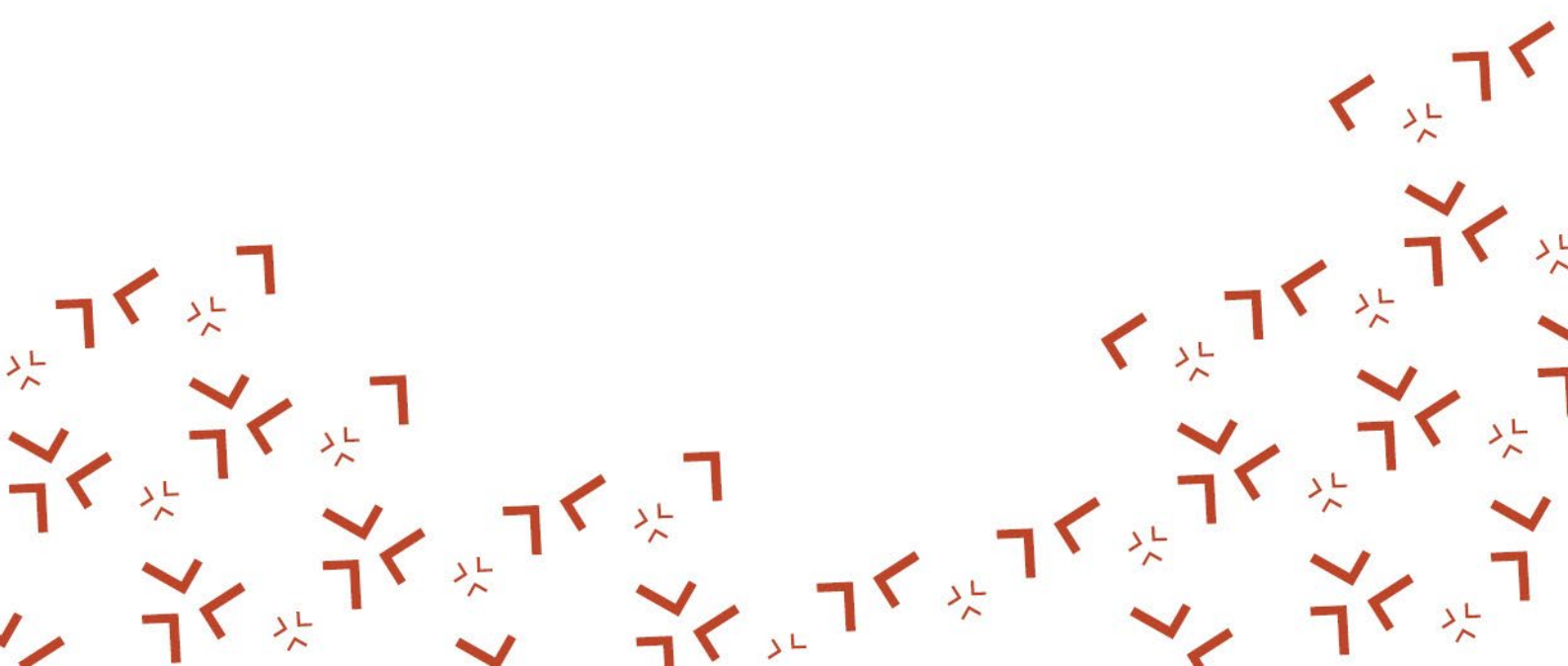


Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. 2022. Käytännön hitsausmetallurgiaa osa 6 : raekoko, sen määrittäminen ja merkitys austeniitin hajaantumisen rakenneterästen hitsauksessa. Hitsaustekniikka. 74 (3), 33-37.



Käytännön hitsausmetallurgiaa. Osa 6:

Raekoko, sen määrittäminen ja merkitys austeniitin hajoamisessa rakenneterästen hitsauksessa.

