

Aplicarea laserelor diodă și CO₂ la sudarea laser-plasmă a tablelor subțiri din aliaje de aluminiu

Application of diode and CO₂ lasers in laser-plasma welding of thin sheet aluminum alloys

I.V. Krivtsun, V.Yu. Khaskin, A.S. Zatserkovny și A.V. Bernatsky

The E. O. Paton Electric Welding Institute, 11, Bozhenko str., 03680, Kyiv-150, Ukraine

e-mail: d56@paton.kiev.ua

Cuvinte cheie

Laser diodă, laser cu CO₂, sudare laser-plasmă, aliaj aluminiu, table subțiri

Keywords

Diode laser, CO₂ laser, laser-plasma welding, aluminium alloy, thin sheet

1. Introducere

În industria modernă este adesea necesar să se execute construcții cu pereți subțiri din aliaje de aluminiu. Aceste construcții includ caroserii de automobile și diferite tipuri de aparate, forme de tubulaturi, produse pentru tehnologia aviatică și spațială etc. Tehnologiile arc electric tradiționale (inclusiv plasma) pot provoca deformații reziduale și tensiuni interne în construcțiile sudate. În plus, astfel de tehnologii nu furnizează întotdeauna caracteristicile necesare de rezistență ale îmbinărilor, fapt ce a stimulat utilizarea sudării cu fascicul de electroni și laser [1].

Recent s-a realizat un progres substanțial în studiul proceselor de sudare hibride inclusiv cele care combină laserul și sursele cu arc electric [2]. Utilizarea sudării hibride permite reducerea cu până la 50% a costului pe metru de sudură și îmbunătățirea performanței procesului cu 50% pe baza înlocuirii parțiale a puterii laserului cu puterea arcului [3]. Combinația radiației laser cu arc de plasmă este menită să permită păstrarea majorității avantajelor sudării laser și să facă procesul de sudare mai atractiv pentru consumator.

Scopul acestei lucrări este crearea metodelor de bază pentru obținerea unor îmbinări din aliaje de aluminiu, pe baza unui studiu al particularităților fizice și tehnologice ale sudării hibride cu utilizarea radiației laser de diferite lungimi de undă. Pentru a atinge acest scop s-a efectuat modelarea matematică a parametrilor geometrici ai pătrunderii laser-plasmă, asigurând astfel o posibilitate de a determina un domeniu aproximativ al parametrilor regimului de sudare. Au fost realizate studii experimentale asupra sudării aliajelor de aluminiu permițând reglarea parametrilor regimului; au fost realizate încercări metalografice și mecanice facilitând astfel identificarea defectelor tipice și mijloacelor pentru eliminarea lor și au ajutat la stabilirea domeniului de aplicare a procesului de sudare.

2. Aplicații

Datele obținute din literatura de specialitate [4-7] au făcut posibilă determinarea schimbării caracteristice a formei pătrunderii laser-plasmă funcție de următorii parametri: puterea radiației P , viteza procesului de sudare (prelucrare) v

1. Introduction

In modern industry it is often necessary to manufacture thin-walled constructions made of aluminum alloys. These constructions include the bodies of cars and various kinds of devices, shape tubes, the aviation and space technology products, etc. The traditionally used arc (including plasma) technologies may bring about the residual deformation and internal stresses in welded constructions. Moreover, such technologies do not always provide the required strength characteristics of the joints, which have stimulated the use of electron-beam and laser welding [1].

Recently there has been a substantial advancement in the study of the hybrid welding processes, including those combining laser and arc power sources [2]. The use of hybrid welding allows to reduce up to 50% of the running meter cost of the weld joint, and to improve the process performance by 50% for account of partial replacement of laser power by arc power [3]. The combination of laser radiation with a plasma arc is designed to permit preserving most of the advantages of laser welding and to make the welding process more attractive to the consumer.

