

Perspective privind principiile de bază la sudarea MIG/MAG^(*)

New insights into fundamentals of the MIG/MAG welding^(*)

Américo Scotti

Center for Research and Development of Welding Processes, Universidade Federal de Uberlândia,
38400-902 – Uberlândia – MG – Brazil, e-mail: ascotti@ufu.br

Cuvinte cheie

MIG/MAG; GMAW; fizica arcului; moment; sudura; tensiune arc; transfer metal

Keywords

MIG/MAG; GMAW; physics of arc; momentum; weld bead; arc voltage; metal transfer.

1. Despre fizica arcului: măsurarea proprietăților

1.1. Momentul și influența sa asupra formării geometriei sudurii

Relația dintre transferul de metal și caracteristicile operaționale ale procesului MIG/MAG sunt deja cunoscute. Studiile efectuate asupra transferului de metal sunt analizate suficient. Totuși, un fenomen ce a fost studiat intens, și încă nu complet clarificat în cazul sudării MIG/MAG este efectul picăturii la transfer asupra formării cordonului de sudură. Există o largă recunoaștere privind importanța energiei picăturii transmise băii de sudare, dar literatura de specialitate nu a clarificat încă modul în care această energie trebuie exprimată sau cuantificată. Un transfer metalic cu picături de dimensiuni mari poate avea un moment mare (M), dar nu va exercita, în mod necesar, o acțiune semnificativă asupra adâncimii de pătrundere.

Momentul este adesea considerat ca factorul ce guvernează formarea geometriei cordonului de sudură, dar nu se specifică relația sa cu timpul și volumul acțiunii picăturii.

Într-o lucrare recentă [1], cercetătorii grupului de sudare numit Laprosolda au evaluat tehnicile și metodele de a mări caracteristicile cinematice și dinamice ale picăturii la transfer. Într-o altă lucrare [2], evaluarea metodologiei a fost realizată utilizând gaz de protecție pentru oțel carbon. Într-o altă lucrare [3], s-a stabilit diferența privind comportarea transferului de metal referitor la momentul dintre sârmele din oțel carbon și aluminiu.

1.1.1. Conceptul momentului efectiv

Parametrul propus pentru calculul efectului momentului în formarea cordonului de sudură a luat în considerare caracterizarea picăturii în transfer (geometric și cinematic). Cunoscând diametrul picăturii (în consecință masa) și viteza sa, când se izbește de suprafața băii, este posibil să se determine principala caracteristică dinamică a picăturilor, caracteristică

1. On the arc physics: properties measurement

1.1. Momentum and its influence on bead geometry formation

The relationship between metal transfer and operational characteristics of the MIG/MAG process is already reasonably known. Studies on metal transfer are quite explored. However, a phenomenon which has been intensively studied, yet not utterly clarified for MIG/MAG welding, is the effect of the droplet under transfer on the bead formation. There is wide recognition of the importance of the droplet energy delivered to the weld pool, but the literature has not made clear yet how this energy should be expressed and quantified. A metallic transfer with droplets of great dimensions can have a great momentum (M), but it will not necessarily exercise a significant action on the bead penetration.

Momentum is frequently referred as governing factor on the bead geometry formation, but the claimers do not state its relationship with time and volume of droplet action.

In a recent work [1], researchers of the welding group named Laprosolda evaluated techniques and methodologies to raise kinematic and dynamic characteristics of the droplets under transfer. In another work [2], the evaluation of the methodology was carried out using carbon steel shielding gas. In a further work [3], the difference in metal transfer behaviors related to the momentum between carbon steel and aluminum wires was established.

1.1.1. The concept of effective momentum

The proposed parameter to compute the momentum effect on bead formation took into account a droplet-in-transfer characterization (geometric and kinematic). Knowing the droplet diameter (consequently the mass) and its speed when impinging on the pool surface, it is possible to determine the main dynamic characteristic of the droplets that could

^{*}Lucrare invitată prezentată la Conferința Internațională „Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate”, Timișoara, 11-12.06.2009

^{*}Keynote speech presented at the International conference „Innovative technologies for joining advanced materials”, Timișoara, 11-12.06.2009.

Principii la sudarea MIG/MAG

care ar putea influența formarea cordonului de sudură, adică momentul (viteza masei x), așa cum arată ecuația 1:

$$M = \rho \pi \frac{d^3}{6} * S_{arrival} \left[kg * m * s^{-1} \right] \quad (1)$$

unde „ M ” este momentul, „ ρ ” densitatea metalului, „ d ” diametrul picăturii și „ $S_{arrival}$ ” viteza efectivă cu care picătura ajunge la baia de sudare, în unități ale SI.

Totuși, o reprezentare fizică mai bună a acțiunii picăturii (mișcarea intermitentă a masei) asupra băii de sudare ar fi produsul momentului ori frecvența (f) cu care picăturile ating baia.

Acest parametru este reprezentat de ecuația 2 și a fost numit aici viteza momentului (Q_{rate}). Așa cum indică unitatea, Q_{rate} este forța cu care picăturile lovesc metalul topit.

$$M_{rate} = M * f \left[N \right] \quad (2)$$

Fără îndoială, deoarece M_{rate} este o forță discretă, efectul picăturii asupra băii va fi transferat atunci când această forță acționează în aceeași zonă. Astfel, dacă această cantitate menționată este împărțită la viteza de sudare (TS), se atinge parametrul care în această lucrare a fost denumit Momentul Efectiv (Me), definit de ecuația 3 (așa cum indică unitatea, Me reprezintă viteza de curgere a masei picăturilor ce ating metalul topit, dar denumirea propusă în această lucrare țintește să accentueze efectul vitezei masei x).

$$Me = \frac{\rho \pi d^3 S_{arrival} f}{6TS} \left[kg * s^{-1} \right] \quad (3)$$

1.1.2. Momentul efectiv ca mijloc de caracterizare a energiei mecanice introduse de picătură în baia de sudare

Așa cum se poate vedea în mai multe detalii în lucrările anterioare [1–3], experimentele au analizat energia transmisă de picătură astfel încât să izoleze efectele altor variabile sau să le facă constante. Astfel experimentele au planificat luarea în considerare a efectului interactiv al curentului de sudare (I) și lungimea arcului (a), dar cu aceeași cantitate de material depus (aceiași volum al băii, întrucât $TS/WFS = \text{constant}$). Prin reglarea curentului la diferite valori, modul de transfer al metalului variază. Suplimentar, în timp ce se menține aceeași cantitate de material depus (și aproximativ aceeași energie liniară), s-ar putea să se încerce minimalizarea efectului altor parametri care guvernează formarea cordonului de sudură. Ca rezultat, efectul momentului picăturilor ce se izbesc de baie ar putea fi observat mai bine.

Deoarece viteza inițială a picăturii, realizată prin WFS ar afecta momentul, s-a hotărât să se mențină pentru fiecare valoare a curentului aceeași WFS , independent de lungimea arcului.

Această realizare a fost posibilă prin utilizarea unei surse electronice de putere care lucrează în curent constant și impune un WFS coerent (pentru o combinație dată sârmă-gaz de protecție, lungimea liberă a sârmei la duza de contact este definită de valoarea WES). În final, pentru a atinge diferite lungimi ale arcului fără a afecta nivelul curentului și al WFS , s-a variat sistematic distanța duza de contact – piesa de lucru ($CTWD$).

Caracterizarea transferului picăturii s-a făcut prin caracteristicile geometrice (diametrul picăturii și lungimea

influence the bead formation, i.e., the momentum (mass x speed), as stated by Equation (1):

$$M = \rho \pi \frac{d^3}{6} * S_{arrival} \left[kg * m * s^{-1} \right] \quad (1)$$

where „ M ” is the momentum, „ ρ ” the metal density, „ d ” the droplet diameter and „ $S_{arrival}$ ” the mean speed of droplet arrival on the welding pool, in SI units.

However, a better physical representation of the droplet (movement of mass intermittently) action on the weld pool would be the product of the momentum by the frequency (f) in which the droplets reach the pool. This parameter is represented by Equation (2) and it was denominated here Momentum Rate (Q_{rate}). As the unit indicates, Q_{rate} is the force in which the droplets hit the fused metal.

$$M_{rate} = M * f \left[N \right] \quad (2)$$

Nevertheless, as M_{rate} is a discrete force, the effect of the droplets on the pool would be translated by the time this force is acting on a same area. Thus, if this mentioned quantity is divided by the welding travel speed (TS), one reaches the parameter that in this work was denominated of Effective Momentum (Me), as defined by Equation (3) (as the unit indicates, Me actually represents the mass flow rate of the droplets reaching fused metal, but the denomination proposed in this work aims to emphasize the mass x speed effect).

$$Me = \frac{\rho \pi d^3 S_{arrival} f}{6TS} \left[kg * s^{-1} \right] \quad (3)$$

1.1.2. Effective momentum as a means of characterization of the mechanical energy input by the drop into the pool

As can be seen in more details in the previous work [1–3], the experiments searched for the droplet delivering energy in such a way to isolate other variables effects or make them constant. Thus, experiments were planned to consider an interactive effect of the welding current (I) and the arc length (a), but under the same amount of deposited material (same pool volume, since $TS/WFS = \text{constant}$). By setting current at different values, it would also be varying the metal transfer mode. In addition, while maintaining concomitantly the same amount of deposited material (and approximately the same heat input), one would be trying to minimize the effect of other governing parameters on the bead formation. As a result, the effect of the momentum of the droplets impinging on the pool could be better distinguished.

Because the initial speed of the droplet, accomplished by the WFS , would affect the momentum, it was also sought to maintain for each current value the same WFS , independently of the arc length. This achievement was possible by using an electronic power source working at constant current mode and imposing a coherent WFS (for a given combination of wire-shielding gas, the wire extension out of the contact tip is defined by the value of the WFS). Finally, to reach different arc lengths without affecting both the current level and WFS , the contact tip-to-work distance ($CTWD$) setting was systematically varied.

The characterization of the droplet transfer was made through the geometric (droplet diameter and arc length) and

arcului) și cinematice (frecvența și viteza corpului). Principalul instrument care a fost utilizat pentru această caracterizare a fost un sistem laser sincronizat shadowgraphy [4], pentru filmare cu mare viteză și 2 piese de soft dedicat pentru măsurători ale frecvenței transferului, diametrului picăturii și lungimii arcului [5, 6], a vitezei și accelerației picăturii. Interesant pentru acest studiu este faptul că numai valorile vitezei de sosire instantanee a picăturilor ($S_{arrival}$) au fost mărite.

Din figura 1 (utilizând datele pentru electrodul din oțel carbon), rezultă că, cu cât M este mai mare, cu atât adâncimea de pătrundere este mai îngustă (rezultatele altor autori pot fi în dezacord deoarece ei mențin, de obicei, viteza de lucru constantă și măresc curentul, ceea ce conduce la o creștere a momentului, dar și a energiei de sudare, care poate masca efectul momentului). Astfel, reducerea adâncimii de pătrundere când M are valori mai mari este după cele afirmate mai sus nerațională. Din aceeași figură, se poate vedea relația directă dintre adâncimea de pătrundere și M_{rate} , adică adâncimea de pătrundere devine mai mare pe măsură ce crește M_{rate} . Fără îndoială, se poate spune că pătrunderea a fost mai profundă atunci când M_{rate} a devenit mai mare numai din cauza curentului, întrucât, așa cum se vede, M_{rate} depinde foarte mult de curent.

Din păcate, nu există un mod de a izola efectul curentului. De exemplu, dacă M_{rate} x analiza pătrunderii, prezentată în figura 1, s-a efectuat cu același curent, influența lungimii arcului ar fi mascat efectul lui M_{rate} . Aceasta înseamnă că atât efectele curentului cât și a lungimii arcului sunt incluse în vitezele de sosire ale picăturii ($S_{arrival}$) și, în consecință, influențează toți parametrii legați de moment (M , M_{rate} sau Me). Dar, un mod de a discrimina efectul curentului ar fi prin raportul M_{rate} și TS (ecuația 3), întrucât M_{rate} , în mod intrinsec transmite dependența dintre WFS și TS ($WFS/TS = \text{constant}$). Chiar dacă curentul și WFS nu sunt 100% dependente, ele sunt strâns legate. Suplimentar, se poate aștepta ca momentul, prin frecvența cu care picăturile ating baia, așa cum Q_{rate} este definit (ecuația 2), să nu ia în considerare timpul în care un același volum al băii suferă acțiunea șocului picăturilor. Din nou raportul lui Q_{rate} și TS , așa cum Me este definit aici, pare să includă și acest efect.

Totuși, cu același raționament în analize, se poate spune că un comportament special apare și în figura 1 (c) în jur de 1,5 kg/s (creșterea lui Me nu mai corespunde cu pătrunderea mai adâncă). Dar, este important de indicat că cele mai mici valori ale lui Me se produc la un curent de 200A, iar cele mai mari valori ale lui Me se produc la 250A, mai degrabă decât la 300 A. Aceasta înseamnă că la Me de circa 1,5 Kg/s curentul a avut o valoare mai mare, favorizând reducerea pătrunderii. Astfel, un echilibru concurent al efectelor (curent x Me) poate clarifica mai departe această reducere neașteptată a pătrunderii pe măsură ce crește valoarea lui Me .

Observând acum figura 2, este posibil să descoperim aceleași tendințe pentru sârma din aluminiu în ceea ce privește relația dintre Me și adâncimea de pătrundere. Dar, există câteva diferențe remarcabile. Valorile lui Me pentru sârma din aluminiu sunt de circa 10 ori mai mici decât cele pentru oțel. Rolul pe care Me îl joacă asupra adâncimii băii depinde de caracteristicile metalului topit (vâscozitate, tensiunea de la suprafață, etc.) ale căror acțiuni sunt dificil de prevăzut.

În afară de aceasta, pătrunderea nu depinde numai de Me , din contră energia liniară se așteaptă să fie parametrul important

kinematic (frequency and body speed) characteristics. The main tools for this characterization was a synchronized laser shadowgraphy system [4], filming in high-speed, and 2 pieces of software dedicated for measurements of the transfer frequency, droplet diameter and arc length [5, 6] and of the droplet speed and acceleration. As interest of this study, just the values of the drops instantaneous arrival speed ($S_{arrival}$) were raised.

