

Determination of the momentum of droplets impinging on the pool during aluminium GMAW *

Determinarea impulsului picăturilor care pătrund în baie la sudarea MIG a aluminiului *

A. Scotti, C.E. Aguiar, L. Rodrigues

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laprosolda, Uberlândia, MG, Brazil,
e-mail: ascotti@ufu.br

Keywords

GMA welding, arc physics, momentum, metal transfer, aluminium

Cuvinte cheie

Sudarea în mediu de gaz protector, fizica arcului electric, impuls, transfer de metal, aluminiu

1. Introduction

Metal transfer and its relationship with the operational characteristics of the GMAW process is a subject well explored by welding developers and of high interest of welding users. A phenomenon, which has been intensively studied, yet not utterly clarified for GMAW, is the effect of the droplet under transfer on the bead formation. In this context, the welding group of the Universidade Federal de Uberlândia, Brazil, started a research program to give some new insights on this matter. In a previous work [1], it was proposed and assessed a parameter that claims to properly quantify the effect of the droplets reaching the pool over the bead penetration during GMAW. It was concluded that the proposed parameter, so-called "Effective Momentum" (see item 2), is the one which better represents the action of the droplets over bead formation.

Preceding the above mentioned work, Essers and Walter [2], in 1981, pointed out in an article, based on experimental data, that there is a correlation between droplet *impulse* and depth of penetration. Two years later, Waszink and Graat [3] published practical results to show that the speed in which the droplets arrives to the weld pool, which is a component of their *momentum*, is affected by the acceleration caused by the gas flow in the arc. At the end of the 80's, Mazumder and Tekriwal [4] took advantage of that knowledge and developed a model to predict bead penetration, in which they entered the effect of the droplets and of the heat convection in it. Kim and Na [5], in 1995, in the same direction, but with more computational resources, considered the filler metal deposition in their model for predicting bead formation, but only estimating (not measuring) the mass, speed and impingement rate of the droplets into the weld pool. In the end of the 90's decade, Murray and Scotti [6], in a dimensionless analysis approach, evaluated the importance of the droplets under transfer on the bead penetration in stainless steel plates. They confirmed and quantified the effect of the detaching droplet momentum, which was enough to take energy to the bottom of the pool.

Wang and Tsai [7], in the beginning of the 21st century, calculated the dimensions of the weld pool through the

*) Invited paper originally published in *Soldagem & Inspeção* Journal, no.4, 2009.

1. Introducere

Transferul de metal și relația sa cu caracteristicile funcționale ale procesului de sudare MIG/MAG este un subiect bine explorat de către cei care elaborează tehnica de sudare și de mare interes pentru utilizatorii tehnicii de sudare. Un fenomen care a fost intensiv studiat, încă incomplet clarificat pentru sudarea MIG/MAG, este efectul picăturii aflate în procesul de transfer, asupra formării rândului (cordonului) de sudură. În acest context, grupul de sudură de la Universitatea Federală din Uberlândia, Brazilia, a început un program de cercetare cu scopul de a da unele noi aspecte de înțelegere asupra acestei probleme. Într-o lucrare anterioară [1], a fost propus și s-a determinat un parametru cu revendicarea că acesta cuantifică exact efectul picăturilor care ajung în baie de sudare, asupra pătrunderii rândului de sudură în timpul sudării MIG/MAG. S-a tras concluzia că parametrul propus, numit "impuls efectiv" (vezi capitolul 2), este elementul care reprezintă mai bine acțiunea picăturilor asupra formării rândului de sudură.

Precedând lucrarea menționată mai sus, Essers și Walter [2], în 1981, au precizat într-un articol bazat pe date experimentale că există o corelație între *impulsul* picăturii și adâncimea de pătrundere. După doi ani, Waszink și Graat [3] au publicat rezultate practice pentru a arăta că viteza cu care picăturile ajung în baie de sudare, care este o componentă a impulsului lor, este afectată de accelerația produsă de către debitul de gaz în arcul electric. La sfârșitul anilor '80, Mazumder și Tekriwal [4] au folosit acele cunoștințe și au elaborat un model de prezicere a pătrunderii rândului de sudură, în care ei au introdus efectul picăturilor și al convecției termice. Kim și Na [5], în 1995, în aceeași direcție, dar având mai multe resurse de tehnică de calcul, au luat în considerare depunerea de metal de adaos, în modelul lor de prezicere a formării rândului de sudură, dar numai estimând (nu măsurând) masa, viteza și rata de pătrundere a picăturilor în baie de sudare. La sfârșitul deceniului '90, Murray and Scotti [6], în abordarea unei analize adimensionale, au evaluat importanța picăturilor în cursul transferului, asupra pătrunderii rândului de sudură, la

*) Lucrare invitată publicată în revista *Soldagem & Inspeção*, nr. 4, 2009.

calculation of its temperature distribution caused by the combination of droplet impulse and electromagnetic, surface tension and gravitational forces. Two years later, Kim and collaborators [8] described the heat flow and thermal cycles in T-joint GMAW by using a 3-dimensional model. In that study, the metallic droplets were considered as volumetric sources of heat. The authors calculated the kinematic characteristics of the metal transfer, such as droplet acceleration. Yet in the beginning of 2000, Fan and Kovacevic [9] considered in their numeric model for GMAW, the complementary effects of heat transfer and gas flow in the arc and mass transfer from the electrode as a whole, but they also included the effect of droplets reaching the pool. These researchers used experimental data on metallic transfer to refine their models. Hu and Tsai [10, 11] recently presented results of their arc and metal transfer modelling with premises similar to the Fan and Kovacevic's (they also used the same experimental data).

As seen, there is recognition of the importance of the droplet energy delivered to the weld pool. However, the mentioned models present several limitations (these models might be unable to consider all of the contour conditions, governing phenomena and intrinsic characteristics of the metallic transfer). Besides the restricted computational resources in the past, the laboratorial conditions for raising validation data on metallic transfer were very limited. In other words, there were great contributions considering the specificity of each case, but it has not been possible yet to find generic models. One of the reasons is that these models work either neglecting or just estimating the kinematics and dynamics of the droplets in transfer, such as arrival speed to the pool and momentum of the droplets. On the other hand, reasonably recent improvements of techniques for arc visualization and electric signal monitoring and treatment have made possible important increments to the knowledge on this matter, maintaining the importance of continuing experimental studies on metallic transfer. In a recent paper [12], the authors evaluated a methodology to raise kinematic and dynamic characteristics of the droplets under transfer. With the use of these characteristics, a parameter denominated "Effective Momentum" was proposed to represent the action of the droplets over bead formation. The validation of this parameter was carried out in another publication [1], using plain carbon steel electrode (AWS ER70S6). Important validation data results are claimed to have been provided for welding metal transfer modellers. But, in contrast to carbon steel, no experimental data about the momentum effect of aluminium and its alloys have been reported in the current literature. It is important to recall that aluminium alloys present physical characteristics, such as specific mass and electrical and thermal resistivities, remarkably different (lower values) than for steels.

In this context, the objective of this paper was to determine kinematics (speed and acceleration) and dynamics (momentum) characteristics of the droplets in transfer during Aluminium GMAW and quantify the final effect of Momentum on bead formation. The final target is the support to researchers for creating more comprehensive pieces of modelling, since metal transfer data for more reliable validations would be available. There is no claim, however, in predicting weld penetration through droplet momentum.

table de oțel inoxidabil. Ei au confirmat și au cuantificat efectul impulsului picăturii care se desprinde, care este suficient pentru a aduce energie până la fundul băii de sudare.

