

Depunerea metalică a oțelurilor prin procedeu hibrid laser-MIG

Development of a hybrid laser assisted cladding process

Dominique GREVEY¹, Eugen CICALA², Mariana ILIE^{2,3}

¹Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne,
12, Rue de la Fonderie, F-71200 Le Creusot, France

²Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în sudură și Încercări de Materiale - ISIM,
Bv. Mihai Viteazul nr. 30, 300222 Timisoara, Romania

Cuvinte cheie

Procedeu hibrid, depunere laser, experimente factoriale

Keywords

Hybrid process, laser cladding, experimental designs

Introducere

Procedeu hibrid laser implică cuplarea unui procedeu ce utilizează ca sursă termică fasciculul laser cu un procedeu clasic TIG, MIG/MAG, plasma, inducție, etc. Realizarea unui astfel de procedeu de sudură mixt laser – arc electric a fost investigat pentru prima dată la sfârșitul anilor 70 dar abia la mijlocul anilor 90 a fost posibilă realizarea tehnologiei de sudare obținându-se un proces stabil și reproductibil făcându-l astfel interesant și pentru industrie. Începând cu această perioadă o serie de procedee de sudare mixtă au fost testate și anume: laser – arc (TIG, MIG, MAG și plasmă), laser – câmp magnetic și laser + inducție. Invariabil, performanțele tehnologice ale unui procedeu hibrid sunt superioare fiecărui procedeu luat separat asigurându-se astfel o completare reciprocă din punct de vedere al efectelor produse [1], [2], [3]. De exemplu, energia arcului electric asociată cu un fascicul laser duce la creșterea stabilității, productivității și a performanțelor tehnologice. O reprezentare schematică a unui procedeu mixt laser-MIG/MAG este redată în figura 1.

Una din problemele majore ale implementării unui procedeu hibrid de sudare constă în numărul mare de variabile, de natură fizică diferită, ce interacționează între ele având, de cele mai multe ori, efecte semnificative asupra rezultatelor obținute.

Studierea eficientă a procesului hibrid de sudare este condiționată de tehnica adoptată și de modul în care aceasta este adaptată complexității procesului analizat. Metoda experimentelor factoriale este o metodă de analiză care se pretează proceselor complexe cu un număr mare de factori de influență ce pot fi studiați cu un număr rezonabil de încercări. [4], [5], [6].

În acest context, în prezentul articol se prezintă performanțele atinse în cazul depunerii hibride MIG-laser a oțelurilor inoxidabile folosind metoda experimentelor factoriale.

Experiment

Obiective și strategii

În cadrul studiului de față s-a dorit evidențierea efectelor parametrilor de proces asupra geometriei cordonului depus prin procedeu hibrid laser-MIG și realizarea de depuneri multi-strat

Introduction

The laser-hybrid process results from coupling the laser process with another classical heating process: TIG, MIG/MAG, plasma, induction, etc. The combination of laser light and an electrical arc into an amalgamated welding process was first investigated in the late of 1970's, but only in the middle of 1990's, a first stable and reproducible process was presented thus making it attractive to industrial applications. Since then, several hybrid systems were tested: laser + arc (TIG, MIG/MAG and Plasma), laser + induction and laser + magnetic field. Invariably, the performance of the hybrid system is greater than the sum of the individual components, implying that synergistic effects on processing capability are produced [1], [2], [3]. For example, the energy of the arc associated with the laser increases the stability of the process, its productivity and the quality of the coating. A schematic representation of the hybrid laser-MIG/MAG is presented in figure 1.

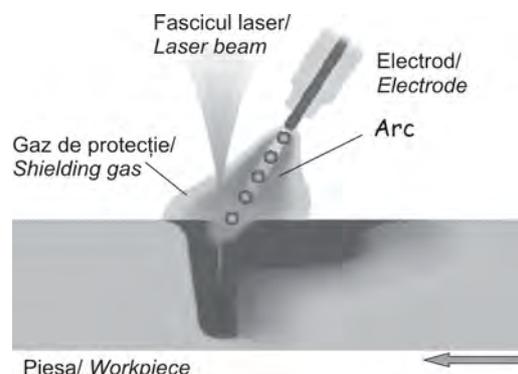


Figura 1. Reprezentarea schematică a procedeuului hibrid laser-MIG/MAG/

Figure 1. Schematic representation of the hybrid laser-MIG/MAG technique

One of the main problems with the implementation of laser-hybrid technologies derives from the fact that they involve complex processes with many variables having different physical

în poziție orizontală, asigurând o rată a depunerii ridicată și în același timp o calitate corespunzătoare a straturilor depuse.

Condițiile experimentale:

- Fascicul laser: Nd :YAG ($\lambda=1,064\mu\text{m}$) ;
- Material de bază: oțel inoxidabil 304;
- Sârma electrod: inox 316L, 1mm diametru;
- Gaz de protecție: argon.
- Cap hibrid (pistolet MIG-laser), ce asigură poziția reciprocă fascicul laser – electrod (arc).

Strategia experimentală a fost axată pe următoarele aspecte:

- realizarea unor serii de încercări secvențiale cu utilizarea graduală a rezultatelor pentru îmbunătățirea performanțelor tehnologice, bazata pe identificarea factorilor cu influență semnificativă și studierea efectelor acestora;

- realizarea de încercări experimentale în poziție orizontală cu identificarea condițiilor optime pentru acest caz și extinderea rezultatelor la depuneri în poziția “peste-cap”.

