

MIG/MAG-hitsausprosessit – aineensiirtyminen ja prosessinohjaus

Jonne Näkki

Erilaisia MIG/MAG-hitsausprosesseja on esitelty Hitsaustekniikka-lehdessä varsin harvoin. Lehden numerossa 2/2007 käsiteltiin MIG/MAG-prosesseja Raimo Suorannan artikkelissa ”MIG/MAG-hitsaus”, ja aihetta sivuttiin myös lehden numerossa 6/2017 allekirjoittaneen artikkelissa ”Kaaritehon mittaminen kaarihitsauksessa” sekä Niki Lankilan ja Reetta Verhon artikkelissa ”Aaltomuoto-ohjattu MIG/MAG-hitsaus ja uusi menetelmäkoestandardi SFS-EN ISO 15614-1: 2017”. Tässä artikkelissa esitellään joitakin uusia luokitteluja MIG/MAG-hitsausprosessille sekä niiden ohjaustavoille.

Yleistä

Varsinkin eri hitsauskonevalmistajien eri brändeillä myytävien MIG/MAG-hitsausprosessien määrä on suuri, useita kymmeniä. Suuren määrän vuoksi erilaiset MIG/MAG-hitsausprosessit ovat saattaneet muuttua käyttäjän näkökulmasta sekavaksi. Lisäksi olisi olennaista erottaa toisistaan MIG/MAG-hitsauksen aineensiirtymismuoto ja hitsausprosessin ohjaustapa, ts. onko prosessi kontrolloimaton, kontrolloitu tai ns. aaltomuoto-ohjattu, koska tällä on merkitystä myös lämmöntuonnin tai kaarienergian mittaamiseen. Tämä luokittelu aiheutti sekaannusta myös menetelmäkokeiden osalta.

Uuden, vuonna 2017 julkaistun menetelmäkoestandardin SFS-EN ISO 15614-1:2017 [1] mukaan lämmöntuonti voidaan korvata kaarienergialla (J/mm), jonka mittaamiseen annetaan ohjeet 2015 julkaistussa dokumentissa ISO/TR 18491 [2]. Tämä dokumentti luokittelee kaarihitsausprosessit aaltomuoto-ohjattuihin (*waveform controlled*) ja ei-aaltomuoto-ohjattuihin (*non-waveform controlled*). Tämä sama luokittelu oli ilmeisesti siirtynyt vuoden 2017 menetelmäkoestandardiin, koska SFS-EN ISO 15614-1:2017:n kohdassa 8.5.2.3 ”Aineensiirtymismuoto” mainitaan, että ”Käytettäessä aaltomuoto-ohjattua virtalähdettä (ks. ISO/TR 18491) sen valmistaja ja aaltomuodon ohjaustapa on kirjattava menetelmäkoepöytäkirjaan yhdessä muiden olennaisten tietojen kanssa. Muutos virtalähteen valmistajasta toiseen tai muutos aaltomuodon ohjaustavassa vaatii uuden menetelmäkokeen”. Itse ainakin tulkitin tämän kohdan standardista niin, että menetelmäkoe oli riippuvainen paitsi hitsausvirtalähteen valmistajasta ja ohjaustavasta,

niin myös synergiakäyrästä. Aaltomuotohan määräytyy synergiakäyrän ohjausparametrien mukaan, jolloin synergiakäyrän muutos muuttaa myös aaltomuodon ohjaustapaan.

Menetelmäkoestandardin SFS-EN ISO 15614-1:2017 kohta 8.5.2.3 kuitenkin muutettiin 30.8.2019 päivättyllä muutoksella [3]. Muutoksen jälkeen kohta menee seuraavasti: ”*Umpilankahitsauksessa ja metallitäytelankahitsauksessa lyhytkaarihitsaus kattaa vain lyhytkaarihitsauksen. Kuumakaari-, pulssi- ja väliskaarihitsaus kattavat toisensa*”. Alkuperäisen standardin ISO 15614-1 suomenoksessa käytettiin englannin kielen termistä ”*globular transfer*” (eli suuripisarainen aineensiirtymismuoto) suomen kielen termiä ”*väliskaarihitsaus*”, vaikka yleensä käytetään termiä ”*sekakaari*”.