From Figure 1 (using data for carbon steel electrode), one depicts that the higher M , the shallower the penetration (other

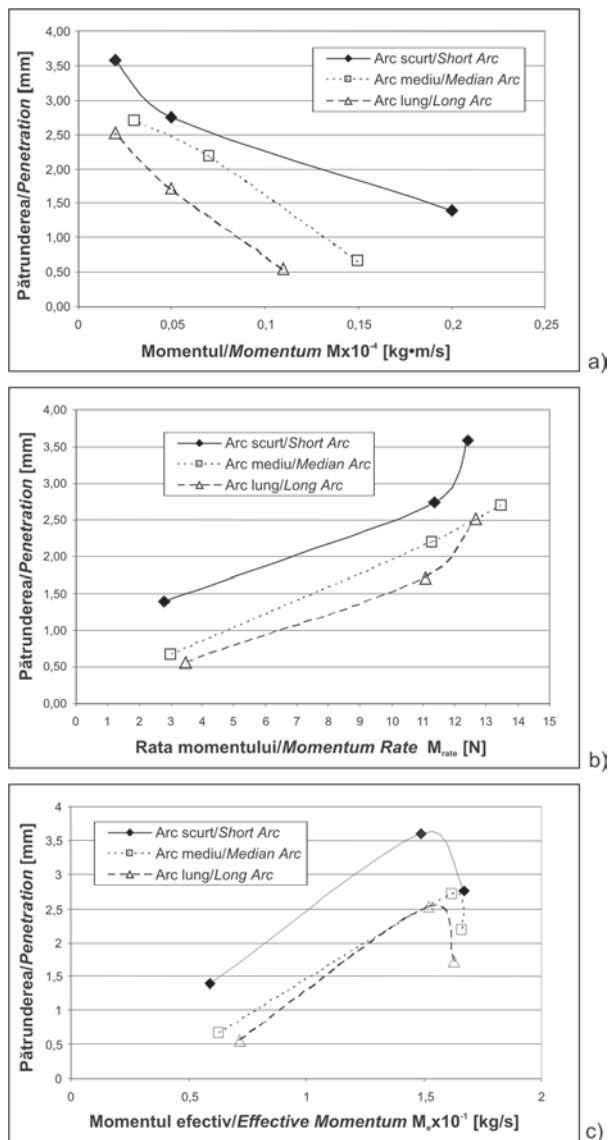


Figura 1. Influența parametrilor momentului asupra adâncimii de pătrundere a sudurii (1,2 mm AWS ER70S-6 sârma, gaz de protecție Ar + 5%O₂, curent reglat la 200, 250 și 300 A)/
Figure 1. The influence of momentum related parameters on the bead penetration (1.2 mm AWS ER70S-6 wire, shield by Ar + 5%O₂, with setting current of 200, 250 and 300 A)

authors' results may disagree because they usually keep travel speed constant while they increase current, which leads to an augment of the momentum, but also to welding energy, which can mask the momentum effect). Thus, the reduction in penetration towards higher M is by the above statements unreasonable. From the same figure, it is possible to see the direct relationship between penetration and M_{rate} , i.e., penetration gets deeper as M_{rate} increases. Nevertheless, one

[7] dar, acum temperatura de topire, conductivitatea termică și entalpia specifică a materialului joacă un rol important. O a doua diferență între comportarea aliajului de aluminiu și a oțelului, diferența observată în figura 2 este că arcul lung a atins cea mai mare valoare a lui Me în cazul aluminiului; în contrast cu sudurile din oțel. Grupul de sudură Laprosolda

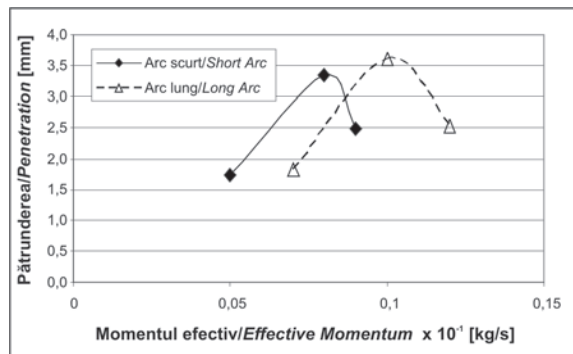


Figura 2. Influența momentului efectiv asupra adâncimii de pătrundere utilizând date pentru sudarea MIG/MAG a aluminiului/

Figure 2. The influence of Effective Momentum on the bead penetration using data for Aluminum MIG/MAG welding

crede că (și caută să demonstreze aceasta) în cazul sudării aluminiului concentrarea legăturii arcului la tablă nu este atât de importantă pentru mărirea pătrunderii ca în cazul oțelului carbon.

1.2. Metodologie pentru determinarea căderii de tensiune anodică, catodică sau în coloana arcului la sudarea MIG/MAG: Arce cu transfer de metal prin scurtcircuitare

1.2.1. Introducere

Căutarea unor explicații logice ale fenomenului ce se petrece la sudarea cu arc i-a îndreptat pe mulți cercetători spre dezvoltarea sau corectarea metodelor care fac posibilă identificarea și măsurarea proprietăților arcului. Totuși, determinarea proprietăților fizico-chimice ale coloanei arcului este o sarcină complexă care de obicei necesită aparatură și tehnici sofisticate. Pentru a depăși acest neajuns, de exemplu reducerea numărului influențelor, proprietățile coloanei de plasmă se măsoară, în mod normal, în condiții specifice (de exemplu, la presiune și temperatură constantă, din gaze simple ionizate). Astfel, aceste date nu sunt întotdeauna coerente atunci când sunt utilizate pentru predicția efectului unui gaz de protecție într-o operație de sudare; dimensiunile mici ale unui arc conduc la gradienti termici și de presiune foarte mari și de asemenea la variații radiale și axiale în compoziția plasmei și în stare ionizată. În consecință, s-au făcut eforturi mari pentru a se găsi proprietățile fizico-chimice ale plasmei, căutând elucidarea fenomenologiei legată de transferul de metal, emisia de electroni, căderea de tensiune anodică și catodică, ș.a.m.d.

Printre cele câteva studii care includ arcul la sudare, câteva dintre ele au câștigat importanță prin prezentarea metodelor care corelează parametrii de sudare cu energia absorbită și dispersată de arc. Metode directe, cum sunt utilizarea probelor pentru măsurarea căderilor de tensiune de-a lungul arcului [8-10], au fost utilizate și îmbunătățite. Majoritatea acestor metode, pe lângă cererea de aparatură

could say that the penetration was more profound when M_{rate} became higher only because of the current, since, as seen, M_{rate} is highly dependent on current.

Unfortunately, there is no way of isolating the current effect. For instance, if the M_{rate} x penetration analysis presented in Figure 1 was made at the same current, the influence of the arc length would mask the effect of M_{rate} . It means that both current and arc length effects are built-in into the droplet arrival speeds ($S_{arrival}$) and, consequently, affect any of the momentum related parameters (M , M_{rate} or Me). But one way to discriminate the current effect would be through the ratio of M_{rate} and TS (Eq. 3), since M_{rate} carries intrinsically the dependence between WFS and TS ($WFS/TS = \text{constant}$). Even though current and WFS are not 100% dependent, they are highly related. In addition, one could expect that momentum by the frequency with which the droplets reach the pool, as Q_{rate} is defined (Eq. 2), does not take into account the amount of time that a same volume of pool suffers the action of the impinging droplets. Again the ratio of Q_{rate} and TS , as Me is defined here, seems to enclose this effect too.

However, in the same reasoning of the analyses, one could say that a peculiar behavior takes place in Figure 1(c) around 1.5 kg/s (the increase of Me does not correspond any longer to further deeper penetration). But, it is important to point out that the lowest values of Me happen at current of 200 A, but the highest values of Me happen for 250 A, rather than for 300 A. This means that at Me around 1.5 kg/s the current was the highest, favoring the deepest penetration. Thus, a concurrent balance of effects (current x Me) further may clarify this unexpected reduction in penetration as Me increases.

Observing now Figure 2, it is possible to see the same trends for an aluminum wire concerning the relationship between Me and bead penetration. But there are some remarkable differences. The values of Me for aluminum wire are about 10 times less than those for steel, despite the fact that the penetrations reached by both welding material were at the same level. Naturally, the role that Me plays on the pool deepness depends on the characteristics (viscosity, surface tension, etc.) of the melted metal, the actions of which are difficult to predict. Besides, penetration does not depend only on Me , on the contrary, heat input is expected to be the governing parameter [7], and now Fusion Temperature, Thermal Conductivity and Specific Heat Content of the material play an important role. A second difference between aluminum alloy and steel behaviors noted in Figure 2 is that long arc reached the highest Me for aluminum; in contrast to steel weldments. The welding group Laprosolda believes (and plans to demonstrate it) that for aluminum welding the concentration of the arc connection to the plate is not so important for increasing penetration as much it is for carbon steel.

1.2. A methodology for anodic, cathodic and column voltage drop determination in MIG/MAG welding: arcs with short-circuiting metal transfer

1.2.1. Introduction

The search for consistent explanations of the phenomenon that happens in a welding arc has directed many researchers to the development or adjustment of methodologies that make

sofisticată și scumpă, au un grad de nesiguranță privind rezultatele, deoarece sunt metode intruzive. Dar, importanța acestor metode nu poate fi trecută cu vederea.

O altă abordare este o metodă indirectă. Această abordare a fost utilizată de către grupul de sudare Laprosolda, iar principalele rezultate au fost deja publicate [11]. Principalele aspecte ale acestei lucrări sunt prezentate în cele ce urmează.

1.2.2. Bazele metodei indirecte pentru determinarea căderilor de tensiune la sudarea cu arc electric cu transfer de metal prin scurtcircuitare

Figura 3 ilustrează puterea consumată de un arc la sudare pentru o valoare dată a curentului. Ecuațiile 4 și 5 definesc aceste relații.

$$U_{ab} = U_{elect+drop} + U_{arc} \quad (4)$$

$$U_{arc} = U_{an+cat} + U_{col} \quad (5)$$

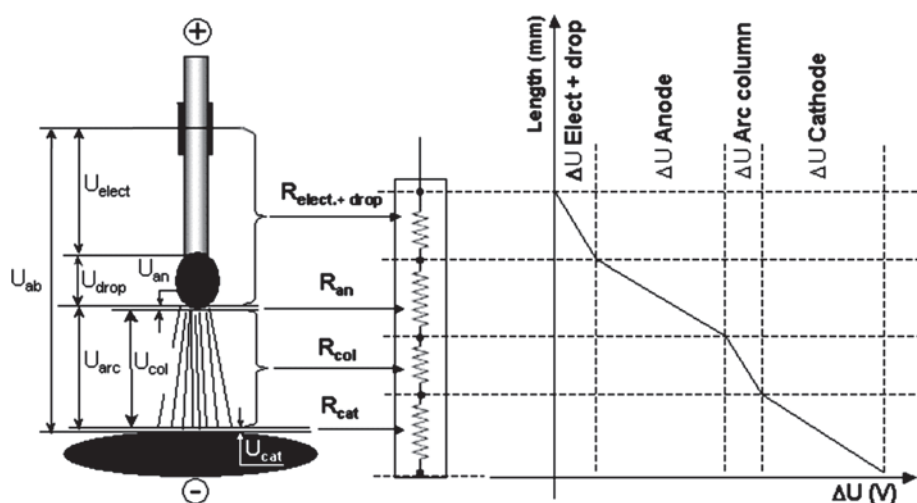


Figura 3. Profilul electric al unui arc la sudare/ Figure 3. Electrical profile of a welding arc

Ponomarev și alții [12] au sugerat determinarea componentelor căderii de tensiune din tensiunea totală a arcului prin măsurarea U_{ab} în diferite puncte specifice în timp (figura 4) și ținând cont de corelarea dintre ele în conformitate cu ecuațiile 4 și 5 (o metodă indirectă). Ei au subliniat faptul că, la sudarea MIG/MAG cu transfer în scurtcircuit, lungimea coloanei ar fi aproximativ nulă chiar în momentul dinaintea scurtcircuitului. În acest moment, tensiunea totală a arcului, aici numită tensiunea minimă a arcului (U'_{ab}), constituie în mod practic, o sumă a căderilor de tensiune de-a lungul electrodului (U_{elect}), picăturii (U_{drop}) și zonelor anodice și catodice (U_{an+cat}). Ei atrag atenția asupra faptului că valoarea sumei căderilor de tensiune de-a lungul electrodului și picăturii (U_{elect} și respectiv U_{drop}) poate fi obținută prin măsurarea tensiunii totale de sudare la momentul imediat după începerea scurtcircuitului (tensiune inițială a scurtcircuitului, reprezentată de (U'_{sc})). În acest moment nu mai există U_{an+cat} . Astfel, din măsurarea U_{ab} , U'_{ab} și U'_{sc} , valoarea sumei căderilor de tensiune referitoare la zonele anodice și catodice (U_{an+cat}) se vor rezolva conform ecuației 5, în timp ce căderea de tensiune de-a lungul coloanei arcului poate fi realizată prin ecuația 6.

$$U_{an+cat} = U'_{ab} - U_{elect+drop} = U'_{ab} - U'_{sc} \quad (5)$$

$$U_{col} = U_{ab} - U_{elect+drop} - U_{an+cat} = U_{ab} - U'_{ab} \quad (6)$$

possible the identification and measurements of arc related properties. However, determination of arc column physico-chemical properties is a complex task, which usually demands sophisticated apparatus and techniques. To overcome this setback, e.g. to reduce the number of influences, the plasma column properties are normally measured in specific conditions (for instance, at constant pressure and temperature, from ionized single gases). Thus, these data are not always coherent when they are used for prediction of a shielding gas effect in a welding operation; the small dimensions of an arc lead to very high thermal and pressure gradients, as much as to radial and axial variations in the plasma composition and ionization state. Consequently, great effort has been made in finding arc plasma physical chemical properties, looking for elucidating the phenomenology related to metal transfer, electron emission, anodic and cathodic voltage drop, and so on.

