

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallennettu versio.
Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat
saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. 2020. Hitsauslaskurit verkossa. Hitsaustekniikka. 72 (4), 21-27.

Hitsauslaskurit verkossa

Timo Kauppi

Tässä artikkelissa tutustutaan viiteen Internetissä toimivaan hitsauslaskuriin (SSAB WeldCalc 3.0, Dillinger Weld Calculation, ThyssenKrupp Proweld 6.0, Japan Welding Engineering Society Online Calculation ja GoWelding). Hitsauslaskurit ("hitsattavuuslaskurit") ovat käteviä työkaluja, kun halutaan etukäteen tietoa teräksen hitsattavuudesta, esimerkiksi hitsausliitoksen kovuudesta ja esikuumennustarpeesta. Laskureiden käytön avulla voidaan myös paremmin ennakkoon varmistaa menetelmäkokeiden onnistuminen

Hitsauksen laadunhallintaan liittyen olisi hyvä, että hitsausliitoksen vaatimuksenmukaisuutta pystyttäisiin arvioimaan etukäteen sekä ennustamaan hitsausarvojen vaikutusta liitoksen ominaisuuksiin. Kun puhutaan ferriittisten terästen hitsauksesta, niin haasteet liittyvät lähinnä esikuumennukseen ja muutosvyöhykkeeseen, sen kovuuteen ja sularajan vieressä olevan karkearakeisen vyöhykkeen (CGHAZ) raekokoon. Tässä yhteydessä ferriittisillä teräksillä tarkoitetaan teknisen raportin CEN ISO/TR 15608:2017 materiaaliryhmien 1 – 6 mukaisia teräksiä. Liian suuri kovuus esim. liian matalan esikuumennuksen takia altistaa teräksen vety- eli kylmähalkeilulle ja liian suuri raekoko puolestaan heikentää liitoksen iskusitkeyttä. Useasti tilanne on se, että hitsausliitoksen mekaanisten ominaisuuksien ei-vaatimustenmukaisuuteen törmätään menetelmäkokeen yhteydessä, kun ainetta rikkovassa testauksessa vaatimukset kovuudelle tai iskusitkeydelle eivät täyty. Tämä tietysti aiheuttaa yrityksille ylimääräistä päänaivaa ja ennen kaikkea kustannuksia, jotka olisivat vältettävissä hitsiliitoksen ominaisuuksien tarkastelulla etukäteen mallinnuksen avulla, jota tässä käsiteltävien hitsauslaskureiden käyttö edustaa.

Hitsauslaskurit

Hitsauslaskureita on esitelty lyhyesti myös "Hitsauksen materiaalioppi" kirjan 2A osan ja luvun 2 "Rakenneteräksiset ja niiden hitsattavuus" liitteessä 1: Tietokoneohjelmia hitsausten suunnitteluun.

Tässä artikkelissa käytetään "Hitsauslaskuri-nimitystä", koska ohjelmistoista käytetään usein niiden englanninkielistä nimitystä "welding calculator". Toisaalta hyvä nimitys voisi olla myös suomeksi "hitsattavuuslaskuri". Artikkelissa tarkastellaan viiden hitsauslaskurin ominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia hitsauksen laadunhallinnan työkaluna. Tarkasteltavana ovat seuraavat selainpohjaiset laskurisovellukset:

1. SSAB WeldCalc:

www.ssab.fi/tuki/calculators-and-tools/weldcalc

2. Dillinger Welding Calculation:

www.dillinger.de/E-Service/UsefulTools/WeldingCalculation

3. ThyssenKrupp Proweld:

online.thyssenkrupp-steel.com/ecmlogin/proweld_register.do

4. Japan Welding Engineering Society Online Calculation:

www.it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/index.jsp

5. Go Welding:

www.gowelding.com

Kolme ensimmäistä on terästehtaiden julkaisemia, mikä merkitsee ennen muuta sitä, että niissä on tarjolla valmiiksi tehtaiden omia teräksiä, mikä nopeuttaa käyttöä. Kolme ensimmäistä käyttävät esikuumennuksen laskemiseen standardin SFS-EN 1011-2:2001 (Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaus-suositukset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus) liitteessä C esitettyä tapaa B ("sak-salainen" ns. CET-tapa), Go Welding tämän standardin tapaa A ("graafinen" ns. CE-tapa) ja Japan Welding Engineering Society Online Calculation Yuriokan ja Kasuyan kehittämä graafista tapaa.

Hitsausliitoksen mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset ja niiden arvioiminen

Kun puhutaan hitsausliitoksen mekaanisista ominaisuuksista, tarkoitetaan silloin lähinnä lujuutta, kovuutta ja sitkeyttä. Näitä taas mitataan ainetta rikkovan aineenkoetuksen (DT) testausmenetelmillä, kuten veto-, kovuus- ja iskusitkeyskokeilla. Menetelmäkoe-standardissa SFS-EN ISO 15614-1:2017 (Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Te-

rästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus) annetaan vaatimuksia hitsausliitoksen kovuudelle, murto- lujuuudelle ja iskusitkeydelle.

Poikittainen vetokoe tehdään päättäisliitokselle ja siinä koelaudat ja testaus tehdään standardin SFS-EN ISO 4136 (Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Poikittainen vetokoe) mukaisesti. Vetosauvan murto- lujuuuden (Rm) on normaalitapauksessa täytettävä perusaineelle asetettu vähimmäisvaatimus, ellei toisin ole määritetty ennen koetta. Eri- pariiliitoksen vetomurto- lujuuus ei saa alittaa alimman lujuuden perusaineelle asetettua vähimmäisarvoa.

Kovuuskokeet tehdään standardin SFS-EN ISO 9015-1 (Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Kovuuskokeet. Osa 1: Kaarihitsausliitosten kovuuskoetta (ISO 9015-1:2001)) vaatimusten mukaisesti Vickersin kovuus- kokeella. Kovuusmittaukset tehdään hitsis- tä, muutosvyöhykkeeltä ja perusaineesta ja tavoitteena on arvioida hitsausliitoksen kovuusarvojen vaihtelualue. Kovuuskoekiden tulosten on täytettävä taulukon 1 mukaiset vaatimukset. Jos kovuuskoekessa ilmenee, että eri koelaudilla on yksittäisiä kovuusarvo- ja, jotka ylittävät taulukon 1 mukaiset arvot, yhden lisämittausrivin saa tehdä (koelau- van toiselta puolelta tai koepinnasta sopi- van valmistelun jälkeen). Yksikään lisäko- vuusarvo ei saa ylittää taulukon 1 mukaisia enimmäiskovuusarvoja.

