaalien menetelmäkokeet kannattaa tehdä ja saada niiden perusteella laadittua hitsausohjeet konepajoilla hitsaajien tueksi tuottavaan ja laadukkaaseen työhön? Moni tekee menetelmäkokeet ”pienimmän vaivan” kautta, kun ne ovat ”niin kalliita ja niiden läpivienti vie niin paljon aikaa”. Tähän liittyen voidaan esittää monta kysymystä:

- Tehdäänkö vain yksi mahdollisimman kattava menetelmäkoe ja hitsataan sillä kaikki tuotteissa olevat liitokset?
- Hitsaako menetelmäkokeen koekappaleen konepajan paras hitsaaja?
- Otetaanko austeniittis-ferriittisissä teräksissä super-duplex 10.2 materiaali, kun sillä voidaan hyväksyttää ryhmän 10.1 normaalitkin duplexit?
- Ehkä konepajalla optimaalisessa jalko- tai alapienä-asennossa (PA, PB) kuljettimen kanssa mekanisoitu MIG/MAG-hitsi on helppo suorittaa, kun hitsausohjeen parametrit ovat vakiot ja lämmöntuonti helppo varmistaa?
- Entä jos hyvät konepajaolosuhteet vaihtuvat asennustyömaan haastaviin hitsausasentoihin ja liitoksien ilmaraot tai sovitusket eivät ole kuten konepajalla?

Turula Engineeringin Outokummun konepajalla on hitsattu haastavia ruostumattomia teräksiä, kuten erilaisia duplex-laatuja pian jo kahden vuosikymmenen ajan ja tällä hetkellä hitsattavia laatuja ovat EN 1.4162 (X2CrMnNiN21-5-1), EN 1.4362 (X2CrNiN23-4), EN 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) ja EN 1.4410 (X2CrNiMoN25-7-4) sekä hieman harvinaisempi hyper-duplex SAF™ 2707 eli EN 1.4658 (X2CrNiMoCoN28-8-5-1).

Hitsauskoordinaattorin näkökulmasta pitää ottaa huomioon paljon muutakin kuin saada SFS-EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019 standardin vaatimusten mukainen menetelmäkoe hyväksytysti läpi ja sen perusteella laadittu WPS hitsaajan käyttöön. Nykyisessä kilpailutilanteessa on huomioitava myös tuottavuus sekä hitsaamisen helppous eli normaalilla työskentelyllä ilman ihmeempiä erikoisjärjestelyjä konepajan nuoremmat ja kokemattomimmat hitsaajat saavat aikaan tuottavasti laadukkaita hitsejä. Näin saadaan pidettyä kilpailukykyä yllä kansainvälisellä tasollakin. Haastavat materiaalit, paksuudet, liitosmuodot, hitsausasennot, mahdollisuus mekanisointiin ja yleisesti hitsaajien osaamistaso ovat asioita, joita tulee arvioida tarkasti. Joihinkin hitseihin sopii hyvin prosessi 136 (MAG-jauhetäytelankahitsaus), kun taas jotkin liitokset on parempi hitsata prosessilla 141 (TIG-hitsaus lisäaineen kanssa).