The aim of this work is creation of basic methods of obtaining the aluminum alloy joints, based on a study of physical and technological peculiarities of hybrid welding using laser radiation of different wavelengths. To achieve this goal the mathematical modeling of geometrical parameters of the laser-plasma penetration was carried out, thus providing a possibility to determine an approximate range of welding regime parameters; the experimental studies on welding of aluminum alloys, enabling the regime parameters adjustment, were accomplished; the metallographic and mechanical tests were conducted which facilitated identification of typical defects and means for their elimination, and helped establish the scope of the welding process application.

2. Applications

The data obtained from literature [4-7] made it possible to determine characteristic change in shape of laser-plasma penetration depending on such parameters as radiation power

și curentul arcului I . Aceasta a permis realizarea unui model matematic care să descrie dependența adâncimii h și a lățimii b a pătrunderii în aliajele de aluminiu cu următorii parametri:

$$h(P, v, I) = a_0 + a_1 P + a_2 v + a_3 I + a_4 P^2 + a_5 v^2 + a_6 \sqrt{I} + a_7 \frac{P \cdot I}{v}; \quad (1)$$

$$b(P, v, I) = c_0 + c_1 P + c_2 v + c_3 I + c_4 P^2 + c_5 v^2 + c_6 \sqrt{I} + c_7 \frac{P \cdot I}{v}, \quad (2)$$

unde a și c sunt coeficienții adâncimii și respectiv a lățimii pătrunderii. Coeficienții care corespund aliajului Al-Mn sunt prezentați în tabelul 1.

Deoarece sudarea aliajelor de aluminiu se realizează cu impulsuri heteropolare în (1) - (2) curentul arcului se presupune la valoarea sa medie în timp și se determină după cum urmează:

$$I = \frac{I_{direct} t_{direct} + I_{reverse} t_{reverse}}{t_{direct} + t_{reverse}} \quad (3)$$

unde I_{direct} , $I_{reverse}$, t_{direct} și $t_{reverse}$ sunt curenții și durata polarității directe și respectiv inverse.

Tabelul 1. Coeficienții adâncimii a și a lățimii c a pătrunderii hibride a aliajului Al-Mn/
Table 1. The coefficients of depth a and width c of a hybrid penetration of Al-Mn alloy

a	Valoare/Value	c	Valoare/Value	Unitate/Unit
a_0	0,578	c_0	2,369	mm
a_1	0,719	c_1	0,899	mm/kW
a_2	-0,023	c_2	-0,021	mm·h/m
a_3	-0,019	c_3	-0,010	mm/A
a_4	-0,110	c_4	-0,291	mm/kW ²
a_5	$1,258 \cdot 10^{-4}$	c_5	$-2,396 \cdot 10^{-5}$	mm·h ² /m ²
a_6	0,272	c_6	0,328	mm/A ^{1/2}
a_7	0,371	c_7	0,095	mm·m/h·A·kW

Calculul dependențelor (1) - (3) a relevat că la puterea radiației laser $P = 2$ kW și la raportul curenților de polaritate directă și inversă $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A ($t_{direct}/t_{reverse} = 0,8/0,8$ s) sudarea hibridă la o viteză de sudare de 70 m/h asigură o adâncime de pătrundere de până la 2 mm, cu o lățime aproape dublă. Mecanismul principal de sudare cu acești parametri de pătrundere are un caracter de sudare prin conducție (termică) [1]. Principalul mecanism al impactului radiației laser asupra comportării arcului plasmă în acest regim de sudare hibridă este evaporarea metalului sub acțiunea radiației laser focalizată [6, 7].

Utilizarea ionizatorului extern (arcul electric) la sudarea laser permite reducerea temperaturii limită la suprafața metalului unde are loc tranziția de la regimul de transmitere a căldurii la regimul mai eficient al pătrunderii adânci. Mai mult, astfel de parametri ai sudurii hibride cum sunt lungimea de undă a radiației și polarizarea influențează eficiența procesului [8]. Pentru a mări eficiența sudării laser și hibride este potrivit să se utilizeze fascicule laser cu polarizare liniară a radiației în direcția sudării.