Taulukko 1. Suurimmat sallitut kovuusarvot (SFS-EN ISO 15614-1:2017)

| Teräsi-ryhmät ISO/TR 15608 | Lämpö- käsitte- mätön (HV10) | Lämpö- käsitelty (HV10) |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1 ^a , 2 ^b | 380 | 320 |
| 3 ^b | 450 | 380 |
| 4, 5 | 380 ^c | 350 ^c |
| 6 | – | 350 |
| 9.1 | 350 | 300 |
| 9.2 | 450 | 350 |
| 9.3 | 450 | 350 |

a. Jos kovuuskoeketta vaaditaan.

b. Terästen $R_{eH} > 890$ MPa osalta määrite- tään erityiset arvot.

c. Eräille materiaaleille voidaan sal- lia suuremmat arvot, jos määritet- ty ennen menetelmäkoeetta.

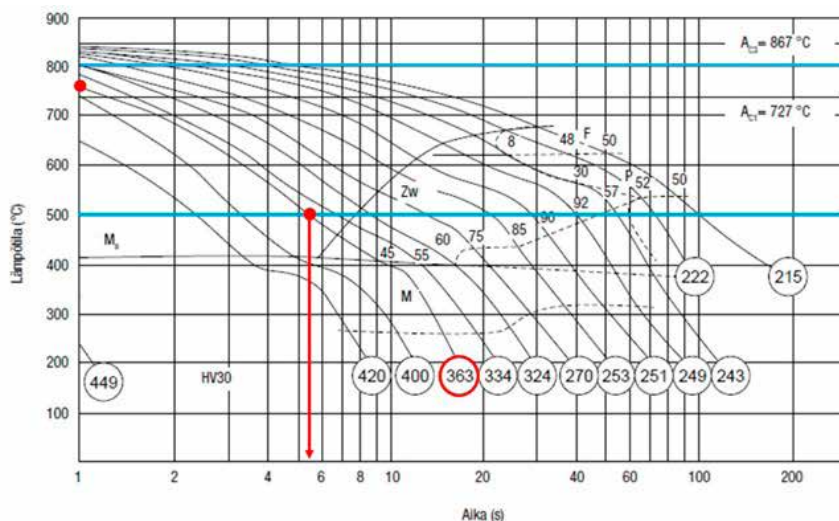
Kovuuden hallinta tapahtuu käytännössä lämmöntonin ja esikuumentuksen avulla. Kovuuden nousu on fysikaalisen metallurgian kannalta tarkasteltuna seurausta martensiitin muodostumisesta mikrorakenteeseen, joka taas riippuu käytännössä hitsin jäähtymisnopeudesta ja teräksen kemiallisesta koostumuksesta (= karkenevuudesta). Martensiitti vaikuttaa pääasiassa kahteen asiaan: kylmähalkkeilualttiuteen ja liitoksen sitkeyteen. Taulukossa 2 on esitetty miten martensiitin määrä vaikuttaa kylmähalkkeilun esiintymistodennäköisyyteen ja mikä on kovuuden ja martensiitin määrän välinen riippuvuus. Kovuus on helppo mitata, mutta se vaatii kuitenkin rikkovaa aineenkoetusta eli fyysisen koekappaleen, johon on tehty hitsiliitos asianmukaisilla hitsausarvoilla.

Taulukko 2.
Kylmähalkkeilutaipumuksen, martensiitin määrän ja kovuuden välinen yhteys.

| Kylmähalkkeilun esiintyminen | Maksimikovuus [HV] | Suurin martensiitin määrä (%) |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Hyvin todennäköistä | 400 | 70 |
| Mahdollista | 350 - 400 | 50 - 65 |
| Ei todennäköistä | 350 | 30 - 45 |
| Ei esiinny | 280 | 30 |

Martensiitin muodostuminen riippuu siis käytännössä lähinnä kahdesta tekijästä: hitsin jäähtymisaajasta ja teräksen kemiallisesta koostumuksesta. Ensimmäinen puolestaan riippuu useasta tekijästä, joita ovat mm. lämmöntonointi (Q), aineenpaksuus, liitostyyppi, lämmönjohtumistapa (2D/3D) ja esikuumentuksen lämpötila (Tp). Hitsin jäähtymisaajan laskentaa selvitetään standardin SFS-EN 1011-2:2001 liitteessä D (muutosvyöhykkeen sitkeys ja kovuus). Ferriittisen hitsin tapauksessa käytetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ kuvaamaan hitsipalon lämpötila-aika -sykliä hitsauksen aikana. Tällä ajalla tarkoitetaan yksinkertaisesti lämpötila-alueen 800...500 °C ohittamiseen kulunutta aikaa. Tällä lämpötila-alueella tapahtuvat ferriittisten terästen mikrorakenteen kannalta olennaiset muutokset.

Jotta kovuus muutosvyöhykkeellä ei ylitä haluttua enimmäisarvoa, on hitsausolosuhteet valittava siten, että jäähtymisaika $t_{8/5}$ ei alita tiettyä, lähinnä teräksen kemiallisesta koostumuksesta riippuvaa arvoa. Tätä varten tarvitsee tietää jäähtymisaajan $t_{8/5}$ vaikutus kovuuteen. Tarkasteluun voidaan käyttää hitsaukseen soveltuvia, teräskohtaisia CCT-kuvaajia, jos niitä on löydettävissä. Kuvassa 1 nähdään esimerkiksi S355J2 teräksen CCT-kuvaajasta, jossa on annettu mm. eri jäähtymisnopeuksien tuloksena syntyvä kovuus ja



Kuva 1. Seostamattoman rakenneteräksen S355J2 CCT-käyrä (Lukkari ym. 2019).

austeniitin hajaantumistuotteiden tilavuusosuudet eli syntyvä mikrorakenne. Käyrästä on avulla voidaan määrittää kovuuden kannalta kriittinen $t_{8/5}$:n arvo.

Kuvan 1 tapauksessa kyse on materiaali-ryhmän 1.2 teräksestä ja näin ollen lämpökäsittelymättömän hitsin enimmäiskovuus saa olla 380 HV. Kuvassa 1 on merkitty punaisella nuolella jäähtymisaika, jonka tuloksena kovuus on 363 HV. Kuvan mukaan se on noin 7 sekuntia eli antaa minimiarvon $t_{8/5}$ -ajalle.