Wang și Tsai [7], la începutul secolului XXI, au calculat dimensiunile băii de sudare prin calculul distribuției sale de temperatură cauzate de combinația impulsului picăturii și a forțelor electromagnetice, a tensiunii superficiale și gravitațională. Doi ani mai târziu, Kim și colaboratorii [8] au descris fluxul de căldură și ciclurile termice la sudarea MIG/MAG a îmbinării în T, utilizând un model tridimensional. În acel studiu, picăturile metalice au fost considerate ca surse volumetrice de căldură. Autorii au calculat caracteristicile cinematice ale transferului de metal, precum accelerația picăturii. Încă la începutul anilor 2000, Fan și Kovacevic [9] au luat în considerație, în modelul lor numeric pentru sudarea MIG/MAG, efectele complementare al transferului de căldură, al debitului de gaz în arcul electric și al transferului masic în ansamblul lor, dar ei au inclus, de asemenea, efectul picăturilor care ajung în baia de sudare. Acești cercetători au utilizat date experimentale privind tranferul de metal pentru a perfecționa modelele lor. Hu și Tsai [10, 11] au prezentat recent rezultate ale modelării lor a arcului și a transferului de metal, cu premise similare cu cele ale lui Fan și Kovacevic (și ei au utilizat aceleași date experimentale).

După cum se vede, există recunoașterea importanței energiei picăturii cedate către baia de sudare. Însă modelele menționate prezintă mai multe limitări (aceste modele nu ar putea să ia în considerare toate condițiile de contur, care determină fenomenele și caracteristicile intrinseci ale transferului de metal). Pe lângă resursele de tehnică de calcul restrânse din trecut, condițiile de laborator pentru preluarea datelor de validare asupra transferului de metal erau foarte limitate. Cu alte cuvinte, au existat contribuții importante luând în considerare caracterul specific al fiecărui caz, dar nu a fost posibil încă să se găsească modele generice. Unul dintre motive este că aceste modele funcționează fie neglijând, fie numai estimând cinematica și dinamica picăturilor în transfer, cum sunt viteza de sosire în baia de sudare și impulsul picăturilor. Pe de altă parte, îmbunătățiri recente ale tehnicilor de vizualizare a arcului, de monitorizare și de prelucrare a semnalelor electrice au făcut posibile creșteri importante ale cunoștințelor asupra acestei probleme, menținând importanța continuării studiilor experimentale asupra transferului de metal. Într-un articol recent [12], autorii au evaluat o metodologie pentru determinarea caracteristicilor cinematice și dinamice ale picăturilor aflate în transfer. Prin utilizarea acestor caracteristici, a fost propus un parametru denumit "impuls efectiv" pentru a reprezenta acțiunea picăturilor asupra formării rândului de sudură. Validarea acestui parametru a fost efectuată într-o altă publicație [1], utilizând sârmă - electrod de oțel carbon simplu (AWS ER70S6). Se afirmă că au fost obținute rezultate importante privind datele de validare, pentru modelele de transfer de metal la sudare. Dar în contrast cu oțelul carbon, nu au fost expuse în literatura curentă date experimentale despre efectul impulsului la aluminiu și la aliajele sale. Este important să se precizeze că aliajele de aluminiu prezintă caracteristici fizice, precum masa specifică, rezistivitatea electrică și conductivitatea termică, evident diferite (valori reduse) față de oțeluri.

2. The concept of effective momentum

The proposed parameter to compute the momentum effect on bead formation considered 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 influence the bead formation, i.e., the Momentum, as stated by Equation 1:

$$M = \rho\pi \frac{d^3}{6} S_{arrival} \quad [kgms^{-1}] \quad (1)$$

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.

In this paper, it is assumed that 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 as Momentum Rate (M_{rate}). As the unit indicates, M_{rate} is the force in which the droplets hit the fused metal.

$$M_{rate} = Mf \quad [N] \quad (2)$$

However, as M_{rate} is a discrete force, the effect of the droplets on the pool would be translated by the time that 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 Effective Momentum (Me), as defined by Equation 3 (as the unit indicates, Me would represent the mass flow rate of the droplets reaching fused metal, but, especially because mass flow rate does not take necessarily into account the droplet size, the denomination proposed in this work aims to emphasize the mass x speed effect).

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

It is considered in this paper that the Effective Momentum of the droplets is the parameter that explains the capacity of these droplets in contributing for the bead penetration (and other geometric parameters of the bead).

3. Experimental methodology

The experimental methodology of this work was based on the fact that the welding parameter setting affects the kinematics (speed and acceleration) and dynamics (momentum) of the droplets under transfer. However, to reach the objectives of this work, the experiments must search for the droplet delivering energy in such a way to isolate other variables effects or make them constant. Thus, experiments to guarantee comparisons between beads 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 the welding speed (TS) was correspondingly increased to maintain constant its relationship to the wire feed speed (WFS)). 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

În acest context, obiectivul acestui articol este de a determina caracteristicile cinematice (viteza și accelerația) și cele dinamice (impuls) ale picăturilor în transfer, în timpul sudării MIG a aluminiului și de a cuantifica efectul final al impulsului asupra formării rândului de sudură. Scopul final este sprijinul pentru cercetători pentru crearea de elemente mai cuprinzătoare ale modelării, din moment ce astfel ar fi la dispoziție date ale transferului de metal pentru validări mai sigure. Însă nu există pretenția de a prezice pătrunderea sudurii, prin impulsul picăturii.

2. Conceptul de moment cinetic efectiv

Parametrul propus pentru a calcula efectul impulsului asupra rândului de sudură a luat în considerare o caracterizare a picăturii aflate în transfer (geometrică și cinematică). Cunoscând diametrul picăturii (prin urmare, masa) și viteza sa la impactul cu suprafața băii de sudare, este posibil să se determine caracteristica dinamică principală a picăturilor care ar putea influența formarea băii de sudare, adică impulsul, după cum se stabilește prin ecuația (1), unde “ M ” este impulsul, “ ρ ” este densitatea metalului, “ d ” este diametrul picăturii, iar “ $S_{arrival}$ ” este viteza medie de sosire a picăturii în baia de sudare, în unități SI.

În acest articol, se presupune că o reprezentare fizică mai bună a acțiunii picăturii (mișcare de masă intermitentă) asupra băii de sudare ar fi produsul impulsului cu frecvența (f), cu care picăturile ajung la baia de sudare. Acest parametru este reprezentat de către ecuația (2), iar el a fost numit rata impulsului (M_{rate}). După cum arată unitatea, M_{rate} este forța cu care picăturile lovesc metalul topit.

Însă, deoarece M_{rate} este o forță discretă, efectul picăturilor asupra băii ar fi tradus prin timpul cât această forță acționează pe o aceeași suprafață. Astfel, dacă această cantitate este divizată prin viteza de sudare (TS), se ajunge la parametrul care în acest articol este denumit impuls efectiv (Me), cum este definit în ecuația (3) (după cum indică unitatea de măsură, Me ar reprezenta debitul masic de picături care ajung la metalul topit, dar, în special pentru că debitul masic nu ia în mod necesar în considerare dimensiunea particulei, denumirea propusă în această lucrare urmărește să accentueze efectul masei multiplicat prin viteză, masa x viteză).

În acest articol se consideră că impulsul efectiv al picăturilor este parametrul care arată capacitatea acestor picături de a contribui la pătrunderea rândului de sudură (și la alți parametri geometrici ai rândului de sudură).

3. Metodologia experimentală

Metodologia experimentală a acestei lucrări a fost bazată pe faptul că prescrierea parametrului de sudare afectează cinematica (viteza și accelerația) și dinamica (impulsul) picăturilor aflate în transfer. Însă pentru a atinge obiectivele acestei lucrări, experimentele trebuie să determine energia furnizată de către picături în așa fel încât să izoleze efectele altor variabile sau să le facă constante. Astfel, pentru a garanta comparația dintre rândurile de sudură au fost planificate experimente, pentru a lua în considerare efectul interactiv al curentului de sudare (I) și al lungimii arcului (a), dar la aceeași cantitate de material depus (aceiași volum al băii de sudare, deoarece viteza de sudare (TS) a fost mărită în mod corespunzător pentru a menține constantă relația sa cu viteza de avans a sârmei (WFS). Prin

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.