Experimentele privind sudarea laser-plasmă s-au efectuat conform schemei din figura 1, utilizând probe din aliaje de aluminiu AMn, AMg3, AMg5M, AMn6 și de tipul 1915 cu grosime mică ($\delta = 0,6...3,0$ mm). A fost utilizat în experimente un cap hibrid cu acțiune directă similar cu cel prezentat în [7], cu

P , process rate v and arc current I . This allowed to develop a mathematical model describing dependence of depth h and width b of penetration in aluminum alloys on the following parameters:

$$h(P, v, I) = a_0 + a_1 P + a_2 v + a_3 I + a_4 P^2 + a_5 v^2 + a_6 \sqrt{I} + a_7 \frac{P \cdot I}{v}; \quad (1)$$

$$b(P, v, I) = c_0 + c_1 P + c_2 v + c_3 I + c_4 P^2 + c_5 v^2 + c_6 \sqrt{I} + c_7 \frac{P \cdot I}{v}, \quad (2)$$

where a and c denote the coefficients of depth and width of penetration respectively. The coefficients corresponding to Al-Mn alloy are shown in Table 1.

Since the welding of aluminum alloys is performed using heteropolar pulses in (1) - (2) the arc current is assumed as its average value over the time and determined as follows:

$$I = \frac{I_{direct} t_{direct} + I_{reverse} t_{reverse}}{t_{direct} + t_{reverse}} \quad (3)$$

where I_{direct} , $I_{reverse}$, t_{direct} and $t_{reverse}$ are the currents and the duration of direct and reverse polarity, respectively.

The calculation of dependences (1) - (3) revealed that at laser radiation power $P = 2$ kW, and the ratio of direct and reverse polarity currents $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A ($t_{direct}/t_{reverse} = 0.8/0.8$ s) the hybrid welding at a welding speed of 70 m/h provides the penetration depth of up to 2 mm, with about twice a width. The main mechanism of welding with these penetration parameters is of a conduction character [1]. The main mechanism of laser radiation impact on behavior of arc plasma in this regime of hybrid welding is the evaporation of metal under the focused laser radiation [6, 7].

The use of external ionizer (electric arc) in the laser welding allows to reduce the boundary temperature of the metal surface at which the transition from heat conduction regime to more effective regime of deep penetration takes place. Furthermore, such parameters of hybrid welding as the radiation wavelength and polarization influence the process efficiency [8]. To increase the efficiency of laser and hybrid welding it is appropriate to use laser beams with linear polarization of radiation in the direction of welding.

Experiments on laser-plasma welding were carried out according to the scheme in Figure 1, using the samples of aluminum alloy AMn, AMg3, AMg5M, AMn6 and 1915 of small thickness ($\delta = 0.6...3.0$ mm). The hybrid direct action plasma torch similar to the one described in [7] was used in the experiments, with focused radiation of diode (wavelength $\lambda = 0.808/0.940$ μ m) and CO₂ lasers ($\lambda = 10.6$ μ m) at power of up to 2 kW. The thermal effect of the plasma arc and laser welding on the welding pool was analyzed by studying the patterns of the joints, as well as the burnout rate of magnesium and manganese.

According to the results of the experiments the corresponding dependences were plotted in Figure 2. From this figure it can be noticed that the sum of the depths of the laser (curve 1) and plasma (curve 2) penetration (curve 3) is less than the depth of the hybrid penetration (curve 4). Thus, non-additivity of the sum of the penetration depths with the use of the heat sources that are included in hybrid process,

radiația focalizată a diodei (lungimea de undă $\lambda = 0,808/0,940$ μm) și lasere CO_2 ($\lambda = 10,6$ μm) cu o putere de până la 2 kW. Efectul termic al sudării cu arc de plasmă și laser asupra băii de sudare a fost analizat prin studierea „tiparului” îmbinărilor, cât și prin viteza de ardere a magneziului și manganului.