Aineensiirtymismuodot

Perinteisesti MIG/MAG hitsauksessa tunnetaan kolme periaatteellista aineensiirtymismuotoa ja kaarityyppeä, oikosulkusiirtyminen (lyhytkaari), suuripisarainen siirtyminen (sekakaari) ja suihkumainen siirtyminen (kuumakaari). Näiden lisäksi pulssimainen aineensiirtyminen (pulssikaari) lasketaan usein neljänneksi aineensiirtymismuodoksi. Standardin SFS-EN ISO 4063 (Hitsaus ja niiden lähiprosessit. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset) mukaan aineensiirtymismuodot voidaan ne luokitella ja merkitä taulukon 1 mukaisesti kirjaimilla D, G, S ja P seuraavan esimerkin mukaisesti [4]. Esim. MIG-umpilankahitsaus, jossa käytetään lyhytkaarta, voidaan merkitä seuraavasti: ISO 4063 - 131-D.

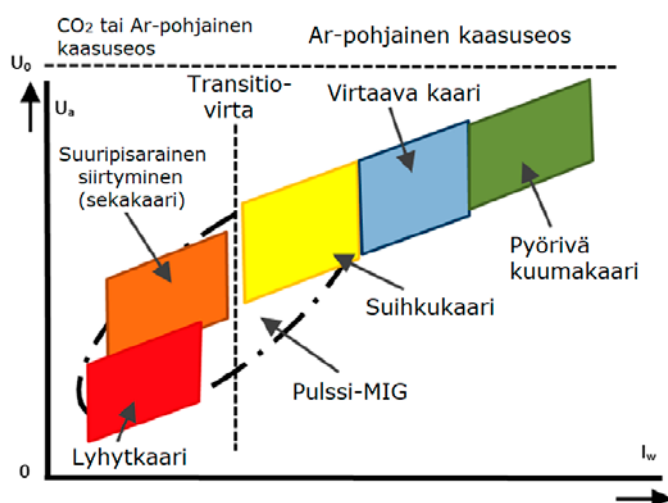
Taulukko 1. Standardin SFS-EN ISO 4063: 2011 mukainen MIG/MAG-prosessin aineensiirtymisen luokittelu [4].

Kirjaintunnus	Suomeksi	Englanniksi
D	Oikosulku-siirtyminen (lyhytkaari)	Short-circuit transfer (dip transfer) short arc
G	Suuripisarainen siirtyminen (sekakaari)	Globular transfer
S	Suihkumainen siirtyminen (kuumakaari)	Spray transfer
P	Pulssimainen siirtyminen (pulssikaari)	Pulsed transfer

Standardista on tulossa myös uusi versio, jossa on uusi luokka B, ”*buried arc transfer*”, jolla viitataan aineensiirtymiseen jauhekaariprosessissa.

Joissakin lähteissä lisäksi suurella jännitteen ja hitsausvirran arvoilla tapahtuva ns. ”*rotating arc*”, pyörivä kuumakaari, lasketaan viidenneksi aineensiirtymismuodoksi [5, 6]. Kuvassa 1 on esitetty MIG/MAG prosessin aineensiirtymismuotojen virtajännitealueet tutkijoiden Lordachescu ja Quintino (2008) mukaan [7].

Kuvassa 1 on jaettu myös kuumakaari kahteen alueeseen: ”*Spray arc*” (suihkukaari) ja ”*Streaming arc*” (virtaava kaari). Erona näiden välillä on lähinnä se, että ”*streaming arc*”-aineensiirtymisessä pisarat ovat pienempiä ja niiden siirtyminen langan kärjestä hitsisulaan on jatkuvaa [7]. Pulssiprosessissa, joka ulottuu kuvassa lyhytkaarialueelta kuumakaarialueelle, käytetään suurempaa hitsausvirtaa jaksoittain suurella taajuudella (< 50 Hz) sulapisaran irrottamiseksi. Tai toisin päin ajateltuna, periaatteessa katkotaan kuumakaarta lämmöntuonnin pienentämiseksi.



Kuva 1. MIG/MAG-kaarihitsausprosessin aineensiirtymismuodot virtajännitekuvaajassa [7].