However, there was still the need to keep the *WFS* constant for each current setting, since it is believed that the initial speed of the droplet, which would be equal (or similar, in the case of short-circuiting transfer) to the *WFS*, would affect the Momentum. Because of this, it was also sought in the experimental methodology 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 *WFS* that would match the setting current. Finally, to reach different arc lengths without affecting both current level and *WFS*, the contact tip-to-work distance (*CTWD*) setting was systematically varied.

The characterization of the droplet transfer is made through the geometric (droplet diameter and arc length) and kinematic (frequency and body speed) characteristics (the same procedure that the previous work [12] used, including the acknowledgment of the error contained in those procedures). The main tool for this characterization is a synchronized laser shadowgraphy system [13], filming in high-speed (2000 fps, shutter of 1/24000 and resolution of 252 x 188 pixels). Additionally, 2 pieces of dedicated software were used for the measurements of the transfer frequency, droplet diameter and arc length [14, 15] and of the droplet speed and acceleration (Optimas® MA® 1.4). As interest of this study, just the values of the droplets instantaneous arrival speed, obtained through a mean of the last two values obtained with the program, referred here from now on as $S_{arrival}$, was stipulated.

A wire of the AWS class ER4043, diameter of 1.2 mm, shielded by Ar, was employed at direct current positive electrode (*DCEP*) condition. Bead-on-plate welds were deposited on Al5000 series plates (250 x 6.35 x 50 mm), in the flat position. A push-pull torch, leaned 15° forward was used. The currents were set at three different levels, one of them slightly below the transition current (stable globular transfer) and the others above the transition current (stable spray transfers). These welding conditions were replicated in two singular arc lengths, gotten by setting properly the *CTWD* (18 and 22 mm, respectively for short and long arcs).

Table 1 presents the setting and resultant welding parameters for the experiments. Figure 1 presents typical images, while Table 2 indicates the quantities that characterize the resulting metal transfers. As seen in Figure 1, the metal is transferring in regular spherical droplets and the transition current for changing from globular to spray transfers is just above 130 A. The results shown in this last table seem very coherent with the welding parameter setting (arc length, droplet diameters and transfer frequency). There is no influence of the arc length on the droplet size.

To confirm the consistence of the measured diameters, an estimate of the detachment frequency (f_{EST}) was made to be compared to the measured metal transfer frequencies (f). This estimation was based on the measured droplet diameters and their standard deviations. The density of the droplets was adopted as 2303 kg/m³ (Al in liquid state) and the range of expected frequencies for smaller (low frequency) and larger diameters (high frequency) was calculated. It was observed

prescrierea curentului la diferite valori, s-a efectuat varierea modului de transfer al metalului. În plus, menținând concomitent aceeași cantitate de material depus (și aproximativ același aport de căldură), s-a încercat să se minimizeze efectul altor parametri care determină formarea rândului de sudură. Ca rezultat, efectul impulsului picăturilor care lovesc baia de sudare a putut fi distins mai bine.

Însă a existat încă necesitatea de a menține constantă *WFS* pentru fiecare prescriere de curent, întrucât se crede că viteza inițială a picăturii, care ar putea fi egală (sau similară, în cazul transferului în regim de scurtcircuit) cu *WFS*, ar afecta impulsul. Din această cauză, s-a căutat prin metodologia experimentală să se mențină pentru fiecare valoare de curent aceeași *WFS*, independent de lungimea arcului. Această realizare a fost posibilă prin utilizarea unei surse de sudare electronice funcționând în modul de curent constant și impunând o *WFS* care este adaptată la curentul prescris. În final, pentru a atinge diferite lungimi ale arcului fără a afecta nivelul de curent și *WFS*, lungimea liberă dintre duză și piesă (*CTWD*) a fost variată în mod sistematic.

Caracterizarea transferului de picături este efectuată prin caracteristicile geometrice (diametrul picăturii și lungimea arcului) și cinematice (frecvența și viteza corpului); este aceeași procedură pe care a utilizat-o lucrarea precedentă [12], cu menționarea erorii conținute în acele proceduri. Instrumentul principal pentru această caracterizare este un sistem laser sincronizat de grafie cu umbre [13], care filmează cu mare viteză (2000 cadre/s, diafragma de 1/24000 și rezoluția de 252 x 188 pixeli). În plus, au fost utilizate două piese de software dedicate pentru măsurătorile frecvenței de transfer, diametrului picăturii și lungimii arcului [14, 15], precum și ale vitezei și accelerației picăturii (Optimas® MA® 1.4). De interes pentru acest studiu, a fost stipulată numai valoarea vitezei de sosire instantanee a picăturilor, obținută prin media ultimelor două valori rezultate prin program, notată aici de acum înainte $S_{arrival}$.

S-a utilizat o sârmă de tipul ER4043 conform AWS, cu diametrul de 1,2 mm, cu protecție de Ar, în curent continuu cu polaritate pozitivă la electrod (*DCEP*). Au fost depuse rânduri de sudură pe table din seria Al 5000 (250 x 6,35 x 50 mm), în poziție orizontală. A fost utilizat un cap de sudare de tip push-pull, înclinat cu 15° înainte. Curenții au fost prescriși la trei nivele diferite, unul dintre ele ușor sub curentul de tranziție (transfer globular stabil), iar celelalte două peste curentul de tranziție (transferuri stabile în spray). Acești parametri de sudare au fost repetați la două lungimi ale arcului electric singular, obținute prin prescrierea exactă a *CTWD* (18 și 22 mm, respectiv pentru arc scurt și arc lung).

Tablelul 1 prezintă parametrii de sudare prescriși și cei rezultați pentru experimente. Figura 1 prezintă imagini reprezentative, iar tabelul 2 arată mărimile care caracterizează modurile de transfer de metal rezultate. După cum se vede în figura 1, metalul se transferă în picături sferice regulate, iar curentul de tranziție de la modul globular la modul în spray este puțin peste 130 A. Rezultatele prezentate în acest ultim tabel apar foarte coerente cu prescrierea parametrilor de sudare (lungimea arcului, diametrele picăturilor și frecvența de transfer). Nu există nici o influență a lungimii arcului asupra dimensiunii picăturii.

Pentru a confirma consistența diametrelor măsurate, a fost făcută o estimare a frecvenței de detașare (f_{EST}), spre a fi comparată cu frecvențele de transfer de metal măsurate (f).



The 2nd South East European IIW International Congress



Welding – HIGH-TECH Technology in 21st century Sofia, Bulgaria, October 21st - 24th 2010

www.iiwcongress2010.com



PIPELINE WELDING - current topic of the region

Organizers:



Bulgarian
Welding
Society



Romanian Welding
Society



Serbian
Society for
Advancement
of Welding



Scientific-
technical Union
of Mechanical
Engineering

Co-Organizers:



Pipeline Research
Council International
LEADING PIPELINE RESEARCH



EUROPEAN PIPELINE RESEARCH GROUP



Technical
University
of Sofia

Institute of Metal
Science - BAS



Golden Sponsors:

Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	EP	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	K	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	3	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	y	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au
Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au	Au

Energoremont
Holding
JSC

KAKZU
Holding
Group

that in all cases the measured frequencies lay between the maximum and minimum of the determined frequency range. However, the measured frequencies were smaller than the

Table 1. Welding parameters/
Tabelul 1. Parametrii de sudare/

Setting Values/ Valori prescrise				Monitored Values/ Valori monitorizate*	
I _{set} (A)	CTWD (mm)	WFS (m/min)	TS (cm/min)	I _M (A)	U _M (V)
130	18 (short arc/ arc scurt)	5.5	38.5	139	24.9
	22 (long arc/ arc lung)			136	26.2
180	18 (short arc/ arc scurt)	7.5	52.5	181	26.0
	22 (long arc/ arc lung)			183	28.3
230	18 (short arc/ arc scurt)	9.0	63	230	27.1
	22 (long arc/ arc lung)			225	28.9