Timo Kauppi

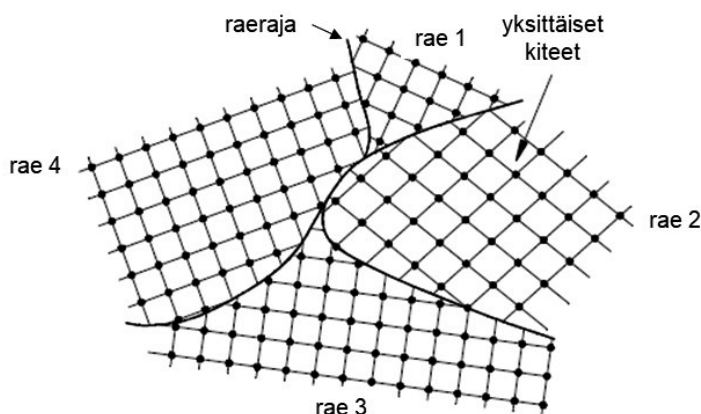
Teräksen raekoko vaikuttaa moniin ominaisuuksiin ja useimmiten korostetaan sen vaikutusta ferriittisten terästen iskutieteyteen. Tässä artikkelissa tarkastellaan raekoon määrittäystä, hitsauksen vaikutusta perinnäisen austeniitin raekokoon ja sen vaikutusta S235 ja S355 lujuusluokan seostamattomien rakenneterästen mikrorakenteeseen ja muutosvyöhykkeen kovuuteen. Artikkelin on jo kuudes osa "käytännön hitsausmetallurgiaa" aihepiiriin liittyen.

Raekoko (engl. grain size) on moniin teräksen ominaisuuksiin vaikuttava asia. Mutta mitä raekoko ylipäättään tarkoittaa ja mikä se on? Asiaa käsiteltiin tämän artikkelisarjan ensimmäisessä osassa HT No 4/2020 lehdessä. Kerrataanpa asiaa hieman ja ainakin osin yksinkertaistettuna.

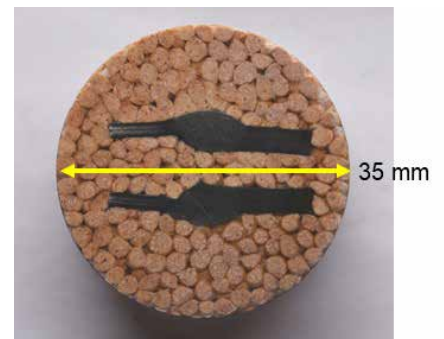
Fysikaalisen metallurgian kannalta yksittäinen rae on alue, jossa siihen metallin jäähmettymisen yhteydessä pinoutuneiden kiteiden orientaatio on sama. Alun perin nämä rakeet ovat muodostuneet metallin jäähmettymisen alkaessa sulatteessa useassa kohdassa samanaikaisesti ja näiden jäähmettyvien kiderintamien kohdatessa toisensa, kuva 1. Yksittäisen rakeen koko voi tässä vaiheessa vaihdella tyypillisesti 0,5 µm:stä aina useisiin millimetreihin (Hannula ym. 2020, 9). Raerakenne uusiutuu mahdollisten faasimuutosten yhteydessä ja muokkauk-

sen mahdollistaman uudelleen kiteytymisen eli rekristallisaation aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että mm. materiaaliyryhmien 1–6 mukaisilla alieutektoidisilla teräksillä raerakenne uusiutuu ensimmäisen kerran esieutektoidisen ferriitin erkautuessa A₃ – ja A₁ –lämpötilojen välillä ja austeniitin hajoantuessa A₁ –lämpötilan alapuolella.

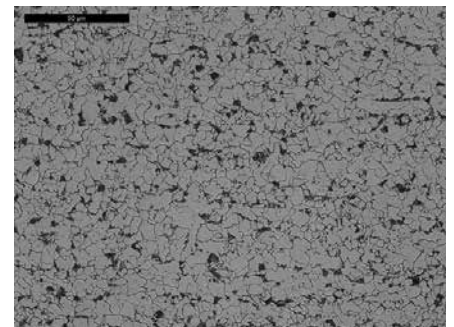
Kahden rakeen välillä muodostuu raeraja, joka saadaan näkyviin metallografisilla tekniikoilla. Tämä vaatii metallin pinnan tasohionnan, kiillottamisen ja syövyttämisen esim. kuumavaletussa näytteenpitimessä, kuva 2. Kun kiillotetun metallipinnan syövyttää sopivalla syövytteellä, niin raerajat tulevat esiin, koska niistä liukenee pois materiaalia helpommin kuin rakeista. Tämä saa aikaan ihmissilmälle erottuvan kontrastin raerajan ja rakeen välille, kuva 3.



Kuva 1. Yhden rakeen alueella siihen pinoutuneiden kiteiden orientaatio on sama.



Kuva 2. Kuumavalettu, hiottu, kiillotettu ja syövytetty metallografinen näyte.