Seuraava kysymys käytännön hitsausta ajatellen on se, millä hitsausarvoilla vaadittava $t_{8/5}$ -aika toteutuu? Hitsausohjeeseen ei voida antaa vaatimuksia $t_{8/5}$ -ajalle, koska sitä on käytännössä mahdotonta käyttää suoraan käytettävien hitsausarvojen arvioinnissa. Standardi SFS-EN 1011-2 mukaan hitsausolosuhteiden ja jäähtymisaajan välinen yhteys voidaan esittää yhtälöillä sekä kaksidimensionaaliselle että kolmidimensionaaliselle lämmönjohtumiselle. Kolmidimensionaalisen (3D) lämmönjohtumisen tapauksessa yhtälö on ferriittisille teräksille muotoa:

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

missä Q = lämmöntonointi [kJ/mm], T_0 = esikuumentus-/työlämpötila [°C] ja F_3 = liitosmuotokerroin.

Tästä lämmöntonointi Q voidaan tarvittaessa ratkaista, josta edelleen päästään kiinni varsinaisiin hitsauskoneeseen aseteltaviin hitsausparametreihin. Tämä on käytännössä työläs prosessi ja vaatii perehtymistä standardissa esitettyihin laskukaavoihin. Hitsauslaskureilla tehtävä onnistuu huomattavasti helpommin.

Päittäisliitosten iskukokeissa koesauvojen testauslämpötila ja vähimmäisiskuenergian arvo määräytyvät yleensä aine- tai tuotestandardin vaatimusten perusteella. Tavallisinta on se, että Charpy-V kokeessa

vaadittava iskuenergian vähimmäisarvo on teräksestä riippuen $KV \geq 27$ tai ≥ 40 J testauslämpötilassa. Koesauvojen mitoituksessa ja kokeen suorituksessa noudatetaan standardeja SFS-EN ISO 148-1 (Metallien Charpy'n iskukoe. Osa 1: Menetelmä) ja SFS-EN ISO 9016 (Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Iskukoe. Koesauvan sijainti, loven suunta ja tarkastus). Hitsiaineen koesauvana käytetään tyyppiä VWT (V: Charpy'n V-lovi – W: lovi hitsiaineessa – T: lovi läpi paksuuden) ja muutosvyöhykkeen (HAZ) koesauvana tyyppiä VHT (V: Charpy'n V-lovi – H: lovi muutosvyöhykkeessä – T: lovi läpi paksuuden). Kustakin määritetystä kohdasta otetaan 3 iskusauvaa. Mikäli iskukokeen kolmen sauvan tulokset eivät täytä vaatimuksia, ja korkeintaan yksi arvo alittaa 70 % määritetystä vähimmäiskeskivertovasta, otetaan kolme lisä-sauvaa. Näiden on noudatettava asetettuja vaatimuksia, ja sauvojen keskiarvo yhdessä alkuperäisten tulosten kanssa ei saa alittaa vaadittua keskiarvoa.

Hitsausliitoksen iskusitkeyteen vaikuttaa hyvin paljon se, kuinka suureksi raekoko kasvaa sularajan vieressä olevassa alueessa eli karkearakeisessa muutosvyöhykkeessä (CG-HAZ). Tähän puolestaan vaikuttaa se, miten kauan alue on rakeenkasvun mahdollistavassa lämpötilassa eli n. 1100–1400°C välisellä lämpötila-alueella. Kun jäähtymisaika $t_{8/5}$ kasvaa, iskusitkeys yleensä heikkenee, mikä ilmenee muutosvyöhykkeen iskuenergian laskuna ja transiitolämpötilana nousuna. Sitkeyden heikkeneminen riippuu teräksen tyyppistä ja kemiallisesta koostumuksesta. Iskusitkeyden ja siihen liittyvän transiitolämpötilan arviointi ei ole yksinkertaista. Joillakin hitsauslaskureilla pystytään ennustamaan transiitolämpötilaa.

Kylmähalkkeilu ei ole mekaaninen ominaisuus, mutta on yksi olennainen tarkasteltava asia ferriittisten terästen hitsausliitoksen laadunhallintaa ajatellen. Sen esiintyminen riippuu kolmesta tekijästä: 1. teräksen vetähalkkeiluherkkyydestä, 2. hitsiliitoksen ve-

typitoisuudesta ja 3. hitsiliitoksessa vaikuttavasta vetojännityksestä. Ennen hitsausta kylmähalkeiluherkkyyttä on arvioitava ja päätettävä, onko käytettävä esimerkiksi esikuumennusta, jolla jäähtymisnopeutta saadaan hidastettua ja näin vedyllä on riittävästi aikaa poistua hitsistä. Esikuumennustarvetta voidaan arvioida standardissa SFS-EN 1011-2 liitteessä C esitetyillä kahdella tavalla (tapa A ja B). Niidenkin käyttäminen vaatii harjaantuneisuutta ja mm. erilaisten diagrammien tarkastelua sekä laskutoimitusten tekemistä. Hitsauslaskurit sisältävät yleensä esikuumennustarpeen ja lämpötilan määrittämiseen soveltuvia osioita.

Hitsauslaskureiden tarkastelua

Hitsauslaskureihin tutustuminen on hyvä aloittaa tarkastelemalla, mitä ominaisuuksia tai parametrejä niillä voidaan ennustaa, taulukko 3. Japan Welding Engineering Society (JWES tästä eteenpäin) Online Calculation laskuri on selkeästi monipuolisin. Sillä pystytään tarkastelemaan kaikki edellä läpikäytyt ominaisuudet: murtolujuus, kovuus, transitiolämpötila, $t_{8/5}$ -aika ja esikuumennuslämpötila. Lisäksi se laskee faasimuutoslämpötilat A_{c1} , A_{c3} ja M_s . Dillingerin Welding Calculator ja ThyssenKruppin Proweld 6.0 laskevat hiiliekvivalentin arvot, HAZ:n maksimikovuuden, $t_{8/5}$ -ajan ja esikuumennuslämpötilan. Dillingerin Welding Calculator laskimen $t_{8/5}$ -ajan laskenta ei kuitenkaan toiminut. SSAB:n WeldCalc 3.0 laskurilla ei voida ennustaa kuin HAZ:n maksimikovuus

Taulukko 3. Eri hitsauslaskureilla ennustettavat ominaisuudet ja parametrit.

| Laskuri | Esi- kuumennus- lämpötila | HAZ kovuus | Hiili- ekvi- valentti | Jäähty- mis- aika $t_{8/5}$ | Murto- lujuus | Transitio- lämpötila | Faasi- muutos- lämpötilat |
|------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| JWES Online Calculation | x | x | x | x | x | x | x |
| Dillinger Welding Calculator | x | x | x | x* | | | |
| ThyssenKrupp Proweld 6.0 | x | x | x | x | | | |
| SSAB WeldCalc 3.0 | x | x | | | | | |
| GoWelding | x | | x | | | | |

* = laskenta ei toiminut

ja tarkastella esikuumennustarvetta. Tosin siinä on lomakeohjat alustavalle hitsausohjeelle (pWPS), menetelmäkoepöytäkirjalle (WPQR) ja hyväksytylle hitsausohjeelle (WPS). GoWelding-laskurilla voidaan laskea vain hiiliekvivalentti ja esikuumennuslämpötila.