Amongst several studies involving welding arcs, some of them gained prominence for presenting methodologies that correlate welding parameters with the energy absorbed and dispended by the arc. Direct methods, such as the utilization of probes for voltage drop measurements along the arc [8-10], have been employed and improved. Most of these methods, besides the demand for sophisticated and expensive experimental apparatus, carry a degree of uncertainty in the results, since they are intrusive methods. But, the importance of these methods cannot be overlooked.

Another approach is an indirect method. This approach was used by the welding group Laprosolda and the main results have already been published [11]. The main aspects of this work are presented as follows.

1.2.2. The basics of the indirect method for determining voltage drops in arc welding with short-circuiting metal transfer

Figure 3 illustrates the power consumed by a welding arc, for a given current value. Equations 4 and 5 define these relationships.

$$U_{ab} = U_{elect+drop} + U_{arc} \quad (4)$$

$$U_{arc} = U_{an+cat} + U_{col} \quad (5)$$

Ponomarev et al. [12] suggested to determine the voltage drops components from total arc voltage through the measurement of the U_{ab} at three specific time points (Figure 4) and taking into account the correlation amongst them according to Equations 4 and 5 (an indirect method). They emphasized that, in the MIG/MAG with short-circuiting transfer, the column length would be approximately null in the instant just before the short-circuit. At this moment, the total arc voltage, herein denominated minimum voltage of arcing (U'_{ab}), constitutes practically of a summation of voltage drops along the electrode (U_{elect}), the droplet (U_{drop}) and the anodic + cathodic regions (U_{an+cat}). They call attention on the fact that the value of the summation of voltage drops

1.2.3. Metodologia de determinare a căderilor de tensiune la sudarea cu arc electric cu transfer de metal prin scurtcircuitare

Metodologia propusă se bazează pe ecuațiile prezentate mai sus, cu unele îmbunătățiri experimentale. Prima îmbunătățire s-a obținut prin utilizarea filmării cu viteză mare (2000 fps) pentru a se observa transferul metalului și determina momentele corecte pentru măsurarea valorilor dorite ale tensiunilor (U_{ab} , U'_{ab} și U'_{sc}). Pentru aceasta se aplică o cameră video CCD și tehnica „synchronized shadowgraphy” [13] astfel, încât fiecare cadru să fie corelat automat cu semnale instantanee de tensiune și curent.

O a doua îmbunătățire a fost prelevarea unui număr mare de măsurători U_{ab} , U'_{ab} și U'_{sc} în timpul unei suduri (fiabilitate statistică). Pentru aceasta, s-a proiectat un program de calculator. Programul poate, eventual, tipări un raport cu valorile medii ale U_{an+cat} , U'_{sc} /unitatea de electrod + extensiile picăturii, $U_{elect+drop}$, U_{col} , I_{ab} și I_{sc} , pentru o lungime medie dată a arcului.

1.2.4. Limitele și corectarea ecuațiilor de bază

Unele particularități ale transferului de metal prin scurtcircuitare sunt căderile de tensiune bruște la începutul scurtcircuitului, urmate de creșteri ale curentului în timpul fenomenului și vârfurile de tensiune și variațiile secvențiale ale curentului și tensiunii după aceea. Din figura 4 se poate observa o perioadă a arcului (cuprinsă de la reaprinderea imediată a arcului până la pornirea imediată a scurtcircuitului), care este divizată în două zone: o zonă a arcului tranzitoriu, în care se observă mari variații ale tensiunii și curentului și o altă zonă de arc mai mult sau mai puțin stabil, în care tensiunea și curentul se comportă practic egal.

Această metodă indirectă, în ciuda faptului că pare simplă și promițătoare, deoarece nu este evazivă, prezintă unele limite. Acestea sunt:

a) Valoarea U'_{sc} este măsurată în condițiile curentului inițial de scurtcircuit (I_{sc}) care este diferită de valoarea medie a curentului care acționează când se măsoară valoarea lui U'_{ab} . Această valoare, din urmă, este utilizată la calculul lui U_{an+cat} (ecuația 5).

Cu alte cuvinte, $U_{elect+drop} \neq U'_{sc}$;

b) La măsurarea lui U'_{ab} și U'_{sc} , electrodul + lungimea picăturii sunt similare, dar mai lungi decât lungimea electrodului în timpul arcului, condiție în care se măsoară U_{ab} pentru calculul lui U_{col} (ecuația 6);

c) U_{col} depinde de curentul de sudare și lungimea arcului. Lungimea arcului, la rândul ei, determină zona superficială a conexiunilor arc – electrod și arc – metal de bază (în principal).

Diferite densități ale curentului implică diversele căderi de tensiune. Astfel, valoarea U_{col} nu poate fi utilizată pentru comparație în condiții diferite dacă nu există siguranța că arcele au aceeași lungime și aceeași intensitate a curentului;

d) U_{ab} în cazul transferului prin scurtcircuit poate fi obținut cu ușurință făcând media semnalelor de tensiune din timpul arcului. Totuși, există o îndoială privind semnificația fizică a includerii sau nu a valorilor tensiunii în timpul reaprinderii și

along the electrode and the droplet (U_{elect} and U_{drop} , respectively) could be obtained by measuring the total welding voltage at an instant immediately after the short-circuit start (initial voltage of short-circuit, represented by U'_{sc}). At this right moment, U_{an+cat} does not exist anymore. Thus, from the measurements of U_{ab} , U'_{ab} and U'_{sc} , the value of the summation of voltage drops referring to anodic and cathodic regions (U_{an+cat}) would be solved according to Equation 5, while the value of the voltage drop along the arc column could be achieved through Equation 6.

$$U_{an+cat} = U'_{ab} - U_{elect+drop} = U'_{ab} - U'_{sc} \quad (5)$$

$$U_{col} = U_{ab} - U_{elect+drop} - U_{an+cat} = U_{ab} - U'_{ab} \quad (6)$$

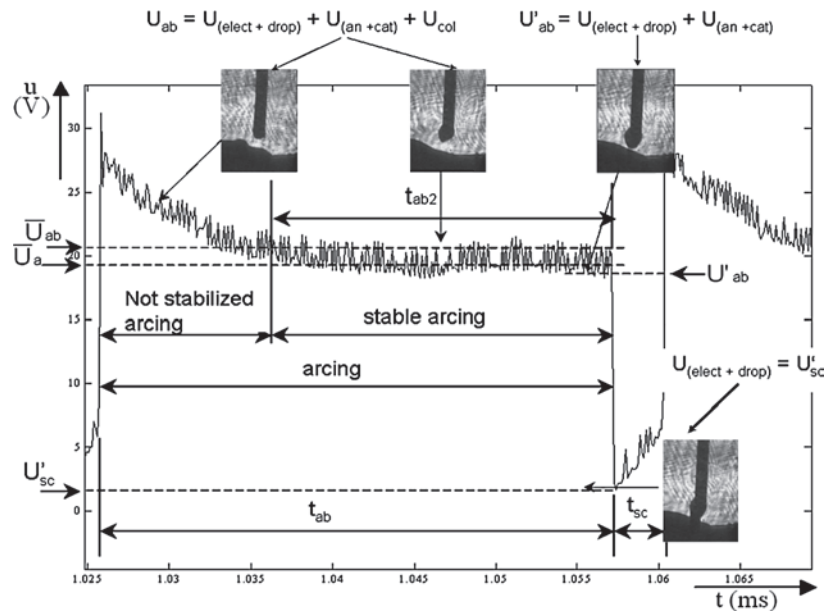


Figura 4. Compoziția tensiunii unui arc cu transfer de metal în scurt circuit, unde: U_a = tensiunea medie a arcului în perioadele de arc + scurt circuit ($t_{ab} + t_{sc}$); U_{ab} = tensiunea medie a arcului în perioadele de arc t_{ab} ; U'_{sc} = tensiunea inițială a scurt circuitului; U'_{ab} = tensiunea minimă a arcului; t_{ab} = durată totală a arcului; t_{ab2} = durată arcului în condiție stabilă și t_{sc} = durată scurt circuitului./

Figure 4. Voltage composition of a arc with short-circuiting metal transfer, where: U_a = mean arc voltage during the periods of arcing + short-circuiting ($t_{ab} + t_{sc}$); U_{ab} = mean arc voltage during the periods of arcing t_{ab} ; U'_{sc} = initial voltage of the short-circuiting; U'_{ab} = minimum voltage of arcing; t_{ab} = total arcing duration; t_{ab2} = duration of the arcing in a stable condition; and t_{sc} = short-circuiting duration.

1.2.3. The methodology for determining voltage drops in arc welding with short-circuiting metal transfer

The proposed methodology is based on the equations above presented, yet with some experimental enhancements. The first improvement was reached by using high-speed filming (2000 fps) for observing metal transferring and determining the right moments for measuring the desired voltage values (U_{ab} , U'_{ab} and U'_{sc}). For that, a CCD camera and the technique „synchronized shadowgraphy” [13] are applied in such a way that each frame could be automatically correlated with instantaneous voltage and current signals.

A second improvement was to sample a large number of U_{ab} , U'_{ab} and U'_{sc} measurements during a weld (statistical reliability). For that, a dedicate computational program was designed. Eventually, the program prints out a report with the

înaintea stabilizării arcului (numită perioadă de tranziție a arcului, vezi figura 5). Includerea valorilor tensiunii din perioada tranzitorie a arcului în calculul U_{ab} poate duce la schimbarea rezultatelor, datorită caracterului de instabilitate. Pe de altă parte, excluderea acestor valori ar aproxima U_{ab} al U'_{ab} , astfel încât U_{col} va atinge valoarea zero, ceea ce nu este conform realității.

Pentru a minimaliza limita „a”, s-a abordat aducerea valorii lui U'_{sc} la același nivel al curentului ca U'_{ab} , adică, $U_{(elect+drop)} = U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc})$, unde $U_{(elect+drop)}$ este valoarea căderii de tensiune de-a lungul electrodului și picăturii atunci când valoarea curentului este a unui arc stabil. De aici, corelarea dintre curenți reprezintă un factor de corecție ($CFI = I_{ab}/I_{sc}$). Considerând că la momentul de scurtcircuit lungimea electrodului este egală cu distanța vârf de contact – piesa de lucru (CTWD) și căderea de tensiune de-a lungul electrodului + picăturii poate fi reprezentată printr-o relație liniară, se poate utiliza ecuația 7 pentru definirea căderii de tensiune pe unitatea de lungime electrod + picătură în timpul arcului:

$$U_{elect+drop}/mm = (U'_{sc}/CTWD) \times (I_{ab}/I_{sc}) \quad (7)$$

O serie de experimente [11] au demonstrat că există o mică dependență între U'_{sc} /unitatea electrodului și lungimea electrodului real + a picăturii, dar există o dependență neașteptată de tipul gazului de protecție. Astfel, raportul $U'_{sc}/CTWD$ trebuie să fie întotdeauna determinat pentru fiecare condiție de sudare (tipul gazului de protecție, compoziția și diametrul electrodului și nivelul curentului).

Pentru a minimaliza limita „b”, propunerea a fost, la utilizarea ecuației 7, să se estimeze și să se corecteze valorile $U_{elect+drop} = U_{an+cat}$ pentru lungimea electrodului a cărui valoare U_{ab} este luată din ($L_{elect+drop}$, unde în acest caz $L_{elect+drop} < CTWD$). Presupunând că U_{an+cat} nu depinde de lungimea electrodului + a picăturii, trebuie corectată valoarea lui $U_{elect+drop}$ pentru o nouă condiție:

$$U_{elect+drop}(cor) = L_{elect+drop} \times U_{elect+drop}/mm \quad (8)$$

Pentru a face posibile diferențele în lungimea arcului între condițiile de sudare în determinarea lui U_{col} (limita „c”), lungimile arcului sunt măsurate automat (se iau aproximativ 7000 cadre pe trecere). După efectuarea măsurătorilor, toate cazurile având lungimea arcului egală cu zero sunt descărcate și lungimile medii ale arcului au fost calculate (corespunzător perioadelor de arc). Astfel, valoarea lui U_{col} a fost exprimată în unități ale lungimii arcului (U_{col}/mm), pentru un nivel de curent dat.

Limita pentru determinarea lui U_{ab} (limita „d”) este mult mai dificil de administrat, deoarece este intrinsecă procesului de sudare cu transfer de metal prin scurtcircuitare. Problema a fost apoi să se definească un criteriu subiectiv pentru determinarea lui U_{ab} . În această lucrare, determinarea lui U_{ab} s-a realizat numai în zona stabilă a arcului.

Odată ce soluțiile de mai sus pentru limitarea ecuațiilor originale sunt acceptabile, cele două părți ale căderii de tensiune la sudare cu arc electric pot fi deduse prin ecuațiile 9 și 10:

$$U_{an+cat} = U'_{ab} - U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc}) \quad (9)$$

$$U_{col}/mm = \{U_{ab} - L_{elect+drop} \times (U'_{sc}/CTWD) \times (I_{ab}/I_{sc}) - U'_{ab} + U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc})\} / L_{arc} \quad (10)$$

mean values of U_{an+cat} , U'_{sc} /unit of electrode + droplet extensions, $U_{elect+drop}$, U_{col} , I_{ab} and I_{sc} , for a given average arc length.

1.2.4. Limitations and correction of the basic equating

Some particularities of the short-circuiting metal transfer are the abrupt voltage falls at the beginning of the short-circuit, followed by current rises during the phenomenon and voltage peaks and sequential variations of current and voltage afterwards. From Figure 4, one can observe an arcing period (comprehended from the arc reignition instant until the short-circuit start instant), which is divided into two regions: one region of a transient arc, where great variations of voltage and current are noticed, and other region of a more or less stable arc, where voltage and current behave practically evenly.