MIG/MAG prosessien uudet luokittelut

Uusia luokitteluja MIG/MAG prosesseille on esittänyt edellä mainittujen Iordachescu ja Quintinon [7] lisäksi mm. Norrish vuonna 2003 [8], Lucas et al. vuonna 2005 [6] ja Scotti et al. vuonna 2012 [10]. Myös Lappeenrantaan teknillisen yliopiston Kah et al. julkaisivat vuonna 2014 pätevän artikkelin erilaisten MIG/MAG kaarityyppien ominaisuuksista [9]. Näissä uusissa luokitteluisa ensimmäisenä luokittelukriteerinä ei ole aineensiirtymismuoto (lyhyt-, kuuma-, tms.) sinänsä, vaan se toimii prosessi kuten on ymmärretty perinteisen MIG/MAG-virtalähteen toimivan, siis vain vakiojännitelähteenä (*natural*), vai kontrolloiko hitsausvirtalähde jatkuvasti prosessia siitä saatavan mittaus-tiedon perusteella (*controlled*).

Ruotsalaisen Tekniska Högskolan Västin vierailevana professorina toimivan Americo Scottin vuonna 2012 julkaistussa [10] kolmen pääluokan luokittelussa aineensiirtymismuodot ovat luonnollinen (*natural*), kontrolloitu (*controlled*) ja vaihteleva (*inter-*

changeable), kuva 2. Myös australialaisen professori John Norrishin luokittelussa [8] prosessit jaetaan kolmeen luokkaan; luonnollinen (*natural*), kontrolloitu (*controlled*) ja laajennettu (*extended*).

Scottin luokittelussa luonnollinen aineensiirtymisen (*natural transfer*) tapahtuu ilman hitsauskoneen adaptiivista osallistumista prosessiin, jännitteen, hitsausvirran, langansyöttönopeuden tai induktanssin muutoksen kautta. Tällöin aineensiirtymiseen vaikuttaa vain sulapisaraan vaikuttavat fysikaaliset voimat (pintajännitys, gravitaatio, ns. Lorenz tai pinch voima jne).

Luonnollinen aineensiirtymisen (*natural transfer*) on jaoteltu vielä alaryhmiin "Contact transfer" ja "Free-flight transfer". ryhmässä "Contact transfer" lanka käy säännöllisin väliajoin kontaktissa työkaluleeseen eli oikosulussa. Kyse on siis perinteisestä lyhytkaarihitsauksen oikosulku-aineensiirtymisestä. Ryhmässä "Free-flight transfer" on kyse perinteisestä välikaari- tai kuumakaari prosessista.

Kontrolloidussa aineensiirtymisessä (*controlled transfer*) vaikuttavat periaatteessa samat fysikaaliset voimat kuin luonnol-

lisessa aineensiirtymisessä, mutta näihin voimiin vaikutetaan tarkoituksella, jotta saataisiin hallittua prosessi paremmin. Esimerkkinä tästä on oikosulun tunnistaminen lyhytkaari prosessissa, jolloin hitsausvirtalähde rajoittaa nopeasti hitsausvirtaa, eikä roiskeita aiheuttavaa virran äkillistä kasvua pääse tapahtumaan.

Vaihtelevassa (*interchangeable*) aineensiirtymisessä vuorottelee kaksi tai useampi luonnollisen aineensiirtymisen luokkaa.

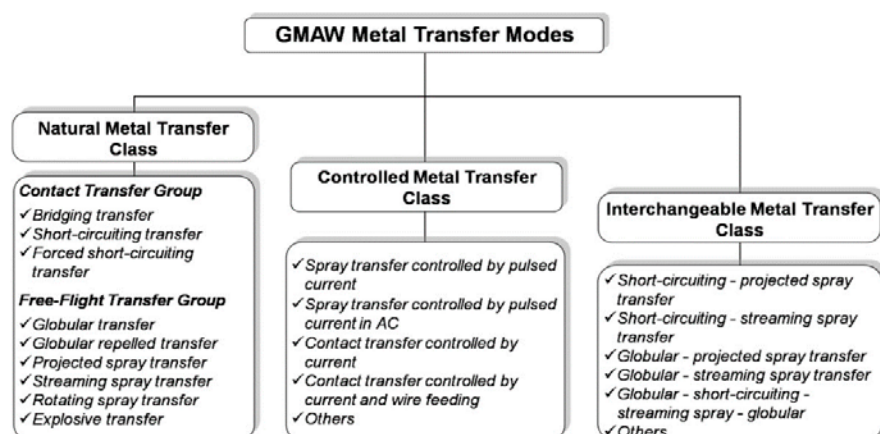
Esim. Froniuksen CMT (Cold Metal Transfer) prosessi kuuluisi Scottin luokittelussa alaluokkaan "Contact transfer controlled by current and wire feeding", eli prosessia kontrolloidaan vaikuttamalla sekä hitsausvirtaan että langansyöttöön.