Kaikissa laskureissa on oma käyttölogiikkansa, jonka oppimiskäyrä on kohtuullisen nopea. Laskureiden käytettävyyteen liittyen voidaan todeta seuraavaa:

- Dillingerin Welding Calculator ja JWES Online Calculation laskureissa kemiallinen koostumus joudutaan syöttämään useampaan kertaan eikä tuloksia saada tallennettua, mikä hidastaa ja hankaloittaa työskentelyä huomattavasti.
- Proweld 6.0 ja WeldCalc 3.0 -laskureissa on tallennustoiminto, jolla tarkasteltavan teräksen kemiallinen koostumus voidaan tallentaa myöhempää käyttöä varten. Tämä helpottaa ja nopeuttaa työskentelyä.

- WeldCalc 3.0 ja ThyssenKruppin Proweld 6.0 vaativat käyttäjän rekisteröitymisen, joka kuitenkin on kohtuullisen vaivatonta.
- GoWelding on vanhahko (sivujen päivityksiä on tehty 2002 – 2014), mikä johtunee siitä, että sivustoa on ylläpitänyt yksityishenkilö (Steven Richard).

Hiiliekvivalenttilaskuri

Kaikissa laskureissa on omat käyttöliittymät eri laskennoille. Kuvassa 2 on esitetty esimerkiksi ThyssenKruppin Proweld 6.0 hiiliekvivalentin laskentaväliohje, johon syötetään tarkasteltavien terästen kemialliset koostumukset. Seosaineiden pitoisuudet voidaan syöttää näppäimistöltä suoraan tai sitten hakea haluttu arvo – ja + komentopainikkeiden avulla. Syötetyt arvot voidaan tallentaa Main – alusvetovalikon ”Save” – toiminnalla, mikä helpottaa jatkotarkasteluja. ”Calcula-

Calculation of various carbon equivalents

| chemical composition in % | range of validity | 1st analysis | 2nd analysis |
|---------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| carbon C | (0,05 - 0,32) | 0,170 | 0,090 |
| silicon Si | (< 0,80) | 0,4 | 0,25 |
| manganese Mn | (0,50 - 1,90) | 1,55 | 1,15 |
| chromium Cr | (< 1,50) | 0 | 0 |
| copper Cu | (< 0,70) | 0 | 0 |
| molybdenum Mo | (< 0,75) | 0 | 0 |
| nickel Ni | (< 2,50) | 0 | 0 |
| niobium Nb | (< 0,06) | 0 | 0 |
| vanadium V | (< 0,18) | 0 | 0 |
| boron B | (< 0,005) | 0 | 0 |

| carbon equivalents in % | | |
|-------------------------|------|------|
| CET (SEW 088-93) | 0,33 | 0,21 |
| CE (BS 5135) | 0,43 | 0,28 |
| PCM (ANSI/AWS D1.1-96) | 0,26 | 0,16 |
| CEN (JIS B8285) | 0,43 | 0,21 |

Kuva 2. ThyssenKruppin Proweld 6.0 hiiliekvivalenttilaskurin kemiallisen koostumuksen syöttöikkuna.

Welding Technology Information Center of The Japan Welding Engineering Society

■ Calculation software of welding

1.1 Carbon equivalents and transformation temperature:

| Chemical Composition Input (wt%) | Carbon Equivalents (wt%) | |
|----------------------------------|--------------------------|--|
| C(<0.8) 0.17 | Mo(<1.0) 0.01 | CE(IIW) 0.411 |
| Si(<1.5) 0.34 | V(<0.1) 0.002 | CE(WES) 0.401 |
| Mn(<3.0) 1.21 | Nb(<0.1) 0.02 | Pcm 0.259 |
| P(<0.025) 0.004 | Ti(<0.1) 0.004 | CEN 0.410 |
| S(<0.025) 0.044 | Al(<0.1) 0.044 | Transformation Temp (°C) (Mn<2, Cu<1, Cr<2.5, Mo<0.5) |
| Cu(<2.0) 0.21 | Ni(<0.01) 0.001 | Ac3 858.0 |
| Ni(<10.0) 0.25 | O(<0.01) 0.001 | Ac1 725.6 |
| Cr(<10.0) 0.03 | B(<0.003) 0.0001 | Ms 417.4 |

Calculate Initialize

May 12, 2007 updated
Source code by N.Y.

Copyright The Japan Welding Engineering Society, 2002-2020 All Right Reserved.

Kuva 3. JWES hiiliekvivalenttilaskurin käyttöliittymä.

te” – komentopainike käynnistää hiiliekvivalenttien laskennan. Laskuri laskee arvot seuraaville yleisimmille hiiliekvivalenteille: CET, CE, CEN ja P_{cm}.

Hiiliekvivalenttien laskentaan käytettävät kaavat ovat:

$$CET=C+\frac{Mn+Mo}{10}+\frac{Cr+Cu}{20}+\frac{Ni}{40} \quad (1)$$

$$CE=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

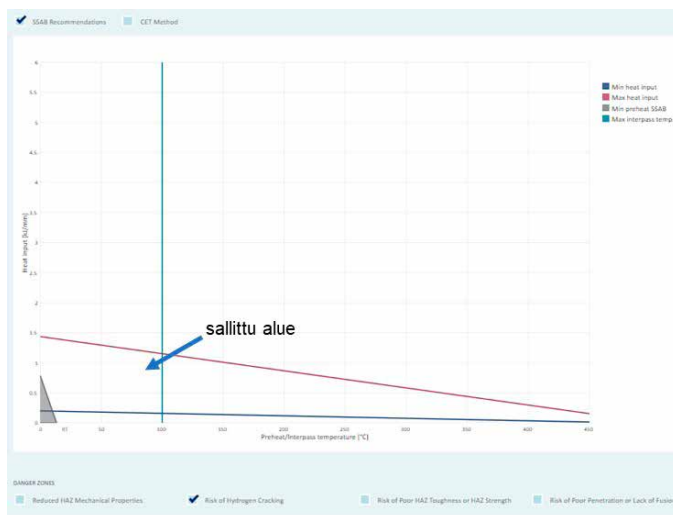
$$CEN=C+\{0.5+0.25 \tanh [20(C-0.12)]\} \times \left[\frac{Si}{24}+\frac{Mn}{6}+\frac{Cu}{15}+\frac{Ni}{20}+\left(\frac{Cr+Mo+Nb+V}{5}\right) \right] \quad (3)$$

$$P_{cm}=C+\frac{Si}{30}+\frac{Mn}{20}+\frac{Cu}{20}+\frac{Ni}{60}+\frac{Cr}{20}+\frac{Mo}{15}+\frac{V}{10}+5xB \quad (4)$$

