# Kaaritehon mittaaminen MIG/MAG- hitsauksessa

#### Jonne Näkki

MIG/MAG- hitsausprosessin lämmöntuonnin tai kaarienergian määrittäminen ja pitäminen tietyllä alueella on tärkeä osa hitsauksen laatua. Tavallisesti kaarihitsauksen lämmöntuonti on laskettu hitsauksen aikaisen keskimääräisen virran, jännitteen ja kuljetusnopeuden avulla. Kuitenkin kun käytetään aaltomuoto-ohjattua kaarihitsausprosessia, kuten pulssi-MIG/MAG, tämä menetelmä saattaa antaa virheellisen tuloksen.

#### Yleistä

Menetelmäkoestandardin uusin painos SFS-EN ISO 15614-1 [1] asettaa muutoksia hitsausenergian määrittämiselle. Standardin edellinen versio (2012) käski laskemaan lämmöntuonnin standardin EN 1011-1 (2009) [2] mukaisesti perinteisellä kaavalla:

$$Q = k x \frac{U x I}{v} x 10^{-3} (kJ/mm)$$

jossa

Q: lämmöntuonti

k: terminen hyötysuhde

U: kaarijännite mitattuna mahdollisimman läheltä valokaarta (V)

I: hitsausvirta (A)

v: kuljetusnopeus (mm/s)

Käytännössä hitsausvirta ja -jännite luetaan hitsausvirtalähteen näytöltä hitsauksen aikana tai laitteen muistista hitsauksen jälkeen, jonne keskimääräiset jännite- ja virta-arvot ovat tallentuneet. Kuljetusnopeus määritetään jakamalla hitsin pituus hitsaukseen kuluneella ajalla.

Uuden ISO 15614-1 -standardin mukaan lämmöntuonti <u>voidaan</u> korvata kaarienergialla (E), joka neuvotaan mittaamaan teknisen raportin ISO/TR 18491 [3] mukaisesti. Käytännössähän lämmöntuonti (Q) on kaarienergia (hitsausenergia) kerrottuna hitsausprosessin ns. termisellä hyötysuhteella k.

Raportti ISO/TR 18491 antaa kolme vaihtoehtoista tapaa kaarienergian määrittämiseen:

Metodi A, hitsausvirrasta,

kaarijännitteestä ja hitsausnopeudesta v perinteisellä kaavalla:

$$E = \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \, [kJ/mm]$$
 (1)

 Metodi B, hetkellisestä kaarienergiasta (IE) ja hitsin pituudesta L kaavalla:

$$E = \frac{12}{L} \times 10^3 \, [kJ/mm]$$
 (2)

Metodi C, hetkellisestä kaaritehosta (IP) ja hitsausnopeudesta v kaavalla:

$$E = \frac{IP}{V} \times 10^{-3} [kJ/mm]$$
 (3)

Raportti ISO/TR 18491 käyttää termejä Instantaneous Energy (IE) ja Instantaneous Power (IP). Sana instantaneous voitaneen suomentaa sanalla hetkellinen. Käytännössä termi hetkellinen energia IE on hetkellinen teho IP kerrottuna kaariajalla. Monissa lähteissä käytetään myös termiä Average Instantaneous Power (AIP), keskimääräinen hetkellinen teho, joka tarkoittaa samaa kuin termi IP, mutta kuvaa paremmin suureen sisältöä. Termiä AIP käytetään myös tässä artikkelissa.

Raportin ISO/TR 18491 mukaan kaarihitsausprosessit jaotellaan aaltomuotokontrolloituihin (waveform controlled welding) ja ei-aaltomuotokontrolloituihin prosesseihin (non-waveform-controlled welding). Raportin määrittelyn mukaan aaltomuotokontrolloidussa prosessissa jännitteen ja/tai virran aaltomuoto on kontrolloitu pisaran koon, tunkeuman, kostutuksen, palon muodon tai aineensiirtymismuodon kontrolloimiseksi. Tässä artikkelissa ei paneuduta vuoksi tarkemmin kaarimuotojen jaotteluun, mutta perinteinen pulssi-MIG/MAG prosessi ja uudemmista prosesseista mm. Froniuksen CMT-prosessi on selvästi aaltomuotokontrolloitu prosessi.