MIG/MAG-prosessin ohjaus

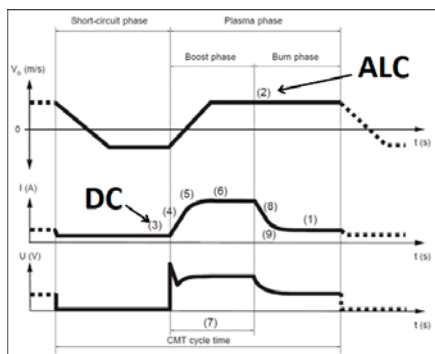
Perinteinen MIG/MAG-hitsausvirtalähde tuottaa tasajännitettä, tai sen tuottama jännite muuttuu vain hieman, kun hitsausvirta tai valokaaren pituus muuttuu. Tällöin prosessi pystyy säätymään automaattisesti muutoksiin työkalupaleen pinnan ja hitsauspistoolin välisessä etäisyydessä. Kun työetäisyys kasvaa, valokaaren pituus kasvaa, jolloin hitsausvirta ja langan sulamisnopeus pienenevät merkittävästi ja valokaari saavuttaa nopeasti alkuperäisen pituuden, koska lankaa syötetään vakionopeudella. Puhutaankin valokaaren tai MIG/MAG-prosessin itsesäätävyydestä.

Perinteisessä MIG/MAG-virtalähteessä lyhytkaarihitsausprosessin säätö tapahtui hitsausvirtapiirin induktanssin passiivisella säätämällä. Pulssiprosessi oli ensimmäinen MIG/MAG-hitsausprosessi, jossa kaari oli kontrolloitu ja jota voidaan pitää periaatteessa myös ns. aaltomuoto-ohjattuna prosessina. Pulssiprosessin ensimmäiseksi kirjallisuusviitteeksi esitetään usein Needhamin artikkelia British Welding Journalissa vuodelta 1965 [11].

Nykyaikaiset elektronisesti ohjatut MIG/MAG-hitsausvirtalähteet mittaavat hitsausvirtaa ja jännitettä ja esim. langan sulamisnopeutta, ja hitsausprosessia kontrolloidaan mittaustiedon perusteella. Esim. lyhytkaari prosessin roiskeettomuus perustuu oikosulun nopeaan tunnistamiseen ja virran rajoittamiseen. Froniuksen uudet virtalähteet mittaavat jännitettä ja virtaa 40 kHz taajuudella [12], eli mittausta tapahtuu 40 000 kertaa sekunnissa, ja tätä tietoa käytetään hitsauksen aikaisen kaaritehon tai energian määrittämiseen. Kempillä lämmöntuonnin mittaukseen käytetään 20 kHz taajuutta ja prosessia kontrolloidaan muutaman kymmenen kilohertzin taajuudella, prosessista riippuen [13]. Kuitenkin tarkempi tieto siitä, miten hitsausvirtalähteet kontrolloivat hitsausprosessia, on ilmeisesti melko lailla jokaisen valmistajan "top secret" tietoa, josta ei kerrota ulkopuolisille.



Kuva 2. MIG/MAG-prosessien luokittelu kolmeen pääluokkaan luonnollinen, kontrolloitu ja vaihteleva [10].

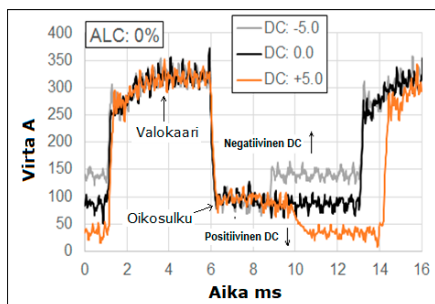


Kuva 3. Yksi sykli Froniuksen CMT-prosessista. Ylin kuvaaja langansyöttönopeus, keskellä hitsausvirta, alhaalla hitsausjännite. Numerot 1 – 9 viittaavat taulukon 2 arvoihin. [14].