Toisena esimerkkinä nähdään kuvassa 3 JWES Online Calculation laskurin hiiliekvivalentin ja faasimuutoslämpötilojen laskentaan liittyvä käyttöliittymä. Syötettyjä arvoja ei voida tallentaa eli ne joudutaan syöttämään aina uudelleen, jos halutaan palata laskentaan toisen istunnon aikana. Tämän lisäksi kemiallinen koostumus joudutaan syöttämään uudelleen myös muiden laskentojen (HAZ kovuus, esikuumennuslämpötila, murtojuuus ja transitiolämpötila) yhteydessä. Eli käyttöliittymä ei ole käyttäjystävällinen, vaan edellyttää paljon ylimääräistä työtä, kun teräksen kemiallinen koostumus joudutaan syöttämään aina uudelleen.

Esikuumennuslämpötilan laskuri

Kuvassa 4 nähdään SSAB:n WeldCalc 3.0 laskurin esikuumennuslämpötilan lasken-



Kuva 4. SSAB:n WeldCalc 3.0 esikuumennuslämpötilan laskentaikkuna.

Kuva 5. Termomekaanisesti valssattu erikoislujuu 700MC Plus teräs valittuna STRENX-kirjastosta.

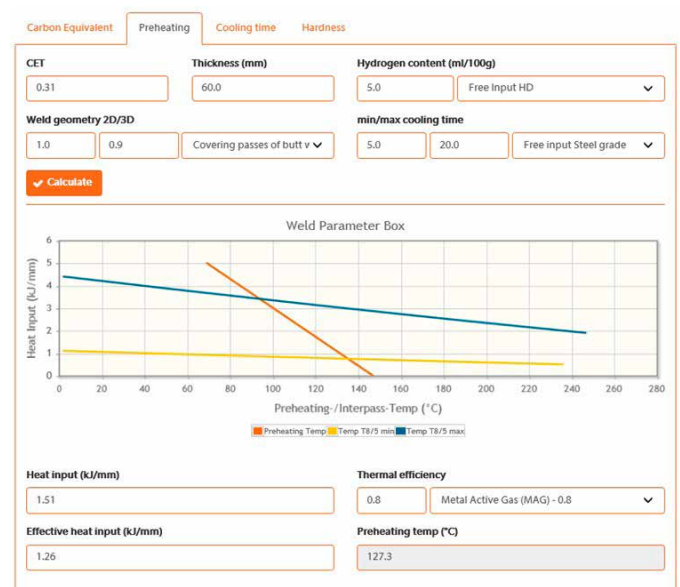
nan käyttöliittymä. Esikuumennuslämpötilaa ei ilmoiteta yksittäisenä lukuna, vaan se on luettava diagrammissa esitetyn sallitun alueen avulla. Esikuumennuksen määritystapa perustuu SSAB-tapaan (SSAB Recommendations) tai standardin SFS-EN 1011-2 liitteessä C esitettyyn tapaan B (CET-tapa). Diagrammiin voidaan valita korostettavaksi ns. ”vaaralliset alueet” eli:

- alue, jossa on vaarana muutosvyöhykkeen mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen
- alue, jossa riskinä on vetyhalkeilu
- alue, jossa riskinä on

muutosvyöhykkeen iskusitkeyden ja lujuuden heikkeneminen

- alue, jossa riskinä on vajaa tunkeuma tai liitosvirhe

Laskuriin voi valita tarkasteltavan teräksen kirjastosta teräs (STRENX/HARDOX, kuva 5) tai syöttää sen näppäimistöltä (OTHER). Jos koostumus syötetään näppäimistöltä, pitää sen lisäksi syöttää t_{8/5}-ajan vaihteluväli ja aineenpaksuus. Osalle kirjastossa olevista teräksistä laskuri antaa suoraan t_{8/5}-ajan vaihteluvälin. Näppäimistöltä syötetty kemiallinen koostumus on tallennettavissa, mikä vaatii kuitenkin hieman ”kikkailua”, koska



Kuva 6. Dillingerin Welding Calculator laskimen esikuumennuslämpötilan laskentaikkuna.

Pre-heat Calculator

Pre-Heat Calculator to EN1011 Part 2 - Non Alloyed And Low Alloy Steels.

Information on how to use this page

Heat Input

Enter Arc Energy KJ/mm OR

Select Welding Process

Heat Input KJ/mm = Note, this box is not for data input.

Carbon Equivalent

Enter Carbon Equivalent OR

Hydrogen Scale

Select Hydrogen Scale

Combined Thickness

Enter Combined Thickness mm Note Thickness must be 2 x T for a butt weld

Calculate Pre-Heat

Min Pre-Heat Temperature= °C

Welding Condition Input

Current(A) 50<A<5000
 Voltage(V) 5<V<100
 Velocity(cm/min) 1<Vel<1000
 Arc Efficiency 0.3<Eata<1.0
 Thickness(mm) 5<Thick<200
 Ambient Temp(°C) -50<Tambinet<50
 Preheat&Interpass(°C) -50<Tph&interpass<400

Welding Condition Output

Arc Energy(kJ/mm) 2.550
 Heat Input(kJ/mm) 2.040
 Welding Cooling Time,t8/5(s) 26.354

HAZ Maximum Hardness estimated

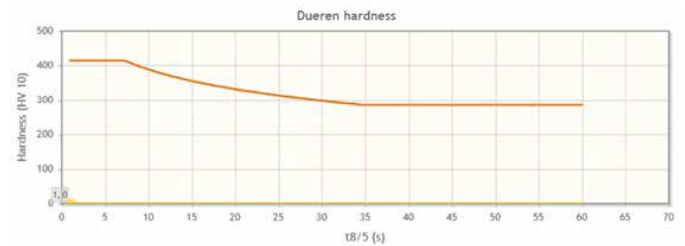
Hv-5 282.5
 Martensite Volume(%) 20.8

Composition Input(wt%)

| | | | | | | | |
|------|--------|-------|--------|----|--------|----|-------|
| C | 0.136 | S | <0.025 | Mo | 0.462 | Al | <0.1 |
| <0.8 | | | | V | 0.008 | N | <0.01 |
| Si | 0.31 | Cu | 0.031 | Nb | 0.003 | O | <0.01 |
| <1.5 | | Ni | 0.05 | B | 0.0001 | | |
| Mn | 0.6 | Cr | 1.02 | Ti | <0.1 | | |
| <3.0 | | <10.0 | | | | | |
| P | <0.025 | | | | | | |

May 12, 2007, updated
Source code by N.Y.