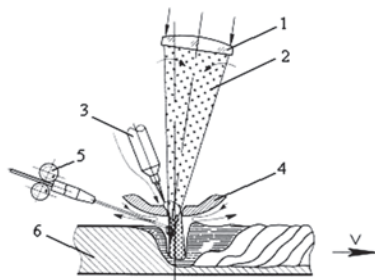


Figura 1. Schema experimentelor privind sudarea hibridă utilizând un cap de plasmă cu acțiune directă integrat: 1 – lentilă de focalizare, 2 – radiație laser, 3 – catod, 4 – duză, 5 – sârmă de adaos; 6 – anod./

Figure 1. Scheme of the experiments on hybrid welding using the integrated direct action plasma torch: 1 – focusing lens, 2 – laser radiation, 3 – cathode, 4 – nozzle, 5 – filler wire; 6 – anode.

Conform rezultatelor experimentelor dependențele corespunzătoare au fost schițate în figura 2. Din această figură se poate observa că suma adâncimilor pătrunderii (curba 3), laserului (curba 1) și plasmei (curba 2) este mai puțin adâncă decât pătrunderea hibridă (curba 4). Astfel, nu are loc însumarea adâncimilor de pătrundere la utilizarea surselor de căldură care sunt incluse în procesul hibrid, și are loc un câștig de adâncime prin pătrunderea hibridă. Distanța dintre curbele 3 și 4 dovedește existența efectului hibrid (sinergic) și arată intensitatea acestuia.

O comparație a rezultatelor experimentelor cu utilizarea laserului CO_2 și diodă a relevat faptul că prezența sinergiei, legătura arcului de plasmă cu suprafața de acțiune a fasciculului de laser și stabilitatea sudării hibride de mare viteză este mai mult influențată de densitatea puterii radiației laser decât de lungimea ei de undă.

S-a stabilit experimental că în domeniul parametrilor investigați viteza optimă de sudare corespunde generării cordonului de sudare cu rigidizare minimă, la puterea maximă a surselor laser și plasmă. Acest regim permite evitarea utilizării sârmei de adaos pentru obținerea de îmbinări cap la cap a tablelor subțiri.

La selectarea duratei optime (t_{direct} și $t_{reverse}$) și a curenților (I_{direct} și $I_{reverse}$) a impulsului direct și invers la sudarea hibridă de viteză mare (până la 300 m/h) s-a arătat că ambele rapoarte tind spre 1:1. Criteriul de optimizare a asigurat o curățare de calitate a suprafeței catodului de pelicula de oxid prin impulsuri de polaritate inversă. Astfel de facilități de finisare a suprafeței ușurează pregătirea componentele pentru sudare și fac ca procesul laser-plasmă să fie mai eficient pentru uz industrial decât sudarea laser.

Încercările mecanice ale probelor, sudate cu fascicul laser, plasmă și respectiv laser-plasmă, au arătat că rezistența îmbinărilor sudate hibrid atinge 90% din rezistența metalului de bază (figura 3). Aceasta permite recomandarea soluțiilor de sudare laser-plasmă pentru rezolvarea problemelor practice legate de sudarea construcțiilor cu pereți subțiri din aliaje de Al-Mg-Mn.

Pentru a determina existența porilor interiori, probele sudate din aliaje AMg3 și AMg6 ($\delta = 0,8...3,0$ mm) au fost supuse controlului cu raze X. În unele cazuri, acești pori s-au

and the depth that is yielded by hybrid penetration, takes place. The distance between curves 3 and 4 proves the existence of hybrid (synergic) effect and shows its intensity.