Turula Engineeringillä on vuosien saatossa kehitetty varsinkin erilaisten duplex-terästen hitsausta. Standardin SFS-EN ISO 15614-1:2019 (Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus) vaatimusten mukaisesti suoritettuja menetelmäkokeita ja niiden perusteella laadittuja hyväksyttyjä hitsausohjeita on kattavasti lähes kaikille käytettäville hitsausprosesseille. Standardin vaatimusten mukaisen testauksen lisäksi on tehty paljon ylimääräisiä testauksia laboratorioissa, kuten mikrorakennetarkasteluja pyyhkäisyelektronimikroskooppilla (SEM/EDS) sekä erilaisia korroosiokokeita. Esimerkiksi ohuiden levyalkanoiden jatkoshitsejä EN 1.4462 ja EN 1.4410 teräksistä tehtyihin sintrausnauhoihin tehdään plasmahitsauksella yhdeltä puolelta läpihitsaamalla, paksumuoto- tai kehähitsettä taas hitsataan jauhekaari-prosessilla (121) kuten myös em. terästen eripariiliitoksia seostamattomaan S355 myötölujuusluokan rakeneteräkseen. Yhdeltä puolelta hitsattavia ohuita materiaaleja hitsataan prosesseilla 141 (TIG-hitsaus ilman lisäainetta) ja 142 (TIG-hitsaus lisäaineen kanssa), joita ollaan viime vuosina korvattu umpilanka MAG-pulssikaarihitsauksella. Pulssikaarella on saatu lämmöntuonti riittävän pieneksi ja tuottavuuden ollessa paljon parempi kuin TIG:llä hitsattaessa. Myös MAG-jauhetäytelankahitsauksella (prosessi 136) on paikkansa ruostumattomien duplex-terästen hitsauksissa. Puikkohitsaus (pro-

sessi 111) ei ole ehkä se tuottavin prosessi, on sillekin kohteensa, koska sillä on hyvä hitsata vaikeasti luoksepäästävässä, ahtaissa väleissä ja varsinkin putkiin saadaan laadukkaita hitsejä.

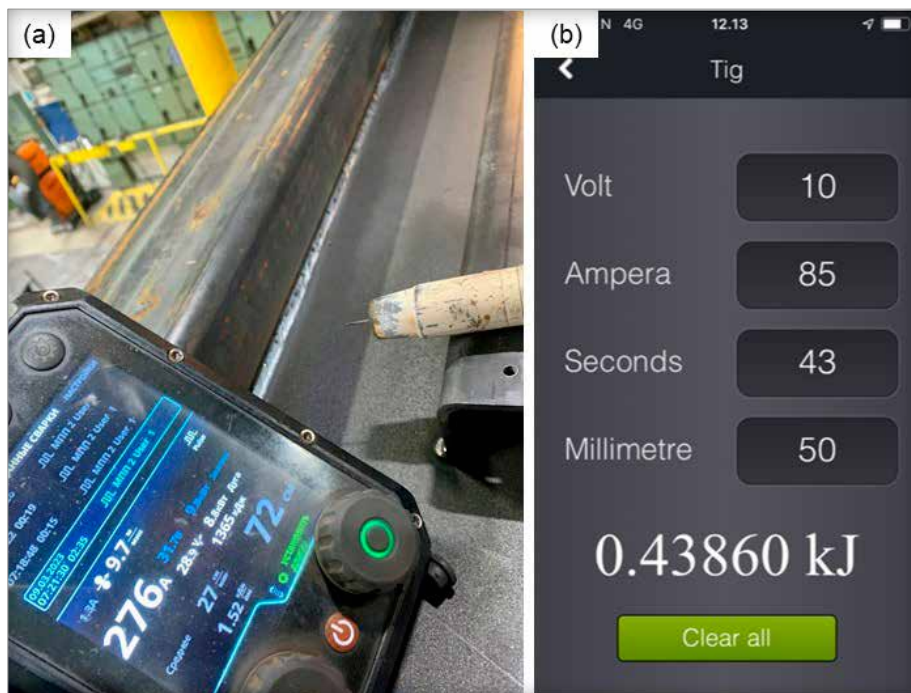
Kaikki hitsaajat sekä operaattorit on pätevytetty SFS-EN ISO 9606-1, -3 ja -5 sekä SFS-EN ISO 14732 pätevyyskoestandardien vaatimusten mukaisesti ja suurella osalla hitsaajista on kattavat pätevydet eri materiaaleihin, liitosmuotoihin ja prosesseihin. Tämä takaa sen, että he pysyvät hitsaamaan aina tapauskohtaisesti valitun hitsausohjeen mukaisesti, ilman että puuttuvat pätevydet tulevat rajoittavaksi tekijäksi.