*Acquisition sampling at 10 kHz and 12 bits, for 5s/
Eșantionare pentru achiziție la 10 kHz și 12 biți, timp de 5s/

Table 2. Average values of the arc lengths (a), droplet diameters (d) and respective standard deviations (σX) and of the detachment frequencies (f)/

Tabelul 2. Valori medii ale lungimii arcului (a), diametrelor picăturilor (d) și respectiv ale deviațiilor standard (σX), precum și ale frecvențelor de desprindere (f)

Runs	I _{SET} (A)	Arc	a (mm)	σ _a (mm)	d (mm)	σ _d (mm)	f (Hz)	f _{EST} (Hz)
A	130	short/ scurt	6.9	0.7	1.4	0.2	77	84
B		long/ lung	8.0	0.4	1.4	0.2	78	84
C	180	short/ scurt	5.5	0.6	1.2	0.1	204	202
D		long/ lung	9.4	0.7	1.1	0.1	210	213
E	230	short/ scurt	7.1	0.2	1.0	0.1	272	336
F		long/ lung	7.7	0.5	1.0	0.1	290	336

estimated frequency using the measured droplet diameter in calculation, in particular to the highest current. One must remember that in these calculations, the metal spattering and evaporation from the electrode was not considered. This finding agrees with the one observed for a carbon steel wire [1], apart from the fact that for this steel wire the difference happened to all currents. An explanation for a slight uneven behaviour between aluminium and steel wires can be grounded in the fact that carbon steel contains gas formers in the composition (more evaporation) and it was welded at higher currents. This

Această estimare s-a bazat pe diametrele măsurate ale picăturilor și pe deviațiile lor standard. Densitatea picăturilor a fost adoptată la valoarea 2303 kg/m³ (Al în stare lichidă) și a fost calculat domeniul frecvențelor așteptate pentru diametre mai mici (frecvență joasă) și diametre mai mari (frecvență înaltă).

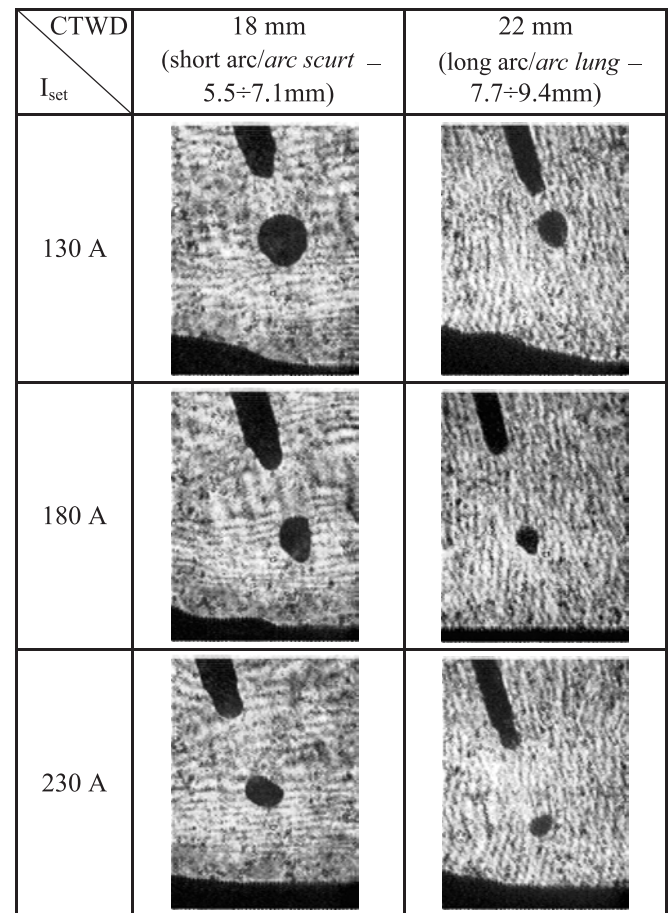


Figure 1. Metal transfers as a function of arc length and welding current (the photos magnifications are different between short and long arcs to emphasize the metal transfer mode)/

Figura 1. Modurile de transfer de metal ca funcție de lungimea arcului și de curentul de sudare (mărirea fotografiilor este diferită între arcul scurt și arcul lung, pentru a accentua modul de transfer al metalului)

S-a observat că în toate cazurile frecvențele măsurate se situează între maximum și minimum domeniului de frecvență determinat. Însă frecvențele măsurate au fost mai mici decât frecvența estimată utilizând în calcul diametrul măsurat al picăturii, în particular la curentul cel mai mare. Trebuie reamintit că în aceste calcule stropirea și evaporarea metalului din electrod nu au fost luate în considerare. Această constatare este în acord cu ceea ce s-a observat la o sârmă din oțel carbon [1], pe lângă faptul că pentru această sârmă de oțel diferența a avut loc la toate valorile curentului. O explicație pentru o comportare neuniformă între sârma de aluminiu și sârma de oțel poate fi bazată pe faptul că oțelul carbon conține în compoziție constituenți care produc gaze (mai multă evaporare) și că s-a sudat la curenți mai mari. Aceste ipoteze necesită totuși validare în continuare, dar lipsa confirmării nu intervine în analiză, după cum urmează.

hypotheses need, however, further validation, but a lack of confirmation does not interfere in the analysis as follows.

4. Results and discussion

4.1. Assessment of the droplet arrival speed on the weld pool surface ($S_{arrival}$)

Table 3 shows that the more the arc lengths increase and the greater the current level are the higher are the values of $S_{arrival}$, and the increase of the value is quite significant from globular to spray mode. These results are also in concordance with the ones for a carbon steel wire [1], yet the speeds reached by the aluminium drops (from 1.21 to 2.71 m/s) are a little higher than the speeds met by the steel's (from 0.48 to 1.79 m/s). Naturally, in both cases $S_{arrival}$ is much faster than the corresponding WFS (considering the free-flight transfers). Concerning arc lengths, these results are fully justifiable if one uses the concepts of the physics of the arc. It is known that accelerated bodies acquire higher speed if they travel for a larger distance. Besides, the droplets in long arcs take longer time to suffer eventually for a braking action due to metallic vapour coming from the bead pool surface. The higher speeds reached by the aluminium droplets in comparison to steel's, even though the welding currents (pinch effect) were lower, may be due to a higher initial speed (higher WFS), lower density and/or a possible less vapour production at the pool surface (inert shielding gas).

The explanation for the action of the current is far more complex, due to competitive effects. One should remember that the initial droplet speeds, still forming at the wire tip, are the same for each current level (in other words, the same wire feed speeds), but they become faster for larger currents (higher WFS). In addition to the current-WFS effect on the initial droplet speed, there is also the effect of the forces acting on the droplet (impulse and dragging), also directly proportional to the welding current. If, on the first hand, these current related forces justify a larger acceleration, on the other hand the same current reduces the size of the droplets, as it gets higher. Considering that the plasma jet, in the order of 100 m/s [10, 16], should have higher speed than the droplets, the dragging force acting on droplets should lead to an increasing $S_{arrival}$ for larger droplets, which did not happen. A higher growth of $S_{arrival}$ from 130 A to 180 is, for sure, related to the droplets sizes (beyond the transition current, the decrease of the droplet with the increasing current is less pronounced, as Table 2 displays).

4.2. Characterization of the bead geometric parameters

First of all, the reader must be reminded that when the current was raised, there was a proportional increase of the travel speed (see Table 1). As a result, beads with approximately the same deposited area and the same energy input are expected from the different current-arc length combinations.