MIG/MAG-hitsausprosessissa voi olla kymmeniä eri säätöparametreja, joilla ohjataan myös hitsauksen aaltomuotoa. Esimerkinä näistä on esitetty seuraavassa kuvassa 3 Froniuksen CMT-prosessin yhden syklin langanopeus-virta-jännitekaavio sekä joitakin synergiakäyrän parametreja. Näistä parametreista voi käyttäjä säätää, langansyöttönopeutta, langan eteenpäin syötön nopeutta (2, ALC) ja langassa kulkevaa virtaa oikosulun aikana (3, DC), tekemättä muutoksia itse synergiakäyrään.

CMT-prosessin ohjausparametreja on ilmeisesti myös muita, mutta nämä ovat ne, jotka käyttäjä saa halutessa esille virtalähteen ohjauspaneelista, ja joita voi muuttaa, jos haluaa tehdä muutoksia synergiakäyrään. Kuva 3 ei kerro kuitenkaan mitään siitä, miten virtalähde mittaa ja kontrolloi prosessia hitsauksen aikana.

Kuvassa 4 on esimerkki siitä, miten CMT-prosessin ohjaus kontrolloi nopeasti hitsausprosessia. Kuvaajassa on oskilloskoopilla 50 kHz taajuudella mitatut virta-arvot CMT-pro-



Kuva 4. Vasemmalla oskilloskoopilla mitattu virtakuvaaja CMT-prosessin syklistä, kun ohjausparametrin DC arvoa vaihdeltiin välillä -5.0, 0.0 ja +5.0. Oikealla on taulukossa vastaavat asetusarvot ja mittaustulosten numeerisia arvoja [15].

Taulukko 2. DVS 0973 mukainen luokittelu MIG/MAG-hitsausprosessin ohjausvaihtoehdoista suomeksi, englanniksi ja alkuperäiset saksankieliset termit [17].

No.	Suomeksi	Englanniksi	Saksaksi
5.3 (1)	Kontrolloitu lyhytkaari	Controlled short arc	Geregelter Kurzlichtbogen
5.3.1 (2)	Roiskeeton lyhytkaari	Low-spatter short arc	Spritzerarmer Kurzlichtbogen
5.3.2 (3)	Matalaenerginen lyhytkaari	Energy-reduced short arc	Energiereduzierter Kurzlichtbogen
5.3.3 (4)	Suuritehoinen lyhytkaari	High-performance short arc	Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen
5.5 (5)	Modifioitu kuumakaari	Modified spray arc	Modifizierter Sprühlichtbogen
5.6 (6)	Pulssikaari	Pulsed arc	Impulslichtbogen
5.7 (7)	Modifioitu pulssikaari	Modified pulsed arc	Modifizierter Impulslichtbogen
5.8 (8)	Vaihtovirtaprosessi	Alternating current process	Wechselstromprozess
5.9 (9)	Yhdistetyt prosessi-variantit	Combined process variants	Kombinierte Prozessvarianten
5.10 (10)	Syklinen langan liike	Cyclic wire movement	Zyklische Drahtbewegung

sessista noin 1,5 syklin aikana, kun hitsattiin yksittäispalkoja Inconel 625 langalla teräs-alustan päälle. Koe toistettiin kolmella säätöparametrin DC (Dynamic Control) -arvolla -5.0 (harmaa), 0.0 (musta) ja +5.0 (oranssi), joka vaikuttaa oikosulun aikaiseen virran arvoon.

Kuvaajan vaaka-akselilla on aika millisekunteina. Oikosulkuvaihe, jossa virran arvo on alempi, luokkaa 50-150 A, alkaa vaaka-akselin 6 ms kohdalla ja kestää kohtaan 13-14 ms saakka. Tänä aikana laitteen ohjaus nostaa tai laskee oikosulkuvirran arvoa noin 9-10 ms kohdalla, riippuen siitä mikä on parametrin DC asetus ja vastaava oikosulkuvirran asetusarvo. Taulukossa esitetyissä virran mittaustuloksissa on hajontaa, mutta virran keskiarvot osuvat varsin hyvin samaan kuin asetusarvot. Negatiivisella parametrin DC arvolla oikosulkuvaiheen virta on suurempi ja saadaan sulatettua suurempi määrä lisäainetta, ilman että se aiheuttaisi roiskeita, tai lisäksi merkittävästi tunkeumaa ja seostumaan, joka on eduksi päällehitsauksessa.