Kaikki hitsausprosessit lukuun ottamatta TIG- ja puikkohitsausta on kohtalaisen helppo mekanisoida. Turula Engineeringillä on käytössä mekanisointiin paljon erilaisia ratkaisuja kuten käsittelylaitteita, radoilla olevia portaaleja, hitsaustraktoreita sekä MAG-robottiasemia (4 kpl) sekä yksi laserhitsaussoilu. Mekanisoinnin suurena etuna on tietysti tuottavuus ja korkea paloaikasuhte verrattuna käsinhitsaukseen, mutta myös hyvä ja ennen kaikkea tasainen laaduntuottokyky sekä lämmöntuonnin hallinta, jota on helppoa valvoa. Lämmöntuonnin merkitys ja sen hallinta on erittäin tärkeää ruostumattomien duplex-terästen hitsin mikrorakenteen ja laadun takia, mutta myös erilaisten muodonmuutosten pienenentämisen ja hitsin hapettumisen kannalta. Tämä vähentää hitsien jälkikäsittelytarvetta. Esimerkiksi hitsin alueella olevat päästövärit voivat aiheuttaa peittauksessa lisäkäsittelyjä.

Se, että on tehty menetelmäkokeet ja niiden perusteella hitsausohjeet ei ole vielä riittävä laadun tae. Tämän lisäksi työhön pätevytettyjen hitsaajien, heidän esihenkilöidensä ja hitsauskoordinaattorin tulee seurata, että hitseissä käytetyt hitsausarvot ovat hitsausohjeiden mukaisia. Se ei riitä, että hitsauksen jälkeen tehdään erilaisia NDT tarkastuksia tai mitataan hitsien ja lämpövyöhykkeen ferriittipitoisuuksia, kuva 9.

Kaikki ainetta rikkomattomat testaukset voivat osoittaa hitsien olevan laadul-

Kuva 9. Ferriittipitoisuuden mittaaminen (FP) on Turula Engineeringillä yksi duplex-hitsien laadunvarmennusmenetelmä, joka vaiheistettu ERP-järjestelmään (toiminnanohjausjärjestelmä) normaaliin NDT-tarkastusten lisäksi.



Kuva 10. Hitsaajan henkilökohtaista laadunvarmistusta a) Kemppi X8 Control Padilla ja b) älypuhelinsovelluksella.

taan standardin SFS-EN ISO 5817: 2014 (Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat) hitsiluokan B mukaisia - mutta mitä tapahtuu, jos lämmöntuonti ei ollutkaan oikea? Tuotteen ollessa käytössä sille suunnitellussa prosessissa voivat mahdolliset laiminlyönnit tulla eteen ja aiheuttaa suuria ongelmia, kun hitsin mekaaniset ominaisuudet on pilattu tai sen korroosionkestävyys ei ole sitä, mitä suunnittelija on materiaalivalinnan tehdesään oletanut.

Turula Engineeringissä käytetään kaikissa vaativissa hitsauksissa aina Kempin WeldEye-sovellusta. Hitsaajilla on aina käytössä työtä tukevat digitaaliset hitsausohjeet (dWPS), jolloin hitsausarvot on valmiiksi asetettu oikein. Tällöin myös käsinhitsauksessa voidaan reaaliajassa varmistua lämmöntuonnista, koska kuljetusnopeus on riippuen hitsaajasta aina

jonkin verran erilainen. Hitsauksen jälkeen toteutunut lämmöntuonti voidaan tarkastaa antamalla hitsatun hitsin pituus, jonka perusteella sovellus laskee keskimääräisen kuljetusnopeuden ja lämmöntuonnin.