Figure 2 illustrates the geometric profiles of the welding beads for the current and arc length combinations. The formation of a slender penetration at the centre of the fused area ("finger like"), as observed in the welds with carbon steel wire [1], is not present here. The "finger-like" characteristic is usually attributed by researchers to a high "momentum" of the droplets, which takes more energy into the bottom of the weld pool [6, 17], when Ar shielding is used. It is believed that a faster heat flow due to the higher thermal conductivity of the aluminium test plate would make the arc thermal effect on

4. Rezultate și discuție

4.1. Determinarea vitezei de sosire a picăturii pe suprafața băii de sudare ($S_{arrival}$)

Tabelul 3 arată că, cu cât lungimea arcului crește și cu cât nivelul de curent este mai mare, cu atât valorile $S_{arrival}$ sunt mai mari, iar creșterea valorii este foarte semnificativă de la modul globular la modul spray. Aceste rezultate sunt și ele în concordanță cu cele pentru o sârmă de oțel carbon [1], însă

Table 3. Average values and respective standard deviations (s) of the droplet arrival speeds ($S_{arrival}$) / Tabelul 3. Valori medii și respectiv deviații standard (s) ale vitezei de sosire a picăturilor ($S_{arrival}$)

Current	130		180		230	
Arc	short/ scurt	long/ lung	short/ scurt	long/ lung	short/ scurt	long/ lung
Mean/ Medie (m/s)	1.21	1.69	2.04	2.71	2.27	2.61
σ	0.15	0.30	0.28	0.19	0.12	0.24
Level of significance/ Nivel de semnificație	P-val. < 0.01		P-val. < 0.01		P-val. < 0.01	

vitezele atinse de picăturile de aluminiu (de la 1,21 la 2,71 m/s) sunt puțin mai mari decât vitezele întâlnite la oțeluri (de la 0,48 la 1,79 m/s). Natural, în ambele cazuri $S_{arrival}$ este mult mai mare decât WFS corespunzătoare (considerând transferurile prin zbor liber). Referitor la lungimile arcurilor, aceste rezultate sunt complet justificabile, dacă se utilizează conceptele fizicii arcului. Este cunoscut că, corpurile accelerate realizează viteză mai mare dacă ele parcurg o distanță mai mare. Pe lângă aceasta, picăturile din arc lung iau un timp mai îndelungat pentru a suporta eventual o acțiune de frânare datorată vaporilor metalici care vin de pe suprafața băii de sudare. Vitezele mai mari atinse de picăturile de aluminiu în comparație cu oțelurile, chiar dacă curenții de sudare au fost mai mici (efectul pinch), pot fi datorate unei viteze inițiale mai mari (WFS mai mare), unei densități mai reduse și/sau unei posibile evaporări mai reduse la suprafața băii de sudare (gaz de protecție inert).

Extrapolarea pentru acțiunea curentului este mult mai complexă, datorită efectelor competitive. Trebuie reamintit că vitezele inițiale ale picăturilor, care încă se formează la capătul sârmei, sunt aceleași pentru fiecare nivel de curent (cu alte cuvinte, aceleași viteze de avans al sârmei), dar ele devin mai mari pentru curenți mai mari (WFS mai mare). În plus la efectul curent – WFS asupra vitezei inițiale a picăturii, există și efectul forțelor care acționează asupra picăturii (impuls și tragere), de asemenea direct proporțional cu curentul de sudare. Dacă pe de-o parte aceste forțe în relație cu curentul justifică o accelerare mai mare, pe de altă parte același curent reduce dimensiunea picăturilor, pe măsură ce el devine mai mare. Considerând că jetul de plasmă, de ordinul a 100m/s [10, 16], trebuie să aibă viteză mai mare decât picăturile, forța de tragere care acționează asupra picăturilor trebuie să conducă la o valoare mai ridicată a $S_{arrival}$ pentru picături mai mari, ceea ce nu s-a întâmplat. O creștere mai mare a $S_{arrival}$, de la 130 A la

the bead formation more efficient than the mechanical effect, making the bead cross section shape more rounded.

From a general view on the results, the higher the current and the longer the arc, the deeper and wider the beads, yet with less reinforcements. A less convex bead (smaller ratio reinforcement by width) is expected from longer arcs. Higher

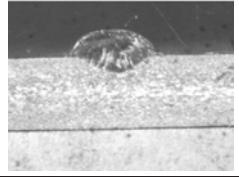
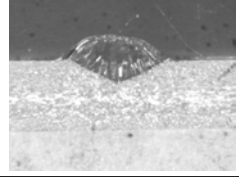
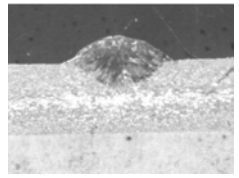
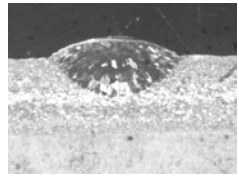
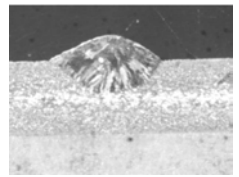
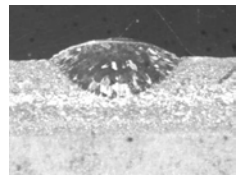
CTWD I_{set}	18 mm (short arc/ <i>arc scurt</i> – 5.5÷7.1mm)	22 mm (long arc/ <i>arc lung</i> – 7.7÷9.4mm)
130 A		
180 A		
230 A		

Figure 2. Geometric profile of the beads as a function of arc length and welding current/

Figura 2. Profilul geometric al rândurilor de sudură în funcție de lungimea arcului și de curentul de sudare

penetration is also expected for increasing current, even if the ratio current by travel speed is kept constant. Similar results were obtained with a carbon steel wire [1]. However, if one considers a free-flight transfer mode (globular or spray), a long arc should lead to shallower penetrations (due to a less concentrated arc connection with the plate), as confirmed in the previous work [1] for a steel wire. This unexpected result would be explained only if another penetration governing parameter (such as oxide forming electron emission sites), would become more significant. However, this parameter was not identified here and deserves further investigation.

4.3. Momentum of the droplets under transference

From the theory, one could expect that penetration is directly related to heat input. But penetration may become shallower if the pool is too voluminous at a given heat input. Experimental studies show that current itself, even keeping the same relation WFS/TS , seems to augment the penetration too. Yet from the theory, one can suppose that the energy of the droplets impinging into the pool (momentum) will contribute to penetration. It is important to recall that the objective of the experimental planning was to emphasize the individual effect of the momentum, through isolation of the heat input and pool dimension effects. This was reasonably possible in the course of the settings of the travel speed as proportional to the wire feed speed, which in turn is in phase to the welding current (thus, the heat input would be approximately the same, regardless I_{SET}).

180 A, este desigur în legătură cu dimensiunile picăturilor (peste curentul de tranziție, descreșterea picăturii cu creșterea curentului este mai puțin pronunțată, după cum arată tabelul 2).

4.2. Caracterizarea parametrilor geometrici ai rândului de sudură

Pentru început, cititorul trebuie să-și reamintească faptul că, atunci când curentul a fost mărit, a fost o creștere proporțională a vitezei de sudare (vezi tabelul 1). Ca rezultat, de la diferitele combinații curent - lungimea arcului se așteaptă rânduri de sudură cu aproximativ aceeași suprafață a depunerii și cu același aport termic.

Figura 2 ilustrează profilele geometrice ale rândurilor de sudură pentru combinațiile de curent și lungimea arcului. Formarea unei pătrunderi înguste în centrul suprafeței topite (“ca degetul”), cum s-a observat la sudurile executate cu sârmă din oțel carbon [1], nu este prezentă aici. Caracteristica “deget subțire” este atribuită în mod obișnuit de către cercetătorii unui “impuls” mare al picăturilor, care ia mai multă energie la baza băii de sudare [6, 17], atunci când este utilizată protecția cu Ar. Se crede că un flux termic mai rapid datorat unei conductivități termice mai ridicate a tablei de probă din aluminiu face efectul termic al arcului asupra formării rândului de sudură mai eficient decât efectul mecanic, făcând mai rotundă secțiunea transversală a rândului de sudură.

