

MAHEG mesterkurzus
Korszerű ívhegesztés
IV. rész
MIG/MAG-hegesztés II.
Zárlatmentes
(finomcseppes és impulzusos) anyagátvitel

Dunaújváros,
2023. március 23.

H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

Köszöntöm a résztvevőket a Magyar Hegesztési Egyesület soron következő mesterkurzusán.

Köszönjük a résztvevők és az előadó-kiállító cégek áldozatvállalását.

Ha minden jól megy, reményeink szerint mindenkinek megtérül a befektetése, és akkor a MAHEG jól végezte dolgát.

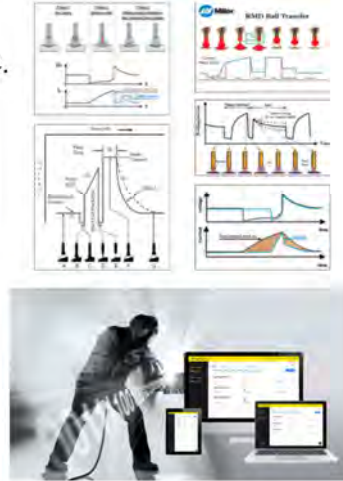
Korszerű ívhegesztés

I. Az elektronikus áramforrás – 2022.március.24.

- Elektronikus vs. hagyományos áramforrások



- A hegesztési folyamat irányítása, magas szinten reprodukálható eljárásváltozatok, ipar 4.0



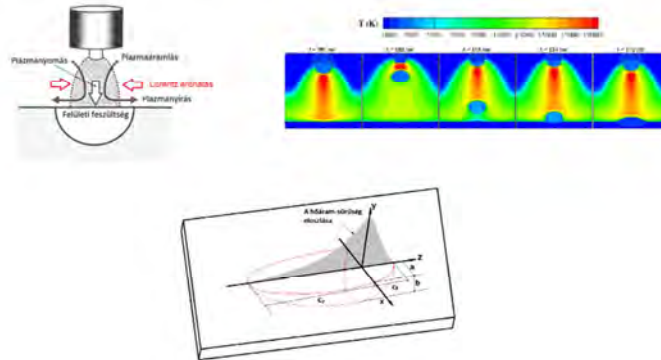
A mesterkurzus-sorozat célja annak bemutatása és megtapasztalása, hogy milyen összefüggés van a korszerű, elektronikus áramforrások és az ívhegesztési eljárások fejlesztése között, illetve, hogy ezek miként leltek hatékony alkalmazásra a modern gyártástechnológiában, megfelelően a hegesztési folyamattal szemben támasztott, korábban nem ismert szintű követelményeknek – különösen a gépesített, robotos alkalmazásokban.

Meghirdetésekor arra gondoltunk, hogy az áramforrások és szolgáltatásaik mélyebb megismerése segít eligazodni a piac gazdag kínálatában, mind az áramforrások, mind a kínált hegesztési eljárásváltozatok megítélésében.

A mesterkurzus kifejezetten az ívhegesztéshez használt berendezésekre és megoldásokra koncentrálna.

Korszerű ívhegesztés

II. A hegesztőív (ívfizika és varratképzés) – 2022. szeptember 15.



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

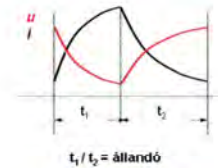
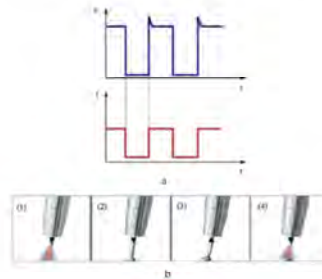
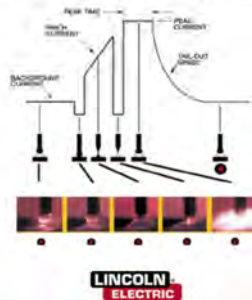
3.