Ilahduttavasti monet yritykset, kuten myös Turula Engineering Oy, on sertifioitu standardin SFS-EN ISO 3834-2:2021 (Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset) vaatimusten mukaan, mikä on selkeä osoitus laadukkaasta hitsaustoiminnasta. Yksi standardin vaatimuksista on jatkuva hitsausarvojen seuranta. Hitsauskoordinaattorin on helppo tehdä tätä, kun käytössä ovat digitaaliset sovellukset. Tähän liittyen on ensiarvoisen tärkeää perehdyttää hitsaajat ymmärtämään lämmöntuonnin merkitystä ja oikeiden hitsausarvojen käyttöä sekä työn aikaisen seurannan tekemistä. Turula Engineeringillä hitsaajia onkin koulutettu tarkkailemaan toteutunutta lämmöntuontia säännöllisesti työn aikana tai aina ennen uuden hitsaustyön alkamista. Osa heistä käyttää tähän WeldEye sovellusta X8 Control Padin kautta tapahtuvalla hitsausarvojen seurannalla, kuva 10 a. Osalla on käytössä älypuhelinsovellus, jolla voi nopeasti laskea lämmöntuonnin, kun mittaa hitsaamisen käytetyn ajan sekä hitsauspituuden, kuva 10 b. Tällaisia sovelluksia on saatavana useampia vaihtoehtoja, esim. HII-NNS Weld Heat Calculator.

Hitsauskoordinaattorin tärkeä tehtävä on tukea, opastaa ja auttaa hitsaajia. Vaativien materiaalien ja liitosten ollessa kyseessä on hyvin suositeltavaa tehdä työkoetta aina ennen varsinaisen hitsaustyön aloittamista. Työkoetta mallintaa "oikeaa" liitosta aina hitsausasentoa myöten ja huomioi myös palkojen väliset sallitut ensimmäislämpötilat, jotka hyvin usein ruostu-

matomilla duplex-teräksillä ovat luokkaa 100 °C. Koekappaleeseen hitsataan hyväksytyn hitsausohjeen (WPS) mukaisilla hitsausarvoilla haluttu hitsi, parametrit tarkastetaan ja kun työkoe on laadullisesti vaaditun mukainen sekä lämmöntuonti on oikein, hitsauksen aloittaminen turvallista. Tämä pätee erityisesti TIG-hitsaukselle, jossa on paljon epävarmuustekijöitä, kuten hitsaajien kuljetusnopeus sekä lisäainelangan syöttö käsin. Joku pudottaa pieniä pisaroita sulaan, kun toinen työntää lisäainetta jatkuvasti sulaan, millä on keskeinen vaikutus lämmöntuontiin ja hitsin jäähtymisnopeuteen. Turula Engineeringillä on suoritettu tänä vuonna paljon testauksia uudella mekanisoidulla TIG-laitteistolla mahtavien tuloksien.

Haastavissa olosuhteissa esimerkiksi asennustyömaalla tarvittaessa mitataan jokaisen palon lämmöntuonti asennon muuttuessa. Kaikkiin tilanteisiin ei ole sopivaa hitsausohjetta valmiina, joten se laaditaan menetelmäkokeeseen perustuen tarvittaessa, vaikka telineillä asennuskohteessa, jotta voidaan varmistaa liitoksen täyttävän kaikki osin sille asetetut vaatimukset.

Turula Engineering Oy (www.turula.fi) on Itä-Suomessa Outokummussa sijaitseva konepaja, jonka toimiala on teollisten laitteiden ja koneiden sekä tuotantolinjojen valmistus alihankintana. Turula Engineering valmistaa sekä yksittäisiä tuotteita että avaimet käteen-ratkaisuja muun muassa energia-, sellu- ja paperi-, rakennus-, puuntyöstö-, kaivos- ja pakkausteollisuuden tarpeisiin. Yrityksen tuotannosta valtaosa menee vientiin. Tällä hetkellä Turula Engineering työllistää 130 henkilöä, joista 30 työskentelee hitsaustehtävissä. Turula Engineering tunnetaan erityisesti haastavien kohteiden menestyksekkäänä tekijänä, ja korkein mahdollinen laatu onkin kaikissa tilanteissa tuotannon keskiössä. Tuotantoprosesseissa hitsaus on keskeisessä roolissa sekä käytettyjen työtuntien että liikevaihdon mittapuulla. Hitsaus on yrityksessä jaettu robotti-, laser- ja käsinhitsausosastoihin, joissa ovat titaaniin ja ruostumattomien terästen käsittelytilat erikseen.