Raportti ISO/TR 18491 neuvoo mittaamaan aaltomuotokontrolloitujen prosessien lämmöntuonnin metodeilla B tai C, koska metodi A voi tuottaa raportin mukaan jopa 70 % virheen mittaukseen. Nämä vaatimukset lämmöntuonnin mittaamiselle ovat tulleet amerikkalaisiin ASME-standardeihin jo vuonna 2010 [4]. Myös saksalainen, joulukuussa 2015 julkaistu tiedote DSV 0973 (MIG-hitsauksen prosessinohjausvaihtoehtojen yhteenveto), jossa luokitellaan eri MIG/MAGprosessien ohjausvaihtoehtoja, ottaa kantaa kaaritehon määrittämiseen. Tiedotteen DSV 0973 mukaan perinteisestä I x U -menetelmää tulisi käyttää vain perinteisen kuumakaariprosessin tehon määrittämiseen [5].

Näistä edellä mainituista ISO/TR 18491 metodeista A vastaa käytännössä vanhaa hitsausenergian tai lämmöntuonnin laskentakaavaa, kun taas metodeissa B ja C täytyy käyttää hetkellisen tehon (AIP) mittausmenetelmää, jonka kaava on:

$$AIP = \frac{\sum_{i}^{n} U_{i} \times I_{i}}{n}$$
(4)

jossa

Ui: jännite jokaisessa mittausjakson mittauspisteessä

li: virta jokaisessa mittausjakson mittauspisteessä

n: näiden mittauspisteiden lukumäärä

AIP-menetelmässä lasketaan siis suurella taajuudella mitattujen virta- ja jännitearvojen jokaisessa mittauspisteessä I x U ja lasketaan näiden tulosten keskiarvo. Raportin ISO/TR 18491 metodin C suure hetkellinen kaariteho IP on sama kuin AIP ja metodin B suure hetkellinen kaarienergia (IE), on AIP (tai IP) kerrottuna kaariajalla.

# Hetkellisen kaarienergian ja tehon mittaaminen

Raportin ISO/TR 18491 mukaan mittauksen näytteenottotiheys (sampling rate) pitäisi olla vähintään 10 kertaa jännitteen ja/tai virran pulssituksen taajuus. Käytännössä tämäkin mittaustaajuus varsin pieni, jos yksi jännitevirta –aaltomuotosykli sisältää vain 10 mittauspistettä. Tällöin jos hitsausvirran pulssituksen tai aaltoliikkeen vaihtelun taajuus on 100 Hz, olisi tarvittava mittaustaajuus 1000 Hz.

Raportti ISO/TR 18491 ei määrittele tarkemmin laitetta, jolla kaaritehon tai –energian mittaaminen tulisi tehdä, mutta käytännössä tällaisia mittauksia voidaan tehdä oskilloskoopilla tai vastaavalla suureen mittaustaajuuteen pystyvillä laitteilla. Erityisesti kaarihitsauksen virran ja jännitteen mittaukseen suunniteltuja laitteita on saatavilla myös kaupallisesti.

Uusimpien MIG/MAG-hitsauslaitteiden ohjelmat pystyvät myös itse mittaamaan virtaa ja jännitettä suurella jopa kymmenien kilohertsien taajuudella ja siten laskemaan hetkellisen tehon (IP) tai hitsausenergian (IE) sekä lämmöntuonnin. Kempin uusimmissa MIG/MAG -hitsauskoneissa, FastMig X, A7 Mig Welder ja X8 Mig Welder, kaariteho, sekä X8 Mig Welderissä myös kaarienergia lasketaan virran ja jännitteen hetkellisarvoista. X8 Mig Welder laskee myös lämmöntuonnin, kun hitsille annetaan sen pituus [6]. Myös uusimmissa Froniuksen hitsauslaitteissa, kuten TPS/i, laitteen ohjausohjelma mittaa virtaa ja jännitettä suurella taajuudella ja määrittää tämän perusteella kaaritehon tai -energian [7].

Centria-ammattikorkeakoulun käytössä oleva Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT -hitsauslaite vuodelta 2015 ilmoittaa kuitenkin vain keskiarvovirran ja -jännitteen. Laite tallentaa hitsauksen aikaiset parametrit 0,1 Hz taajuùdella, joka ei riittävä hetkellisen, ns. AIP tehon määrittämiseen, koska CMTprosessin taajuus on itsessään tavallisesti 70-80 Hz.