Az első alkalommal összefoglaltuk az ívhegesztés energiaforrásának, a hegesztőívnek a lényeges tulajdonságait, amelyek a hegesztőáram modulációjával célszerűen befolyásolhatók a megfelelő varratképzés érdekében.

A lényeges ívfizikai tulajdonságok megismerése segíthet az ívnek a huzalelektroda leolvasztásában és a hegfüldő kezelésében játszott szerepének értékelésében, az ívfizikai felételek és a varratképzés közötti összefüggések megismerésében. Végző fokon annak megértésében, hogy adott feltételek (anyagminőség, ívatmoszféra) mellett hogyan befolyásolhatók az ív varratképzésben fontos tulajdonságai a villamos táplálás paramétereinek vezérlésével. A programban szerepelt a hegesztési folyamat szimulációjához szükséges hőforrás-modellek bemutatása is.

Korszerű ívhegesztés

III. MIG/MAG I (rövidzárlatos anyagátvitel) – 2022. november 15.



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
Info@maheg.hu; www.maheg.hu

Ezt követően három fejezet foglalkozik a huzalelektrodás, védőgázos ívhegesztés kiemelt alkalmazásaival, úgymint

- a rövidzárlatos,
- a zárlatmentes anyagátvitelű eljárásváltozatokkal, illetve
- ezek kombinálásával megvalósított különleges munkarendekkel.

Megismerjük az egyes, tipikus anyagátviteli módokhoz társítható, elektronikus áramforrásokkal lehetséges technológiai hatásokat, figyelemmel azok reprodukálhatóságára, amely a modern gyártástechnológiai alkalmazások alapkövetelménye.

A rövidzárlatos anyagátvitelű MIG/MAG-hegesztéshez jelentek meg az első – azóta már klasszikussá vált – fejlesztések. Ebben a részben három, jellegzetes megoldás ismertetésén keresztül tártuk fel a rövidzárlatos hegesztés jellegzetes problémáit és azok jellegzetes megoldásait.

Korszerű ívhegesztés

IV. MIG/MAG II (zárlatmentes anyagátvitel) – 2023. március 23.



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

5

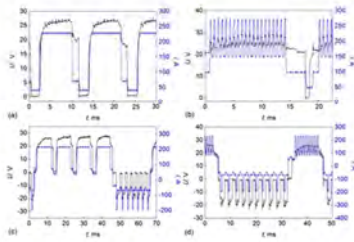
Zárlatmentes anyagátvitelt két módon lehetséges megvalósítani.

A finomcseppes anyagátvitellel járó, *alias* szórt- vagy permetes íves (S) hegesztés jellegzetesen nagy villamos teljesítménnyel történik. A folyamat stabilitását a munkapont stabilitása szolgálja. A nagy áramsűrűség miatti intenzív folyamatok kézben tartásához azonban kifejezett nagy dinamikájú áramforrás szükséges. Ezt a feltételt jellemzően az elektronikus áramforrások teljesítik. Ez magyarázza, hogy elerjedésükkel megnőtt az erre a teljesítménytartományra ajánlott, ún. módosított finomcseppes eljárásváltozatok kínálata, amelyek meghatározott varratképzési igények kielégítését szolgálják. Számos – általában nehezen reprodukálható – megoldás mellett immár új anyagátviteli mód, pontosabban hegesztőív-típus szabványosítása várható, az ún. merített íves (B – *burried arc*) hegesztése.

A zárlatmentes anyagátvitel másik változata az impulzusos anyagátvitelű hegesztés (P). A teljesítménymoduláció révén lehetővé válik a zárlatmentes anyagátvitelű hegesztés alkalmazásának lényeges kiterjesztése a kis hőbevitellel járó tartományra, illetve Az elektronikus áramforrások működése és digitális irányítása lehetővé teszi az impulzusos anyagátvitelhez szükséges hullámalak-vezérlés módosítását a mindenkori varratképzés számára optimális áramlefutás számára.