This indirect method, in spite of looking like simple and promising, since it is not evasive, presents some limitations. These are:

a) The U'_{sc} value is measured under conditions of a short-circuit initial current (I_{sc}) which is different from the mean current value acting at the moment the value of U'_{ab} is measured. This latter value is used in the calculation of U_{an+cat} (Eq. 5). In other words, $U_{elect+drop} \neq U'_{sc}$;

b) In the measurements of U'_{ab} and U'_{sc} , the electrode + droplet length is similar, but longer than the electrode length during arcing, condition in which U_{ab} is measured for the calculation of U_{col} (Eq. 6);

c) U_{col} depends on the welding current and arc length. The arc length, in turn, determines the superficial area of the connections arc-electrode and arc-parent metal (mainly). Different current densities imply diverse voltage drops. Thus, the U_{col} value cannot be used for comparison amongst unlike conditions if there is no assurance that the arcs have the same length and carry the same current intensity;

d) U_{ab} in a short-circuiting transfer welding could be easily obtained by averaging voltage signal while arcing. However, there is doubt about the physical meaning of the inclusion or not of the voltage values during reignition and before arc stabilization (named transient arc period, as seen in Figure 5). The inclusion of the transient arc period voltage values in U_{ab} calculation could disguise the results, due to the instability character. On the other hand, the exclusion of these values would approximate U_{ab} of U'_{ab} , in such a way that U_{col} would get close to zero, what is not faithful with reality.

For minimizing limitation „a”, the approach was to bring the U'_{sc} value to a same current level as U'_{ab} , that is, $U_{(elect+drop)} = U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc})$, where $U_{(elect+drop)}$ is the voltage drop value along the electrode and droplet when current is the one of a stable arc. Hence, the correlation between currents represents a correction factor ($CFI = I_{ab}/I_{sc}$). Considering that at the short-circuit moment the electrode length is equal to the contact tip-to-work distance (CTWD) and that the voltage drop along the electrode + droplet can be represented by a linear relationship, one can use Equation (7) for defining the voltage drop per unit of length of electrode + droplet during arcing:

$$U_{elect+drop}/mm = (U'_{sc}/CTWD) \times (I_{ab}/I_{sc}) \quad (7)$$

A series of experiments [11] demonstrated that there exist little dependence between U'_{sc} /unit of electrode and the actual

deoarece în cazul ecuației 9 lungimea electrodului + cea a picăturii este aceeași pentru determinarea lui $U'_{ab} - U'_{sc}$, dar curenții sunt diferiți.

În cazul ecuației 10, $L_{elect+drop}$ presupune aceeași valoare la care U_{ab} se măsoară ($CTWD$ minus L_{arc} la momentul la care se măsoară U_{ab}).

Pentru a minimaliza limita „c”, ar fi de asemenea important să se estimeze și să se corecteze încă odată valoarea lui $U_{(elect+drop)}$ pentru a se lua în considerare ponderea rezistenței electrice în picătură în legătură cu lungimea totală a electrodului + cea a picăturii. Totuși, deoarece relația dintre rezistivitățile picăturii și electrodului este necunoscută, nu este posibil să se aplice nici o corecție.

1.2.5. Rezultate

Pentru a exemplifica utilizarea metodologiei, s-au analizat 5 amestecuri de gaze de protecție pe bază de Ar și 3% CO_2 cu adaos de N_2 variind de la 1 la 5% (sârmă AWS ER308LSi, 1,2 mm, $CTWD$ de 18 mm, tensiune (U_{ref}) 16,5 V și viteză de alimentare cu sârmă (WFR) egală cu 3,2 m/min). Această stabilire/reglare a parametrilor s-a realizat la sudarea cu transfer de metal prin scurtcircuitare pentru toate amestecurile supuse evaluării. Nu a fost nevoie să se adopte o reglare diferită pentru U_{ref} și WFR pe amestec, deoarece lungimea arcului nu a variat în mod semnificativ. Pentru a avea siguranța că scurtcircuitele se produc în fața băii (pe o porțiune tocmai topită) și nu pe întreaga baie, viteza de lucru a fost mărită până la această condiție (în acest caz la 35cm/min).

Influența conținutului de N_2 asupra grupelor de tensiune poate fi vizualizată în figurile 5-7. Așa cum se poate vedea în Figura 5, azotul adăugat într-un gaz de protecție determină creșterea căderii de tensiune din zona anodică și catodică (cu aproximativ 0,3 V). Considerând că, conținutul de N_2 nu influențează viteza de topire a sârmei (nu a fost nevoie să se

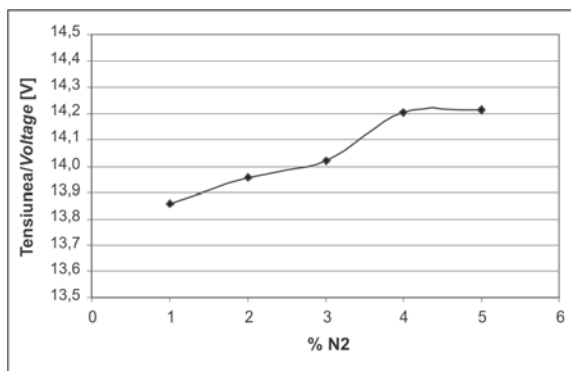


Figura 5. Influența conținutului de N_2 asupra căderii de tensiune în conexiunile anodice/catodice ale arcului (U_{an+cat})

Figure 5. Influence of the N_2 content on the voltage drop in the arc anodic/cathodic connections (U_{an+cat})

schimbe viteza de alimentare cu sârmă pentru a se menține același nivel al curentului și lungimea arcului pentru diferite amestecuri), această creștere a tensiunii este, atunci, probabil datorată catodului. Deoarece sudurile par a fi mai puțin convexe și mai late prin creșterea conținutului de N_2 , posibil datorită unei energii mai mari liniare în tablă, deși s-a lucrat cu aceeași energie de sudare ($E = U \times I/TS$), există o altă dovadă că metodologia este adecvată.

În concluzie, sudarea prin scurtcircuitare a demonstrat că cu cât conținutul de N_2 este mai mare cu atât este mai mare

electrode + drop length, but there is an unexpected dependence with the type of shielding gas. Thus, the ratio $U'_{sc}/CTWD$ must always be determined for each welding condition (shielding gas type, electrode composition and diameter and current level).

For minimizing limitation „b”, the proposal was, at the use of Eq. (7), to estimate and correct the $U_{elect+drop} = U_{an+cat}$ values for the electrode length whose value of U_{ab} is taken from ($L_{elect+drop}$, where in this case $L_{elect+drop} < CTWD$). Assuming that U_{an+cat} does not depend on the electrode + drop length, one must correct the value of $U_{elect+drop}$ for a new condition:

$$U_{elect+drop(cor)} = L_{elect+drop} \times U_{elect+drop}/mm \quad (8)$$

To make up for possible arc length differences between welding conditions in the U_{col} determination (limitation „c”), the arc lengths are measured in the automatic way (taken approximately 7000 frames per run). After the measurements, all the events with arc length equal to zero are discharged and the mean arc lengths were calculated (corresponding to arcing periods). Thus, the values of U_{col} passed to be expressed per unit of arc length (U_{col}/mm), for a given current level.

The limitation for determining U_{ab} (limitation „d”) is more difficult to be managed, since it is intrinsic to welding processes with short-circuiting metal transfer. The question, then, was to define a subjective criterion for U_{ab} determination. In this work, the determination of U_{ab} was carried out only in the stable region of the arc.

Once the above solutions for the limitations of the original equating are acceptable, the two parcels of the voltage drop in a welding arc can be deduced through Equations (9) and (10):

$$U_{an+cat} = U'_{ab} - U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc}) \quad (9)$$

$$U_{col}/mm = \{U_{ab} - L_{elect+drop} \times (U'_{sc}/CTWD) \times (I_{ab}/I_{sc}) - U'_{ab} + U'_{sc} \times (I_{ab}/I_{sc})\}/L_{arc} \quad (10)$$

since in the case of Equation (9) the electrode + droplet length is the same used in the determination of $U'_{ab} - U'_{sc}$, but currents are different. In the case of Equation (10), $L_{elect+drop}$ assume the same value at which U_{ab} is measured ($CTWD$ minus L_{arc} at the moment U_{ab} is measured).

For minimizing limitation „c”, it would be also important to estimate and correct once more the $U_{(elect+drop)}$ value to take into account the weight of the electrical resistance in the droplet in relation to the total electrode + droplet length. However, as the relationship between the droplet and electrode electrical resistivities is unknown, it is not possible to apply any correction.

1.2.5. Some results

For exemplifying the use of the methodology, 5 shielding gas blends based on Ar and 3% CO_2 with addition of N_2 varying from 1 to 5% were analyzed. (AWS ER308LSi wire, 1,2 mm, $CTWD$ of 18 mm, setting voltage (U_{ref}) of 16,5 V and a wire feed rate (WFR) equal to 3,2 m/min). These setting parameters were accomplished to welding with metal transferring by stable short-circuits for all blends under evaluation. There was no need of adopting a different setting for U_{ref} and WFR per blend, since the arc lengths did not vary significantly. To assure that the short-circuits were occurring in front of the pool (on a just melted portion), and not over

tensiunea totală a arcului. Totuși, căderea de tensiune în conexiunile arcului la anod și catod reprezintă aproape întreaga cădere de tensiune. Căderea de tensiune de-a lungul coloanei de plasmă nu depinde de micile variații ale azotului din compoziția gazului de protecție, deoarece vaporii metalici par

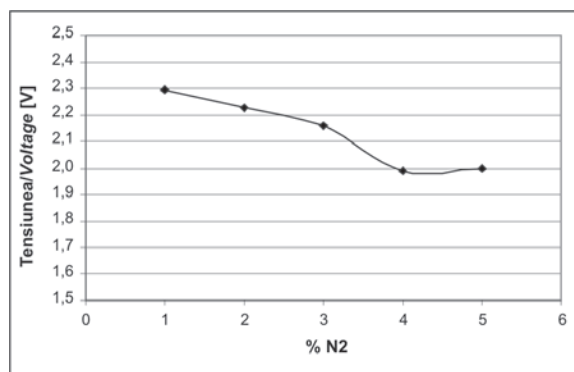


Figura 6. Influența conținutului de N_2 asupra căderii de tensiune pe lungimea electrodului + a picăturii ($U_{\text{elect+drop}}$) /
Figure 6. Influence of the N_2 content on the voltage drop along electrode + drop length ($U_{\text{elect+drop}}$)

să prevaleze peste influența amestecului de gaz atunci când se utilizează un arc foarte scurt. Pe de altă parte, variații mici ale conținutului de N_2 în compoziția gazului de protecție influențează căderea de tensiune pe lungimea electrodului și a picăturii.

2. Transferul de metal: Clasa de transfer de metal combinat

2.1. Introducere

Modul în care metalul este transferat determină stabilitatea procesului și influențează generarea stropilor, posibilitățile poziționale ale operației și calitatea sudurii. Datorită importanței subiectului, cercetătorii și IIS (Institutul Internațional de Sudură) au depus eforturi pentru a caracteriza transferul de metal pentru sudarea MIG/MAG prin clasificări didactice și logice. Clasificarea transferului de metal, care rămâne încă în vigoare în documentația IIS, a fost propusă cu circa 30 de ani în urmă [14]. În ciuda meritului, această caracterizare nu cuprinde recent descoperitul transfer controlat sau noile moduri posibile de transfer de metal, posibil de recunoscut cu noile tehnologii de măsurare.

Urmând noile abordări de clasificare, s-au prezentat propuneri noi [15-19] de către cercetători de seamă în acest domeniu în perioada anilor 2003 – 2008. Transferurile care se produc în noile procese au fost incluse. Pe de o parte, a existat tendința de a simplifica clasele utilizând caracteristicile metalului supus transferului (dimensiunile picăturii și factorii principali care acționează), mai curând decât aplicațiile. Pe de altă parte, clasificările propuse recent nu acoperă toate fenomenele ce se produc la transferul metalului.

Nu se poate nega importanța acestor noi abordări menționate care conduc la o clasificare mai cuprinzătoare, și totuși simplă. Dar, se așteaptă ca o schemă de clasificare efectivă, reevaluată să ajute mai mult pe utilizatori în sarcina adesea confuză de selectare a procesului și să faciliteze învățarea principiilor procesului. În acest context, membrii grupului de sudare Laprosolda urmează să propună o contribuție la acest proces de clasificare a transferului de metal

the whole pool, the travel speed was increased up to find this condition (in the present case, to 35 cm/min).

The N_2 content influence on the voltage parcels can be visualized in Figures (5) to (7). As it can be seen in Figure 5, nitrogen added to a shielding gas makes the voltage drop at

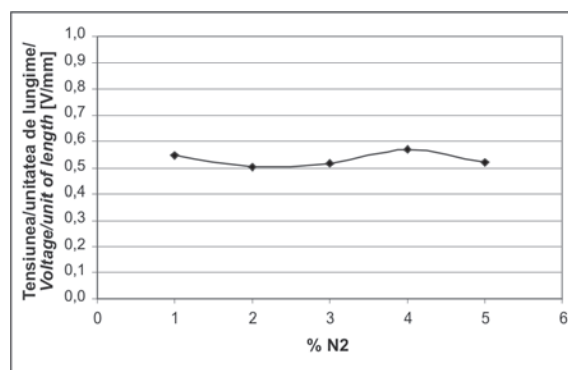


Figura 7. Influența conținutului de N_2 asupra căderii de tensiune pe lungimea coloanei de plasmă ($U_{\text{col/mm}}$) /
Figure 7. Influence of the N_2 content on the voltage drop along the plasma column ($U_{\text{col/mm}}$)

the anodic and cathodic region to rise (by approximately 0.3 V). Considering that the N_2 content did not affect the wire fusion rate (there was no need of changing the wire feed speed to keep the same current level and arc length for different blends), this voltage increase is, then, probably due to the cathode. As the beads showed to be less convex and wider with an increasing N_2 content, possibly due to a higher heat input to the plate, despite of working at the same calculated welding energy ($E = U \times I/TS$), there is another evidence of the methodology adequacy.

In conclusion, short-circuiting welding demonstrated that the higher the N_2 content, the more the total arc voltage. However, the voltage drop in the arc connections to the anode and cathode represents almost the total voltage drop. The voltage drop along the plasma column is independent of small variations of nitrogen in the shielding gas composition, since the metallic vapors seem to prevail over the gas blend influence when a very short arc is employed. On the other hand, small N_2 variations in the shielding gas composition affect the voltage drop along electrode + droplet length.

