

CERCETARE-DEZVOLTARE-INOVAR-PROIECTARE
RESEARCH-DEVELOPMENT-INNOVATION-DESIGN

Modul de răspuns al echipamentului la sudarea WIG pulsat a oțelului inoxidabil

Response of the welding power source in pulsed TIG welding of stainless steel

Damjan Klobčar¹, Nejc Markič¹, Drago Bračun¹, Luka Selak¹, Uroš Trdan¹, Aljaž Ščetinec², Timotej Debevec³, Aleksija Đurić⁴, Anamaria Feier^{5*}

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana

² Brinox d.o.o.

³ Enoop d.o.o.

⁴ University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo

⁵ Faculty of Mechanical Engineering, Politehnica University Timisoara

Rezumat

Această lucrare analizează influența parametrilor procesului de sudare WIG pulsat asupra răspunsului sursei de curent de sudare și, în consecință, asupra aportului de căldură și a geometriei sudurii. În studiul experimental s-a variat frecvența impulsului și proporția curentului de bază. Prin măsurarea curentului de sudare și a tensiunii arcului s-a analizat răspunsul sursei de curent, s-a determinat aportul de căldură și s-a examinat geometria sudurii. Rezultatele arată că, în special la frecvențe de impuls mai mari, sursa de curent nu reușește să urmeze forma de impuls intenționată sau să atingă valorile de curent definite. Acest lucru afectează direct aportul de căldură și geometria sudurii. Creșterea frecvenței impulsurilor până la 5 kHz are ca rezultat o adâncime a pătrunderii și o lățime a sudurii mai mari, în principal datorită aportului mai mare de căldură.

Cuvinte cheie

Sudare WIG pulsat, răspunsul echipamentului de sudare, curent de sudare, geometria depunerii prin sudare

Abstract

This research analyses the influence of welding parameters in pulsed TIG welding on the electrical response of the welding power source, and consequently on heat input and weld geometry. In the experiment, we varied pulse frequency and the proportion of base current. By measuring welding current and arc voltage, we analysed the response of welding power source, determined heat input, and examined weld geometry. The results show that, particularly at higher pulse frequencies, the welding power source fails to follow the intended pulse shape and fails to achieve set values of welding current. This directly affects heat input and weld geometry. Increasing pulse frequency up to 5 kHz results in higher weld penetration depths and weld width, mainly due to higher heat input.

Keywords

Pulsed TIG welding, welding power source response, welding current, welding voltage, weld bead geometry

1. Introducere

Sudarea cu electrod nefuzibil în mediu de gaz inert sau Wolfram Inert Gas (WIG) este utilizată în industrii precum cea aerospațială, chimică, de prelucrare, construcții navale, producere de energie, tehnologie medicală și auto, în principal datorită capacității sale de a produce suduri de înaltă calitate, precise

1. Introduction

Gas-shielded arc welding with a non-consumable tungsten electrode or Tungsten Inert Gas (TIG) welding is used in industries such as aerospace, chemical, processing, shipbuilding, power generation, medical technology and automotive, mainly due to its ability to produce high quality, precise and visually appeal-

și estetice, cu un arc stabil și aproape fără stropi [1]. Sudarea WIG este foarte eficientă pentru unele aplicații, în special la piese subțiri, unde sunt necesare o tensiune redusă a arcului și un aportul redus de căldură. Pe lângă acestea, sudarea WIG în regim pulsant (P-WIG) este o variantă avansată a procedurii WIG care utilizează un curent pulsant pentru un mai bun control al procesului [2].

În regimul pulsant de sudare WIG curentul alternează rapid între o valoare ridicată (curent de puls - I_p), care creează pătrunderea în materialul de bază și participă la formarea unui anumit contur al sudurii, și o valoare redusă (curent de bază - I_b) care asigură o ardere continuă arcului și facilitează răcirea băii de metal topit, reducând astfel aportul total de căldură [3,4]. Acest aport de căldură ciclic oferă numeroase avantaje față de sudarea WIG convențională cu curent continuu. Permite controlul precis al aportului de căldură, deoarece energia este furnizată în intervale scurte, facilitând disiparea eficientă a căldurii în metalul de bază, rezultând astfel o zonă influențată termic (ZIT) mai îngustă [5].