Korszerű ívhegesztés

V. MIG/MAG III (kombinált eljárásváltozatok) – 2023. május 25.



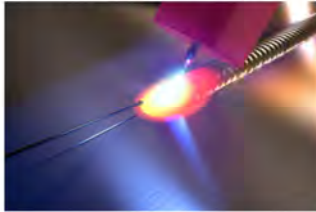
H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

6

A MIG/MAG-hegesztéssel foglalkozó utolsó részben az egyes eljárásváltozatok (modulációk) kombinációját mutatjuk be, amelynek különösen a gépesített, robotos alkalmazásokban van jelentősége.

Korszerű ívhegesztés

VI. TIG (korszerű eljárásváltozatok) – 2023. június 15.



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

7

A mesterkurzus utolsó fejezetét arra szánjuk, hogy bemutassuk a korszerű áramforrások kínálta lehetőségeket a volfrámelektrodás, védőgázos ívhegesztés területén.

9:00 – 9:30 MIG/MAG-hegesztés zárlatmentes anyagátvitellel [Kristóf Csaba, MAHEG]

9:30 – 10:00 Lorch eljárásváltozatok zárlatmentes anyagátvitelhez [Bodorkós Gergely, Rechen Hegesztőház Kft.]

Kávészünet



11:00 – 11:30 CLOOS eljárásváltozatok zárlatmentes anyagátvitelhez [Vachter Ákos, Crown International Kft.]

11:30 - 11:50 Módosított **finomcseppes és **bemerülő** anyagátvitelű hegesztés [Nagy Ferenc, REHM Hegesztéstechnika Kft.]**

12:00 Ebéd



13:00 – 16:00

Bemutatók, konzultáció

Rehm

Cloos

Lorch

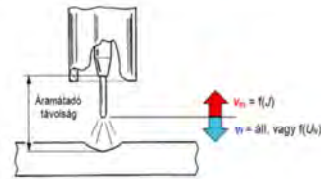
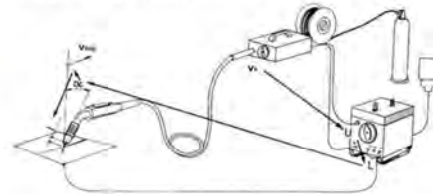
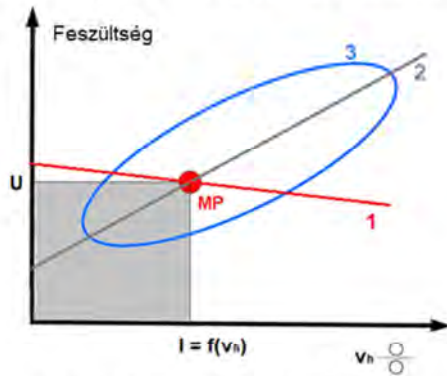
Kiállítók:

– Kemper

– Panelectrode



A MIG/MAG-hegesztés stabil munkapontja (ismétlés)



- 1 – Az áramforrás statikus jelleggörbéje
- 2 – Egyezményes munkafeszültség (MIG/MAG)
- 3 – Stabilitási tartomány

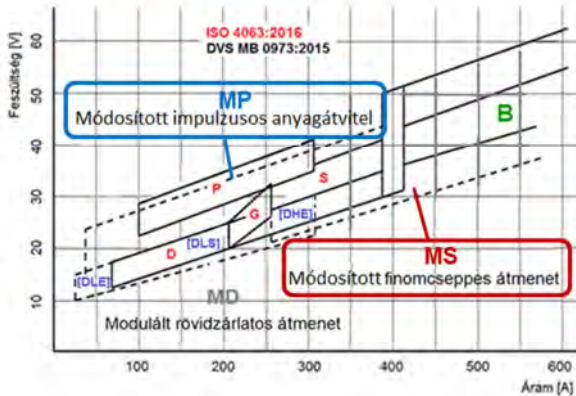
H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
Info@maheg.hu; www.maheg.hu

10.