Utilizarea experimentelor factoriale în studiul proceselor complexe, implică determinarea unei relații între intrările în sistem (factorii de influență) și ieșiri (funcțiile obiectiv) (figura 2) și, implicit, controlul acestora din urmă făcând abstracție de fenomenologia complexă a sistemului investigat.

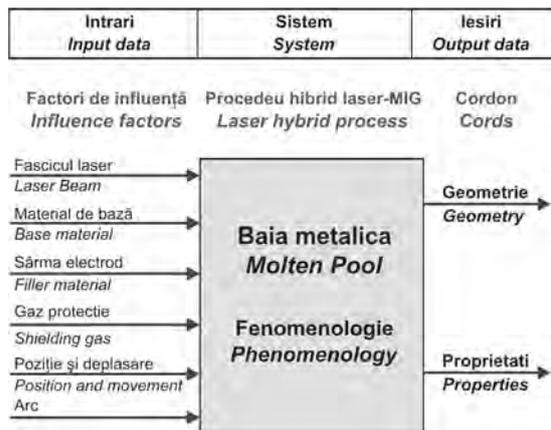


Figura 2. Reprezentarea schematică a procesului ca sistem cibernetic/

Figure 2. Schematic representation of the process as a “black box”

În cazul procesului de depunere prin procedeu hibrid, factorii de influență pot fi grupați în factori specifici fiecărui element ce intervine în acest proces (figura 2): fascicul laser, material de bază, sârma electrod, gaz de protecție, arc electric, poziție relativă arc-fascicul - material, deplasare. Funcțiile obiectiv stabilite vizează, în cadrul testelor preliminare, geometria cordonului (lățime, înălțime) iar în final, calitatea straturilor depuse. În cadrul testelor preliminare, apariția stropilor la depunerea în poziția peste cap a impus ca obiectiv suplimentar identificarea condițiilor de lucru ce reduc la minim apariția acestora. Un alt obiectiv a vizat explorarea unui domeniu experimental suficient de mare pentru a permite evidențierea efectelor factorilor asupra geometriei cordonului.

Structura experimentelor preliminare

Experimentele factoriale preliminare au fost experimente ortogonale fiecare având câte 16 combinații între nivelele factorilor de influență [6]. Pentru primul experiment factorial,

nature and which sometimes have important interactions with significant effects on obtained results.

An efficient study of the laser-hybrid process is strongly linked to the research strategy adopted, which must be tailored to the complexity of the analyzed process. The experimental design method is a suitable tool for studying the complex process with many influencing factors while maintaining the number of tests at a reasonable level [4], [5], [6]. In the above context, the article presents the performance achieved in MIG-laser assisted cladding process using a strategy based on the method of design of experiments.

Experimental procedure

The objectives and the adopted strategy

The purpose of the study was to highlight the effect of the operational parameters for laser - MIG cladding process on the geometry of the cords and to carry out multi-layer deposits in flat positions with the highest possible rate and, in the same time, keeping a suitable quality of the deposits.

The experimental conditions were:

- laser beam: Nd :YAG ($\lambda=1,064\mu\text{m}$) ;
- base material: stainless steel 304;
- filler material: 1 mm diameter wire of 316L stainless steel;
- shielding gas: Ag.

For the experimental tests, a hybrid head that combines the two elements (MIG and laser beam) was used. The experimental strategy involved two steps:

- to carry out several tests, in a sequential way, while allowing to use the results of the former tests in order to improve the obtained performances and to study more deeply the influence of the factors identified as most important during the following experiments;

- to begin with the tests for the simplest set up (flat position) and to continue with the most difficult to realize (overhead position).

The experimental design is a structured and organized method which permits to determine the relationship between the different *factors* affecting a process and *the output* of that process (fig. 2) using an appropriate strategy. In this way, the output can be controlled only by modifying the influencing factors and the complicated phenomenology of the system can be ignored.

For the particular case of the studied hybrid laser cladding, the influencing factors can be grouped in factors specific for (fig.2): laser beam, base material, filler material, shielding gas, electric arc and positioning and movement. The objective functions refer to the geometry and the properties of the cords, for the intermediary results, and to the realized deposits for the final results. The preliminary tests showed that the main problems encountered during the realization of the deposits by laser hybrid process - MIG in the overhead position consists in the appearance of projections, which prevent the realization of the cords. Under these conditions, the primary objectives of the preliminary tests were to reduce projections as much as possible and to explore a large enough experimental fields to determine the effects caused by the factors of influence on the geometry of the cords. The tests were carried out in a flat position and one pass of the hybrid head.