Dintr-o vedere generală asupra rezultatelor, cu cât curentul este mai mare și arcul este mai lung, cu atât sunt mai adânci și mai late rândurile de sudură, însă cu supraînălțări mai reduse. Un rând de sudură mai puțin convex (raport mai redus supraînălțare / lățime) este așteptat de la arce mai lungi. Pătrundere mai mare este așteptată și pentru curent mai mare, chiar dacă raportul curent / viteză de sudare este menținut constant. Rezultate similare au fost obținute cu o sârmă de oțel carbon [1]. Totuși, dacă se consideră un mod de transfer cu zbor liber (globular sau spray), un arc lung va conduce la pătrunderi mai înguste (datorită unei conexiuni mai puțin concentrate a arcului cu tabla de metal de bază), după cum s-a confirmat în lucrarea anterioară [1] pentru o sârmă de oțel. Acest rezultat neașteptat ar fi explicat numai dacă un alt parametru determinant al pătrunderii (cum este oxidul care formează locațiile de emisie electronică), ar deveni mai semnificativ. Însă acest parametru nu a fost identificat aici și el merită cercetat în continuare.

4.3. Impulsul picăturilor aflate în transfer

Din teorie se poate aștepta ca pătrunderea să fie în relație directă cu aportul de căldură. Dar pătrunderea poate deveni mai redusă dacă baia de sudare este prea voluminoasă la un aport de căldură dat. Studii experimentale arată că însuși curentul, chiar menținând aceeași relație WFS/TS , pare de asemenea să mărească pătrunderea. Însă din teorie se poate presupune că energia picăturilor care lovesc baia (impulsul) va contribui la pătrundere. Este important de reamintit că obiectivul planului experimental a fost acela de a accentua efectul individual al impulsului, prin izolarea aportului termic cu efectele sale asupra dimensiunii băii de sudare. Acest lucru a fost posibil în mod rațional în cursul prescrierii vitezei de sudare la valoare proporțională cu viteza de avans al sârmei, care în schimb este în fază cu curentul de sudare

Table 4 presents the calculated values for the Effective Momentum (Me), as defined by Equation 3, while Figure 3 relates these values with bead penetration (analog graphic for carbon steel wire is placed beside the one for aluminium for comparison purpose). From Table 4, one can see that penetration increases as Me increases up to around 0.09 kg/s,

Table 4. Average values of the Momentum related parameters of the droplets/

Tabelul 4. Valori medii ale momentului cinetic raportate la parametrii picăturilor

Runs/ Treceri	I_{SET} (A)	Arc	d (mm)	f (Hz)	$S_{arrival}$ (m/s)	$Me \times 10^{-1}$ (kg/s)
A	130	short/ scurt	1.4	77	1.22	0.05
B		long/ lung	1.4	78	1.68	0.07
C	180	short/ scurt	1.2	204	2.04	0.09
D		long/ lung	1.1	210	2.70	0.12
E	230	short/ scurt	1.0	272	2.27	0.08
F		long/ lung	1.0	290	2.61	0.10

but a peculiar behaviour takes place around this value (the increase of Me does not correspond any longer to further deeper penetration). Observing Table 4, it is possible to verify that the lowest values of Me happen at current of 130 A, but the highest values of Me happen for 180 A, rather than for 230 A. It is well known that current plays the most important

(astfel, aportul termic ar fi aproximativ același, indiferent de I_{SET}).

Tabelul 4 prezintă valorile calculate pentru momentul cinetic efectiv (Me), cum este definit în ecuația 3, în timp ce figura 3 pune în corelație aceste valori cu pătrunderea rândului de sudură (graficul analog pentru sârma de oțel carbon este plasat alături de cel pentru aluminiu, în scopul comparației). Din tabelul 4, se poate vedea că pătrunderea crește cât timp Me crește până la circa 0,09 kg/s, dar are loc o comportare specifică în jurul acestei valori (creșterea Me nu mai corespunde cu pătrunderea mai mare, în continuare). Observând tabelul 4, este posibil să se verifice că valorile cele mai joase ale Me au loc pentru 180 A, mai mult decât pentru 230 A. Este bine cunoscut că, curentul joacă cel mai important rol în formarea rândului de sudură, justificând pătrunderea mai mare la o valoare intermediară a Me . Astfel, un bilanț concurent al efectelor (curent x Me) poate clarifica această reducere neașteptată în pătrundere, cât timp Me crește.

Observând figura 3, este posibil să se vadă aceeași tendință atât pentru sârmele de aluminiu, cât și pentru cele de oțel, referitor la relația dintre impulsul efectiv (Me) și pătrunderea rândului de sudură. Dar există unele diferențe remarcabile. Valorile mărimii Me găsite pentru sârma de aluminiu sunt de circa 10 ori mai mici decât pentru oțel (în pofida faptului că densitatea este numai de trei ori mai redusă), în ciuda faptului că pătrunderile realizate de ambele materiale de sudare au fost la același nivel. În mod natural, rolul pe care Me îl joacă asupra adâncimii băii de sudare depinde de caracteristicile (vâscozitate, tensiune superficială, etc.) metalului topit, iar aceste acțiuni sunt dificil de prezis. Pe lângă aceasta, pătrunderea nu depinde numai de Me , dimpotrivă, se așteaptă ca aportul de căldură să fie parametrul determinant [6]. Comparând parametrii și condițiile de sudare ale sudurilor de aluminiu din această lucrare, cu cei ai

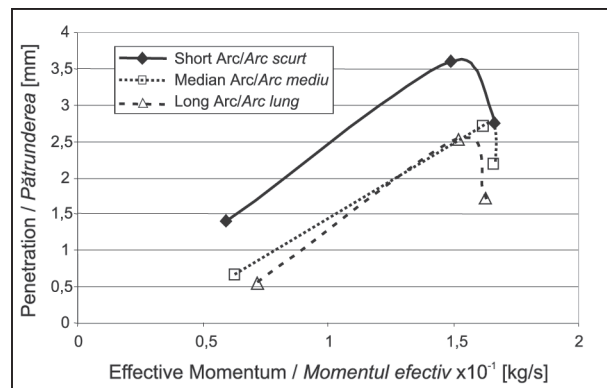
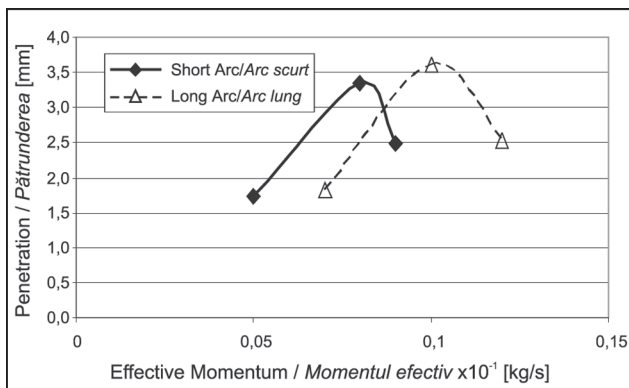


Figure 3. The influence of Effective Momentum on the bead penetration: on the left, using data for Aluminium GMAW (Table 4); on the right, using data for Carbon Steel GMAW (Ref. 1), for comparison purpose/

Figura 3. Influența Momentului Cinetic Efectiv asupra pătrunderii rândului de sudură: în stânga, utilizând date pentru sudarea MIG a aluminiului (Tabelul 4); în dreapta, utilizând date pentru sudarea MIG/MAG a oțelului carbon (Ref. 1), în scopul comparației

role in welding bead formation, justifying higher penetration at an intermediate value of Me . Thus, a concurrent balance of effects (current x Me) may clarify this unexpected reduction in penetration as Me increases.