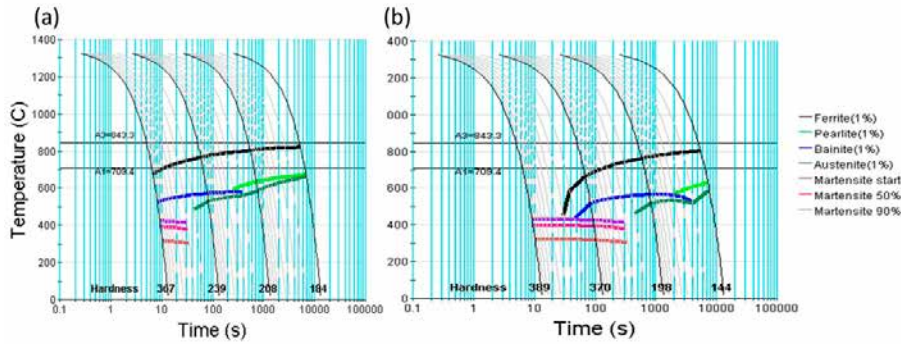


Kuva 3. Ferriittirakeita ja perliittisaarekkeitä 3% Nitalilla syövytettyssä metallografisessa näytteessä.

Raekoon määrittäminen

Raekoko vaikuttaa siis teräksen ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja sitkeyteen. Miten raekoko sitten voidaan määrittää? Se voidaan tehdä esim. standardeissa ISO 643 tai ASTM E112 esitetyillä tavoilla.

Standardi SFS-EN ISO 643:2013 (Teräksen raekoon määrittäminen) ensinnäkin määrittelee rakeen seuraavasti: "Rae on suljettu monikulmio, jolla on enemmän tai vähemmän kaarevat sivut. Rae saadaan näkyviin metallografisessa tarkastelussa tasomaisena poikkileikkauksena, kun näyte on kiillotettu ja käsitelty".



Kuva 11. S235J2+N tyyppisen rakenneteräksen (0.14%C, 0.26%Si, 1.0%Mn, 0.05%Cr, 0.005%Mo, 0.008%V, 0.04%Ni, 0.018%Cu) CCT-käyrät kahdella eri perinnäisen austeniitin raekoolla, a) $d = 10 \mu\text{m}$ ja b) $d = 120 \mu\text{m}$, austenitointilämpötila $T = 1350^\circ\text{C}$.

Kuvassa 11 ja 12 on esitetty saman simuloinnin tulokset S235J2+N rakenneteräkselle. Selkeimmät erot S355K2+N rakenneteräkseen verrattuna ovat selvästi pienempi kovuus suurimmalla jäähtymisnopeudella ja se, että $t_{8/5}$ - ajan ollessa 30 s kovuus nousee hyvin lähelle nopeimman jäähtymisen arvoja raekoon kasvaessa yli $40 \mu\text{m}$. Näiden tulosten perusteella ei ole ihmeäkään, että allekirjoittaneelle on tullut useasti vastaan liian suuria kovuuksia periaatteessa helposti hitsattavien pehmeiden terästen karkearakeisessa muutosvyöhykkeessä.

Perinnäisen austeniitin raekoko

Kuinka suureksi perinnäisen austeniitin raekoko hitsauksessa sitten voi kasvaa? Tämä on tietysti olennainen kysymys, kun ajatellaan, miten edellä esitetty vaikuttaa hitsattavan teräksen ominaisuuksiin käytännössä.