Kuva 9. JWES laskurin laskimen kovuusennuste kuimalujalle 13CrMo4-5 teräkselle.



Cooling time t8/5(s) Hardness (HV 10)

Kuva 10. Dillingerin Welding Calculation laskimen kovuusennuste kuimalujalle 13CrMo4-5 teräkselle.

antamalla niiden laskentaan tarvittavien parametrien arot. Lisäksi valitaan käytettävä vetysteikko ja yhdistetty aineenpaksuus. Esikuumennuslämpötila lasketaan standardin SFS-EN 1011-2 liitteessä C esitetyllä tavalla A.

Muutosvyöhykkeen kovuus

Kaikilla testatuilla laskureilla, paitsi GoWelding laskurilla, pystytään arvioimaan muutosvyöhykkeen suurinta kovuutta. Tämä on tarpeen mm. menetelmäkokeen suunnittelun yhteydessä, kun halutaan varmistua siitä, että kovuudet eivät ylitä sallittuja teräsryhmäkohtaisia arvoja.

Kuvassa 8 on esitetty osa ThyssenKrupp Proweld 6.0 laskurin muutosvyöhykkeen enimmäiskovuuden laskentaan liittyvää käyttöliittymästä. Kovuudet on annettu eri t_{8/5}-ajoille. Kovuus lasketaan Yuriokan kaavalla, kuten tehdään myös JWES:n laskurissa.

Kuvassa 9 nähdään esimerkki muutosvyöhykkeen enimmäiskovuuden laskennan tuloksista kuimalujalle teräkselle 13CrMo4-5

Kuva 8. Proweld 6.0 laskurilla las- ketut muutosvyö- hykkeen enimmäis- kovuuden arvot

Kuva 7. GoWelding laskurin esikuumennuksen laskentaikkuna.

Calculation of maximum hardness in the HAZ

| element content in % | range of validity | 1st analysis | 2nd analysis |
|----------------------|-------------------|--------------|--------------|
| carbon C | (<0,3) | 0,170 | 0,090 |
| silicon Si | (<1,2) | 0,4 | 0,25 |
| manganese Mn | (<2) | 1,55 | 1,15 |
| chromium Cr | (<1) | 0 | 0 |
| copper Cu | (<0,9) | 0 | 0 |
| molybdenum Mo | | 0 | 0 |
| nitrogen N | | 0 | 0 |
| nickel Ni | (<5) | 0 | 0 |
| niobium Nb | | 0 | 0 |
| vanadium V | | 0 | 0 |
| boron B | | 0 | 0 |

| maximum hardness HV 10 by Yurioka formula | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| cooling time in t8/5 in s | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 60 |
| 1st analysis | 379 | 320 | 286 | 267 | 246 | 235 | 228 |
| 2nd analysis | 228 | 202 | 192 | 187 | 181 | 179 | 174 |

laskurin luoman wcc-tiedoston joutuu siirtämään johonkin oman tietokoneen kansioon, josta se on myöhemmin löydettävissä.

Dillingerin Welding Calculator laskimessa esikuumennuslämpötilan esitys on samankaltainen, mutta lisäksi annetaan täsmällinen CET-hiilikvivalentin arvosta, aineenpaksuudesta, vetypitoisuudesta, liitostyyppistä, jäähtymisajasta ja lämmöntuonnista riippuva lämpötila, kuva 6. Kun on tarvetta vain esikuumennuslämpötilan tarkasteluun, ei laskuriin tarvitse syöttää teräksen kemiallista

koostumusta, jos hiilikvivalentin CET- arvo on tiedossa. Ellei CET:n arvo ole tiedossa, lasketaan se "Carbon Equivalent" laskentaikkunassa. Tuloksia ja lähtötietoja ei voida tallentaa. Esikuumennuksen määrittystapa perustuu standardin SFS-EN 1011-2 liitteessä C esitettyyn tapaan B (CET-tapa).

GoWelding laskurin esikuumennuksen laskimen käyttöliittymä on esitetty kuvassa 7. Siihen voidaan syöttää suoraan kaarienergian (E) ja valitun hitsausprosessin sekä hiilikvivalentin arvot. Ne voidaan myös laskea

JWES:n laskimella laskettuna. Syöttötietoina vaaditaan teräksen kemiallisen koostumuksen lisäksi hitsausvirta, kaarijännite, hitsausnopeus, terminen hyötysuhde, hitsaus- ja esikuumentuslämpötila. Laskin ennustaa muutosvyöhykkeen kovuudeksi arvoa 282.5 HV5 hitsin jäähtymisajalla $t_{8/5} = 26.354$ s.

Kuvassa 10 on esitetty Dillingerin laskimen kovuusennuste samalle kuunalujalle teräkselle. Ennustettu kovuus on hieman korkeampi ja $t_{8/5}$ -aika (5 s) paljon lyhyempi verrattuna JWES:n laskurin tuloksiin. Kovuuden ennustamisessa käytetään eri kaavaa eli Dillingerin laskin käyttää nk. Dürenin kaavaa. Erot ennustetussa kovuudessa johtuvat todennäköisesti eri laskentakaavojen käytöstä.

Laskureissa käytetään kovuuden ennustamiseen Yuriokan, Oshitan ja Tamehiron v. 1981 julkaisemaa kaavaa ja Lorenzin & Dürenin samana vuonna julkaisemaa kaavaa. Ne ovat sen verran monimutkaisia, että niiden tarkempi tarkastelu tässä yhteydessä ei ole mielekäästä.

Laskurien testausta

Laskureita testattiin käyttämällä laskennoissa kolmea terästä ja vakiohitsausarvoja:

- teräkset P355NL2 (s = 60 mm), S690QL (s = 12 mm) ja S700MC (s = 10 mm)
- hitsausprosessi 136 (MAG-jauhetäytelankahitsaus), kaarijännite U = 33 V, hitsausvirta I = 200 A ja hitsausnopeus v = 250 mm/min → lämmöntuonti Q = 1.26 kJ/mm
- liitosmuoto BW (päittäishitsi) eli yhdistetty aineenpakkaus = 2 x s

Terästen aineodistusten mukainen kemiallinen koostumus ja hiiliiekvivalentin CE arvo on annettu taulukossa 4.