DSV 0973 mukainen MIG/MAG-prosessien luokittelu

Saksalainen hitsausyhdistys DVS (Deutscher Verband für Schweißen) on julkaissut vuonna 2015 pätevän luokittelun siitä, miten MIG/MAG-hitsausprosessia ohjataan eri valmistajien hitsausprosesseissa [17]. Tässä luokittelussa prosessit on luokiteltu sekä aineensiirtymistavan että prosessin ohjaustavan mukaan kymmeneen eri luokkaan, taulukko 2. Prosessien suomenkieliset käännökset

eivät ole vakiintuneita, vaan kirjoittajan muokkaamia. Taulukossa on esitetty myös prosessien englannin- ja saksankieliset termit. Taulukossa on esitetty sulkeissa myös DVS:n vuonna 2016 julkaistussa postereissa [18] esitetyt prosessien numerotunnukset 1 – 10. Seuraavassa on lyhyt selostus erilaisten prosessien pääpiirteistä:

Kontrolloidussa lyhytkaarihitsauksessa (5.3) hitsausvirtalähteen ohjaus havaitsee sekä oikosulku- että valokaarivaiheen ja säätää näitä molempia. Tämä luokka on jaettu vielä alaluokkiin: **roiskeeton (5.3.1)**, **matalaenerginen (5.3.2)** ja **suuritehoinen (5.3.3)** lyhytkaarihitsaus, jossa tavoitteena on saavuttaa suurempia langansyötön arvoja ennen kuin aineensiirtymismuoto vaihtuu sekakaareen.

Modifioidussa kuumakaaressa (5.5) prosessia pyritään kontrolloimaan, niin että valokaari saadaan keskitettyä ja että kuumakaari alkaa aikaisessa vaiheessa, ts. pienemmällä hitsausvirran arvoilla.

Pulssikaarena (5.6) pidetään tässä yhteydessä tyristoriohjauttua perinteistä pulssikaarta, joka oli käytössä ennen elektronisesti ohjattuna hitsauskoneita.

Modifioitu pulssikaari (5.7) tarkoittaa prosessia, jolle on tunnusomaista suurempi parametrin määrä, ja joita kontrolloidaan synergiakäyrien ohjausparametrien kautta.

Vaihtovirtaprosessissa (5.8) tapahtuu kontrolloitu napaisuuden vaihto aikana tehoelektroniikkaa käyttäen.

Yhdistetyt prosessivariantit (5.9) -luokassa yhdistyy useampi kuin yksi prosessiluokka. Muutokset prosessien välillä, tai prosessien ohjauksen ja kontrolloinnin muutokset eivät ole havaittavissa silmämääräisesti. Sama

Nimitys	Valmistaja	5.3 Kontrolloitu lyhytkaarhitsaus	5.3.1 Rolkkeeton lyhytkaarhitsaus	5.3.2 Matalaenerginen lyhytkaarhitsaus	5.3.3 Suuriteholinen lyhytkaarhitsaus	5.5 Modifioitu kuumakaarhitsaus	5.6 Pulssikaarhitsaus	5.7 Modifioitu pulssikaarhitsaus	5.8 Vaihdevirtaprosessi	5.9 Yhdistetyt prosessivariantit	5.10 Syklinen lاندan liike
CMT (Cold Metal Transfer)	Fronius	X	X	X	X						X
CMT Advanced	Fronius	X	X	X	X				X	X	X
CMT Pulse	Fronius							X		X	X
ColdArc	EWM	X	X	X							
ColdMIG	Merkle	X	X	X							
ColdWeld	Cloos	X		X					X		
ControlWeld	Cloos	X	X								
DeepArc	Merkle					X					
FOCUS.ARC	Rehm	X		X		X					
FOCUS.PULS	Rehm							X			
ForceArc	EWM					X					
HighUP	Merkle	X					X			X	
newArc	Kjellberg	X	X		X	X					
RapidWeld	Cloos					X					
RootArc	EWM	X	X	X							
LSC (Low Spatter Control) & LSC Advanced	Fronius	X	X	X							
PCS (Puls Controlled Spray Arc)	Fronius					X					
PMC (Pulse Multi Control)	Fronius							X			
POWER.ARC	Rehm	X		X							
ProSWITCH	Merkle									X	
SpeedArc	Lorch	X				X					
SpeedCold	Lorch	X	X	X							
SpeedPulse	Lorch						X	X			
SpeedRoot	Lorch	X	X								
SSA (SpeedShortArc)	SAF Oerlikon	X			X						
SpeedUp	Lorch	X					X	X		X	X
WiseRoot	Kemppi	X	X								
WiseThin	Kemppi	X		X							