### Tuloksia

Seuraavassa on esitelty joitakin kaaritehon mittaustuloksia. Kokeet tehtiin hitsaamalla 150 mm pitkiä yksittäispalkoja Ø 1,2 mm nikkelipohjaisella Inconel 625 -langalla niukkaseosteisen 20 mm teräslatan päälle suoralla liikkeellä nopeudella 1000 mm/min. Kaikki kokeet tehtiin Centria-ammattikorkeakoulun Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT

### Taulukko 1. Synergiakäyrät kokeissa.

	Standardi-MIG	Pulssi-MIG	CMT C 1693	
Synergiakäyrä	S 538	P 327		
Lisäaine, jolle käyrä on suunniteltu	CrNi 19 12 3	Ni-seos 625	Ni-seos 625	
Suojakaasu, jolle käyrä on suunniteltu	Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	100% Ar	100% Ar	

Standardi-MIG -synergiakäyränä käytettiin ruostumattoman AISI 316 -tyypin teräksen("haponkestävän teräksen") käyrää, koska standardi-MIG-käyrää nikkeliseoksille ei ollut saatavilla.

-hitsauslaitteella. Suojakaasuna käytettiin kaasua Mison He30 (Ar-30%He, 0,03%NO) ja kaasusuuttimen etäisyys pinnasta oli 12 mm. Lisäainelanka Inconel 625 ja paksu alustalevy oli valittu siksi, että kaaritehon mittauskokeet liittyivät muihin pinnoitushitsauskokeisiin. Heliumseosteisella suojakaasulla saadaan hitsipalko leviämään paremmin pinnoitushitsauksessa.

Kokeissa käytettiin kolmea eri prosessia: 1. perinteinen MIG, 2. pulssi-MIG ja 3. CMT. Kokeet tehtiin käyttäen Froniuksen synergiakäyriä, jotka on esitetty taulukossa 1.

Kokeita tehtiin langansyöttönopeuksilla: 5-12 m/min. CMT-prosessilla suurin langansyöttö oli kuitenkin 10 m/min, koska prosessissa ei ole mahdollista käyttää suurempia langansyötön arvoja. Prosessi muuttuu hieman epävakaaksi jo 9-10 m/min langansyötöllä. Tuloksissa on otettu huomioon vain kaariteho, eli termisen hyötysuhteen kerrointa k (0,8) tai liikenopeutta ei otettu huomioon. Jännitteen ja virran mittaaminen tehtiin PicoScope 3424 oskilloskoopilla. Jännitteen mittaus tehtiin kosketussuuttimeen liitetyn johtimen ja alustakappaleen väliltä, ja virta mitattiin hitsauskoneelta lähtevään miinuskaapelin ympärille liitetyllä Pico TA167 -pihtimittarilla. Käytetty mittaustaajuus oli 50 000 Hz. Oskilloskoopin tallentamasta virta – jännitekäyrän mittauspisteet siirrettiin Exceliin ja laskettiin AIP-kaariteho kaavan 4 mukaan. Kaaritehon määrityksessä käytettiin 4 s pituista ajanjaksoa hitsauksen loppuvaiheesta, eli määritykseen käytettiin virran ja jännitteen 200 000 mittauspistettä.

Virran ja jännitteen keskiarvot hitsauksen aikana luettiin hitsauskoneeseen yhdistetystä Fronius Explorer -ohjelmasta, joka tallentaa hitsauksen aikaisen datan 0,1 s välein. Ohjelma tallentaa myös langansyötön mitatun arvon.

Mittausten tuloksia on esitetty taulukoissa ja kuvissa 2-4. Taulukoissa on esitetty

Langan-		Hitsauskone			Oskilloskooppi			
syöttö m/min	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	U x I W	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	AIP W	Ero: I x U vs. AIP	
5	122	20,9	2538	125	18,9	2019	-21 %	
6	130	24,1	3124	136	20,0	2346	-25 %	
7	184	21,7	4007	185	21,9	3922	-2,1 %	
8	203	24,4	4939	204	24,6	5018	1,6 %	
9	214	25,8	5511	218	25,1	5462	-0,9 %	
10	229	25,3	5793	230	25,6	5885	1,6 %	
11	243	26,1	6354	242	26,4	6399	0,7 %	
12	265	27,5	7277	262	27,3	7139	-1,9 %	