Sudarea WIG pulsant îmbunătățește semnificativ calitatea sudurilor și reduce apariția defectelor de tipul porozității, fisurării și deformării [6]. Ea favorizează rafinarea microstructurii și are ca rezultat structuri cu granulație mai fină care îmbunătățesc proprietățile mecanice, cum ar fi rezistența la tracțiune și ductilitatea, ceea ce se realizează prin cicluri termice și solidificare controlată a băii de metal [7]. Alte avantaje identificate sunt: o stabilitate crescută a arcului, o densitate energetică și o presiune a arcului mai mari, tensiuni remanente mai mici în suduri și o segregare redusă a elementelor, ceea ce reduce formarea fazelor fragile și susceptibilitatea la fisurare la cald în diverse aliaje [8,9]. Eficiența sudării WIG pulsant este influențată în mare măsură de capacitățile și performanțele sursei de putere pentru sudare. Sursele de sudare moderne, în special cele capabile să creeze pulsuri de înaltă (HF) și ultraînaltă (UHF) frecvență (uzual ≥ 20 kHz), sunt esențiale pentru aceste procese avansate [10,11]. Aceste surse de putere inovative care adesea conțin dispozitive electronice pe bază de carbură de siliciu (SiC), oferă o dinamică superioară și un control precis al formelor de undă ale curentului permițând o reglare flexibilă a pulsurilor [12]. Pulsurile UHF, de exemplu, reduc tensiunea medie a arcului, crescând în același timp presiunea de stagnare și constricția arcului (până la 260-290% comparativ cu procedeul WIG în curent constant) [13]. Acest lucru duce la o concentrare mai mare a energiei arcu-

ing welds with a stable arc and almost no spatter [1]. TIG welding is very effective for various applications, especially for thin sheets where the low arc voltage and heat input are an advantage.

Among these, pulsed TIG welding (P-TIG) is an important advanced version of the process that utilises a pulsed current for better process control [2].

In the pulsed TIG welding mode, the current alternates rapidly between a high value (pulse current - I_p), which creates penetration into the base material and participates in the formation of a certain weld contour, and a low value (base current - I_b) which ensures continuous arc burning and facilitates the cooling of the molten metal pool, thus reducing the total heat input [3,4]. This cyclical heat input offers numerous advantages over conventional TIG welding with direct current. It enables precise control of the heat input, as the energy is delivered in short intervals, allowing efficient heat dissipation into the base metal and resulting in a narrower heat-affected zone (HAZ) [5].

Pulsed TIG welding significantly improves the quality, of weld seams and reduces defects such as porosity, cracking, and distortion [6]. It promotes microstructure refinement, and results in finer grain structures that improve different mechanical properties such as tensile strength and ductility, which is achieved through thermal cycling and controlled solidification of the molten metal [7]. Other identified benefits of the process include an improved arc stability, a higher energy density and a higher arc pressure, a lower residual stresses in the weldments, and a minimised element segregation, which reduces the formation of brittle phases and also reduces the susceptibility to hot cracking in various alloys [8,9].

The effectiveness of pulsed TIG welding is greatly influenced by the capabilities of the welding power source. Modern power sources, especially those capable of pulsing at high frequency (HF) and ultra-high frequency (UHF) (typically ≥ 20 kHz), are critical to these advanced processes [10,11].

These innovative power sources, which often incorporate silicon carbide (SiC)-based power electronic devices, offer superior dynamics and precise control of current waveforms, allowing for flexible regulation of pulses [12].