The structure of the preliminary tests

The preliminary experimental designs used orthogonal plans, each with 16 tests [6]. For the realization of the first experimental

au fost selectați 5 factori de influență, fiecare având 4 nivele de variație:

- X_{11} \Rightarrow poziția spotului focal față de suprafața materialului de bază;
- X_{12} \Rightarrow putere laser;
- X_{13} \Rightarrow viteza de avans;
- X_{14} \Rightarrow viteza sârmei electrod;
- X_{15} \Rightarrow înălțimea arcului electric

Matricea program asociată acestui prim experiment factorial este dată în tabelul 1 și conține atât valorile fizice corespunzătoare celor 4 nivele ale factorilor de influență selectați cât și valorile funcțiilor obiectiv (lățimea L și înălțimea H cordonului depus) corespunzătoare fiecărei combinații. Alte condiții experimentale:

- distanța focală lentilă: 200 mm;
- debit de gaz: 20 l/min;
- lungimea capătului liber: 6 mm;
- distanța arc-fascicul laser: 5 mm.

design five factors of influence were selected, each with four levels:

- X_{11} \Rightarrow the position of the focal point to the surface of the base material;
- X_{12} \Rightarrow laser power;
- X_{13} \Rightarrow the speed of the hybrid head;
- X_{14} \Rightarrow the speed of the filler wire;
- X_{15} \Rightarrow the height of the electric arc.

The matrix-program of the first experimental design, with the physical values of the factors levels is presented in table 1. The measured values of the widths (L) and the heights (H) of the obtained cords are included in the same table. The other conditions for the experimental tests were:

- the focal distance for the optical lens: 200 mm;
- the flow rate of the shielding gas: 20 l/min;
- the stick-out: 6 mm;
- the distance between the arc and the laser beam (on the adjustment of the head): 5 mm.

Tabelul 1. Matricea program pentru primul experiment factorial/ Table 1. The matrix program of the first experimental design

Nr. / N_o	Factorii de influență/ Influencing factors					Funcțiile obiectiv/ Objective functions	
	X_{11} [mm]	X_{12} [kW]	X_{13} [m/min]	X_{14} [m/min]	X_{15} [%]	L [mm]	H [mm]
1	+6	2	0,8	8	-5	7,85	1,70
2	+6	2,5	1,2	10	2	7,16	1,62
3	+6	3	1,6	12	9	5,41	1,58
4	+6	3,5	2,0	14	-12	5,58	1,19
5	+9	2	1,2	14	9	6,58	2,16
6	+9	2,5	0,8	12	-12	10,51	2,13
7	+9	3	2,0	10	-5	5,49	1,24
8	+9	3,5	1,6	8	2	6,21	1,04
9	+12	2	1,6	10	-12	4,88	1,33
10	+12	2,5	2,0	8	9	4,15	1,09
11	+12	3	0,8	14	2	10,86	2,47
12	+12	3,5	1,2	12	-5	7,16	1,82
13	+15	2	2,0	12	2	4,59	0,99
14	+15	2,5	1,6	14	-5	5,83	1,77
15	+15	3	1,2	8	-12	6,36	1,33
16	+15	3,5	0,8	10	9	10,23	1,72

Fasciculului laser a fost poziționat în fața arcului electric în sensul de mișcare. Parametrii arcului electric (tensiunea și curentul) au fost stabiliți în funcție de tipul și diametrul sârmei electrod precum și de viteza de avans a acesteia. Pentru realizarea celui de-al doilea experiment au fost selectați nouă factori de influență din care șase (X_{21} - X_{26}) cu două nivele de variație, iar trei (X_{27} - X_{29}) cu patru nivele de variație:

- X_{21} \Rightarrow poziția spotului focal față de suprafața materialului de bază;
- X_{22} \Rightarrow tipul gazului;
- X_{23} \Rightarrow distanța dintre arc și fasciculul laser;
- X_{24} \Rightarrow poziția arcului electric relativ la fasciculul laser;
- X_{25} \Rightarrow modul de lucru al arcului (standard sau pulsat);
- X_{26} \Rightarrow debitul de gaz;
- X_{27} \Rightarrow putere laser;
- X_{28} \Rightarrow viteza de avans;
- X_{29} \Rightarrow viteza sârmei electrod.

Matricea program asociată celui de-al doilea experiment factorial împreună cu nivele de variație ale parametrilor precum și semnificația fizică a acestora sunt prezentate în tabelul 2.

The laser beam was positioned before the arc, in the direction of movement. The parameters of the arc (voltage and intensity) were fixed in an implicit way according to the contribution of wire and by taking in account the diameter and the nuance used. For the realization of the second experimental design nine factors of influence were selected, from which six (X_{21} - X_{26}) with two levels and three (X_{27} - X_{29}) with four levels:

- X_{21} \Rightarrow the position of the focal point to the surface of the base material;
- X_{22} \Rightarrow the nature of gas;
- X_{23} \Rightarrow the distance between the arc and the laser beam (on the adjustment of the head);
- X_{24} \Rightarrow the position of the arc compared to the laser beam, in the movement direction;
- X_{25} \Rightarrow the arc working regime (standard or pulsated);
- X_{26} \Rightarrow the gas flow rate;
- X_{27} \Rightarrow the laser power;
- X_{28} \Rightarrow the speed of the hybrid head;
- X_{29} \Rightarrow the speed of the filler wire.

Valorile măsurate ale lăţimii (L) şi înălţimii (H) cordonului obţinut sunt de asemenea incluse în tabel. Apariţia stropilor a fost cuantificată folosindu-se calificative pe baza fotografiilor realizate în timpul procesului. Ca şi în cazul primului experiment, distanţa focală a lentilei a fost de 200mm iar lungimea capătului liber de 6 mm.