### Taulukko 3. Mittaustulokset pulssi-MIG-prosessilla

Taulukko 2 Mittaustulokset standardi-MIG-prosessilla

Langan.	Hitsauskone		09				
syöttö m/min	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	U X I W	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	AIP W	Ero: I x U vs. AIP
5	105	24,0	2508	107	24,2	3271	30 %
6	128	24,3	3102	129	24,7	3970	28 %
7	153	25,2	3846	155	25,7	4800	25 %
8	175	26,3	4587	178	26,8	5605	22 %
9	197	27,3	5374	200	27,8	6419	19,4 %
10	223	28,0	6247	227	28,4	7278	16,5 %
11	240	29,2	6996	243	29,8	8081	15,5 %
12	261	29,0	7567	262	29,8	8661	14,5 %



Kuva 1. Standardi-MIG. I x U ja AIPtehon mittaustulokset langansyöttö-teho -kuvaajassa



Kuva 2. Pulssi-MIG. I x U ja AIP-tehon mittaustulokset langansyöttö-teho -kuvaajassa

6/2017

## Taulukko 4. Mittaustulokset CMT-prosessilla

l angan.	ngan. Hitsauskone		Oskilloskooppi				
syöttö m/min	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	U x I W	I <sub>mean</sub> A	U <sub>mean</sub> V	AIP W	Ero: I x U vs. AIP
5	123	14,5	1784	126	14,4	2474	39 %
6	139	15,3	2115	141	15,3	2936	39 %
7	153	15,9	2437	155	15,8	3333	37 %
8	182	15,5	2825	186	15,6	4126	46 %
9	205	17,9	3665	207	18,0	4946	35 %
10	218	18,1	3928	219	17,8	5134	31 %



Kuva 3. CMT. I x U ja AIP-tehon mittaustulokset langansyöttö-teho -kuvaajassa

myös oskilloskoopilla mitattujen jännite- ja virta-arvojen keskiarvot, jotka osoittavat, että oskilloskoopilla määritetyt keskimääräiset jännite- ja virta-arvot olivat hyvin lähellä hitsauskoneen tallentamia arvoja.

Tuloksista näkyy, että standardi-MIGprosessilla saatiin käytännössä sama tulos molemmilla kaaritehon mittausmenetelmillä. Mittaustuloksissa oli eroja vain pienimpien 4 ja 5 m/min langansyöttöarvojen kohdalla,





jolloin kaaritehoa oli aivan liian vähän ja va-

suurempia kaaritehon arvoja kuin perinteinen I x U -menetelmä. Tämä ero oli suuri varsinkin CMT-prosessilla, jolla suurin mitattu ero oli 8 m/min langansyötöllä peräti 46%. Pulssi-MIG -prosessilla suhteellinen, prosentuaalinen ero pieneni kuin langansyötön asetusarvo ja



kaariteho kasvoivat, mutta CMT-prosessilla tätä trendiä ei ollut havaittavissa.

Eri prosesseilla langansyötöllä 8 m/min tehtyjen kokeiden virta-jännitekuvaajista nähdään selvästi miten pulssi- ja CMT-prosessissa virran ja jännitteen aaltomuoto on säännöllistä ja kontrolloitua, kuva 4. CMTprosessissa ohjataan lisäksi hitsauslankaa samassa tahdissa virran ja jännitteen pulssituksen kanssa. Pulssi-MIG- ja CMT-pro-



ous Powe

42

52

8 32 40

Kuva 4: Virta-jännitemittaustulosten kuvaajat prosesseille standardi-MIG, pulssi-MIG ja CMT. Langansyöttö: 8 m/min.



Kuva 5. Virta-jännitemittaustulosten (kuva 4) perusteella lasketun hetkellisen ja keskimääräisen kaaritehon kuvaajat prosesseille standardi-MIG, pulssi-MIG ja CMT. Langansyöttö: 8 m/min.



Kuva 6. Langansyötöllä 8 m/min tehtyjen kokeiden poikkileikkaushieet. Vasemmalla standardi-MIG, keskellä pulssi-MIG ja oikealla CMT.

#### [www.hitsaus.net]

sesseissa virran vaihtelu on erittäin suurta. Standardiprosessissa taas virta vaihtelee selvästi vähemmän, mutta jännitteessä on oikosulkujen aiheuttamaa vaihtelua.

Kuvassa 6 on esitetty kuvassa 5 esitettyjen virta-jännitemittaustulosten perusteella lasketun hetkellisen tehon (Instantaneous Power) kuvaajat ja myös keskimääräinen hetkellinen teho, AIP (Average Instantaneous Power).

Langansyöttönopeudella 8 m/min tehtyjen kokeiden poikkileikkaushieet on esitetty kuvassa 7 ja kokeiden mittaustuloksia on koottu vielä taulukkoon 5.