Observing Figure 3, it is possible to see the same trend for both aluminium and steel wires concerning the relationship Effective Momentum (Me) and bead penetration. But there are

sudurilor de oțel [1], primul caz a utilizat un domeniu al raportului I/TS de la 3,4 la 3,7 A/cm/min, pe când pentru oțel a fost utilizat un domeniu de la 6,0 to 6,9 A/cm/min, cu energie de sudare mai mare. Se poate observa că temperatura de topire mai redusă, în ciuda căldurii latente de topire mai mari și a capacității calorice specifice mai mari ale aliajului de aluminiu din seria 5000, comparativ cu oțelul, ar justifica o

some remarkable differences. The values of Me found for aluminium wire are about 10 times less than for steel (despite density is only one third less), 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, which actions are difficult to predict. Besides, penetration does not depend only on Me , on the contrary, heat input is expected to be the governing parameter [6]. Comparing the welding conditions of the aluminium weldments in this work with the one of the steel weldments [1], the first case used a range of I/TS from 3.4 to 3.7 A/cm/min while for steel was employed a range from 6.0 to 6.9 A/cm/min, with higher welding energy. It can be claimed that a lower point of fusion, despite higher latent heat of fusion and specific heat capacity of the 5000 series aluminium alloy when compared to steel would justify a similar penetration even aluminium presenting lower Me and I/TS ratios. Thus, it is clear by Figure 3 the act of Me on penetration, but this low Me found in aluminium GMAW could justify the lack of “finger like” shape (slender penetration at the centre of the fused area) of the cross sections of the beads, pointed out in item 4.2 as characteristic of carbon steel GMAW shielded with high contents of Ar.

A second difference between aluminium alloy and steel behaviours noted in Figure 3 is that long arc reached the highest Me for aluminium; in contrast to steel weldments (the arc length did not influenced Me for a given current, as seen in ref. 1). This might be an explanation for the higher penetration with long arc (item 4.2). One could state that the welding energy ($U \times I/WFS$) due to the increased arc voltage (U) for longer arcs would be the reason for that, but it is reasonable to think that this voltage increase would lead to heat losses to the environment, not necessarily to the plate (heat input is not always totally proportional to welding energy). The authors support their hypotheses based on the results for steel. In addition, the authors believe (and plan to demonstrate it) that for aluminium welding the concentration of the arc connection to the plate is not so important for increasing penetration as much it is for carbon steel. This would happen because of the Al alloys high thermal conductivity. Yarmuch and Patchett [18], for instance, have shown that increasing the time ratio in CC+ in aluminium GTAW the fusion efficiency increases. According to these authors, longer times spent on electrode positive polarity (EP) enhance the area covered by the mobile cathode spots seeking new locations for electron emission. From these comments, one can deduce that a longer EP period makes the arc concentration smaller (the same effect of a long arc).

5. Conclusions

By the application of this methodology for determining kinematic and dynamic characteristics of metal transfer in aluminium GMAW (ER4043, $\Phi 1.2$ mm; Ar shielding), with current varying from 130 to 230 A (metal transfer mode covering from globular to spray), can be deduced that:

- The droplets under transfer reached arrival speeds from 1.21 to 2.71 m/s, depending on the current level and arc length. These values are much higher than the wire feed speeds, showing that the droplets are accelerated along the arc;
- The longer the arc and the greater the current level the higher the values of the droplet arrival speeds;

pătrundere similară, chiar dacă aluminiul prezintă valori mai mici pentru Me și pentru raporturile I/TS. Astfel, în figura 3 este clară acțiunea Me asupra penetrării, dar acest Me redus găsit la sudarea MIG a aluminiului ar putea justifica absența formei “ca degetul” (pătrundere îngustă la centrul suprafeței topite) a secțiunilor transversale ale rândurilor de sudură, precizate în capitolul 4.2 ca fiind caracteristice pentru sudarea MIG/MAG a oțelului carbon, utilizând gaz de protecție cu conținut mare de Ar.

A doua diferență între comportarea aliajului de aluminiu și cea a oțelului notată în figura 3 este că arc lung a atins cea mai mare valoare a Me pentru aluminiu; în contrast cu sudurile de oțel (lungimea arcului nu a influențat Me pentru un curent dat, cum se vede în ref. 1). Aceasta poate fi o explicație pentru o pătrundere mai mare cu arc lung (capitolul 4.2). Se poate afirma că energia liniară de sudare ($U \times I/WFS$) datorită tensiunii mai mari a arcului electric (U) pentru arce mai lungi ar fi motivul pentru acel lucru, dar este rațional să se considere că această creștere a tensiunii ar conduce la pierderi de căldură către mediul ambiant, nu în mod necesar către tablă (aportul de căldură nu este totdeauna în totalitate proporțional cu energia liniară de sudare). Autorii sprijină ipoteza lor pe baza rezultatelor pentru oțel. Pe lângă aceasta, autorii cred (și planifică să demonstreze aceasta) că pentru sudarea aluminiului concentrația de conexiuni ale arcului electric la tablă nu este așa de importantă pentru creșterea pătrunderii, cât este pentru oțelul carbon. Aceasta se întâmplă probabil din cauza conductivității termice ridicate a aliajelor de aluminiu. Yarmuch și Patchett [18], de exemplu, au arătat că prin creșterea raportului de timp la sudarea MIG în CC+ a aluminiului, randamentul de topire crește. Conform acestor autori, timpii mai lungi consumați la polaritatea pozitivă a electrozului (EP) măresc suprafața acoperită de către petele catodice mobile care caută noi locații pentru emisia electronică. Din aceste comentarii, se poate deduce că o perioadă mai lungă de polaritate pozitivă (EP) face concentrarea arcului mai mică (același efect ca la arc lung).

5. Concluzii

Prin aplicarea acestei metodologii pentru determinarea caracteristicilor cinematice și dinamice ale transferului de metal la sudarea MIG a aluminiului (ER4043, $\Phi 1,2$ mm; gaz de protecție Ar), la curent variind de la 130 A la 230 A (modul de transfer de metal acoperind domeniul de la globular la spray), se pot deduce următoarele:

- Picăturile aflate în transfer ating viteze de sosire de la 1,21 la 2,71 m/s, în funcție de nivelul de curent și de lungimea arcului. Aceste valori sunt mult mai mari decât vitezele de avans al sârmei, ceea ce arată că picăturile sunt accelerate de-a lungul arcului electric;
- Cu cât arc electric este mai lung și cu cât nivelul de curent este mai mare, cu atât sunt mai mari vitezele de sosire ale picăturii;
- Impulsul efectiv (Me) nu poate fi pus în relație directă nici cu masa particulei, nici cu frecvența individuală, ca la oțelul carbon (ref. 1). Combinația acestor parametri cu lungimea arcului, curentul și viteza de sudare este ceea ce face posibil un Me mai mare la valori ale curentului diferite de valoarea cea mai mare;

- The Effective Momentum cannot be directly related with either droplet mass or individual frequency, as much as for carbon steel (ref 1). The combination of these parameters with arc length, current and travel speed is what makes possible to have higher Me at current values away from the highest;

- The droplet Effective Momentum (the mass flow rate of the droplets reaching fused metal) reached values from 0.05 to 0.12 kg/s. The value changes accordingly to the metal transfer under a given welding parameter, i.e., the highest current level may not provide the greatest Effective Momentum;

- The low Effective Momentum values found for aluminium GMAW in this work, around 10 times less than for carbon steel GMAW in similar situation, can explain the formation of rounded bead cross sections (avoiding “finger like” shape as observed with steel wires);

- The droplet Effective Momentum shows to play important role in the bead formation (increasing the penetration), but its effect must be analyzed under the influence of the current level too;

- For aluminium, the arc length (indirectly by the diameter, arrival speed and frequency of the droplets), in contrast to for carbon steel, affects the values of the Effective Momentum: a longer arc increases the momentum action of the droplets on the weld pool (this fact help to explain an increasing penetration when the arc is longer);

- The importance of measuring all component parameters of this quantity is highlighted, since the mechanical effect of the droplets impinging into the weld pool was uncovered.