[www.hitsaus.net]

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \times I_i}{n}$$

IP: hetkellinen teho (Instantaneous Power)
 U_i : jännite jokaisessa mittausjakson mittauspisteessä
 I_i : virta jokaisessa mittausjakson mittauspisteessä
 n : näiden mittauspisteiden lukumäärä

Hetkellinen energia (IE) saadaan kertomalla hetkellinen teho (IP) kaariajalla.

Kuten edellä mainittiin, uudet MIG/MAG-virtalähteet mittaavat hitsauksen aikais-
 ta jännitettä ja virtaa suurella taajuudella
 (Kemppi 20 kHz, Fronius 40 kHz), ja pystyvät
 laskemaan lämmöntuonnin tai kaarienergian
 em. menetelmien B ja C mukaan. Esim. Kem-
 pin X8 laskee hitsauksen lämmöntuonnin,
 joka siis ottaa huomioon prosessin termisen
 hyötysuhteen eli ns. k-kertoimen (0,8) [13],
 kun ohjauspaneeliin, Control Pad, annetaan
 hitsin pituus. Froniuksen TPS taas ilmoittaa
 näytöllä kaarienergian, arc energy (IE), joka
 ei sisällä k-kerrointa [19].

Jonne Näkki
TKI-asiantuntija (TkT, IWE)
Centria-ammattikorkeakoulu
Kokkola
jonne.nakki@centria.fi

Tämän artikkeli on kirjoitettu osana EU-
 alueohjelma Interreg Nordin rahoittamaa
 tutkimushanketta: *CINEMA - Towards circu-
 lar economy via ecodesign and sustainable
 remanufacturing.*



Lähteet

1. SFS-EN ISO 15614-1:2017. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus.
2. ISO/TR 18491 (2015). Welding and allied processes — Guidelines for measurement of welding energies.
3. SFS-EN ISO 15614-1:2017/A1:2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus.
4. SFS EN ISO 4063:2011: Hitsaus ja niiden lähiprosessit. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset.
5. Holthaus, M. (2014). International Welding Engineer (IWE) training course material, Part 1, Welding processes and equipment. GSI SLV GmbH, Gesellschaft für Schweißtechnik. International – Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalten. SLV Duisburg.
6. Lucas, W., Iordachescu, D., & Ponomarev, V. (2005). Classification of metal transfer modes in GMAW, IIW Doc No XII-1859-05.
7. Iordachescu, D., & Quintino, L. (2008). Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. Journal of materials processing technology, 202(1-3), 391-397.
8. Norrish, J. (2003). A review of metal transfer classification in arc welding (IIW DOC. XII-1769-03. Bucharest). Villepinte, France: International Institute of Welding.
9. Kah, P., Latifi, H., Suoranta, R., Martikainen, J., & Pirinen, M. (2014). Usability of arc types in industrial welding. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9(1), 15.
10. Scotti, A., Ponomarev, V. & Lucas, W. (2012). Scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012). pp 1406 – 1413.
11. Needham, J. C. (1965). Material transfer characteristics with pulsed current. Brit. Weld. J., 12(5).
12. Samuel Karjalainen, Pronius Oy
13. Jani Kumpulainen, Kemppi Oy.
14. Willinger, M. (2014). MIG/MAG, CMT & CMT Adv. Parameter Adjustments. Fronius International GmbH. March 2014.
15. Näkki, J. (2018). Properties of alloy 625 claddings made with laser and CMT methods. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4279-4>
16. Ponomarev, V., Scotti, A., Silvinskiy, A., & Al-Erhayem, O. (1775). Atlas of MIG/MAG welding metal transfer modes. IIW Doc. XII-1771 to, 3.
17. DVS-Merkblatt 0973 (2015). Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens. (Yhteenveto MIG/MAG-hitsauksen prosessinohjausvaihtoehtoista).
18. DVS Media (2016). Process control variants for GMAW.
19. Fronius TPS 320i C, Operating instructions. 2019.