The matrix-program of the second experimental design, with the physical values of the influencing factors levels are presented in table 2. The measured values of the widths (L) and the heights (H) of the obtained cords are included in the same table. For each tests the presence of projections was appreciated by a qualifier, following photographs taken during the cladding

Tabelul 2. Matricea program asociata celui de-al doilea experiment factorial/
Table 2. The matrix program of the second experimental design

Nr. / No	Factorii de influenţă/ Influencing factors									Funcţiile obiectiv/ Objective functions	
	X ₂₁ [mm]	X ₂₂ [-]	X ₂₃ [mm]	X ₂₄ [-]	X ₂₅ [-]	X ₂₆ [l/min]	X ₂₇ [kW]	X ₂₈ [m/min]	X ₂₉ [m/min]	L [mm]	H [mm]
1	+5	Ar	5	înainte	pulsat	20	1,5	0,8	7	7,26	1,60
2	+5	Ar	5	înainte	standard	15	2	1,2	9	5,73	1,58
3	+5	Ar	5	după	pulsat	15	2,5	1,6	11	9,40	0,95
4	+5	Ar	5	după	standard	20	3	2,0	13	7,16	1,11
5	+5	80%Ar+20%He	7	înainte	pulsat	20	2	1,6	13	6,56	1,17
6	+5	80%Ar+20%He	7	înainte	standard	15	1,5	2,0	11	4,79	1,17
7	+5	80%Ar+20%He	7	după	pulsat	15	3	0,8	9	10,76	1,45
8	+5	80%Ar+20%He	7	după	standard	20	2,5	1,2	7	7,50	1,04
9	+15	Ar	7	înainte	pulsat	20	2,5	2,0	9	4,20	1,26
10	+15	Ar	7	înainte	standard	15	3	1,6	7	4,23	1,05
11	+15	Ar	7	după	pulsat	15	1,5	1,2	13	11,46	1,31
12	+15	Ar	7	după	standard	20	2	0,8	11	10,20	1,80
13	+15	80%Ar+20%He	5	înainte	pulsat	20	3	1,2	11	8,47	0,99
14	+15	80%Ar+20%He	5	înainte	standard	15	2,5	0,8	13	9,18	1,96
15	+15	80%Ar+20%He	5	după	pulsat	15	2	2,0	7	7,18	0,73
16	+15	80%Ar+20%He	5	după	standard	20	1,5	1,6	9	5,53	1,02

Rezultate şi discuţii

Analiza rezultatelor preliminare

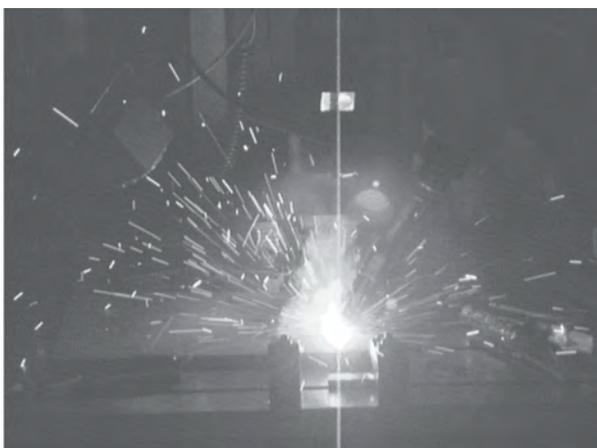
Analiza rezultatelor preliminare a evidenţiat efectele factorilor de influenţă consideraţi, asupra geometriei cordonului şi a apariţiei stropilor în timpul procesului de depunere. În domeniul experimental investigat, diferitele combinaţii ale nivelelor factorilor de influenţă au evidenţiat o gamă largă de situaţii privind apariţia stropilor (figura3 –a stropire abundentă, figura 3- b stropire

process. As for the tests of the first experimental design, the focal distance of the lens was 200 mm and the stick-out 6mm.

Results and discussions

The analysis of the preliminary results

The analysis of the preliminary results highlighted the effects of the considered influencing factors on the cords geometry and on the presence of projections during the process. The



a) apariţia stropilor / projections



b) lipsa stropilor / lack of projections

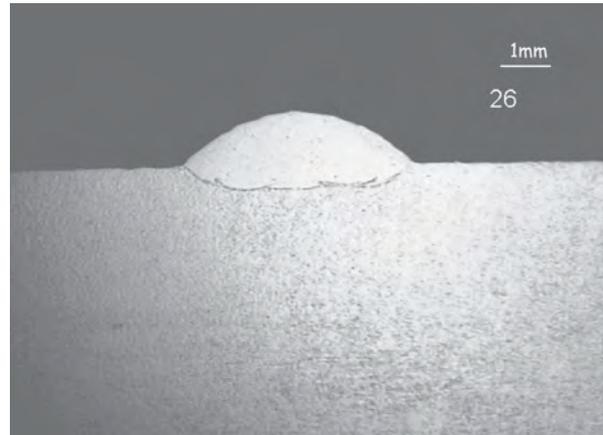
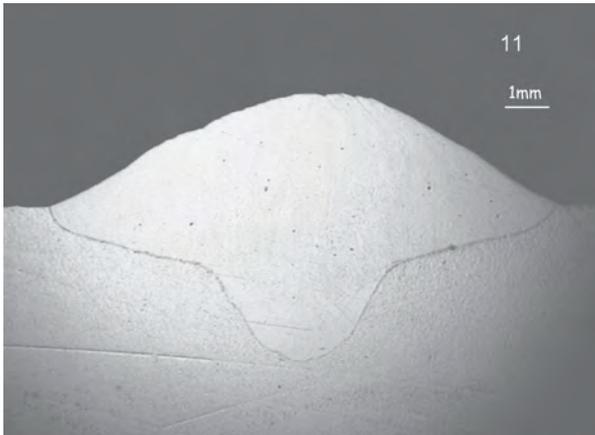
Figura 3. Regimuri de operare / Figure 3. Different operating conditions