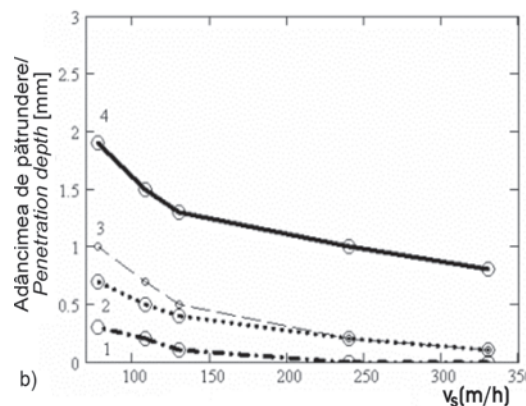
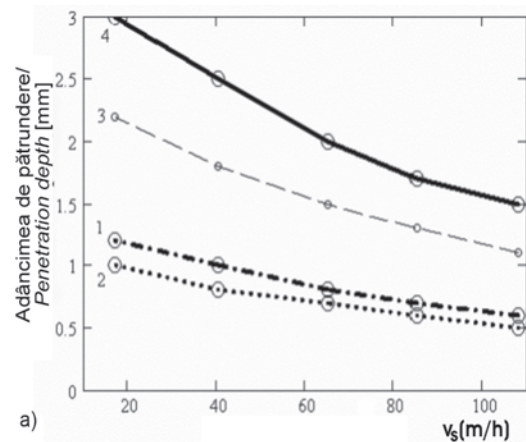


Figura 2. Dependența adâncimii de pătrundere h asupra vitezei v la sudarea laser-plasmă a aliajelor AMg3, AMg5M AMg6 și tip 1915: a) radiație diodă laser, b) radiație laser CO_2 . În ambele cazuri: $P = 1,2$ kW; $I_{direct}/I_{reverse} = 50/50$ A; $U = 18$ V; 1 – sudarea laser, 2 – sudarea cu plasmă, 3 – valoarea sumei pătrunderilor la sudarea laser și arc de plasmă, 4 – sudarea hibridă./

Figure 2. Dependences of the penetration depth h on the velocity v of the laser-plasma welding of AMg3, AMg5M AMg6 and 1915 alloys: a) diode laser radiation, b) CO_2 laser radiation. In both cases: $P = 1.2$ kW; $I_{direct}/I_{reverse} = 50/50$ A; $U = 18$ V; 1 – laser welding, 2 – plasma welding, 3 – aggregate value in laser and plasma arc welding, 4 – hybrid welding.

A comparison of the results of experiments with the use of CO_2 and diode lasers revealed that the presence of synergy, linking of the plasma arc to the area of the laser beam and the stability of high-speed hybrid welding is more related to the power density of laser radiation than its wavelength.

It was experimentally established that in the investigated range of parameters the optimal welding speed corresponds to the minimum reinforcing bead generation at maximum power of the laser and plasma sources. This regime permits to obviate the use of the filler wire for obtaining the thin sheet butt joints.

Selection of optimal durations (t_{direct} and $t_{reverse}$) and currents (I_{direct} and $I_{reverse}$) of direct and reverse pulses with high-speed (up to 300 m/h) hybrid welding has shown that both ratios tend to 1:1. The optimization criterion was ensuring the high-quality cathode surface cleaning of the oxide film by pulses of reverse polarity. Such kind of surface refining facilitates preparing of parts for welding and makes the laser-

înregistrat. Studii mai detaliate au relevat faptul că apariția porilor este cauzată de conținutul mare de hidrogen, cât și de arderea parțială a magneziului și a manganului din îmbinările sudate. Introducerea de aditivi (sârmă AMg6 ϕ 1,2 mm) a ajutat la eliminarea completă a porilor. Analizele metalografice au arătat că structura componentelor din aliaj de aluminiu, obținută prin sudare hibridă este mai apropiată de structurile caracteristice la sudarea cu fascicul laser decât de cele obținute la sudarea cu plasmă. În cazul utilizării unei sârme de adaos situația opusă devine adevărată – structura sudurilor hibride este mai apropiată de structura obținută la sudarea cu plasmă (figura 4). Aceasta se datorează supraîncălzirii intense a metalului prin topirea metalului de adaos în baia de sudare.