2. On the metal transfer: Combined metal transfer class

2.1. Introduction

The way by which the metal is transferred across the arc gap determines the process stability and affects spatter generation, positional operation capabilities and weld quality. Due to the importance of the subject, researchers and IIW (International Institute of Welding) commissioners endeavored to characterize metal transfer for MIG/MAG welding through didactic and logic classifications. The metal transfer classification, which still remains in force in the IIW documentation, was proposed almost 30 years ago [14]. Despite the merit, this classification does not encompass either the recently discovered controlled transfer or the new metal transfer modes possible to be recognized by new measurement technologies.

In pursuit of new classification approaches, new proposals [15-19] were presented by some leading researchers in this

Principii la sudarea MIG/MAG

prin păstrarea tendințelor, dar și prin includerea unei clase nu prea comentată în literatura de specialitate.

2.2. Propunere pentru clasificarea transferului de metal

Înainte de toate este important să se specifice terminologia utilizată în clasificarea Laprosolda. Mod (mod transfer metal) este utilizat pentru a defini o comportare caracteristică a unei picături supusă transferului la sudarea MIG/MAG, cum ar fi cel globular sau așa zisa pulverizare. Grup (grup de moduri) care simbolizează un număr de moduri care au caracteristici similare. Clasa (clase de moduri) este cea mai înaltă din punct de vedere ierarhic (parental) grupare de moduri: o clasă a unui mod poate fi formată dintr-una sau mai multe grupe.

Tehnici moderne de laborator (specifice, filmare video de mare viteză sincronizată cu achiziția parametrilor de sudare) au sprijinit studiile privind transferul de metal. Aceste instrumente au scos în evidență faptul că sunt mai multe clase parentale de transfer de metal decât cele cunoscute. Membrii grupului de sudare Laprosolda cred că o clasă suplimentară trebuie să se distingă datorită caracteristicilor unice ale schimbărilor periodice în modul de transfer, provocate de schimbările privind parametrii de sudare (o comportare „autofagă”). Această clasă se numește aici „Transfer de metal combinat”. Astfel clasificarea propusă este prezentată pe scurt în Figura 8.

area during the period of 2003 to 2008. Transfers that happen in new processes were included. On the one hand, there was in most work a tendency in simplifying the classes by using the characteristics of the metal under transfer (droplet sizes and main factors acting) rather than applications. On the other hand, the recently proposed classifications do not cover all occurrences of metal transfer.

One cannot deny the importance of these mentioned new approaches to lead to a more comprehensive, yet simple, classification. But, it is expected that an effective re-evaluated classification scheme should assist better the users in the often confusing task of process selection and facilitate teaching of process principles. In this context, members of the welding group Laprosolda are about to propose a contribution to the process of metal transfer classification by preserving the tendencies, but also by including a class not very much commented in the literature so far.

2.2. The proposal for metal transfer classification

First of all, it is important to state the terminology used in Laprosolda's classification. Mode (metal transfer mode) is used to define a characteristic behavior of a drop under transference in MIG/MAG welding, such as the Globular or the so-called Spray. Group (group of modes) stands for a number of modes that have similar characteristics. Class (classes of modes) is

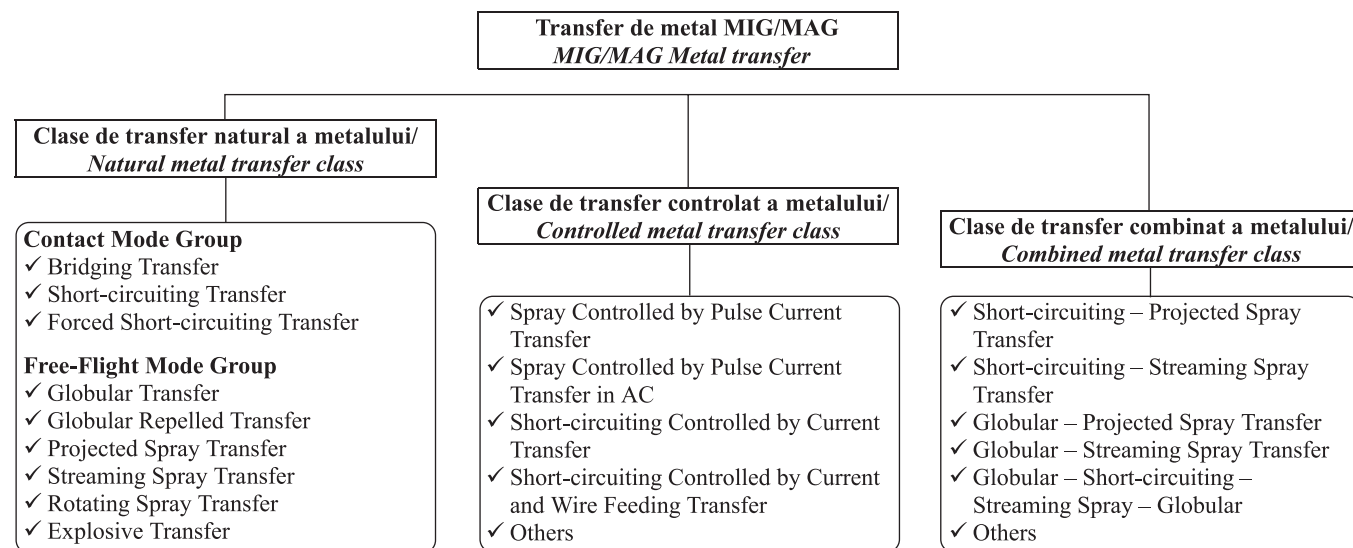


Figura 8. Clasificarea propusă pentru transferul de metal pe baza ordinii ierarhice (clase, grupe și moduri)/
Figure 8. Proposed Metal Transfer Classification based on hierarchal order (classes, groups and modes)

Clasa de transfer de metal a „Modurilor naturale” cuprinde acele moduri care nu-și asumă nici un control adaptiv al parametrilor de sudare (tensiune arc, curent de sudare, viteză de alimentare cu sârmă, inductanță, etc.) în timpul transferului picăturii de metal. În aceste moduri, transferul picăturii în baia de sudare este influențat în primul rând de un echilibru fizic rezultat al forțelor ce acționează asupra picăturii. Există două grupe distincte de moduri naturale de transfer al metalului: o grupă în care picătura de metal este transferată băii de sudare în timpul unui contact dintre ele și o altă grupă în care picătura atinge baia în zbor liber peste zona arcului.

Într-o anumită măsură, clasa „Transferului de metal controlat” este compusă din moduri naturale „îmbunătățite” cu scopul de a îmbunătăți caracteristicile operaționale ale procesului, cum ar fi minimizarea stropilor, controlul geometriei

the highest hierarchic (parental) grouping of modes: A class of mode can be formed by one or more groups.

Modern laboratory techniques (specific, high speed video filming synchronized with welding parameters acquisition) boosted the studies on metal transfer. These tools brought out evidences that there are more metal transfer parental classes than the recognized ones. Members of the welding group Laprosolda believe that an extra class should be distinguished due to its unique characteristic of periodical changes in the transfer mode provoked by changes in welding parameters (an „autophagic” behavior). This class is here referred as „Combined Metal Transfer”. Thus, the proposed classification is summarized as seen in Figure 8.

The „Natural Modes” class of metal transfer embraces those modes which do not assume any adaptive control of

sudurii, stabilizarea absorbției de căldură, ș.a.m.d). Echilibrul forțelor încă prevalează, dar se modifică deliberat și constant pentru a controla transferul de metal, cum ar fi prin alterări pre-programate ale curentului (MIG în impulsuri) sau modificări on-line ale unuia sau mai multor parametri de sudare.

Termenul clasă de moduri „Transfer de metal combinat” este utilizat într-un context pentru o clasă în care, fără vreo intervenție din partea operatorului sau a unui sistem de control adaptiv, două sau mai multe moduri de transfer se produc într-o secvență repetitivă periodică, una urmând alteia drept consecință a celei anterioare. De exemplu, variația curentului, temperatura electrodului și/sau starea plamei datorită modului de transfer în desfășurare dă naștere unor condiții pentru ca următorul mod să se producă.

2.3. Clasa modurilor de transfer de metal combinat

Modurile de transfer de metal combinate nu sunt foarte mult comentate în literatura de specialitate, poate pentru că sunt dificil de identificat utilizând tehnicile de laborator obișnuite. Pe lângă aceasta ele sunt confundate ușor cu instabilitatea temporară a transferului în timpul unei reglări la setul de parametri operaționali de tranziție între două moduri naturale adiacente. Ca moduri înregistrate, se pot cita [20]:

- *Scurt-circuit – Projected spray;*
- *Scurt-circuit – Streaming spray;*
- *Globular – Projected spray;*
- *Globular – Streaming spray;*
- *Globular – Short-circuiting – Streaming Spray – Globular;*
- *Altele.*

Deși câmpurile de producere a acestor moduri de transfer sunt localizate între modurile naturale adiacente, nu trebuie să fie confundate cu un mod de transfer de tranziție, deoarece acesta se caracterizează după alte principii de bază, cum ar fi repetabilitatea secvențial periodică (adică, nu este un fenomen de instabilitate ocazională între două moduri). Modul de transfer de metal combinat se produce dacă și numai dacă sunt prezente condițiile necesare, adică o combinație a curentului, lungimii arcului, materialului și diametrului sârmei, gazului de protecție, distanței tub de contact - piesa de lucru (CTWD) și dinamica favorabilă (inductanța) sursei de putere. Cu alte cuvinte, dacă nu există condiții favorabile într-o zonă intermediară între două moduri naturale, acest mod de transfer de metal nu se va produce niciodată.

În realitate, toate condițiile favorabile menționate mai sus sunt „adunate împreună” pentru a permite curentului de sudare să depășească într-o măsură nivelul curentului pentru tranziția globular - spray, schimbând un mod natural de transfer (scurtcircuit sau globular în projected spray or streaming spray). La scurt timp după aceasta, curentul scade și tipul modului de transfer se reîntoarce coerent la cel anterior, inițiind un nou ciclu. Se crede că există **2 motive** (care acționează singure sau împreună) pentru astfel de variații tranzitorii sau ciclice ale curentului.

Primul motiv se referă la fenomenul scurtcircuitului, depinzând în principal atât de inductanța sursei de putere (răspunsul dinamic al curentului, adică vitezele de creștere și scădere a curentului) cât și de combinația electrod-gaz de protecție (determinând nivelul curentului de tranziție și durata scurtcircuitului, adică timpul de creștere a curentului).

the welding parameters (arc voltage, welding current, wire feed speed, inductance, etc.) during the metal droplet transfer. In these modes, the droplet transfer to the weld pool is primarily influenced by a resultant physical balance of forces acting on the droplet. There are two distinctive groups of the natural metal transfer modes: a group in which the metal droplet is transferring to the weld pool during a *contact* between them and another one in which the droplet reaches the pool in a *free flight* across the arc gap.

To a certain extent, the class „Controlled Metal Transfer” is composed of „improved” natural modes, aiming at improving operational characteristics of the process, such as spattering minimization, weld geometry control, heat input stabilization, and so on). The balance of force still prevails, but it is deliberately and constantly modified to control the metal transfer, such as by pre-programmed current alterations (MIG Pulsed) or by on-line modification of one or more welding parameters.

The term „Combined Metal Transfer” class of modes is used in a context for a class where, without any interference of the operator or an adaptive control system, two or more transfer modes occur in a periodic repetitive sequence, one following the other as a consequence of the previous one. For instance, the variation of current, electrode temperature and/or plasma status due to a transfer mode under processing gives rise to conditions for the following mode to take place.

2.3. Modes of the combined metal transfer class

Combined Metal Transfer Modes are not widely commented in the current literature, most likely because they are difficult to be identified using ordinary laboratory techniques. Besides, they are easily confused with temporary transfer instability during a setting at a transition operational envelope between two adjacent natural modes. As registered modes, it can be cited [20]:

- *Short-circuiting – Projected Spray;*
- *Short-circuiting – Streaming Spray;*
- *Globular – Projected Spray;*
- *Globular – Streaming Spray;*
- *Globular – Short-circuiting – Streaming Spray – Globular;*
- *Others.*

Though the fields of occurrence of these transfer modes are located between adjacent natural modes, they should not be confused with a transition transfer mode, because they are characterized by other fundamentals, such as sequential periodic repeatability (i.e., it is not a phenomenon of occasional nature instability between two modes). The combined metal transfer mode takes place if, and only if, all necessary conditions are present, i.e., a combination of current, arc length, material and diameter of the wire, shielding gas, contact-tube to work distance (CTWD) and favorable dynamics (inductance) of the power source. In other words, if there are no favorable conditions in an intercession area between two natural modes, this mode of metal transfer will never happen.