Taulukossa 5 on annettu hiiliiekvivalenttien, esikuumentuslämpötilan ja maksimikovuuden tulokset eri laskureilla laskettuna. Hiiliiekvivalentin referenssi arvot on laskettu kemiallisten koostumusten perusteella MS Excel taulukkolaskenta ohjelmistolla ja esikuumentuslämpötilan referenssiarvot on laskettu standardin SFS-EN 1011-2 liitteessä C esitetyllä esikuumentustavalla B. Taulukon mukaan laskentatuloksissa on jonkin verran eroja. Suurimmat poikkeamat ovat JWES Online Calculation ja GoWelding laskurien S355NL2 teräkselle antamat, selvästi matalammat esikuumentuslämpötilat. GoWelding laskurin kohdalla tämä johtuu siitä, että esikuumentuslämpötilan määrittäminen perustuu standardin SFS-EN 1011-2 liitteen C graafiseen tapaan A ja JWES Online Calculation laskuri puolestaan Yuriokan ja Kasuyan kehittämään graafiseen tapaan. Lisäksi JWES Online Calculation laskurin antamat CET-hiiliiekvivalentin arvot ovat liian suuria kaikille teräksille. Maksimikovuuden

Taulukko 4. Laskureiden testauksessa käytettyjen terästen aineodistusten mukainen kemiallinen koostumus ja hiiliiekvivalentti CE.

| Teräs | %C | %Mn | %Cr | %Mo | %V | %Ni | %Cu | CE |
|----------------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| P355NL2 | 0.170 | 1.21 | 0.03 | 0.01 | 0.002 | 0.25 | 0.21 | 0.41 |
| S690QL | 0.166 | 0.81 | 0.28 | 0.207 | 0.007 | 0.05 | 0.009 | 0.40 |
| S700MC | 0.057 | 1.81 | - | 0.005 | 0.013 | - | - | 0.37 |

Taulukko 5. Kolmen teräksen (P355NL2, S690QL ja S700MC) hiiliiekvivalenttien, esikuumentuslämpötilan ja muutosvyöhykkeen maksimikovuuden arvot.

| Laskuri | Teräs | s (mm) | CET | CE | CEN | P _{cm} | T _p (°C) ^{*)} | HV _{max} | t _{8/5} (s) ^{**)} | M (%) |
|------------------------------|---------|--------|------|------|------|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------|
| Dillinger Welding Calculator | P355NL2 | 60.0 | 0.29 | 0.39 | 0.41 | 0.26 | 126 | 339 | - **) | - |
| Dillinger Welding Calculator | S690QL | 12.0 | 0.28 | 0.40 | 0.41 | 0.25 | RT | 296 | - **) | - |
| Dillinger Welding Calculator | S700MC | 10.0 | 0.28 | 0.40 | 0.40 | 0.25 | RT | 262 | - **) | - |
| SSAB WeldCalc 3.0 | P355NL2 | 60.0 | - | - | - | - | 125 | 340 | 6 | - |
| SSAB WeldCalc 3.0 | S690QL | 12.0 | - | - | - | - | RT | 302 | 11 | - |
| SSAB WeldCalc 3.0 | S700MC | 10.0 | - | - | - | - | RT | 250 | 16 | - |
| ThyssenKrupp Proweld 6.0 | P355NL2 | 60.0 | 0.31 | 0.41 | 0.41 | 0.26 | 126 | 306 | 8.2 | - |
| ThyssenKrupp Proweld 6.0 | S690QL | 12.0 | 0.28 | 0.40 | 0.40 | 0.25 | RT | 285 | 11.2 | - |
| ThyssenKrupp Proweld 6.0 | S700MC | 10.0 | 0.24 | 0.37 | 0.24 | 0.16 | RT | 256 | 16.1 | - |
| JWES Online Calculation | P355NL2 | 60.0 | 0.40 | 0.40 | 0.41 | 0.26 | 43 | 327 | 7 | 49.5 |
| JWES Online Calculation | S690QL | 12.0 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.25 | RT | 301 | 10 | 38.3 |
| JWES Online Calculation | S700MC | 10.0 | 0.38 | 0.37 | 0.24 | 0.17 | RT | 270 | 10 | 44.1 |
| GoWelding | P355NL2 | 60.0 | - | 0.41 | - | - | 20 | - | - | - |
| GoWelding | S690QL | 12.0 | - | 0.40 | - | - | RT | - | - | - |
| GoWelding | S700MC | 10.0 | - | 0.37 | - | - | RT | - | - | - |
| Referenssi (EN 1011-2) | P355NL2 | 60.0 | 0.31 | 0.41 | 0.41 | 0.26 | 124 | - | 6 | - |
| Referenssi (EN 1011-2) | S690QL | 12.0 | 0.28 | 0.40 | 0.41 | 0.25 | RT | - | 11 | - |
| Referenssi (EN 1011-2) | S700MC | 10.0 | 0.24 | 0.37 | 0.25 | 0.17 | RT | - | 16 | - |

*) RT = ei tarvita

**) = laskuri ei toiminut

arvoissa ei ole käytännön kannalta eroavaisuuksia eri laskurien välillä.

Taulukossa 5 laskurit käyttävät erilaisia esikuumentuksen määrittystapoja:

- Dillinger Welding Calculator: SFS-EN 1011-2: Tapa B (ns. CET-tapa)
- SSAB WeldCalc 3.0: SFS-EN 1011-2: Tapa B (ns. CET-tapa) ja SSAB:n oma tapa
- ThyssenKrupp Proweld 6: SFS-EN 1011-2: Tapa B (ns. CET-tapa)
- JWES Online Calculation: ns CEN-tapa
- GoWelding: SFS-EN 1011-2: Tapa A (ns. CE-tapa)

Toisena testitapauksena tarkastellaan liian suurien kovuusarvojen takia menetelmäkokeessa hylätyn putken ja levyn välisen T-liitoksen muutosvyöhykkeen kovuutta WeldCalc 3.0 ja Proweld 6.0 -laskureilla laskettuna.