Konzervatív szemlélettel a MIG/MAG-hegesztési folyamat stabilitását az áramforrás és terhelése (a hegesztőív) munkapontjának stabilitásaként határozzuk meg. Ez feszültségtartó áramforrással és egyenletes huzalelőtölési sebességgel valósítható meg.

A munkapont paraméterei (az áram és a feszültség) első közelítésben meghatározzák az anyagátvitel (más nézőpontból a hegesztőív) jellegét. A hegesztési folyamat finomhangolása a rendszer (a hegesztőáramkör) dinamikus viselkedését befolyásoló tényezők megválasztásával, illetve (ettől nem teljesen függetlenül) az áram hullámalakjának vezérlésével (a teljesítménymodulációval) lehetséges.

Módosítások



* DVS Merkleblatt 0973:2015 alapján

Hagyományos változatok (ISO/DIS 4063:2020)



MD – modulált rövidzártos*

MP – módosított impulzusos*

- Hullámalak moduláció
- Eltérés a csepp/impulzus ciklusoktól

MS – módosított finomcseppes*

- A finomcseppes tartomány tágítása
- A leolvadási teljesítmény növelése
- Mély beolvadású, stabil hegesztés.

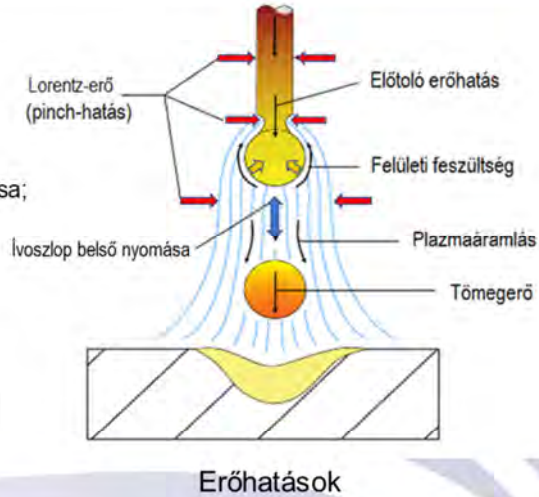
A már ismert ábrán kiemeltük a mai előadások tárgyát.

A módosított (modulált) impulzusos hegesztés tartománya (MP) az áram hullámalakjának módosítása (programozhatósága) révén a feltételekhez igazodó impulzusparaméterekkel, a teljesítménymoduláció segítségével szolgálja az eljárás célszerű alkalmazását.

A módosított finomcseppes tartományt (MS), amely lényegében a hagyományos tartomány tágítását szolgálja a kisebb ívfeszültségű mező irányában, megteremtve a feltételeket a nagy leolvadási teljesítmény mellett elérhető, ellenőrzött beolvadáshoz. A finomcseppes tartományban a teljesítménymoduláció háttérbe szorul: a hegesztőív megfelelő kondicionálására az áramforrás (változtatható) dinamikus viselkedését alkalmazzák („dynamically fixible arc”). Bemutatjuk az ide sorolható, már szabványosnak tekinthető, bemerülő íves (B – burried arc) hegesztést.

A cseppleválás

- (Előtoló erő)
- Lorentz-erő:
 - Folyadékoszlop összenyomása;
 - Pinch-hatás;
 - Ívoszlop stabilizálás.
- Felületi feszültség
- Az ívoszlop belső nyomása
- Tömegelő



A cseppleválás

Az ív egyik talppontját (általában az *anódot*) képező huzalelektrodából leváló cseppek képződését az olvadt fémcsepp felületi feszültsége formálja, miközben hat rá a hegesztőáram elektromágneses terének (Lorentz-erejének) erőtere. Az ívoszlop belső nyomásának erőhatása a csepp leválása ellen hat, miközben a már levált cseppet gyorsítja.