Actually, all favorable conditions mentioned above are „gathered together” to allow welding current to exceed to some extent the Globular-Spray transition current level, changing a natural transfer mode (short-circuiting or globular to projected spray or even streaming spray). Shortly thereafter, this current decreases and the transfer mode type coherently

Principii la sudarea MIG/MAG

Un curent post scurtcircuit de valoare mare poate sta temporar deasupra nivelului curentului de tranziție provocând transferul de tip spray. Datorită aceluiași curent de valoare mare, viteza de topire a electrodului devine mai mare decât *WFS* și lungimea arcului începe să crească progresiv. Deoarece arcele mai lungi determină scăderea valorii curentului (la surse de putere cu tensiune constantă), viteza de topire a electrodului de asemenea scade treptat. Ca urmare, aceasta devine mai mică decât *WFS*, iar vârful sârmei se apropie de baia de sudare. Un curent de valoare mică și un arc scurt sunt condiții favorabile apariției scurtcircuitului și ciclul este repornit. Acest (**prim**) motiv este predominant în justificarea producerii modului de transfer de metal combinat „scurtcircuit - spray” (Figura 9).

returns to the previous one, initiating a new cycle. It is believed that there are **2 reasons** (acting alone or jointly) for such transitory and cyclic variations of the current. The **first** is related to the short-circuit phenomenon, mainly depending on both the inductance of the power source (dynamic answer of the current, i.e. current rising and falling rates) and the combination electrode-shielding gas (determining the transition current level and the short-circuit duration, i.e. current rising time). A high post short-circuiting current may temporarily stay above the transition current level, provoking spray transfer. Due to the same augmented current, the electrode melting rate becomes higher than the *WFS* and the arc length starts to increase progressively. As longer arcs make the current to decrease (in constant voltage power source),

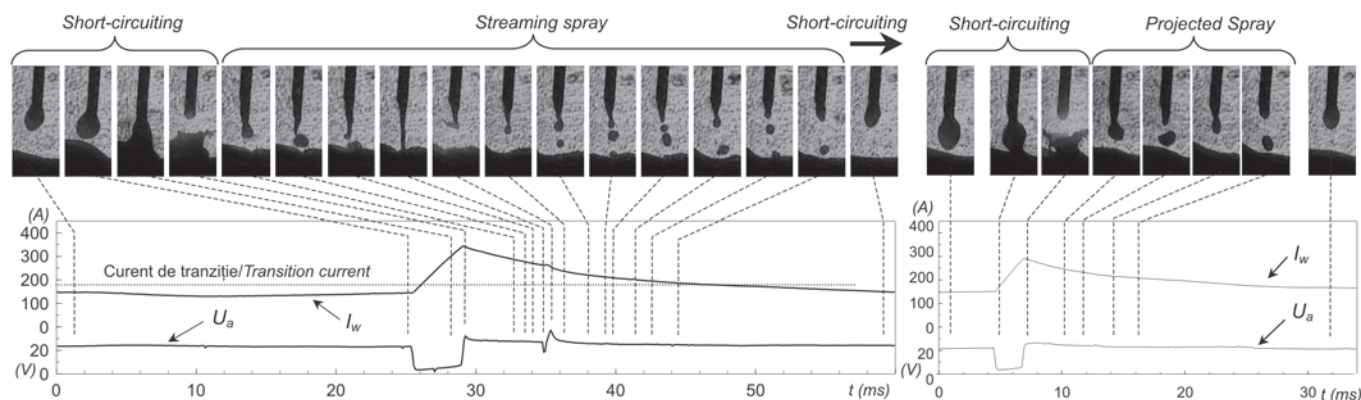


Figura 9. Exemple de tipuri de moduri de transfer de metal combinate „scurtcircuit – spray”: sus „streaming” iar la dreapta „projected” (sârmă electrod din oțel carbon 1 mm diametru; $U_a = 23,5$ V; $I_w = 170$ A; *WFS* = 7 m/min; viteza de lucru = 36 cm/min; CTWD 18 mm; gaz de protecție Ar + 5%O₂). Notă: pentru a sublinia fenomenul, tensiunea arcului a fost, în mod intenționat, fixată mai mare decât este normal, cu rată mare de creștere și scădere a curentului./

Figure 9. Examples of Combined Metal Transfer modes of the type „short-circuiting – spray”: above „streaming” and to the right „projected” (carbon steel wire-electrode of 1,0 mm diameter; $U_a = 23.5$ V; $I_w = 170$ A; *WFS* = 7 m/min; travel speed = 36 cm/min; CTWD of 18 mm; shielding gas Ar + 5%O₂). Note: To place an emphasis on the phenomenon, the arc voltage was intentionally set higher than the normal, with high current rising rate and current falling rate.

Al **doilea motiv** se referă la un fenomen care nu este încă discutat îndeajuns, în mod deschis în literatură. Există dovezi că rezistivitatea electrică a picăturii devine mai mare decât cea a coloanei arcului atunci când se sudează cu sârme din oțel carbon și amestecuri de gaze cu mai puțin de 12% CO₂ [21]. În timpul transferului globular în astfel de condiții, pe măsură ce picătura crește și în consecință, arc se reduce, tensiunea arcului crește „în loc” să se reducă (ceea ce ar fi de așteptat și ar fi mai logic). Deoarece o tensiune mai mare conduce la reducerea valorii curentului la tensiune constantă a surselor de putere (cu gradient impus de inductanță), viteza de topire a sârmei devine mai mică decât *WFS*. Aceasta accelerează și mai mult apropierea vârfului sârmei (cu picătură globulară) de baia de sudare, provocând uneori scurtcircuitele incipiente (cu un curent de scurtcircuit nesemnificativ care nu afectează fenomenul).

Împreună cu creșterea extensiei electrodului, rezistența electrică totală începe să se reducă (rezistența de-a lungul sârmei prevalează asupra celei ale coloanei arcului), iar curentul începe să crească din nou. Acesta ar putea atinge, funcție de inductanță, valori peste curentul de tranziție (care este mic pentru acele amestecuri de gaze), rezultând generarea unui mod de transfer de tip projected spray sau chiar de tip streaming spray. Viteza mare de topire a electrodului, care rezultă, duce la creșterea lungimii arcului și micșorarea curentului, condiționând, din nou, transferul globular. Un nou ciclu începe.

the electrode melting rate also falls down gradually. In sequence, it becomes lower than the *WFS* and the wire tip returns to approach to the weld pool. A low current and a short arc are providential conditions to a short-circuit to occur, and the cycle is restarted. This (**first**) reason is predominant to justify the occurrence of the „short-circuiting - spray” combined metal transfer mode (Figure 9).

The **second reason** is related to a phenomenon which is still not discussed openly enough in the literature. There are evidences that the electric resistivity of the droplet becomes higher than that of the arc column when welding with carbon steel wires and shielding gas mixtures with less than 12% CO₂ [21]. During a globular transfer under such conditions, as the droplet is growing and, consequently, the arc is reducing, the arc voltage grows „instead” of being reduced (what would be expected and would be more logical). As a higher arc voltage makes the current to reduce in the constant voltage power sources (with gradient imposed by the inductance), the wire melting rate becomes lower than the *WFS*. This accelerates even more the approach of the wire tip (with a globular droplet) to the weld pool, sometimes provoking incipient short-circuits (with an insignificant short-circuit current which would not affect the phenomenon). Together with the electrode extension growth, the total electric resistance starts reducing (the resistance along the wire prevails over that of the arc column),

Acest **al doilea motiv** justifică producerea modului de transfer combinat „globular – spray” (figurile 10 și 11).

Figura 12 ilustrează modul combinat „Globular – scurtcircuit – streaming spray”. Se presupune că, în acest caz, ambele **motive** descrise mai sus acționează în mod combinat. În timpul apropierii vârfului sârmei de baia de sudare, între

and the current starts increasing again. It could reach, also function of the inductance, values above the transition current (which is low for those gas mixtures), resulting in a projected or even streaming spray transfer generation. Resulting high electrode melting rate does the arc length to grow and the current to reduce, conditioning again the globular transfer. A

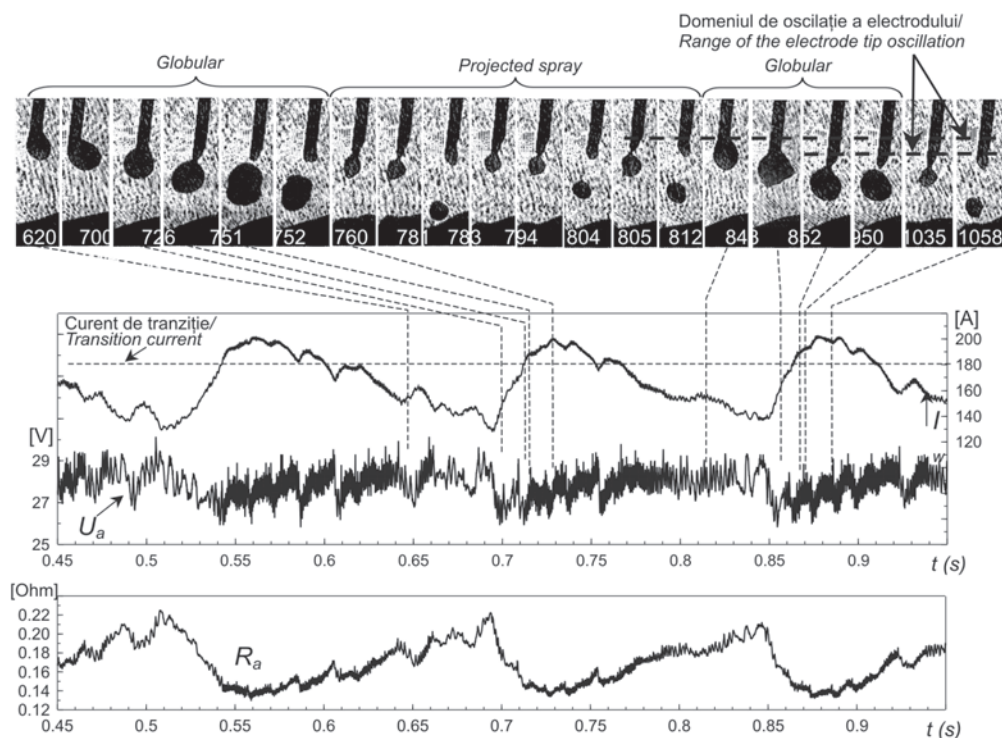


Figura 10. Un exemplu de mod de transfer de metal combinat, de tip „globular – spray” (o sursă de putere electronică cu caracteristică în tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1mm diametrul; $U_a = 27,9$ V; $I_w = 166$ A; $WFS = 6,3$ m/min; viteza de lucru = 30 cm/min; CTWD 18 mm; gaz de protecție Ar + 5%O₂). Notă: curentul și rezistența arcului (R_a) sunt simetrice în oglindă, ultimul fiind cel care-l controlează pe primul/

Figure 10. An example of the combined metal transfer mode of the type „globular – spray” (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.0 mm diameter; $U_a = 27.9$ V; $I_w = 166$ A; $WFS = 6.3$ m/min; travel speed = 30 cm/min; CTWD of 18 mm; shielding gas Ar + 5%O₂). Note: the current and the arc resistance (R_a) are mirror symmetrical, being the latter which controls the former.

cadrele 900 – 1028, prevalează **al doilea motiv**, deși creșterea curentului nu a fost suficientă pentru a depăși tranziția globular – spray. Dar, pentru că a fost un scurtcircuit, tranziția modului de transfer de metal a devenit posibilă datorită curentului de post scurtcircuit (**primul motiv**).

Sunt anumite condiții energetice încă nestudiate în profunzime, care pot face să varieze curentul periodic și să genereze un mod de transfer de metal combinat „projected spray – streaming spray” cu interschimbări ciclice între ele (figura 13). Se poate presupune că o generare intensă a vaporilor metalici într-un arc streaming spray poate altera proprietățile plamei astfel încât să forțeze micșorarea curentului. Transferul s-ar transforma într-un mod projected spray cu generarea unei cantități mai mici de vaporii metalici, care ar face curentul să crească din nou, ș.a.m.d. Dar, principalul motiv pentru reducerea curentului spre sfârșitul fazei de streaming spray ar fi o lungime mai mare a arcului. Și viceversa, în timpul transferului prin projected spray, curentul cu valori mici conduce la scurtarea arcului provocând o creștere a curentului și, în final, tranziția modului de transfer spre streaming spray. Și într-un caz și în altul există o dovadă clară a manifestării principiilor fundamentale ale modului de transfer

new cycle sets in. This **second reason** justifies the „globular – spray” combined metal transfer mode to occur (Figs. 10 and 11).

Figure 12 illustrates the combined mode „Globular – Short-circuiting – Streaming spray”. It is supposed that, in this case, both **reasons** described above are acting in combination. During the approach of the wire tip to the weld pool, between the frames from 900 to 1028, the **second reason** prevails, though the current increment was not enough to exceed the globular-spray transition. But, as there was a short-circuit, the metal transfer mode transition became possible due to the post short-circuiting current (**first reason**).

They are certain energetic conditions still not studied deeply enough, which can make the current vary periodically and generating a combined metal transfer mode „projected spray - streaming spray” with cyclical interchanges between them (Fig. 13). It can be supposed that an intensive generation of metallic vapor in a streaming spray arc may alter the plasma properties in such a way to force the current to reduce. The transfer would then turn into projected spray with less metallic vapor generation, what would make the current to increase again, and so on. Or the main reason for the current to start reducing by the end of the streaming spray stage would be an increased arc length. And

Principii la sudarea MIG/MAG

de metal combinat, atunci când variația condițiilor, datorată unui mod de transfer anterior, dă naștere condițiilor pentru ca următorul mod de transfer să se producă.

vice-versa, during the projected spray transfer, low current leads the arc to shorten, provoking a current raise and, finally, the transfer mode transition towards the streaming spray. In one case