redusă) precum şi privind geometria cordonului (fig.4 – a cordon de dimensiune mare, figura 4 – b cordon de dimensiune redusă). Aceste rezultate atestă importanţa efectelor produse de factorii

explored experimental field showed situations with a great diversity on the presence of projections (Fig.3 –a many projections and Fig.3 –b lack of projections) and on the geometry

de influență. Analiza rezultatelor arată că puterea laserului, modul de lucru al arcului, distanța dintre arc și laser precum și natura gazului au cea mai mare influență asupra rezultatelor obținute. Pentru cazul poziției orizontale, cele mai bune rezultate privind

of the cords (Fig.4 - a big size cord and Fig.4 -b small size cord) which illustrate the importance of the effects caused by the influencing factors in their intervals of variation. Analysis of the results showed that the factors of influence which have the



a) cordon mare / large cords

Parametri / Operational conditions ($v = 0,8$ m/min, $v_w = 14$ m/min)
Dimensiuni / Cord dimensions ($L = 10,86$ mm, $H = 2,47$ mm)

b) cordon mic / small cords

Parametri / Operational conditions ($v = 1,7$ m/min, $v_w = 6$ m/min)
Dimensiuni / Cord dimensions ($L = 4,23$ mm, $H = 1,05$ mm)

Figura 4. Diferite tipuri de cordoane / Figure 4. Geometry of the cords

depunerea cu un minimum de stropi (fig. 3- b) au fost obținute pentru următorii parametri de proces:

- putere laser: $P = 3$ kW ;
- regimul arcului electric: pulsat ;
- distanța dintre arc și fascicul laser: $X = 5$ mm ;
- tipul gazului: argon.

Influența diferiților factori asupra dimensiunilor geometrice ale cordonului poate fi studiată în profunzime folosindu-se funcțiile obiectiv:

- suprafața exterioară a cordonului, S [mm^2];
- debitul volumic de material depus, DV [cm^3/min].

O analiză a rezultatelor preliminare arată că o influență majoră asupra caracteristicilor cordonului (S , DV) le au viteza de avans v și viteza sârmei electrod v_w (a materialului de adaos). Un cordon (Fig.5) cu o suprafața exterioară S mare și cu cel mai mare debit volumic de material depus DV este obținut pentru o viteză a capului de avans de $v = 0,8$ m / min și o viteză a sârmei de $v_w = 14$ m / min, ce corespunde unui debit de material de adaos mai mare de 5kg / h.

Aceste rezultate preliminare au permis selectarea unor parametri de proces ce permit reducerea formării stropilor și care au influență semnificativă asupra caracteristicilor geometrice ale cordonului. Rezultatele obținute probează faptul că metoda experimentelor factoriale permite studiul unui număr mare de factori de influență, 10 în acest caz, cu 2 sau 4 nivele de variație utilizând doar 32 de experimente. Pornind de la situația cea mai favorabilă determinată pentru depunerile în poziție orizontală, s-a stabilit în continuare programul experimental pentru poziția peste cap.

Poziția "peste-cap"

În acest caz, depunerile au fost realizate într-o singură trecere cu o rată mare de depunere a materialului de adaos ($v_w = 14$ m/min), nivelele celorlalți factori de influență fiind cele care au asigurat reducerea stropilor. Pentru a estima caracteristicile geometrice ale cordonului la depunerea în poziție peste cap, s-a utilizat un experiment factorial complet EFC²⁴ cu 4 factori de

greatest effect on the presence of projections are: the laser power, the arc working regime (standard or pulsed), the distance between the arc and the laser beam and the nature of the gas. For the flat position, the operational conditions that allow obtaining an adequate deposition with minimum projections (Fig.3-b), are as follow:

- the laser power: $P = 3$ kW ;
- the arc working regime: pulsed ;
- the distance between the electric arc and the laser beam: $X = 5$ mm ;
- the gas type : argon

The effects caused by the influencing factors on the geometric dimensions of the cords can be studied in a comprehensive manner using the objective functions:

- the surface of the cord above the support, S [mm^2];
- the flow volume of deposited material, DV [cm^3/min].

An analysis of preliminary results showed that the factors that have the greatest influence on S and DV are: the speed of hybrid head, v and the speed of wire, v_w . The cord with the largest S and the largest DV is obtained in the experimental field explored for the following conditions (Fig.5): $v = 0.8$ m / min and $v_w = 14$ m / min. The wire speed $v_w = 14$ m / min corresponds to a deposit rate higher than 5kg / h.

The preliminary study has helped to select the operating conditions more suitable to reduce projections and to act on the geometric characteristics of the cords. It should be noted that the use of the design of experiments led to the study of the effects caused by ten influencing factors influences, with two or four levels with a total of 32 tests. Taking as departure point the best results obtained for the flat position, the experimental design for overhead position was established.