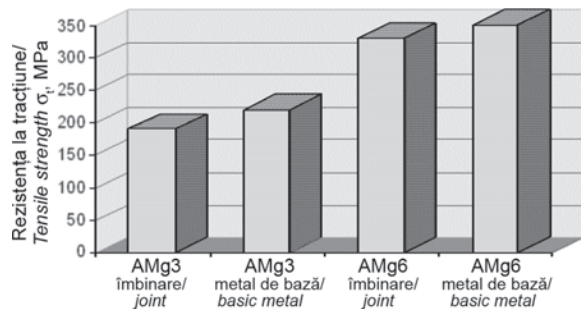


Figura 3. Încercările de rezistență la tracțiune (σ_t , MPa) ale componentelor din aliaje de AMg3 și AMg6 sudate hibrid/
Figure 3. Tensile strength (σ_t , MPa) tests of hybrid welded AMg3 and AMg6 alloy compounds.

O comparație cu sudarea laser a arătat că la sudarea hibridă puterea arcului comprimat înlocuiește parțial puterea radiației laser. Pentru table subțiri din aliajele de aluminiu, acest efect poate fi estimat aproximativ ca o înlocuire a 1KW din puterea laserului cu un 1kW din puterea arcului de plasmă. Astfel efectul economic de înlocuire a sudării laser cu cea hibridă este reducerea semnificativă a costului echipamentului laser. Este într-adevăr rezonabil, deoarece costul echipamentului de sudare cu plasmă este de obicei mult mai scăzut.

Sudarea țevilor din aliaj AMn ($\delta = 0,3$ mm) utilizate ca părți constituente ale pachetelor din sticlă este un exemplu de aplicație industrială a tehnologiei dezvoltate. În cursul experimentelor conduse la puterea de 1,5 kW a fasciculului laser CO₂ cu și curent de sudare $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A s-a obținut o îmbinare de calitate superioară la viteza de sudare mai mare de 1000 m/h. Trebuie notat că în cazul sudării cu laser CO₂ sunt necesari circa 3...5 kW pentru a se atinge o viteză similară.

3. Concluzii

1. În domeniul parametrilor considerați, regimurile optime de sudare corespund vitezei de sudare la care se produce minima rigidizare la generarea cordonului de sudare, la puterea maximă. În majoritatea cazurilor astfel de regimuri permit prevenirea utilizării materialului de adaos pe baza extinderii volumului de material pătruns.

2. La sudarea hibridă cu utilizarea radiației laserului diodă raportul puterilor laserului și plamei trebuie să se apropie de 1:1 sau să varieze în direcția creșterii puterii laserului. Aceasta se datorează îmbunătățirii stabilizării procesului de sudare proporțional cu creșterea evaporării metalului sub radiația laser.

3. La sudarea laser-plasma a aliajului de aluminiu cu impulsuri heteropolare inversarea polarității impulsurilor asigură curățirea

plasma process more efficient for industrial use than laser welding.

The mechanical tests of the samples, welded by laser radiation, plasma and laser-plasma method, showed that the strength of the hybrid welded joints reaches 90% of the base metal strength (Figure 3). This allows recommending the laser-plasma welding solutions for solving practical problems associated with the welding of thin-walled constructions of Al-Mg-Mn alloys.

To determine the availability of the interior pores the welded samples of AMg3 and AMg6 alloys ($\phi = 0.8...3.0$ mm) were exposed to the X-ray control. In some cases, these pores have been recorded. More detailed studies revealed that the cause of their occurrence is a high content of hydrogen, as well as partial burnout of magnesium and manganese in the welded joints. Introduction of additives (AMg6 wire ϕ 1.2 mm) helped completely eliminate the pores. Metallographic studies have shown that the structure of aluminum alloy compounds, obtained in hybrid welding, bears a closer resemblance to the structures that are characteristic of the laser process than of plasma one. In the case of utilizing a filler wire the opposite situation holds true - the structures of hybrid joints are much closer to the structures obtained in plasma welding (Figure 4). This is due to intensive overheating of metal through the melting of additional metal in the weld pool.