UHF pulsing, for example, reduces the average arc voltage while significantly increasing the stagnation pressure and arc constriction (up to 260-290% compared to constant current TIG) [13]. This leads to a higher concentration of arc energy, a narrower arc,

lui, un arc mai îngust și o pătrundere mai mare [14]. Procedelee avansate, cum ar fi WIG cu impulsuri de curent sinusoidale de înaltă frecvență (HFSWP DC WIG), au demonstrat o pătrundere aproape dublă în comparație cu WIG convențional, precum și o presiune a arcului și o eficiență termică îmbunătățite prin principiile rezonanței LC [15]. Aceste progrese tehnologice elimină limitările, cum ar fi pătrunderea redusă și energia difuză, specifice sudării WIG convenționale [16]. Oțelurile inoxidabile, utilizate în diverse aplicații, de la sisteme de evacuare pentru automobile până la industria farmaceutică, alimentară, medicală și petrochimică, sunt principalele materiale sudate prin procedeul WIG, alături de aliajele de aluminiu, titan și superaliaje [17]. Anumite tipuri, cum ar fi oțelurile inoxidabile feritice AISI 316L, 304L, 409L și 444, „preferă” acest procedeu datorită faptului că atenuează problemele cauzate de conductivitatea termică redusă și de ZIT extinse, specifice sudării convenționale [18,19]. Având în vedere dezvoltarea continuă a surselor pentru sudare, în special în ceea ce privește modularea precisă a formei de undă a curentului, optimizarea în continuare a calității și eficienței sudării rămâne un obiectiv important [20]. Articolul investighează răspunsul sursei de sudare la diferiți parametri de puls și efectul acestora asupra aportului de căldură și dimensiunilor sudurii în aplicațiile care folosesc oțel inoxidabil.

2. Metodologie

2.1 Proprietățile materialului de bază

Materialul utilizat în experimentări a fost oțelul inoxidabil martensitic SIST EN X20Cr13 (AISI 420) cu dimensiunile 110 × 70 × 5 mm. Oțelurile inoxidabile martensitice conțin 12-18% crom și 0,1-1,2% carbon. Compoziția chimică (% masice) a oțelului selectat este prezentată în tabelul 1.

Tabelul 1. Compoziția chimică a X20Cr13 (w. %) [SIJ]
Table 1. Chemical composition of X20Cr13 (w. %) [SIJ]

	C	Si	Mn	Cr
%	0,20	max. 1,50	max. 1,50	13,0

Proprietățile mecanice și fizice ale oțelului utilizat au fost: densitate $\rho = 7,73 \text{ g/cm}^3$; modul de elasticitate $E = 216 \text{ GPa}$ (20°C) – 190 GPa (400°C); conductivitate termică $\lambda = 30 \text{ W/(m K)}$; rezistență electrică $\zeta = 60 \text{ }(\Omega\text{-mm}^2)/\text{m}$; căldură specifică $c = 0,46 \text{ J/(g K)}$; rezistență la tracțiune $R_m = 700\text{--}850 \text{ MPa}$; alungire $\epsilon = 13\%$ (20°C).

and deeper penetration [14].

Advanced processes such as high frequency sinusoidal shape wave pulse DC TIG (HFSWP DC TIG) have shown almost twice the penetration depth compared to conventional TIG, as well as improved arc pressure and thermal efficiency through LC resonance principles [15]. These technological advances eliminate limitations such as low penetration and diffuse energy in conventional TIG welding [16].

Stainless steels, which are used in numerous applications from automotive exhausts to, the pharmaceutical, food processing, medical and petrochemical industries, are the main materials welded using TIG welding, along with aluminium alloys, titanium and superalloys [17].

Certain grades such as AISI 316L, 304L, 409L, and 444 ferritic stainless steels benefit from this process, which alleviates the problems caused by their low thermal conductivity and susceptibility to large HAZ in conventional welding [18,19]. Paying attention to the continuous development of welding power sources, particularly in the precise modulation of the current waveform, further optimisation of welding quality and efficiency remains an important goal [20].

This paper investigates the response of the selected welding power source to different pulse parameters and their effect on heat input and characteristic weld dimensions in stainless steel applications.

2. Methodology

2.1 Properties of base material

The material used for the experimental program was the martensitic stainless steel SIST EN X20Cr13 (AISI 420), dimensions 110 × 70 × 5 mm. Martensitic stainless steels contain 12–18% chromium and 0.1–1.2% carbon. The chemical composition (weight %) is shown in table 1.