The overhead position

For this position the deposits were realized in one pass with the highest rate of the filler ($v_w = 14$ m/min) and with the optimum conditions in order to reduce the projections. The purpose of the study was to estimate the geometrical characteristics of the

influență, fiecare având două nivele de variație [6]. Cei patru factori de influență considerați pentru acest studiu au fost:

- X_{31} \Rightarrow poziția spotului focal față de suprafața superioară a materialului;
- X_{32} \Rightarrow putere laser;
- X_{33} \Rightarrow viteza de avans;
- X_{34} \Rightarrow distanța arc-fascicul laser.

Matricea program asociată experimentului factorial complet EFC 2⁴ este prezentată în tabelul 3. Pentru fiecare combinație a factorilor de influență s-au măsurat valorile funcțiilor obiectiv (L), (H) (S) și DV.

cord for the overhead position. To carry out the experiments one used a complete factorial design EFC 2⁴, with four factors of influence, each with 2 levels [6]. The factors of influence retained for the study were:

- X_{31} \Rightarrow the position of the focal point to the surface of the base material;
- X_{32} \Rightarrow laser power;
- X_{33} \Rightarrow the speed of the hybrid head;
- X_{34} \Rightarrow the distance between the arc and the laser beam.

The matrix-program of the experimental design EFC 2⁴ carried out in the overhead position is presented in table 3. Measured

Tabelul 3. Matricea program asociată experimentului factorial complet \Rightarrow EFC 2⁴ / Table 3. The third experimental matrix \Rightarrow EFC 2⁴

Nr. / No	Factorii de influență/ Influencing factors				Funcțiile obiectiv/ Objective functions			
	X_{31} [mm]	X_{32} [kW]	X_{33} [m/min]	X_{34} [mm]	L [mm]	H [mm]	S [mm ²]	DV [cm ³ /min]
1	+10	5	2	0,6	12,27	2,80	18,91	11,3
2	+10	5	2	0,8	11,67	3,51	19,61	15,7
3	+10	5	3	0,6	12,83	3,89	24,05	14,4
4	+10	5	3	0,8	12,88	3,86	23,98	19,2
5	+10	7	2	0,6	13,05	3,19	19,73	11,8
6	+10	7	2	0,8	11,72	2,73	15,57	12,5
7	+10	7	3	0,6	12,54	3,32	19,86	11,9
8	+10	7	3	0,8	12,57	2,52	13,90	11,1
9	+15	5	2	0,6	14,81	2,64	20,37	12,2
10	+15	5	2	0,8	13,28	2,46	17,91	14,3
11	+15	5	3	0,6	11,74	3,46	20,72	12,4
12	+15	5	3	0,8	11,21	3,12	16,52	13,2
13	+15	7	2	0,6	11,79	2,85	18,55	11,1
14	+15	7	2	0,8	11,40	2,38	16,07	12,9
15	+15	7	3	0,6	14,75	3,24	19,94	12,0
16	+15	7	3	0,8	10,39	2,93	16,77	13,4

Tabelul 4. Comparația datelor măsurate cu cele simulate / Table 4 Comparison between the measured and the estimated values

Nr./ No	Valori măsurate / Measured values		Valori estimate / Estimated values		Nr./ No	Valori măsurate / Measured values		Valori estimate / Estimated values	
	S [mm ²]	DV [cm ³ /min]	S _{est} [mm ²]	DV _{est} [cm ³ /min]		S [mm ²]	DV [cm ³ /min]	S _{est} [mm ²]	DV _{est} [cm ³ /min]
1	18,91	11,3	21,83	13,3	9	20,37	12,2	19,07	11,2
2	19,61	15,7	20,32	16,3	10	17,91	14,3	17,56	14,2
3	24,05	14,4	22,96	14,0	11	20,72	12,4	20,20	11,9
4	23,98	19,2	21,45	17,0	12	16,52	13,2	18,69	14,9
5	19,73	11,8	18,67	11,1	13	18,55	11,1	19,24	11,6
6	15,57	12,5	14,73	11,9	14	16,07	12,9	15,30	12,4
7	19,86	11,9	19,80	11,8	15	19,94	12,0	20,37	12,3
8	13,90	11,1	15,86	12,6	16	16,77	13,4	16,42	13,1

Pe baza rezultatelor din tabelul 3 pot fi determinate relațiile polinomiale 1 și 2 cu ajutorul cărora se pot estima caracteristicile cordonului S (formula 1) și DV (formula 2).

$$S_{est} = 35,86 - 2,21X_{31} + 1,13X_{32} + 22,9X_{33} - 1,25X_{34} + 0,33X_{31}X_{34} - 6,1X_{33}X_{34} \quad (1)^*$$

$$DV_{est} = 8,88 - 1,75X_{31} + 0,73X_{32} + 43,3X_{33} - 0,38X_{34} + 0,27X_{31}X_{34} - 5,63X_{33}X_{34} \quad (2)^*$$

* În relațiile (1) și (2) se introduc X_{31} și X_{34} în mm, X_{32} în kW, X_{33} în m/min obținându-se S_{est} în mm² și DV în cm³/min.

O comparație între valorile măsurate pentru S și DV corespunzătoare combinațiilor factorilor din matricea program

values: widths (L), heights (H) and surfaces (S) and computed values: DV are given in the same table.