Menetelmäkokeen lähtötiedot olivat

seuraavat:

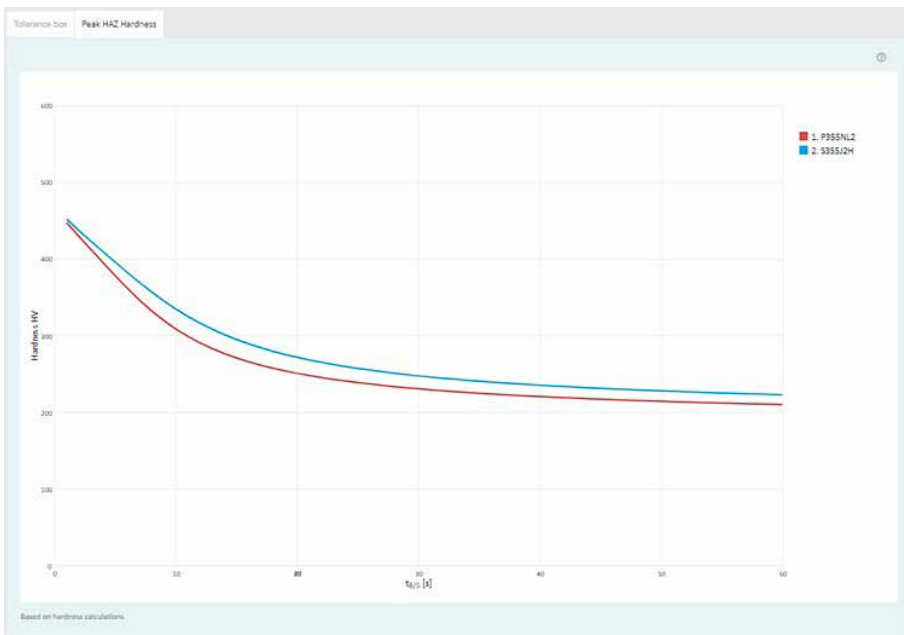
- koekappale A, seostamaton rakenneteräs S355J2H, putken halkaisija \varnothing 150 mm, T = 39 mm, CET = 0.32 %
- koekappale B, seostamaton painelaiteteräs P355NL2, levynpakkaus s = 16 mm, CET = 0.31 %
- hitsausprosessi MAG-umpilankahitsaus (135), lämmöntuonti Q = 1.1-1.2 kJ/mm
- kovuudet vaihtelivat välillä 149-409 HV10 koekappaleessa A ja välillä 146-406 HV10 koekappaleessa B

Kuvassa 11 on esitetty WeldCalc 3.0-laskurin laskentatulokset. Kuvassa annetaan muutosvyöhykkeen enimmäiskovuuden riippuvuus $t_{8/5}$ -ajasta. Haasteena on nyt se, että laskimella ei pystytä määrittämään $t_{8/5}$ -aikaa. Se täytyy arvioida jollakin muulla keinolla.

Miksi käyttää laskureita?

Hitsauslaskureilla voidaan tarkastella etukäteen hitsausliitoksen ominaisuuksia ja vaadittavaa esikuumennusta eli niiden avulla voidaan tehdä hitsaukseen liittyvää ”metallurgista suunnittelua”. Tässä tarkastellut laskurit soveltuvat seostamattomille ja niukkaseosteisille ferriittisille teräksille ja niistä helppokäyttöisimpiä olivat ThyssenKruppin Proweld 6.0 ja SSAB:n WeldCalc 3.0 lähinnä sen vuoksi, että niiden tulokset ja lähtötiedot voidaan tallentaa myöhempää käyttöä varten.

Laskureita kannattaa käyttää aktiivisesti, kun ollaan hitsaamassa uudentyypistä tai uudelta toimittajalta tulevaa terästä tai, kun esim. hitsausasento on sellainen, että lämmöntuonti on tavallisuudesta poikkeavaa. Tällöin liitoksen metallurgiset perusasiat ovat nopeasti tarkistettavissa ja näin voidaan välttyä turhilta kustannuksilta, joita syntyy mm. hitsin halkeamien ja hylättyjen menetelmäkokeiden takia.



Kuva 11. S355J2H / P355NL2 eripariliitoksen muutosvyöhykkeen enimmäiskovuuden riippuvuus $t_{8/5}$ -ajasta WeldCalc 3.0 laskurilla laskettuna.

Filet Weld on a T-Joint Direct input of E or Q

Attention: Please maintain the current delimiter symbol when entering floating point numbers!

CALCULATE

| Designation | Info | Result |
|----------------------|----------------|-------------------|
| Transition thickness | d_0 in mm | 15.4 |
| Type of heat flow | | Three-dimensional |
| Cooling time | $t_{8/5}$ in s | 5.2 |

Kuva 12. S355J2H / P355NL2 eripariliitoksen hitsin $t_{8/5}$ -aika Proweld 6.0 laskimella laskettuna.

maximum hardness HV by Yurioka formula

cooling time in $t_{8/5}$ in s

| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | Hardness |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
| 1st analysis | 379 | 308 | 272 | 251 | 231 | 221 | 215 | 211 | 379 |
| 2nd analysis | 397 | 335 | 295 | 271 | 247 | 235 | 227 | 222 | 397 |

Kuva 13. S355J2H / P355NL2 eripariliitoksen muutosvyöhykkeen enimmäiskovuuden riippuvuus $t_{8/5}$ -ajasta Proweld 6.0 laskurilla laskettuna.

Proweld 6.0 laskimella voidaan laskea $t_{8/5}$ -aika ja samalla myös 2D/3D-lämmönjohtumisen transitiopaksaus. Annetuilla lähtöarvoilla saadaan kuvan 12 mukainen tulos eli laskuri antaa $t_{8/5}$ -ajaksi 5.2 s kuvan 10 perusteella WeldCalcin ennustama maksimikovuus on luokkaa 400 HV, eli hieman pienempi kuin todellisuudessa mitatut arvot. Proweld 6.0 laskin antaa suunnilleen samat kovuuden ennustearvot taulukkomuodossa. kuva 13. Kovuuden arviointiin käytettävä aika laskuria käytettäessä on luokkaa minuutteja, kun lähtöarvot ovat tiedossa. Jos arviointi pitäisi tehdä ilman laskuria, tarvittaisiin siihen

hyvin paljon laskentaa (hiilikvivalentti, lämmöntuonti, $t_{8/5}$ -aika, kovuus) ja aikaa kului helposti kymmeniä minuutteja.

Vaikka lasketut kovuusarvot ovat hieman todellisuutta pienempiä, niin voidaan tulosten perusteella arvioida, kuinka paljon hitaampaa jäähtymisnopeutta ja sitä kautta suurempaa lämmöntuontia pitäisi käyttää, jotta menetelmäkokeen koehitsin kovuus saataisiin laskemaan alle sallitun. Kyseessä ovat materiaaliryhmän 1.2 teräkset, joten lämpökäsittelmättömän hitsin kovuuden tulee olla alle 380 HV10.

Lisälukemista

Nobuta Yurioka: Esikuumennustapojen vertailu, Hitsaustekniikka-lehti No 1/2009

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