The mechanical and physical properties of the steel used were: density $\rho = 7.73 \text{ g/cm}^3$; modulus of elasticity $E = 216 \text{ GPa}$ (20°C) – 190 GPa (400°C); thermal conductivity $\lambda = 30 \text{ W/(m K)}$; electrical resistance $\zeta = 60 \text{ }(\Omega\text{-mm}^2)/\text{m}$; specific heat $c = 0.46 \text{ J/(g K)}$; tensile strength $R_m = 700\text{--}850 \text{ MPa}$; elongation $\epsilon = 13\%$ (20°C).

2.2 Cercetarea experimentală

Experimentele au fost realizate cu o sursă iWave 500i AC/DC care permite frecvențe de puls de până la 10 kHz. Sudarea a fost realizată utilizând un sistem automatizat care asigură o viteză constantă de sudare (12,2 cm/min) și o distanță constantă între electrod și piesa de lucru (2 mm). Alți parametri au fost: unghiul de înclinare al pistolului WIG 90°; polaritatea electrodului negativă; electrodul nefuzibil a fost WLa15, Ø2,4 mm; lungimea electrodului 175 mm; gaz de protecție Ar 4.8, debit 10 l/min; dimensiunea duzei 10; formă de puls pătrată.

În prima parte a experimentelor s-a definit valoarea curentului de puls la $I_p = 150$ A; durata relativă a curentului de puls $DR\% = 50\%$; valoarea curentului de bază $I_b = 50\%/75$ A și s-a modificat frecvența pulsului de la 0,5 Hz la 10 kHz și s-au comparat rezultatele cu cele specifice sudării cu un curent DC constant cu valoarea de referință de 112,5 A care reprezintă o valoare medie între curentul de puls și cel de bază cu o durată relativă de 50%. În a doua serie de teste, investigațiile au fost efectuate la 1 kHz și 2 kHz, variind procentul curentului de bază de la 10% la 80%, astfel încât diferențele dintre cei doi curenți să devină mai mari. Curentul de sudare a fost măsurat cu un senzor Hall HTFS 400-P/SP2, iar pentru măsurarea tensiunii arcului a fost utilizat un divizor de tensiune cu o diviziune de 1:10. Polul său liber (negativ) a fost conectat numai după amorsarea arcului, pentru a evita o eventuală supraîncărcare a componentelor de măsurare, iar polul pozitiv a fost conectat la piesa de sudat. Aceste valori au fost înregistrate folosind un osciloscop InfiniiVision DSO-X 3014A conectat la tensiunea de rețea printr-un transformator de izolare, pentru a evita eventualele interferențe și a permite luarea măsurilor de protecție. Înainte de fiecare măsurătoare, piesa de sudat a fost curățată cu acetonă, fixată pe o bancă de lucru și sudată complet. Arcul a fost aprins cu un dispozitiv de înaltă frecvență și înaltă tensiune, iar viteza de sudare a fost menținută constantă la 12,2 cm/min. După amorsarea arcului, cablul neconectat al divizorului de tensiune a fost conectat la piesa de sudat, permițând măsurarea tensiunii arcului. Pentru măsurarea de referință s-a efectuat mai întâi sudarea WIG cu un curent continuu constant de $I = 112,5$ A, apoi s-a modificat frecvența pulsului și componenta curentului de bază, așa cum se arată în tabelul 2.

S-a utilizat osciloscopul pentru a înregistra și monitoriza măsura în care răspunsul sursei de putere era încă comparabil cu forma teoretică a unui puls cu undă pătrată.

2.2 Experimental research

The experiments were carried out with a iWave 500i AC/DC source, which enables pulse frequencies of up to 10 kHz. Welding was carried out using an automated system that ensures a constant welding speed (12.2 cm/min) and a constant distance between the electrode and the workpiece (2 mm). Other parameters were: torch inclination angle 90°; electrode polarity negative; the used non-fusible electrode was WLa15, Ø2.4 mm; electrode length 175 mm; shielding gas Ar 4.8, gas flow rate 10 l/min; nozzle size 10; square pulse shape.