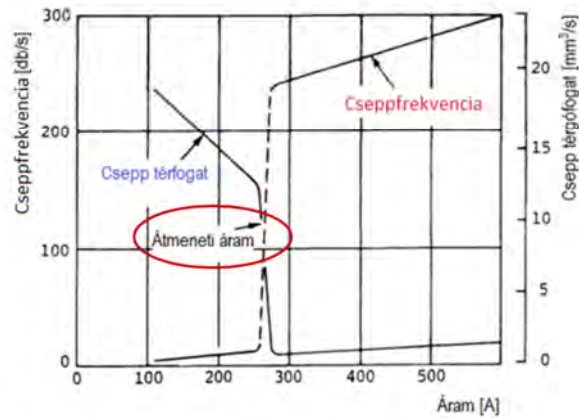
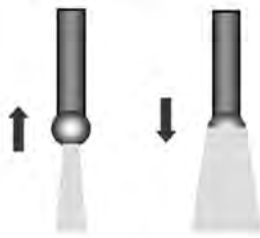
Amint az előtolási sebességgel haladó elektrodavégen a csepp elér egy (a védőgáztól és a hegesztőáramtól függő) kritikus méretet, megkezdődik a folyadékoszlop beszűkülése, és ennek során az ott helyileg növekvő áramsűrűség miatt vele együtt növekvő mágneses erőhatás egymást erősítő folyamatában gyorsan szűkül a cseppet tartó folyadékídk (pinch-hatás). Ebben a fázisban a felületi feszültségnek a fémcseppet gömbalakra kényszerítő hatásának az ív tengelyével párhuzamos, a csepp leválasztásában fontos szerepet játszó komponense is gyorsan növekszik. Így ez a két erőhatás meghatározó szerepet játszik a csepp leválásában.

A levált csepp átjutását a hegfürdőbe immár az ívoszlop belső nyomása is segíti, a hegesztési pozíciótól függő tömegelő (adott esetben a gravitáció) hatásával együtt.

A felületi feszültségből származó erőhatás a folyadékcsépp felületére merőleges, mindig a csepp belsejébe mutató erőhatás, amelynek következtében a csepp a lehető legkisebb felületet (elvileg gömb alakot) igyekszik felvenni.

A cseppleválás feltételei

A plazmanyomás hatása a cseppleválásra



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

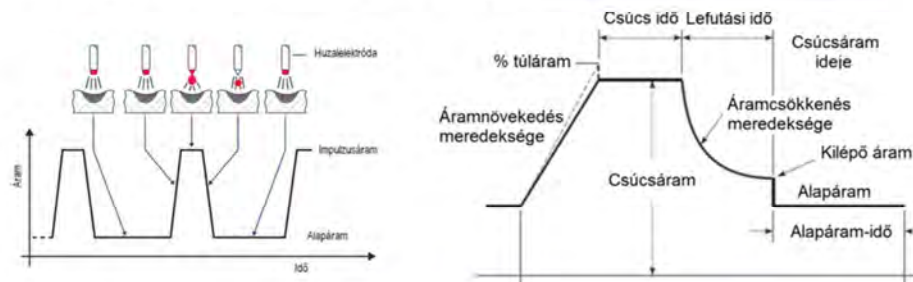
13.

A cseppleválás feltételei

A csepp felületén kialakuló, áramot vezető felület méretének is fontos hatása van. Ha az ív talppontjának kiterjedése kisebb a huzalátmérőnél, az áram Lorentz-erejének a cseppet megtámasztó (leválását hátráltató) komponense keletkezik, és fordítva, ha nagyobb, akkor a leválást segítő komponens keletkezik. Az ív kritikus átmérője függ a hegesztőáramtól és az alkalmazott védőgáz összetételétől. Nagy áram és nagy argon tartalmú védőgáz segíti a cseppek gyorsabb leválását, azaz az átlagos cseppátmérő csökkenését.

MP – módosított (modulált) impulzusos

- A cseppeleválás irányítása
- A hegesztőív varratképző tulajdonságainak módosítása



H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

14

Az impulzusos MIG/MAG-hegesztés módosítása

Az áramimpulzusokkal vezérelt (röviden impulzusos) anyagátvitel meghatározása: a cseppek kizárólag a kritikus áramsűrűséget meghaladó csúcsáramú áramimpulzusok hatására válnak le.