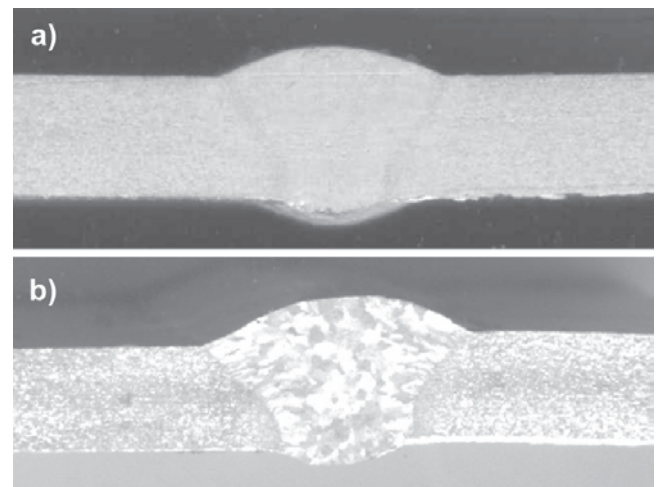


Figura 4. Structurile îmbinărilor cap la cap din aliaj AMg5M ($\delta = 3$ mm) obținute prin sudare cu fascicul laser CO₂ și a sârmei de adaos AMg6 (ϕ 1,2 mm): a) sudare laser ($P = 2$ kW, $v = 30$ m/h); b) sudare hibridă ($P = 2$ kW, $v = 120$ m/h, $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A; $U = 20$ V)./

Figure 4. The structures of the AMg5M ($\delta = 3$ mm) alloy butt joints obtained using the radiation of CO₂ laser and AMg6 filler wire (ϕ 1.2 mm): a) laser welding ($P = 2$ kW, $v = 30$ m/h); b) hybrid welding ($P = 2$ kW, $v = 120$ m/h, $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A; $U = 20$ V).

A comparison with laser welding showed that in hybrid welding the power of compressed arc partially replaces the power of laser radiation. For thin sheet aluminum alloys, this effect can be roughly estimated as a replacement for 1 kW of laser power with 1 kW of plasma power. Thus, the economic effect of replacing the laser welding with its hybrid analog is the significant reduction in the cost of laser equipment. It is

catodului de pelicula de oxid de pe suprafața probei. La sudarea hibridă de mare viteză pentru a se obține curățirea de calitate a catodului raportul duratei impulsului al polarității directe și inverse trebuie să se apropie de 1:1. Impulsurile de curent de polaritate inversă trebuie să fie de până la 70...100% din impulsurile de curent de polaritate directă.

4. Investigarea neomogenității chimice a îmbinărilor a relevat prezența arderii unor elemente ca magneziul și manganul în cazul sudurii hibride fără aditivi. Acest efect conduce la formarea porilor în îmbinările din metal turnat. Și mai mult, conținutul ridicat de hidrogen în îmbinările sudate influențează apariția porilor. Utilizarea sârmei de adaos a permis controlul procesului de îmbinare și eliminarea efectului de generare a porilor.

5. Aplicarea sudării hibride laser-plasma în cazul aliajelor de aluminiu permite creșterea cu 2÷4 ori a adâncimii de pătrundere în comparație cu sudarea laser și o creștere similară a vitezei de sudare în comparație cu sudarea cu plasmă.

6. Compararea efectelor la utilizarea laserului CO₂ și diodă a relevat faptul că prezența efectelor sinergice, legarea arcului de plasmă la zona de acțiune a fasciculului laser și stabilitatea sudării hibride de mare viteză sunt mai degrabă legate de gradul de focalizare a radiației laser decât de lungimea sa de undă.

7. Încercările de rezistență la tracțiune și impact ale componentelor din AMg3, AMg5, AMg6 și aliaje de tip 1915 au demonstrat avantajul procedurii hibrid față de procedeele cu laser și plasmă.

8. Perspectivele de viitor privesc utilizarea laserului cuplat cu fibră optică și a laserului Nd:YAG luând în considerare lungimea de undă de valoare mică și dimensiunea de focalizare a fasciculului laser, cât și flexibilitatea transmișiei prin fibră optică a fasciculului laser.