In the first part of the experiments, it was set the pulse current value to $I_p = 150$ A; pulse current duty cycle $DC\% = 50\%$; base current value $I_b = 50\%/75$ A and changed the pulse frequency from 0.5 Hz to 10 kHz and compared the results with a DC reference welding current of 112.5 A, which represents an average value between the pulse current and the base current with a duty cycle of 50 %. In the second series of tests, investigations were carried out at 1 kHz and 2 kHz, varying the percentage of base current from 10% to 80%, so that the differences between the two currents became greater. The welding current was measured with a Hall sensor HTFS 400-P/SP2, and a voltage divider with a division of 1:10 was used to measure the welding voltage. Its free pole (negative) was connected only after the arc was struck to avoid possible overloading of measurement components, and the positive pole was connected to the welding workpiece. These values were recorded using an InfiniiVision DSO-X 3014A oscilloscope connected to the mains voltage via an isolating transformer to avoid possible interference and enabling protective measures.

Before each measurement, the workpiece to be welded was cleaned with acetone, clamped on a workbench and fully welded. The arc was ignited with a high-frequency high-voltage device, and the welding speed was constant at 12.2 cm/min. After the arc was ignited, the unconnected cable of the voltage divider was connected to the workpiece, allowing the welding voltage to be measured.

For the reference measurement, it was first carried out TIG welding with a constant direct current of $I = 112.5$ A and then changed the pulse frequency and the base current component as shown in table 2.

It was used the oscilloscope to record and monitor the extent to which the response of the welding current source was still comparable to the theoretical shape of a square-wave pulse. The measurement data was

Tabelul 2. Parametri setați pentru o măsurare individuală efectuată cu Fronius iWave 500iAC/DC
Table 2. Set parameters for an individual measurement performed with the Fronius iWave 500iAC/DC

Măsurare / Measurement	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f [Hz]	0,5	500	1000	2000	5000	10000	1000	2000	2000
I _b [%]	50	50	50	50	50	50	10	10	85

Datele de măsurare au fost prelucrate în sensul filtrării zgomotului cu un filtru Butterworth, apoi convertite corespunzător în Excel, iar energia liniară a fost calculată folosind relația (1):

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad (1)$$

U reprezintă tensiunea arcului în [V], I este curentul de sudare în [A], iar v reprezintă viteza de sudare care a fost constantă la 12,2 cm/min în toate testele.

De asemenea, trebuie subliniat faptul că, datorită periodicității semnalului în timpul sudării pulsate, s-au utilizat pentru calcul valorile medii pătrate (RMS) ale curentului de sudare și ale tensiunii arcului.

Astfel, s-au obținut valorile medii ale ariei de sub curbele curentului și tensiunii. Pentru a determina și compara forma, adâncimea și lățimea sudurii, precum și aria materialului topit și, astfel, pentru a evalua în mod cuprinzător aportul de căldură, probele au fost secționate transversal la 20 mm de la începutul sudurii, utilizând un ferăstrău circular. Probele pregătite în acest mod au fost șlefuite cu hârtie abrazivă având granulație succesivă până la 4000 și curățate apoi cu etanol. A urmat un atac cu apă regală (1 parte HNO₃ și 3 părți HCl) timp de 8-10 secunde și curățare din nou cu etanol.

Imaginile secțiunilor transversale au fost prelevate cu ajutorul microscopului optic digital VHX-6000, iar dimensiunile sudurilor au fost analizate cu ajutorul software-ului ImageJ.

3. Rezultate și discuții

În continuare se prezintă rezultatele și se discută influența frecvenței pulsurilor și a curentului de bază asupra comportamentului sursei de putere și asupra dimensiunilor caracteristice ale sudurii.

3.1 Influența parametrilor de sudare asupra răspunsului sursei de sudare

3.1.1 Influența frecvenței pulsurilor

Măsurătorile au arătat că frecvența pulsurilor are o influență semnificativă asupra răspunsului curentului de sudare furnizat de sursa de putere, așa cum se poate observa din diagramele obținute de la osciloscop și prezentate în figura 1.

noise-filtered using a Butterworth filter and then converted accordingly in Excel and the heat input calculated using relationship (1):

U stands for the welding voltage in [V], I for the welding current in [A] and v for the welding speed, which was constant at 12.2 cm/min in all tests. It should also be emphasized that due to the periodicity of the signal during pulse welding, it was used the Root Mean Square (RMS) values of the welding current and welding voltage measurements for the calculation. This provided the average values of the area under the welding current and welding voltage curves. In order to determine and compare the shape, depth and width of the weld bead and the area of the melted material and thus comprehensively evaluate the heat input, the samples were sectioned crosswise 20 mm from the start of the weld using a circular saw.