Eredetileg az áramimpulzusok fröcskölésmentes anyagátvitelre optimalizált frekvenciája és hullámalakja azonban számos alkalmazás számára gondot okozott a varratképzés tekintetében. Az elektronikus áramforrások alkalmasak a hullámalak célszerű formálására, hogy a folyamatot a varratképzéshez szükséges plazmaáramlás és ívnyomás alakításával a varratképzésre is alkalmassá tegyék.

A jobb oldali ábrán az áramimpulzus jellegzetes paraméterei láthatók.

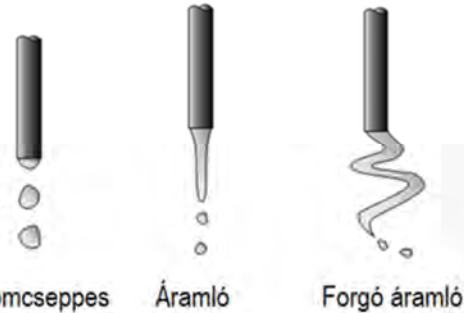
Az áram(sűrűség) növelése

A Lorentz-erő növekedése →

- a megolvadt huzalvég beszűkül, kisebb cseppek, sűrűbben válnak le,
- megnő az áramsűrűség, vele az ív koncentrációja és az ívnyomás,
- megnő a folyamat dinamikája.

Az ívfeszültség növekedése →

- hosszú, nehezen kezelhető ívoszlop
- nehezen kezelhető hegfürdő



Az áramsűrűség növelése

Ha az áramsűrűség egy (a hegesztési feltételektől függő) kritikus értéknél nagyobb, az elektromágneses erőhatás révén kicsi, a huzalátmérővel lényegében megegyező átmérőjű cseppek válhatnak le az elektródáról, amelyek – alapesetben – az ív tengelyében jutnak a hegfürdőbe.

Növelve az áramsűrűséget, a nagy sebességgel adagolt huzalelektróda megolvadt vége az elektromágneses erő (pinch-hatás) révén kisebb átmérőjű folyadékoszloppá alakul, amelyből nagyon finom cseppek válnak le (javasolt elnevezése, az angol „streaming” alapján áramló jellegű anyagátmenet). Tovább növelve az áramsűrűséget, a folyadékoszlop megnyúlik, és jellegzetes, spirális alakot vesz fel: az ilyen anyagátmenetet célszerűen forgó áramló anyagátmenetként különböztetjük meg.

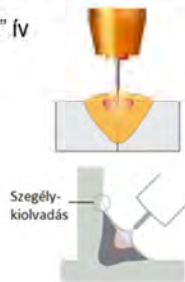
A finomcseppes anyagátvitelű hegesztést kifejezetten nagy leolvadási teljesítmény jellemzi, ezért vízszintes helyzetben, nagy keresztmetszetek feltöltésére alkalmazzák.

Itt jegyzem meg, hogy a nagy villamos teljesítménnyel arányos nagy leolvadási sebesség értelemszerűen igen nagy dinamikát igényel az áramforrás részéről, különösen, ha a – hegesztéstechnikai szempontból fontos – kisebb ívfeszültséget akarunk alkalmazni, a koncentráltabb ív, az ellenőrizhető beolvadási mélység miatt. Ez azonban az anyagátvitel instabilitásával jár, nem kizárt az rövidzárlatok előfordulása, ami viszont extrém nagy dinamikát igényel az áramforrás részéről. Az elektronikus áramforrások e tulajdonságuk révén teszik lehetővé a nagyteljesítményű, mély beolvadású eljárások terjedését.