Based on the results from table 3 one can deduce the polynomial relations in order to estimate the S (formula 1) and DV (formula 2).

$$S_{est} = 35.86 - 2.21X_{31} + 1.13X_{32} + 22.9X_{33} - 1.25X_{34} + 0.33X_{31}X_{34} - 6.1X_{33}X_{34} \quad (1)^*$$

$$DV_{est} = 8.88 - 1.75X_{31} + 0.73X_{32} + 43.3X_{33} - 0.38X_{34} + 0.27X_{31}X_{34} - 5.63X_{33}X_{34} \quad (2)^*$$

* In the relations (1) and (2) one introduces X_{31} and X_{34} in mm, X_{32} in kW, X_{33} in m/min and one obtains S_{est} in mm² and DV in cm³/min.

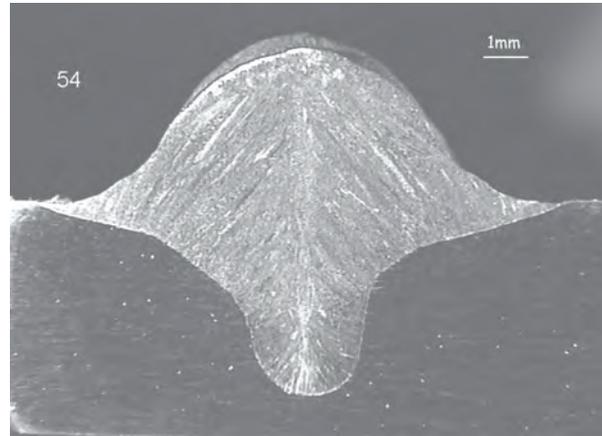
și cele estimate S_{est} și DV_{est} utilizând relațiile (1) și (2), evidențiază buna corelație dintre acestea (tabelul 4)

Se poate observa o modificare importantă a geometriei cordonului la trecerea de la o poziție de depunere la alta pentru aceiași parametri de proces (figura 5 - poziție orizontală, figura 6 - poziția peste cap).



Parametri / Operational conditions ($v = 0.8$ m/min, $v_w = 14$ m/min, $P = 2$ kW, $I = 357$ A, $U = 29,5$ V, foc.pos. = +10mm)
Dimensiuni / Cord dimensions (L = 12,62mm, H = 1,84mm)

Figura 5 Cordon realizat în poziție orizontală/
Figure 5. Cord realized in flat position



Parametri / Operational conditions ($v = 0.8$ m/min, $v_w = 14$ m/min, $P = 2$ kW, $I = 357$ A, $U = 29,5$ V, foc.pos. = +10mm)
Dimensiuni / Cord dimensions (L = 11,67mm, H = 3,51mm)

Figura 6. Cordon realizat în poziție "peste-cap" /
Figure 6. Cord realized in overhead position

Depuneri multi-strat

Rezultatele obținute la depunerea în cele două poziții, au facilitat selectarea parametrilor adecvați obținerii unui cordon „de bază” ce a fost utilizat la depunerea multi-strat. Utilizând un experiment factorial adițional pentru cazul cordoanelor juxtapuse și suprapuse în configurația peste cap, a scos în evidență parametrii de proces optimi:

- viteza de avans $V = 0,8$ m/min;
- puterea laser $P = 2$ kW;
- poziția spotului focal față de suprafața superioară a materialului de bază: + 15mm;
- distanța arc-fascicul laser $X = 4$ mm;
- viteza sârmei electrod $v_w = 5,5$ m/min, ce corespunde unui debit de material depus de 2kg/h.

Cordonul selectat pentru realizarea depunerilor multi-strat este redat în figura 7. În figura 8 se prezintă o depunere mono-strat cu o lățime mare (170×100 mm²) realizată cu cordonul optim și care prezintă o foarte bună calitate a suprafeței. În figura 9 este prezentat o depunere multi-strat realizată cu parametrii corespunzători cordonului optim în configurație peste cap, care de asemenea prezintă o foarte bună calitate a suprafeței. Analiza cu raze X a depunerii, a evidențiat lipsa defectelor din profunzime.

Concluzii

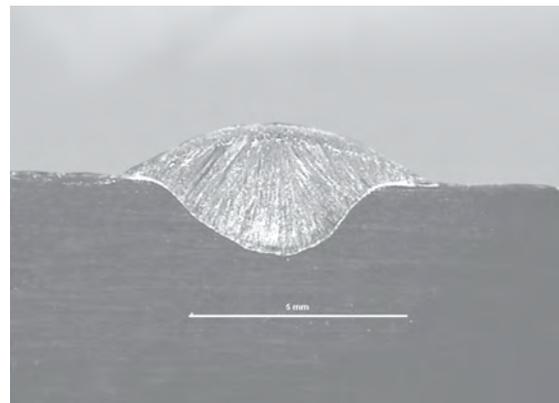
Procesul de depunere laser-MIG este un proces complex, influențat de o gamă largă de factori. Studiul acestuia necesită aplicarea unor tehnici de experimentare și analiză adecvate. Utilizarea metodei experimentelor factoriale permite evidențierea influenței diferiților factori asupra geometriei cordonului și în același timp, estimarea interacțiunilor dintre aceștia. Rezultatele obținute pentru cazul în care avem o singură trecere atât pentru poziția de depunere orizontală cât și pentru poziția de depunere

If one compares the measured values for S and DV obtained during the experiments with the estimated values S_{est} and DV_{est} using the relations (1) and (2) one notes a good correlation between them (table 4)

It should be noticed that a change of the position of the cord while passing from the flat position (fig.5) to the overhead (fig. 6) in the same operating conditions, modifies in an important way the shape and dimensions of the cords.