The samples prepared in this way were ground to the appropriate roughness (4000 grit sandpaper) and cleaned with ethanol. They were then etched in aqua regia (1 part HNO₃ and 3 parts HCl) for 8 to 10 seconds and then cleaned again with ethanol.

Images of the cross-sections were taken using the VHX-6000 optical digital microscope and the dimensions of the weld seams were analysed using ImageJ software.

3. Results and discussions

The next chapter presents the results and discusses the influence of the pulse frequency and the base current on the behaviour of the power source and the dimensions of weld seam.

3.1 Influence of the welding parameters on the response of the welding power source

3.1.1 Influence of the pulse frequency

The measurements have shown that the frequency has a significant influence on the response of the welding current supplied by the welding power source, as can be seen from the diagrams obtained from the oscilloscope in figure 1.

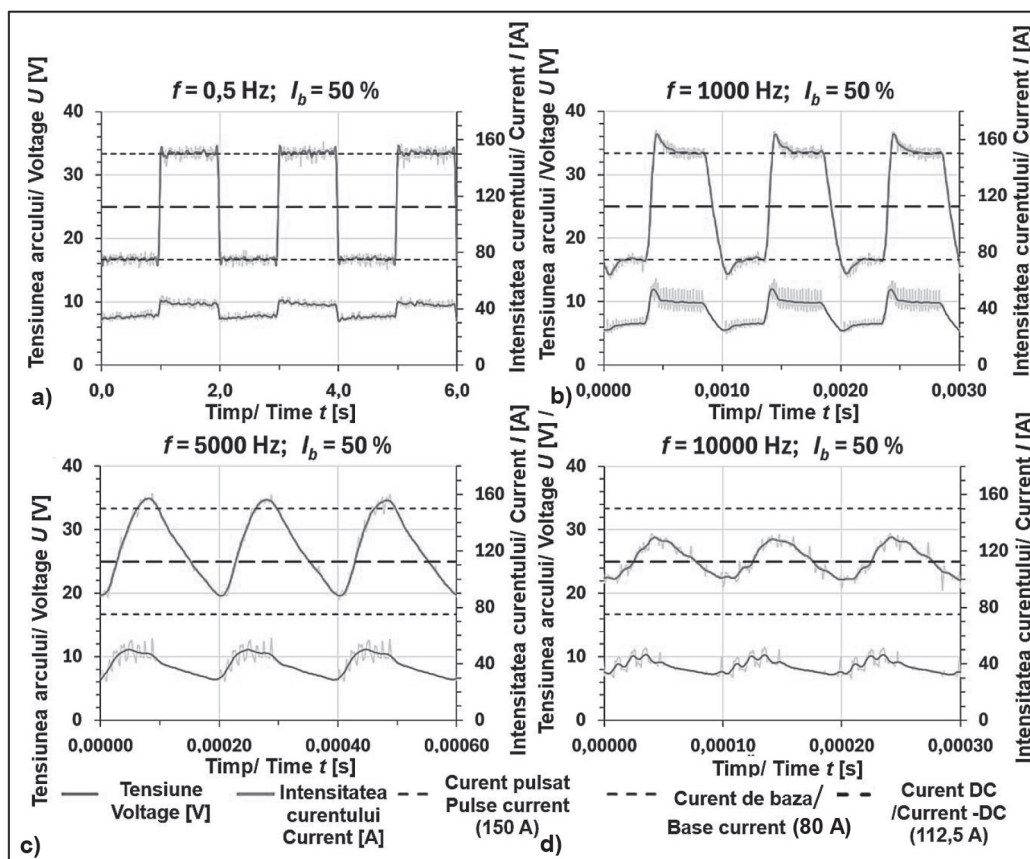


Figura 1. Diagrame ale comportamentului de răspuns al sursei de putere pentru sudare în raport cu curentul de sudare și tensiunea de sudare la diferite frecvențe de impuls de la 0,5 Hz la 10 kHz