Acknowledgments

The authors wish to thank all team members of the welding group Laprosolda (Centre for Research and Development of Welding Processes) of the Universidade Federal de Uberlândia, Brazil, for the infrastructure support and advices. They also thanks to Brazilian bodies for research development, Fapemig (through project TEC 604/2005), for the financial support, and CNPq, for scholarships.

References/Bibliografie

[1]. Scotti, A. and 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, 11201, DOI: 10.1051/epjap:2008196.

[2]. Essers, W.G. and Walter, R., Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding, *Welding Journal*, 60 (2), Feb 1981, 37s–42s.

[3]. Waszink, J.H. and Graat, L.H.J., Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. *Welding Journal*, 62 (4), Abr 1983, p. 109–116.

[4]. Mazumder, J., Tekriwal, P., Finite Element Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding. *Welding Journal*, 67 (6), Jul. 1988, p. 150-156.

[5]. Kim, J.-W. and Na S.-J., A study of the effect of contact tube-to-workpiece distance on weld pool shape in gas metal arc welding, *Welding Journal*, 74 (6), Mai 1995, p. 141–152.

[6]. Murray, P.E., Scotti, A. Depth of penetration in gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 4 (2), 1999, p. 112–117.

- Impulsul efectiv al picăturii (debitul masic al picăturilor care ajung pe metalul topit) a atins valori de la 0,05 la 0,12 kg/s. Valoarea se schimbă în acord cu transferul de metal la un parametru de sudare dat, adică nivelul de curent cel mai mare nu poate da cel mai mare impuls efectiv;

- Valorile scăzute ale impulsului efectiv găsite pentru sudarea MIG a aluminiului în această lucrare, de aproximativ 10 ori mai mici decât pentru sudarea MIG/MAG a oțelului carbon în situații similare, poate explica formarea de secțiuni transversale rotunde ale rândului de sudură (evitând forma “ca degetul” observată la sârmele din oțel carbon);

- Impulsul efectiv al picăturii arată că el joacă un rol important în formarea rândului de sudură (crescând pătrunderea), dar efectul său trebuie să fie analizat și sub influența nivelului de curent;

- Pentru aluminiu, lungimea arcului (indirect, prin diametru, viteza de sosire și frecvența picăturilor), spre deosebire de oțelul carbon, afectează valorile impulsului efectiv: un arc mai lung produce acțiunea crescută a impulsului picăturilor asupra băii de sudare (acest fapt ajută explicarea unei creșteri a pătrunderii atunci când arcul este mai lung);

- Este pusă în evidență importanța măsurării tuturor parametrilor componenți ai acestei mărimi, întrucât a fost elucidat efectul mecanic al picăturilor care pătrund în baia de sudare.

Recunoașteri

Autorii doresc să mulțumească tuturor membrilor echipei Grupului de sudare Laprosolda (Centrul pentru Cercetarea și Dezvoltarea Proceselor de Sudare) de la Universitatea Federală din Uberlândia, Brazilia, pentru baza de infrastructură și pentru consiliere. De asemenea, ei mulțumesc organismelor braziliene pentru cercetare și dezvoltare, Fapemig (prin proiectul TEC 604/2005) pentru sprijinul financiar și CNPq pentru burse.

[7]. Wang, Y. and 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]. Kim, C.-H., Zhang, W., Debroy, T., Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding, *Journal of Applied Physics*, 94 (4). 2003. p. 2667-2679.

[9]. Fan, H.G. and Kovacevic, R., A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37 (18), Sep 2004, p. 2531–2544.

[10]. Hu, J. and Tsai, H.L., Heat and mass transfer in gas metal arc welding - Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (5/6), 2007, p. 833–846.

[11]. Hu, J. and Tsai, H.L., Heat and mass transfer in gas metal arc welding - Part II: The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (5/6), 2007, p. 808-820.

[12]. Scotti, A. and Rodrigues, C.E.A.L., A methodology for Determining Kinematic and Dynamic Characteristics of a Transferring Droplet Aiming Modeling Validation of MIG/MAG Welding, 17th Int. Conf. on Computer Technology in Welding And Manufacturing, TWI, Cranfield, UK, Jun 2008, 11 p.

[13]. Bálamo, P.S.S., Vilarinho, L.O., Vilela, M. and 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.

[14]. Maia, T.C.G., Flôres, E.L. and Scotti, A., Metal Transfer Quantification in MIG/MAG Process by Image Processing, II Cong. Nacional da Engenharia Mecânica - CONEM 2002, João Pessoa, Brasil, UFPB/ABCM, Aug 2002, CPB1200, 10 p. (in Portuguese).

[15]. Maia, T.C.G., Flôres, E.L. and Scotti, A., Comparative Assessment between Automate and Manual Quantitative Analyses Applied to MIG/MAG Metal Transfer Images, II Cong.

Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Uberlândia, Brazil, Apr 2003, CD ROM (in Portuguese).

[16]. Jones, L.A., Eagar, T.W., Lang, J.H., A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode. Journal of Physics D: Applied Physics. 31 (1), 1998, p. 107–123.

[17]. Scotti, A., A review on special metal transfer modes in gas metal arc welding. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences, 20 (3), 1998, p. 465 – 478.

[18]. Yarmuch, M.A.R. and Patchett, B.M., Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum, Welding Journal, AWS, 86 (7), Jul 2007, p. 196s-200s.



Programul de formare și perfecționare profesională în domeniul sudării, procedeele conexe și examinărilor nedistructive trimestrul II - 2010

INGINER SUDOR INTERNAȚIONAL/ EUROPEAN (IWE/EWE)			
partea a III - a		26.04 - 11.06.2010	
<i>Informații suplimentare: EWE Cornel Fanu, telefon 0256-491828 int. 183 fax 0256-492797</i>			
INSPECTOR SUDOR INTERNATIONAL - NIVEL INGINER (IWI - C)			
partea a II - a		17.05 - 02.06.2010	
<i>Informații suplimentare: sing. Angela Câneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			
INSPECTOR SUDOR INTERNAȚIONAL - NIVEL STANDARD (IWI - S)			
partea a II - a		24.05 - 04.06.2010	
<i>Informații suplimentare: sing. Angela Câneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			
SPECIALIST SUDOR INTERNAȚIONAL (IWS)			
partea a II - a		15.03 - 26.03.2010 și 26.04 - 14.05.2010	
<i>Informații suplimentare: EWE Cornel Fanu, telefon 0256-491828 int. 183 fax 0256-492797</i>			
SUDOR MATERIALELOR TERMOPLASTICE			
cursul 1 – 24 - 28.05.2010		cursul 2 – 14 - 18.06.2010	
<i>Informații suplimentare: ing. Marius Cocard, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			
COORDONATOR SUDARE PENTRU SUDAREA POLIETILENEI			
cursul 1 – 19.04 - 23.04.2010		cursul 2 – 17.05 - 21.05.2010	
<i>Informații suplimentare: ing. Marius Cocard, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			
OPERATOR SUDOR POLIETILENĂ			
specializare pentru autorizare		cursul 1 – 12.04 - 23.04.2010	cursul 1 – 19.04 - 23.04.2010
specializare pentru reautorizare		cursul 2 – 10.05 - 21.05.2010	cursul 2 – 17.05 - 21.05.2010
<i>Informații suplimentare: ing. Marius Cocard, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			
OPERATOR EXAMINĂRI NEDISTRUCTIVE, conform SR EN 473, nivel 1 + 2			
Examinare cu lichide penetrante	26.04 - 30.04.2010	Examinare cu pulberi magnetice	19.04 - 23.04.2010
Examinare cu radiații penetrante	07.06 - 25.06.2010	Examinare cu ultrasunete	10.05 - 28.05.2010
Examinare vizuală	12.04 - 16.04.2010		
<i>Informații suplimentare: sing. Angela Câneparu, telefon 0256-491828 int. 180, fax 0256-492797</i>			