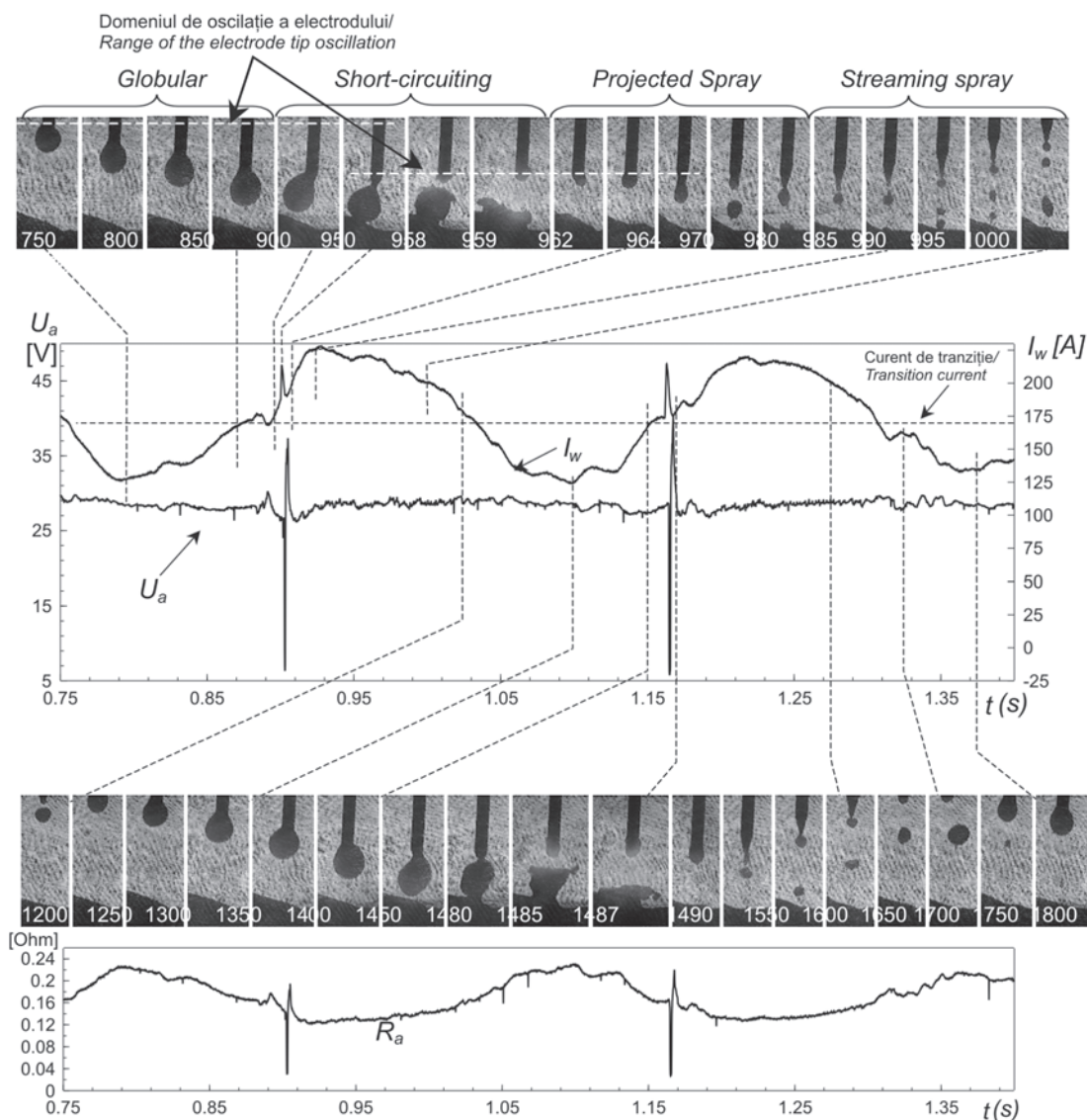


Figura 11. Un exemplu de mod de transfer de metal combinat „globular – spray” (o sursă de putere electronică cu caracteristică tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1 mm diametru; $U_a = 28,4$ V; $I_w = 177$ A; WFS = 6,5 m/min; viteza de lucru = 36 cm/min; CTWD 18 mm; gaz de protecție Ar + 2%O₂). Notă: succesiunea modului de transfer este după cum urmează: Globular → Spray projected → Streaming Spray → Spray projected → Globular, în concordanță cu comportarea curentului./

Figure 11. An example of the combined metal transfer mode of the type „globular – spray” (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.0 mm diameter; $U_a = 28.4$ V; $I_w = 177$ A; WFS = 6.5 m/min; travel speed = 36 cm/min; CTWD of 18 mm; shielding gas Ar + 2%O₂). Note: the transfer mode succession is as follows: Globular → Spray projected → Streaming Spray → Spray projected → Globular, in agreement with the current behavior.

Trebuie menționat că un al **treilea motiv** ipotetic pentru ca să se producă transferul combinat „globular - spray” este atunci când se utilizează un amestec de gaze pe bază de argon cu mai mult de 12% CO₂ (acum rezistența specifică a coloanei arcului este mai mare decât cea a picăturii). În timpul fazei transferului globular, atât timp cât crește picătura și în consecință lungimea arcului se reduce, se reduce și tensiunea arcului (reducerea căderii de tensiune a coloanei arcului este mai semnificativă decât o mărire a căderii de tensiune în picătura care crește), cauzând o creștere a valorii curentului atunci când se utilizează surse de putere de tensiune constantă.

Atunci, dacă curentul depășește nivelul curentului de tranziție, se poate produce un mod de transfer de tip spray,

or the other, there is a clear evidence of the manifestation of the combined metal transfer mode fundamental principles, when variations of conditions due to a previous transfer mode give rise to conditions for the following mode to take place.

It is worthwhile mentioning a hypothetical **third reason** for the combined transfer „globular-spray” to occur when using an argon based shielding mixture with more than 12% of CO₂ (now the specific resistance of the arc column is higher than that of the droplet). During the globular transfer stage, as long as the droplet is growing and, consequently, the arc length is reducing, the arc voltage reduces as well (the reduction of the arc column voltage drop is more significant than a voltage drop increment in the growing droplet), causing

urmat de o creștere a vitezei de topire a electrodului și o creștere a lungimii arcului. Această comportare poate fi însoțită de o creștere a rezistenței coloanei arcului care poate conduce la o reducere a curentului. În final, poate fi restabilirea modului de transfer globular. Un nou ciclu va începe din nou. Totuși, cu cât conținutul de CO_2 într-un amestec de gaz este mai mare, cu

a current increase when using constant voltage power sources. Then, if the current exceeds the transition current level, there might be a spray transfer mode established, followed by an increase of the electrode melting rate and an arc lengthening. This behavior might be accompanied by an arc column resistance rising which might guide to a current

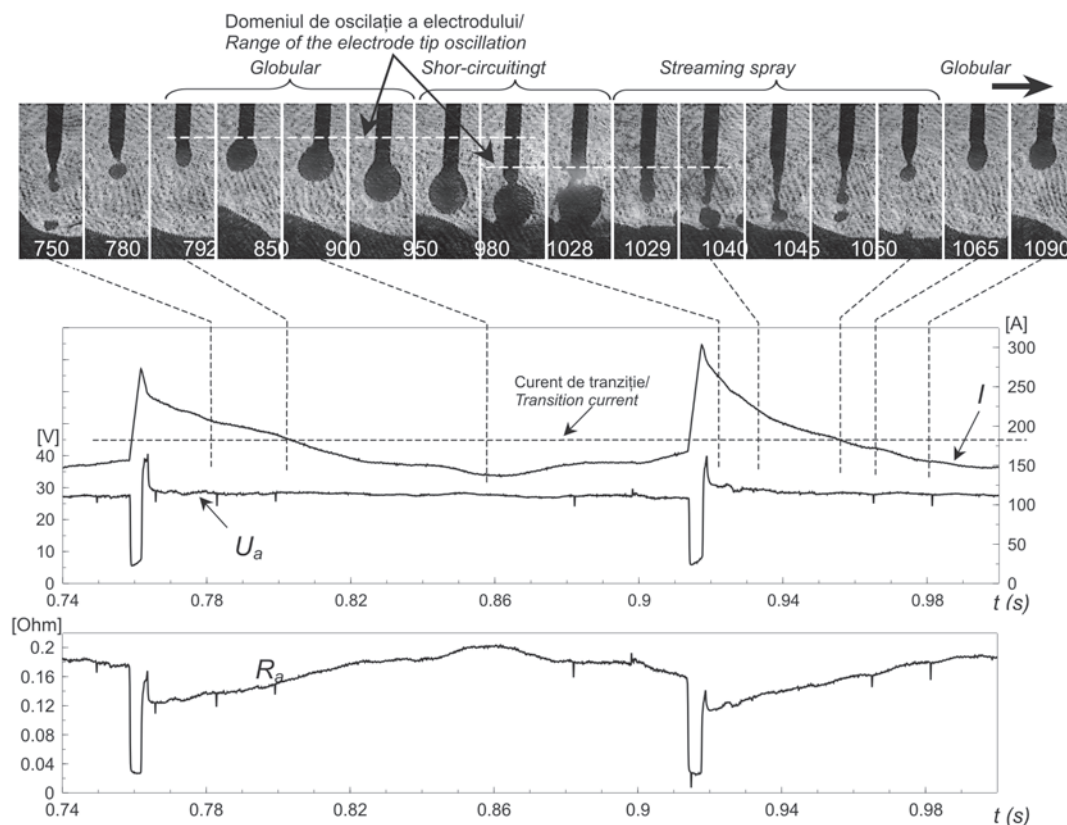


Figura 12. Un exemplu de mod de transfer de metal combinat de tip „globular – scurt-circuit – streaming spray” (sursă de putere electronică cu caracteristică tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1 mm diametru; $U_a = 27,5$ V; $I_w = 170$ A; $WFS = 6,5$ m/min; viteza de lucru = 36 cm/min; CTWD 18 mm; gaz de protecție Ar + 2% O_2). Notă: reducerea tensiunii arcului în comparație cu cazul ilustrat în figura 6 a constituit una dintre condițiile favorabile pentru producerea acestui mod de transfer./

Figure 12. An example of the combined metal transfer mode of the type „globular – short-circuiting – streaming spray” (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.0 mm diameter; $U_a = 27.5$ V; $I_w = 170$ A; $WFS = 6.5$ m/min; travel speed = 36 cm/min; CTWD of 18 mm; shielding gas Ar + 2% O_2). Note: the reduction of the arc voltage as compared with the case shown in Fig. 6 was one of the favorable conditions for this mode to occur.

atât este mai mare și valoarea curentului de tranziție și astfel devine mai dificil de depășit. Acesta este principalul motiv pentru care modul de transfer combinat nu este de obicei observat atunci când se utilizează amestecuri de gaze pe bază de argon cu conținut bogat de CO_2 .

Este important de amintit că atunci când un utilizator încearcă să obțină un mod de transfer de tip spray, procedura sugerează fixarea în prealabil a unui curent pornind de la nivelul scăzut al curentului spre cel mai înalt nivel. Atunci când se efectuează o astfel de procedură, se poate produce un transfer combinat neobservat de tipul „globular – spray” (figura 14) dacă amestecul de gaze de protecție are un conținut scăzut de CO_2 . Aceasta nu se observă în cazul în care amestecul de gaze are un conținut de CO_2 peste 12 - 15% (figura 15).

În final, se poate susține că modurile de transfer de metal combinate, dificil de identificat de sudori/operatori, cauzează perturbări ale procesului (stropi, formă neadecvată a sudurii și altele) și, astfel, trebuie evitate. Pentru a fi asigurați că aceasta nu se întâmplă, dinamica sursei de putere, factorul care

reduction. Finally, there might be the re-establishment of the globular transfer mode. A new cycle would settle down again. However, the higher the CO_2 content in a gas mixture, the higher the transition current value becomes, and, thus, it becomes more difficult to be exceeded. This is the main reason why the combined metal transfer mode is usually not observed when using CO_2 rich argon based shielding mixtures.

It is important to remember that when a user is trying to get a spray transfer mode, his/her procedure suggests to pre-set a current starting from low current level toward the highest. When fulfilling such a procedure, an unnoticed combined transfer of the type „globular – spray” may take place (Figure 14) if a shielding mixture used has a low CO_2 content. What is not observed if a shielding mixture has a CO_2 content above 12 - 15% (Figure 15).

Finally, one can stand that combined metal transfer modes, difficult to be identified by welders/operators, cause process disturbances (spattering, weld bead misshape and others) and, thus, they should be avoided. In order to be secured against

Principii la sudarea MIG/MAG

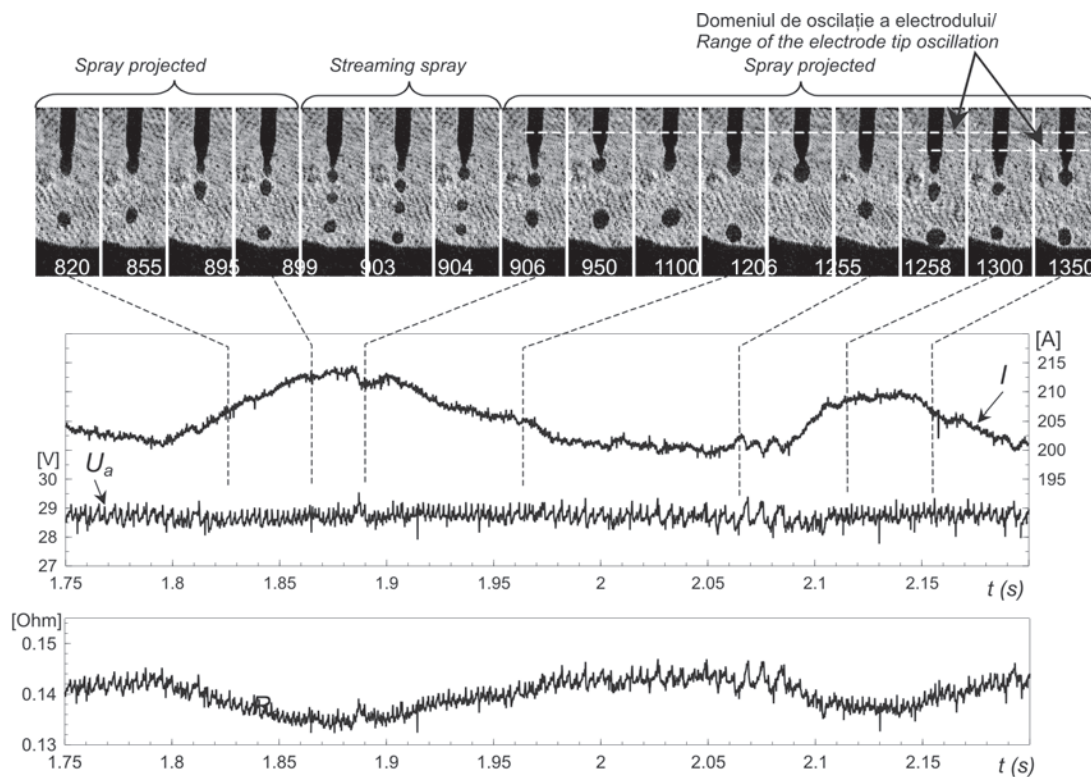


Figura 13. Un exemplu de mod de transfer de metal combinat de tip „projected spray – streaming spray” (o sursă de putere electronică cu caracteristică tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1 mm diametru; $U_a = 28,7\text{ V}$; $I_w = 207\text{ A}$; $WFS = 8,7\text{ m/min}$; viteza de lucru = 36 cm/min ; $CTWD\ 18\text{ mm}$; gaz de protecție $\text{Ar} + 2\%\text{O}_2$)./

Figure 13. An example of the combined metal transfer mode of the type „spray projected – streaming spray” (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.0 mm diameter; $U_a = 28.7\text{ V}$; $I_w = 207\text{ A}$; $WFS = 8.7\text{ m/min}$; travel speed = 36 cm/min ; $CTWD\text{ of }18\text{ mm}$; shielding gas $\text{Ar} + 2\%\text{O}_2$).