Bibliografie/ References

- [1]. xxx: *The technology of electric welding of metals and alloys by melting*, edited by B. Paton. Moscow: Mashinostroeniye, 1974, 768 p.
- [2]. Katayama, S., "Advances of hybrid laser-arc welding," *Welding technology*, vol. 56, no. 2, 2008, p. 51-58.
- [3]. Irving, B., "Automotive engineers plunge into tomorrow's joining problems," *Welding Journal*, vol. 73, no. 11, 1994, p. 47-50.
- [4]. Walduck, R. P., și Biffin, J., "Plasma arc augmented laser welding," *Welding and Metal Fabrication*, vol. 62, no. 4, 1994, p. 172-176.
- [5]. Dilthey, U., Wieschemann A., "Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes," *Rivista Italiana della Saldatura*, vol. 52, no. 6, 2000, p. 749-759.
- [6]. Krivtsun, I.V., "Modelling of hybrid laser-PTA processes and integrated plasma torches for their realization," *Proc. of the Int. Conf. on Laser Technologies in Welding and Materials Processing*, Katsiveli, Ukraine, 2003, p. 122-130.
- [7]. Krivtsun I. V., "Modelling hybrid plasma-laser processes and integrated plasmatrons," *Welding International*, vol. 18, no. 4. 2004, p. 268-276.
- [8]. Garashchuk, V.P, Kirsei, V.I, Shinkarev, VA, "Influence of the polarization of CO₂ laser radiation on the geometric parameters of a molten region in welding of metals," *Soviet Journal of Quantum Electronics*, vol. 16, no. 12, 1986, p. 1660-1662.

indeed reasonable, since the cost of plasma is usually much lower.

Welding of the AMn alloy ($\delta = 0.3$ mm) shaped tubes utilized as a constituent part of the glass packets provides the example of an industrial application of the developed technology. In the course of experiments conducted at the CO₂ laser radiation power of 1.5 kW and the welding current $I_{direct}/I_{reverse} = 100/50$ A the high-quality joint of this alloy was obtained at the welding speed of more than 1000 m/h. It should be noticed that in the case of CO₂ laser welding about 3...5 kW would be required to reach a similar speed.

3. Conclusion

1. In the range of parameters under consideration the optimal welding regimes correspond to welding speed at which the minimum reinforcing bead generation at the maximum power occurs. In most cases such regimes permit to obviate using the adding material in virtue of the volume expansion of the penetrated metal.

2. In hybrid welding with the use of diode laser radiation the ratio of laser and plasma powers should approach 1:1 or vary in the direction of increase in laser power. This is due to improvement in the stabilization process of welding in proportion to metal evaporation enhancement under the laser radiation.

3. In laser-plasma arc welding of aluminum alloys with heteropolar pulses the reverse polarity pulses ensure the cathode cleaning of oxide film on the sample surface. In high-speed hybrid welding in order to achieve high-quality cathode cleaning the pulse duration ratio of direct and reverse polarity should approach 1:1. The reverse polarity pulses current should amount up to 70...100% of the direct polarity pulse current.

4. The investigation of the chemical inhomogeneity of joints revealed the presence of burnout of such elements as magnesium and manganese in the case of hybrid welding without additives. This effect leads to the pore formation in the cast metal joints. Moreover, the high content of hydrogen in the welded joints affects the presence of pores. The use of filler wire allowed to control the process of joint alloying and eliminate the effect of pore generation.

5. Application of laser-plasma hybrid welding of aluminum alloys enables a 2 to 4 fold increase in the penetration depth compared to the case of laser welding and a similar increase in welding speed, as compared to plasma welding.

6. Comparison of effects of CO₂ and diode lasers application revealed that the presence of synergy, linking of the plasma arc to the area of the laser beam action and the stability of high-speed hybrid welding are rather related to the degree of laser radiation focusing than its wavelength.

7. Tensile strength and impact strength tests of AMg3, AMg5, AMg6 and 1915 aluminum alloy compounds have proved the advantage of a hybrid method to the laser and plasma ones.

8. Future prospects of the work progress concern the use of fiber and Nd:YAG-laser radiation taking into account the small wavelength and radiation focus spot, as well as a flexible optical fiber feed.