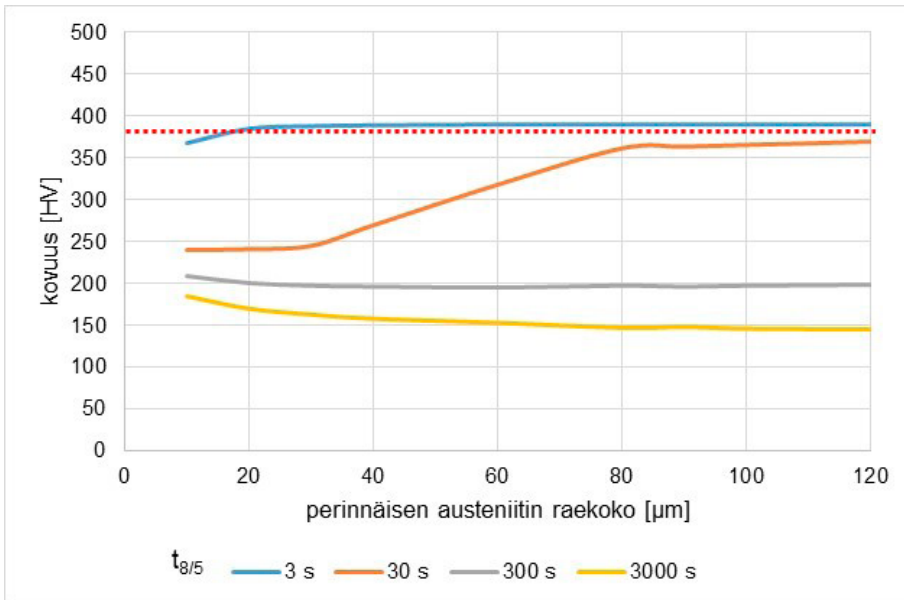
Raekoon kasvaminen riippuu lähinnä lämpötilasta ja ajasta, joka vietetään rakeenkasvulle otollisissa lämpötiloissa. Kuvassa 13 on esitetty JMatPro -mallinnuksen tuloksia austeniitin rakeenkasvusta kolmessa lämpötilassa (1000, 1150 ja 1300°C). Kuva havainnollistaa hyvin sen, että lämpötilan noustessa raekoon kasvu nopeutuu ja loppuraekoko kasvaa. Jos aikaa on riittävästi käytössä raekoko kasvaa niin kauan, kunnes kappaleen fyysiset dimensiot tulevat vastaan, koska raerajoihin sitoutunut energia pyrkii hakeutumaan minimiarvoonsa. Mitä pienempi raekoko on, niin sitä enemmän on raerajapinta-alaa ja niihin sitoutunutta energiaa.

Kirjallisuudesta löytyy sängen niukasti tutkimuksia lämmöntuonnin vaikutuksesta perinnäisen austeniitin raekoon kasvuun. Kuvaan 14 on referoitu kolmea tutkimusta. Käytetyt lämmöntuonnit ovat suurimmillaan sellaisia, joita syntyy vain monilankajauhekaarihitsauksessa. Kuvan perusteella normaaleilla lämmöntuonneilla ($Q < 3.5 \text{ kJ/mm}$) rakeenkasvu on hyvinkin maltillista. Tässä törmätään kuitenkin siihen haasteeseen, että lämmöntuonnin laskentakaava ($Q = U \times l / v \times 1000 \text{ [kJ/mm]}$) ei ota huomioon työkappaleen lämpötilan nousua hitsauksen aikana, mikä käytännössä hidastaa jäähtymisnopeutta. Ja tämä puolestaan vaikuttaa myös austeniitin rakeenkasvuun.

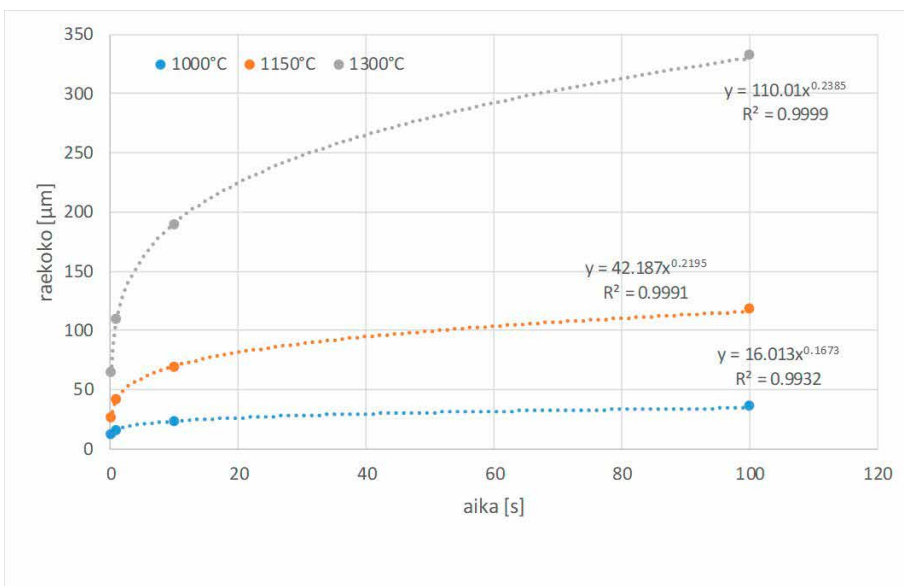
Zhang ym. tutkimuksessa on tarkasteltu $t_{8/5}$ -ajan vaikutusta perinnäisen austeniitin raekokoon, kuva 15. Kuvan $t_{8/5}$ -ajat on laskettu tutkimuksessa käytettyjen lämmöntuontien perusteella standardissa SFS-EN 1011-2 liitteessä D esitetyllä kaavalla D.2:

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \times Q \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3$$

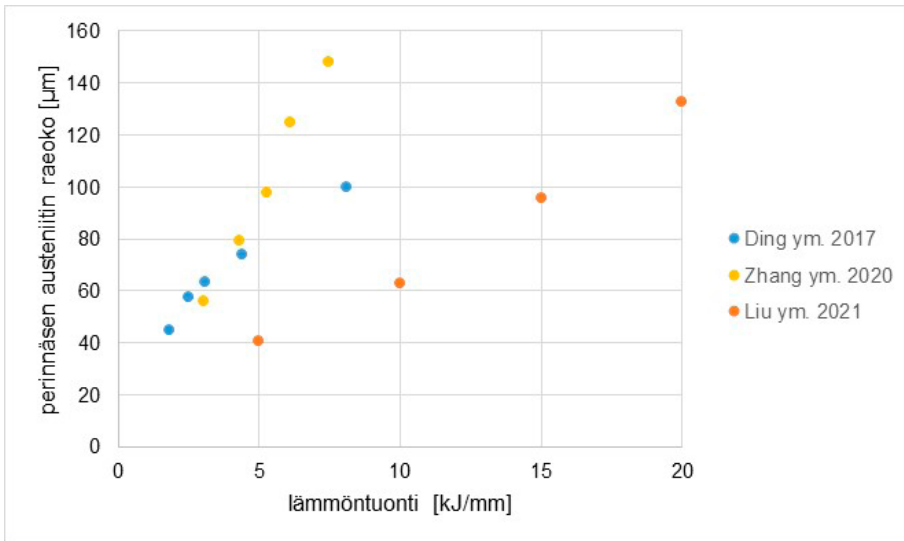
Kaava pätee 3D lämmönjohtumiseen eli suhteellisen suurille aineenpaksuuksille, josta



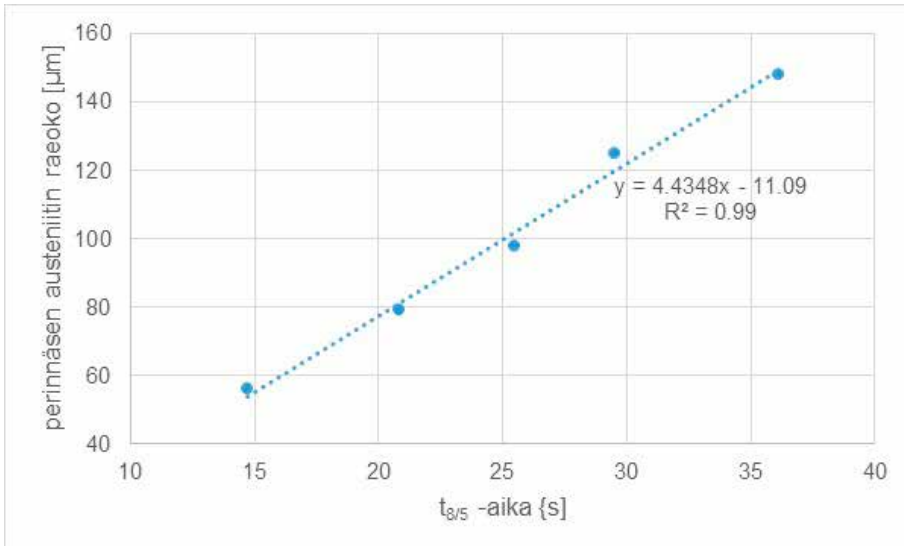
Kuva 12. Raekoon ja $t_{8/5}$ - ajan vaikutus S235J2+N tyyppisen rakenneteräksen kovuuteen.