Hitsauksen laadunhallinnan dilemma

Jutun kirjoittajat ovat toimineet hitsauksen parissa jo pitkään. **Antti Nykänen** koordinoi erittäin vaativien materiaalien hitsausta ja on oppinut vuosien varrella siihen, että mahdolliset haasteet ja vastaukset niiden ratkaisemiseen on selvittävä etukäteen. Se ei voi jäädä odottamaan sitä, että hitsattu rakenne vaurioituu käytössä ja siinä vaiheessa aletaan selvittämään sitä, mikä meni pieleen. **Timo Kauppi** tekee teollisuudelle vaurioselvityksiä ja on nähnyt toinen toistaan uskomattomampia tapauksia, joissa Antin filosofiaa ei ole noudatettu.

Dilemma otsikossa tarkoittaa sitä, että luvattoman usein rakenteen vaatimusten mukaisuuden osoittaminen jää pintapuoliseksi ja todellisuudessa rakenteeseen jää virheellisyys, jotka johtavat vaurioihin jopa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tai sitten pienestä tarkastuslaajuudesta johtuen laatu ei olekaan kohdallaan siellä, mihin tarkastus ei ulottunut. Rakenteen kriittisyys pitäisi arvioida mahdollisimman tarkkaan etukäteen ja päättää sen perusteella mm. siitä onko syytä muuttaa tarkastuslaajuutta tuotestandardin vaatimuksia tiukemmaksi. Ja aivan kuten Antin puheenvuorossa todettiin, menetelmäkoe varmistaa oikeastaan vain sen, että liitoksen mekaaniset ominaisuudet ovat kunnossa. Tähän liittyen erityisesti aggressiivisiin korroosio-olosuhteisiin meneville tuotteille pitäisi tehdä menetelmäkokeen yhteydessä tehdä myös korroosio-ominaisuuksien testausta. Tässä artikkelissa käsitelty austeniittis-ferriittiset ruostumatomat teräkset eli duplex-teräkset ovat rakennemateriaalina juuri tällaisia!

Lähteet

Gronemberger M. E. R., Nakamatsu S., Rovere C. A. D, Kuri S. E. & Mariano N. A. 2015. Materials Research. 2015; 18(Suppl 2): 138-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.352114>.

Gupta A., Kumar A., Baskaran T. & Arya S. B. 2018. Effect of Heat Input on Microstructure and Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel Shielded Metal Arc Welds. Transactions of the Indian Institute of Metals. DOI: 10.1007/s12666-018-1294-z.

Hosseini V. A., Wessman S., Hurtig K. & Karlsson L. 2016. Nitrogen loss and effects on microstructure in multipass TIG welding of a super duplex stainless steel. Materials & Design. Volume 98. May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.011>.

Kotecki D.J. 1997. Ferrite Determination in Stainless Steel Welds Advances since 1974. Welding Research Supplement. January. 1997. pp. 24 – 37.

Outokumpu. 2015. Corrosion handbook 11th edition. Outokumpu Stainless Oy.

Outokumpu. 2023. Internetsivu. Luettu 25.2.2023. Luettavissa <https://www.outokumpu.com/en/expertise/2020/duplex-90-years/history-of-duplex-stainless-steel#:~:text=The%20first%20duplex%20grades%2C%20with,can%20affect%20ferritic%20stainless%20steel>.

Paulraj P. & Garg R. 2016. Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments. Engineering Science and Technology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.01.013>.

Renner P., Chen Y., Huang Z., Raut A. & Liang H. 2021. Tribocorrosion Influenced Pitting of a Duplex Stainless Steel. Lubricants 2021, 9, 52. <https://doi.org/10.3390/lubricants9050052>.

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

**Antti Nykänen, IWE, IWI-C
Turula Engineering Oy
antti.nykanen@turula.fi
www.turula.fi**