Az áramsűrűség növelése

- Burjánzó megoldások, márkanevek védelmében;
- Kétségek a pulzáló áram alkalmazása kapcsán;
- A valódi probléma a stabil, mély kráter fenntartása, amely lehetővé teszi, hogy a hegfürdőbe mélyedve legyen fenntartható;

„Permetes”, „szórt” ív



Bemerülő ív



J. R. Dutra et al. A New Interpretative Basis for the High Performance GMAW Process. Soldagem & Inspeção 2021.26: e2620 | <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI26.20>

H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

16

A finomcseppes anyagátviteles hegesztés problémái

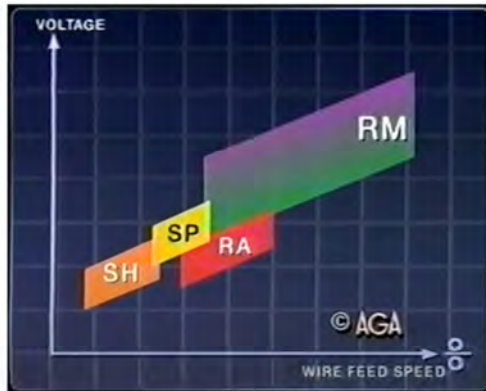
Lényeges feladat a hegfürdő formálása olyan módon, hogy az ívet körbe ölelő kráter stabilizálódjék, fenntartva a lehetőségét az ív „bemerülésének”. Ennek hiányában csökken a tompavarrat beolvadási mélysége, és a nagy ívfeszültség miatt a sarokvarraton megjelenik a szegély kiolvadás.

MS – módosított finomcseppes → NT MIG/MAG (HP-GMAW)

- Több huzalelektroda (ikerhuzalos, ill. tandem hegesztés)
- Hozaganyag adagolás (hideg vagy meleg huzal)
- Az ívteljesítmény ellenőrzött növelése a beolvadási mélység növelése érdekében, vastag lemezek **egysoros hegesztésére** alkalmas varratalak és a folyamat stabilitásának fenntartása mellett

A huzalelektrodás, védőgázos hegesztés alkalmazási spektrumának finomcseppes (permetes vagy szórt íves) tartományát (az ív nagy teljesítménye miatt) egyrészt nagy leolvadási teljesítmény jellemzi, amelyet (az extrém nagy áramsűrűséggel járó ívstabilitási problémákat megkerülendő) ikerhuzalos vagy tandem elrendezéssel lehet tovább fokozni, másrészt – éppen a nagy áramsűrűséget kihasználva – a nagy beolvadási mélység (felolvasztási teljesítmény) jellemzi. Ez utóbbi különösen a vastag lemezek egysoros (ellenőrzött beolvadású) hegesztéséhez használható eredményesen, de – mint látni fogjuk – a beolvadás közben tartása különleges – csak elektronikus áramforrással megvalósítható – követelményeket támaszt az áramforrással szemben, és fegyelmezett hegesztéstechnikát igényel. A hegesztett kötés megbízható minősége érdekében ezt a különleges hegesztési munkarend, mint új eljárásváltozatot határozza meg az ISO 4063 új tervezete (ISO/DIS 4063:2020).

Az első próbálkozások



AGA® RapidArc™ és RapidMelt™

FRONIUS T.I.M.E. process
(Transferred Ionized Molten Energy)H-1034 Budapest, Bécsi út 96/b
info@maheg.hu; www.maheg.hu

18

Módosított finomcseppes anyagátviteléses hegesztés

A finomcseppes („spray arc” nyomán inkább *szórt* vagy *permetes íves*) tartományban a stabil munkapont (a hegesztőáramnak megfelelő) nagy ívfeszültség mellett jön létre, ez a nagy leolvadási és felolvasztási teljesítmény (beolvadási mélység) alapja. Ez utóbbi azonban – különösen mély beolvadású varratok hegesztésénél – nehezen ellenőrizhető, ezért számos próbálkozás (ajánlat) létezik az ívfeszültség csökkentésére, amelyek a zárlatot elkerülő, vagy áramimpulzusokkal támogatott leolvadással, vagy változtatható dinamikájú áramforrás segítségével tartják fenn a hegfürdő különleges, az egyenletesen mély beolvadáshoz szükséges, ún. *metastabil állapotát*.