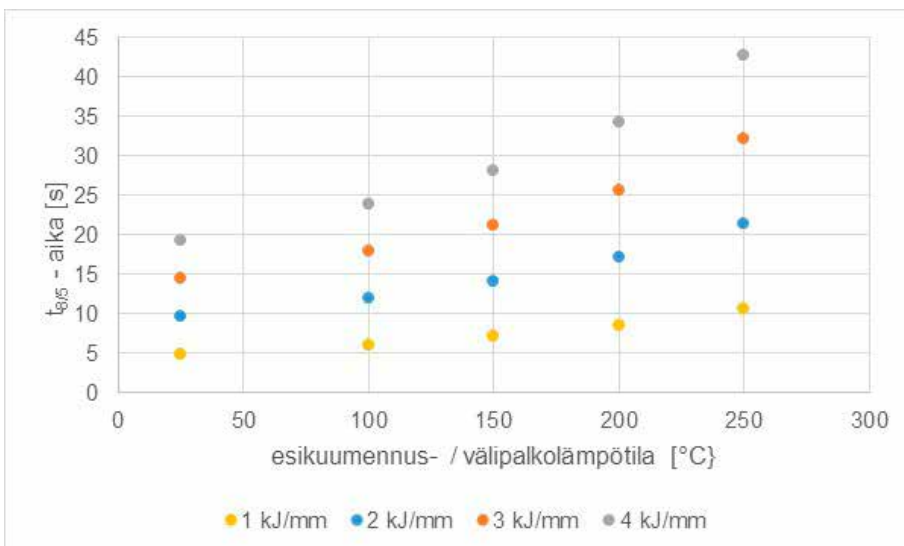
Kuva 13. Lämpötilan ja pitoajan vaikutus austeniitin raekokoon.



Kuva 14. Lämmöntuonnin vaikutus perinnäsen austeniitin raekokoon (Ding ym. 2017; Zhang ym. 2020; Liu ym. 2021 muokattu).



Kuva 15. Perinnäsen austeniitin raekoon riippuvuus $t_{8/5}$ -ajasta vanadiini + typpiseostetulla teräksellä (Zhang ym. 2020 muokattu).



Kuva 16. Esikuumennus-/välipalkolämpötilan vaikutus $t_{8/5}$ -aikaan eri lämmöntuonneilla (Zhang ym. 2020 muokattu).

on käytännössä kyse silloin, kun puhutaan aidosti monipalkohitsauksesta.

Kuvassa 16 on puolestaan esitetty esikuumennus- / välipalkolämpötila ja lämmöntuonti vaikuttavat $t_{8/5}$ -aikaan. Tarkastelu on tehty myös standardissa SFS-EN 1011-2 liitteessä D esitetyllä kaavalla D.2. Kuva osoittaa selvästi sen, kuinka suuri vaikutus molemmilla tarkastelluilla parametreillä on $t_{8/5}$ -aikaan ja sen kautta perinnäsen austeniitin raekokoon.

Onko seostamattomien rakenneterästen hitsaus todella näin hankalaa?

Edellä esitetystä saattaa syntyä käsitys siitä, että kaarihitsaukseen liittyvä metallurgia on erinomaisen monimutkaista ja sen hallinta vaatii syvällistä tietoa erilaisista asioista. Tosiasia on kuitenkin se, että 80–90 % hitsauksista on sellaisia, että tämänkaltaiset tarkastelut voidaan ohittaa huoletta. Mutta sitten ovat ne loput, jotka yleensä vielä liittyvät kriittisiin käyttökohteisiin ja joissa olisi hyvä olla riittävä käsitys metallurgisista ilmiöistä, jotka vaikuttavat hitsiliitoksen ominaisuuksiin. Tällöin hitsausmetallurgiset tarkastelut tarjoavat keinon ennakkointiin, joilla voidaan välttää monet yllättävät tilanteet. Hitsausmetallurgian syventävää opetusta annetaan tällä hetkellä Oulun yliopistossa ja LUT-yliopistossa. Tämän lisäksi opetusta saa Taitotalon ja LUT-yliopiston IWE koulutuksissa.

Lähteet

Ding Q., Wang T., Shi Z., Wang Q., Wang Q & Zhang F. 2017. Metals 2017, 7, 115; doi:10.3390/met7040115.

Liu D., Yang J., Zhang Y., Qiu Y., Cheng G., Yao M. & Dong J. 2021. Frontiers in Materials. July 2021. Volume 8. Article 694583.

SFS-EN ISO 643. 2021. Steels. Micrographic determination of the apparent grain size. Standardi. SFS.

Zhang J., Xin W., Luo G., Wang R. & Meng Q. 2020. High Temp. Mater. Proc. 2020; 39:33–44.

Lukkari J., Kyröläinen A. & Kauppi T. 2019. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2 a. Metallit ja niiden hitsattavuus. Suomen Hitsaustekniillinen Yhdistys ry. ISBN 978-951-98212-8-3.

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