The realization of the multi-layer deposits

The results obtained in the flat and the overhead position made it possible to select the most suitable parameters for the “basic cord” which was used to carry out multi-layer deposits. An additional experimental design realized with juxtaposed and



Parametri / Operational conditions ($v = 0,8$ m/min, $v_w = 5,5$ m/min, $P = 2$ kW, $I = 159$ A, $U = 20,8$ V, $X = 4$ mm)

Figura 7. Cordon realizat în poziție orizontală /
Figure 7. Cord realized in flat position

superimposed cords in the overhead position (the most difficult) showed that the best deposit is obtained for the following parameters:

- the speed of the hybrid head $v = 0,8$ m/min;
- the power $P = 2$ kw;
- the position of the focal to the surface of base material: + 15mm;
- the distance between the arc and the laser beam $X = 4$ mm;
- the speed of the filler wire $v_w = 5,5$ m/min, which corresponds to a rate of 2kg/h.

peste cap, sunt folosite ulterior pentru realizarea depunerilor multistrat.

Studiul evidențiază performanțele tehnologice ale acestui procedeu hibrid în realizarea depunerilor multistrat în cazul

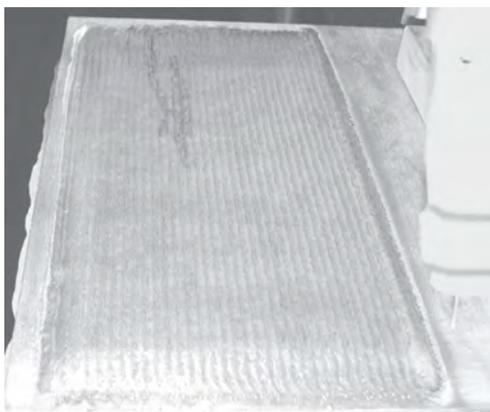


Figura 8. Depunere mono-strat în poziția “peste-cap” /
Figure 8. Mono-layer deposit realized in overhead position

oțelului inoxidabil. Placările au fost obținute în configurația peste cap pentru o rată de depune mai mare de 2kg/h. Suprafața acestora s-a dovedit a fi de calitate superioară, iar analiza cu raze X a scos în evidență lipsa defectelor de profunzime.

Bibliografie / References

- [1] Cui, H.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten kombinierter Laser-Lichtbogentechnik. TU, Braunschweig, Dissertation, 1991
- [2] Maier, C., Beersiek, J., Neuenhahn, K.: Kombiniertes Lichtbogen – Laserstrahl - Schweißverfahren – Online-Prozessüberwachung. DVS 170 (1995) S.45-51
- [3] Steen et al.: Azrc-Augmented Laser Welding. 4th Int. Conf. On Advances In Welding Processes, Paper No 17 (1978), pp 257-265
- [4] Montgomery, D.C.: Design and analysis of experiments, John Wiley&Sons, New York, 1991
- [5] Goupy, J.: Introduction aux plans d'expériences, Dunod, Paris, 2001
- [6] Cicală, E.: Metoda experimentelor factoriale, Ed. Politehnica, Timișoara, 2005



The cord selected for the realization of the multi-layer deposits is presented in figure 7. In figure 8 is presented a mono-layer deposit of great width (170x100 mm²) realized with the optimal basic cord and which has a good quality of surface. In figure 9 is presented a multi-layer deposit carried out in the overhead position with the optimal cord and which presents also a good quality of the surface. The examinations by X-ray showed zero

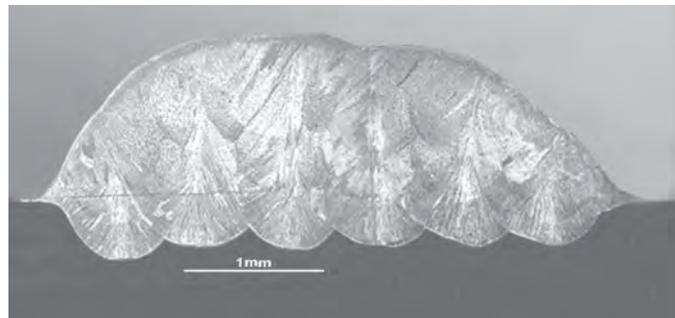


Figura 9. Depunere multi-strat în poziția “peste-cap” /
Figure 9. Multi-layer deposit realized in overhead position

defects in the deposits carried out.

Conclusion

The laser - MIG hybrid process is a complex one, influenced by many factors and its experimental study requires an adequate planning of the experimental tests. The use of the experimental designs method allows the description of the effects of the operational factors on the geometry of the deposits carried out for the flat and overhead position. After successive stages for determining the optimal operating conditions for the realization of a basic cord the obtained results are further used to realize the multi-layer deposits in both positions.

The study carried out highlighted the feasibility of the laser-MIG hybrid process for realization of the multi-layer stainless steel deposits. The deposits obtained for the flat and overhead positions were carried out for a filler rate bigger than 2kg/h. Their surfaces have a good quality, and the X-ray analysis shows that there are no defects.

Lucrare prezentată la conferința internațională “Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate”, Timișoara, 12-13.06.2008

Paper presented at the international conference “Innovative technologies for joining advanced materials, Timișoara, Romania, 12-13.06.2006