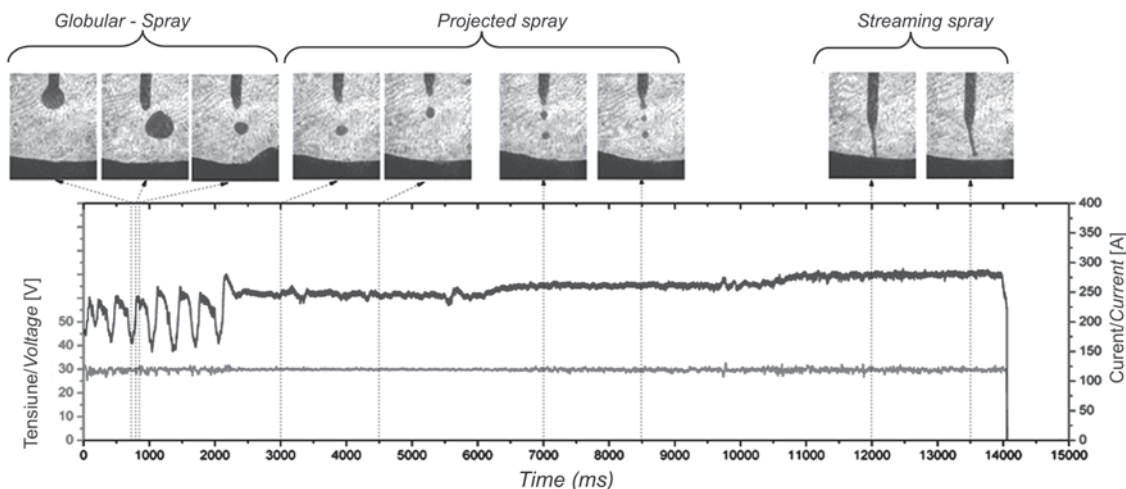


Figura 14. Particularitățile tranziției modurilor de transfer de metal atunci când se utilizează un amestec de gaze cu conținut scăzut de CO_2 (sursă de putere electronică cu caracteristică tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1,2 mm diametru; $U_a = 32\text{ V}$; WFS a fost schimbat de la 5 la 8 m/min ; viteza de lucru = 40 cm/min ; $CTWD\ 18\text{ mm}$; gaz de protecție $\text{Ar} + 2\%\text{CO}_2$)./

Figure 14. Peculiarities of the metal transfer modes transition when using a shielding mixture with a low CO_2 content (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.2 mm diameter; $U_a = 32\text{ V}$; WFS was altered from 5 to 8 m/min ; travel speed = 40 cm/min ; $CTWD\text{ of }18\text{ mm}$; shielding gas $\text{Ar} + 2\%\text{CO}_2$).

gouvernează fenomenul, nu trebuie să fie excesivă (vitezele de mărire și micșorare ale curentului nu trebuie să fie prea mari) pentru a permite utilizarea amestecurilor de gaze pe bază de argon cu conținut scăzut de CO_2 . În cazul în care aceste perturbări persistă utilizatorii se vor adresa centrelor de cercetare echipate cu tehnici moderne pentru vizualizarea arcului pentru a determina domeniul parametrilor de sudare pentru condițiile date, permițând optimizarea proceselor de sudare și, în particular,

it, the power source dynamics, the governing factor of that phenomenon, should not be excessive (current rising and falling rates should not be too high) to allow the use of argon based shielding mixtures with a low CO_2 content. In case that these disturbances persist, the users will have to address to research centers equipped with modern techniques for the arc region visualization in order to determine the welding parameters working range for given welding conditions, allowing welding

excluzând producerea modurilor de transfer combinat. Din fericire, transferul globular, care este, în majoritatea cazurilor „punctul inițial” de generare a unui mod de transfer combinat nu se utilizează foarte mult în practică (în literatura de specialitate

process optimizing and, in particular, excluding combined transfer modes occurrence. Fortunately, the globular transfer, which is, in most cases, the „initial point” to generate a combined transfer mode is not used widely in practice (only few references

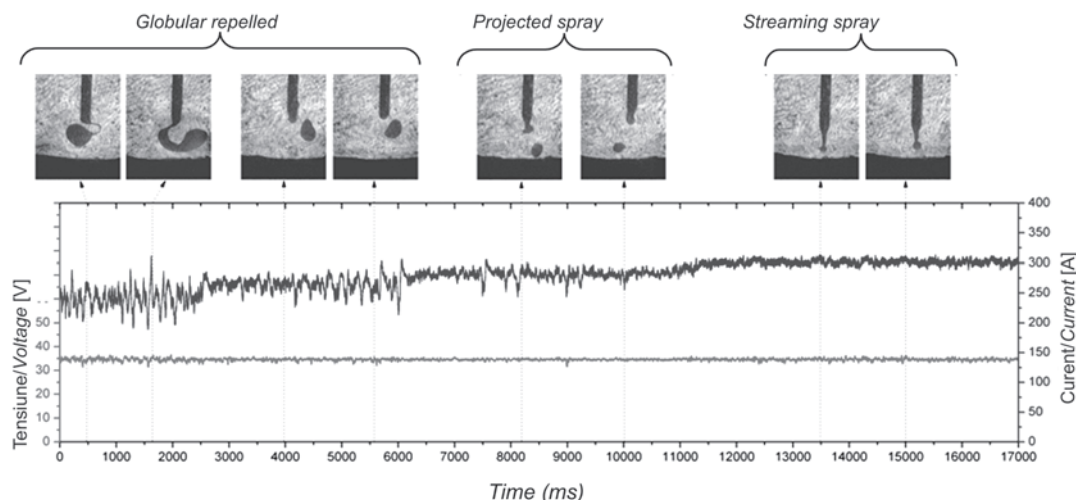


Figura 15. Particularitățile tranziției modurilor de transfer de metal atunci când se utilizează un amestec de gaze cu conținut ridicat de CO_2 (sursă de putere electronică cu caracteristică tensiune constantă; sârmă oțel carbon 1,2 mm diametru; $U_a = 37 \text{ V}$; WFS a fost schimbat de la 6 la 9 m/min; viteza de lucru = 40 cm/min; CTWD 18 mm; gaz de protecție Ar + 15% CO_2).

Figure 15. Peculiarities of the metal transfer modes transition when using a shielding mixture with a high CO_2 content (an electronic power source with the constant voltage characteristic; carbon steel wire of 1.2 mm diameter; $U_a = 37 \text{ V}$; WFS was altered from 6 to 9 m/min; travel speed = 40 cm/min; CTWD of 18 mm; shielding gas Ar + 15% CO_2).

pot fi găsite numai câteva referințe privind utilizarea acestuia pentru table foarte subțiri și treceri la rădăcină). Transferul globular se aplică în special la sudarea aluminiului, unde transferul combinat nu are motive să se producă [21].

can be found in the literature of its use for welding very thin plates and for root passes). The globular transfer is particularly applied for welding aluminum, where the combined transfer problem has no reasons to occur [21].

Bibliografie/ References

[1]. Scotti, A. și Rodrigues, C.E.A.L., A methodology for Determining Kinematic and Dynamic Characteristics of a Transferring Droplet Aiming Modeling Validation of MIG/MAG Welding, COMPCON - Computer Technology in Welding & Manufacturing, TWI, 18 – 19 June 2008, Cranfield University, Cranfield, UK.

[2]. Scotti, A. și Rodrigues, C.E.A.L., Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 45 (1), 2009, p. 11201p1-p8 (DOI: 10.1051/epjap:2008196)

[3]. Scotti, A. și Rodrigues, C.E.A.L., Determination of the Momentum of the Droplets Impinging the Pool during Aluminum MIG/MAG, Submitted to Welding Journal.

[4]. Bálamo, P.S.S., Vilarinho, L. O., Vilela, M., Scotti, A., Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, The Int. Journal for the Joining of Materials, 12 (1), 2000, 1-12.

[5]. MAIA, T.C.G., Flôres, E.L., Scotti, A., Metal Transfer Quantification in MIG/MAG Process by Image Processing, II Congresso Nacional da Engenharia Mecânica - CONEM 2002, 12 a 16 de Agosto, João Pessoa, Brasil, UFPB/ABCM, CPB1200, 10 p. (in Portuguese).

[6]. Maia, T.C.G., Flôres, E.L., Scotti, A., Comparative Assessment between Automate and Manual Quantitative Analysis Applied to MIG/MAG Metal Transfer Images, II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Uberlândia, MG, CD ROM (in Portuguese).

[7]. Wang, Y. și Tsai, H.L., Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (11), 2001, p. 2067-2080

[8]. Topchiy Ju.K., Kamenev V.A., Diurgerov N.G., Lenivkin V.A., Avtomat. Svarka, 11, 26 (1973) (in Russian).

[9]. Lenivkin V.A., Diurgerov N.G., Petrov P.I., Varuha E.N., Svar. Proizv., 5, 8 (1978) (in Russian).

[10]. Lenivkin V.A., Diurgerov N.G., Sagirop Kh.N., Technological Properties of the MIG/MAG Welding Arc, 1st edn. (Mashinostroenie, Moscow, 1989) (in Russian).

[11]. Scotti, A., Ponomarev, V., Costa A.V., A methodology for voltage drop determination in GMA welding: arcs with short-circuiting metal transfer, Eur. Phys. J. Appl. Phys., EDP Sciences, 34, 2006, p. 231-236 (DOI: 10.1051/epjap:2006060).

[12]. Ponomarev, V. ș.a., Arc process statistical analysis, Methodical approaches, analysis conceptions, experiences, 1st edn. (JOM-Institute, Denmark, 1997).

[13]. Bálamo, P.S.S., Vilarinho, L. O., Vilela, M., Scotti, A., Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, In: Int. J. for the Joining of Materials, vol 12, no. 1, 2000, The European Institute for Joining of Materials (JOM), Denmark, p. 1-12 (ISSN 0905-6866).

[14]. Anon A., Classification of Metal Transfer, IIW Doc. XII-636-76.

[15]. Norrish J., A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding. IIW Doc. XII-1769-03.

[16]. Iordachescu D. și Quintino L., Contributions to the Classification of the Metal Transfer in Arc Welding IIW Doc. No XII-1798-04.

[17]. Lucas W., Iordachescu D., Ponomarev V., Classification of Metal Transfer Modes in GMAW. IIW Doc. XII-1859-05.

[18]. Izutani, S., Shimizu, H., Suzuki, K., Koshiishi, F., Observation and Classification of Droplet Transfer in Gas Metal Arc Welding, Doc. 212-1090-06.

[19]. Norrish J., New classification of the metal transfer (oral presentation). IIW Annual Assembly, 2008.

[20]. Scotti, A., Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW, J. of Science and Technology of Welding and Joining, Institute of Materials Publ, UK, 5 (4), 2000, p. 227-234 (ISSN 1362-1718).

[21]. Scotti A., Ponomarev V., Resende A., The influence of the electrode materials and shielding gas mixture on the specific electric resistances of the drop/column of the arc in MIG/MAG welding. IIW Doc. XII-1909-06.



Programul de formare și perfecționare profesională în domeniul sudării, procedeelelor conexe și examinărilor nedistructive

2009

INGINER SUDOR INTERNAȚIONAL/ EUROPEAN (IWE/EWE)		
partea a II - a	19.10 - 27.11.2009	
partea a III - a	18.01 - 05.02.2010	
Informații suplimentare: EWE Cornel Fanu, telefon 0256-491828 int. 183 fax 0256-492797		
INSPECTOR SUDOR INTERNATIONAL - NIVEL INGINER (IWI - C)		
partea I	02.11 - 20.11.2009	
partea a II - a	18.01 - 05.02.2010	
Informații suplimentare: sing. Angela Căneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797		
INSPECTOR SUDOR INTERNAȚIONAL - NIVEL STANDARD (IWI - S)		
partea I	12.11 - 20.11.2009	
partea a II - a	26.01 - 05.02.2010	
Informații suplimentare: sing. Angela Căneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797		
TEHNOLOG SUDOR INTERNAȚIONAL/EUROPEAN (IWT/EWT)		
partea I	21.09 - 02.10.2009	
partea a II - a	19.10 - 20.11.2009	
partea a III - a	18.01 - 28.01.2010	
Informații suplimentare: EWE Cornel Fanu, telefon 0256-491828 int. 183, fax 0256-492797		
SPECIALIST SUDOR INTERNAȚIONAL (IWS)		
partea I	21.09 - 02.10.2009	
partea a II - a	19.10 - 06.11.2009	
Informații suplimentare: EWE Cornel Fanu, telefon 0256-491828 int. 183 fax 0256-492797		
SUDAREA POLIETILENEI		
coordonatorul sudării, conform SR EN ISO 14731	operator sudor polietilenă, conform ISCIR CR 9/3	
instruire	specializare pentru autorizare	specializare pentru reautorizare
12 - 16.10.2009	12 - 16.10.2009	23 - 27.11.2009
Informații suplimentare: ing. Marius Cocard, telefon 0256-491828 int. 182, fax 0256-492797		
EXAMINĂRI NEDISTRUCTIVE, conform SR EN 473		
	nivel 1	nivel 2
Curs de examinare cu pulberi magnetice	05.10 - 06.10.2009	05.10 - 09.10.2009
Curs de examinare cu radiații penetrante	19.10 - 23.11.2009	19.10 - 06.11.2009
Curs de examinare cu ultrasunete	09.11 - 13.11.2009	09.11 - 27.11.2009
Informații suplimentare: sing. Angela Căneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797		