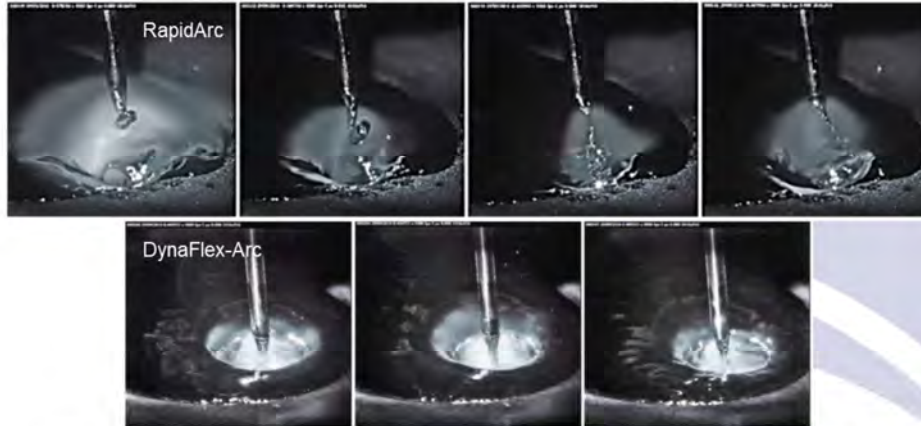
Az első megoldások már az 1990-es években megjelentek (AGA®RapidArc®), majd számos (általában áramimpulzusokkal támogatott) megoldás szaporította az azonos célt szolgáló, misztikus elnevezésű megoldások számát.

A nagyteljesítményű hegesztés klasszikus megoldásai az AGA®RapidMelt®, illetve a Fronius T.I.M.E. eljárása (T**ransferred Ionized Molten Energy**), amely utóbbi különleges, négy komponensű gázkeverékkel működött.

Az elmúlt évtizedek próbálkozásai végül elvezettek az ellenőrzött mély beolvadású hegesztést megvalósító, bemerülő íves (B) szabványosítás előtt álló üzemmód meghatározásához. Ez egy eredetileg az alumínium hegesztéséhez az Alcoa-nál kifejlesztett megoldás volt, amelyet 2004-ben szabadalmaztattak az Egyesült Államokban.

Forrás: J. R. Dutra et al: A New Interpretative Basis for the High Performance GMAW Process. Soldagem & Inspeção. 2021;26:e2620 | <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI26.20>

Finomcseppes (*alias* permetes vagy szórt íves) hegesztés



Forrás: J. C. Dutra et al: A New Interpretative Basis for the High Performance GMAW Process. Soldagem & Inspeção. 2021;26:e2620

Bemutatjuk, hogy a nagy leolvadási sebesség miatt elkerülhetetlen rövidzárlatok kezelésére kifejlesztett (a zárlati áram bekapcsolási tranziensét gyorsító és a kikapcsolási tranziensét lassító) ún. DynaFlex-Arc ívvel kézben tartani a beolvadási alak (kulcslyuk hatáshoz hasonló) metastabil állapotát, biztosítva ezzel az egyenletes beolvadást.

A felső képen RapidArc üzemmódban, az alsó képen bemelegülő íves („DynaFlex-Arc”) íves hegesztés gyorskamerás felvétele látható.

Szabványosított eljárásváltozat: **bemerülő íves** MIG/MAG-hegesztés (**B** – „burried arc”)



A beolvadási alak kontrollálását szolgáló, különleges üzemmód bekerül az ISO 4063-ban meghatározott, huzalelektrodás, védőgázos eljárás egyik változataként a rövidzárlatos (D), a nagycseppes (G), az impulzusos (P), a finomcseppes (S) mellett, mint bemerülő íves hegesztés (B – burried arc).