Poikkileikkauskuvista ja mittaustuloksista näkyy selvästi, miten CMT-prosessin tunkeuma ja seostuma, kuten myös HAZ, on pienempi kuin standardi- ja pulssi-MIG -prosesseilla.<sup>1</sup> Vaikka langansyötön asetusarvo oli 8 m/min, oli CMT-prosessin todellinen langansyöttö 8,8 m/min, joka tuottaa myös hieman suuremman hitsinpalon ja vaatii hieman enemmän energiaa lisäainelangan sulattamiseen. CMT-prosessille on tyypillinen piirre, että todellinen langansyöttö ei ole sama kuin asetusarvo, vaan tavallisesti noin 10% suurempi.

## **Päätelmät**

Näiden hitsauskokeiden tulosten perusteella, kun käytettiin tavallista, ei-kaarimuoto ohjattua MIG/MAG-prosessia, perinteinen keskiarvovirta x keskiarvojännite -menetelmä (I x U) antoi samoja tuloksia kuin AIP-menetelmä. Kaarimuoto-ohjatuilla prosesseilla pulssi-MIG ja CMT, AIP-menetelmä antoi selvästi suurempia kaaritehon arvoja kuin perinteinen I x U -menetelmä. Tämä ero oli suuri varsinkin CMT prosessilla, jolla suurin mitattu ero oli 46 % langansyötöllä 8 m/min. Muissa mittauksissa, kun CMT-prosessin säätöparametreja ALC ja DC on vaihdeltu, on tämän eron arvoksi saatu jopa noin 70%.

Jonne Näkki Kehitysinsinööri (DI, IWE) Centria-ammattikorkeakoulu Kokkola jonne.nakki@centria.fi, 044 725 0252

### Taulukko 5: Kokeiden vertailuarvoja standardi, pulssi and CMT prosesseilla langansyöttönopeudella 8 m/min, sekä poikkileikkauksista mitattuja arvoja.

	Standardi-MIG	Pulssi-MIG	СМТ
I x U -kaariteho	4939 W	4587 W	2825 W
AIP -kaariteho	5018 W	5605 W	41.26 W
Todellinen langansyöttö	8,1 m/min	8,1 m/min	8,8 m/min
Tunkeuma	1,5 mm	1,3 mm	0,5 mm
Tuodun lisäaineen poikkileikkausala	9,5 mm <sup>2</sup>	10,0 mm <sup>2</sup>	10,4 mm <sup>2</sup>
Sulatetun perusaineen poikkileikkausala	5,4 mm <sup>2</sup>	3,3 mm <sup>2</sup>	1,2 mm <sup>2</sup>
Seostuma	36%	25%	10%
HAZ + sulanut alue	16,2 mm <sup>2</sup>	16,2 mm <sup>2</sup>	10,7 mm <sup>2</sup>

## Lähteet

- SFS-EN ISO 15614-1:2017. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkeliseosten kaarihitsaus.
- SFS-EN 1011-1: 2009. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset Osa 1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle.
- Technical Report. ISO/TR 18491: 2015. Welding and allied processes — Guidelines for measurement of welding energies.
- Teresa Melfi. New Code Requirements for Calculating Heat Input. The Welding Journal, June 2010.
- DSV 0973. Overview of process control variants for gas shielded metal-arc welding. Deutsches Institut für Schweißen und verwandte Verfahren, 2015.
- 6. Mikko Törölä, Kemppi Oy.
- Samuel Karjalainen, Pronius Oy. Manfred Schörghuber, Fronius International GmbH



Tämän artikkelin kokeet tehtiin osana julkisesti rahoitettua tutkimushanketta: CMT - Nordic business opportunities from coating and additive manufacturing. Hankkeen rahoittajana on Interreg Pohjoinen, joka on Suomen, Ruotsin ja Norjan pohjoisten alueiden EU-ohjelma, ja jonka tavoitteena on tämän alueen kilpailukyvyn ja vetovoiman vahvistaminen. Hankkeessa on mukana yhteensä neliä tutkimusosapuolta. Centria-ammattikorkeakoulu Kokkolasta, Tampereen teknillinen yliopisto, Luulajan teknillinen yliopisto Ruotsista, sekä Tromssan yliopisto Norjasta. Hankkeessa on mukana myös yritysosapuolia Suomesta, Ruotsista ja Norjasta.