Figure 1. Diagrams of the response behaviour of the welding power source in relation to welding current and welding voltage at different pulse frequencies from 0.5 Hz to 10 kHz

Valorile curentului de puls și ale curentului de bază sunt indicate cu linii punctate negre în figura 1. Rezultatele arată că până la o frecvență de 1 kHz (figura 1b)), sistemul atinge în continuare cu succes valorile țintă ale curentului de puls și de bază, cu forma corectă a unei pătrate a curentului de sudare și tensiunii arcului. La frecvențe de 1 kHz (figura 1b) și 5 kHz (figura 1c), se poate observa o depășire mai mică a curentului și tensiunii. Sursa de putere atinge doar valoarea țintă a curentului de puls, dar nu și valoarea de bază a curentului de sudare, deoarece este forțată să furnizeze frecvența definită a pulsurilor. La frecvența de 10 kHz (figura 1c), sistemul nu atinge forma dreptunghiulară dorită pentru valorile măsurate, ci oferă o formă de puls semnificativ mai slabă. Acest lucru arată că sursa de putere nu este capabilă să furnizeze o modificare a parametrilor de sudare din cauza timpului limitat disponibil pentru modificarea dorită, deoarece rata sa de creștere și de scădere este limitată. Figurile 1b-c arată că viteza de creștere și cea de scădere a parametrilor de sudare sunt diferite, viteza de creștere fiind mai mare decât cea de scădere.

La frecvențe foarte mari, adică la 10 kHz (figura 1d),

The values of the pulsed and base current are shown as black dotted lines.

The results show that up to a frequency of 1 kHz (figure 1b), the system still successfully achieves the target values of pulsed and base current with the correct square wave shape of welding current and welding voltage.

At frequencies of 1 kHz (figure 1b) and 5 kHz (figure 1c), a lower overshoot of the current and voltage can be observed. The power source only achieves the target value of the pulse current, but not the base value of the welding current, as it is forced to deliver the correct pulse frequency. At frequency of 10 kHz (figure 1c), the system does not achieve the desired rectangular shape of the measured values but delivers a significantly poorer pulse shape. This shows that the welding power source is unable to deliver a change in welding parameters due to the limited time available for the desired change in welding parameters, as its rise and fall rate is limited. Figures 1b-c also show that the rise rate and fall rate of the welding parameters are different, with the rise rate being much faster than the fall rate.

At very high frequencies, i.e. at 10 kHz (figure 1d),

marja dintre curentul de puls și curentul de bază este și mai mică. Aici, sursa de putere nu atinge nici măcar valoarea țintă a curentului de puls. În schimb, curentul de puls și curentul de bază se deplasează în jurul valorii RMS medii, adică un curent continuu constant de 112,5 A cu o amplitudine de aproximativ 14 A. Acest lucru indică faptul că sursa de putere trece la condiții de sudare cu un curent continuu constant, în condițiile menționate mai sus.

3.1.2 Influența curentului de bază

Timpul disponibil pentru modificarea pas cu pas a parametrilor de sudare joacă un rol decisiv în răspunsul optim al sursei de putere pentru sudare. Pentru a clarifica influența diferitelor valori ale curentului de bază țintă, s-au efectuat măsurători la frecvențele de 1 kHz și 2 kHz, modificând setarea curentului de bază la 10%, 50% și 85% din valoarea curentului de puls de 150 A. Aceste valori sunt reprezentate prin linii punctate negre în figura 2. Rezultatele arată că o creștere a diferenței dintre curentul de puls și curentul de bază afectează în mod semnificativ comportamentul de răspuns în sine, astfel încât în toate exemplele prezentate, cu excepția celui de 2 kHz și a curentului de bază de 85% (figura 2d), nu se obține pulsul de undă pătrată dorit. Motivul rezidă din nou în viteza limitată de creștere și scădere a sursei de alimentare care permite o diferență mai mare între puls și valoarea curentului de bază. După cum se poate observa din diagrama din figura 2a), sursa de putere continuă să atingă un comportament de răspuns acceptabil la o frecvență de 1 kHz, chiar și cu o diferență mai mare între curentul de puls și curentul de bază, adică la valori scăzute ale curentului de bază de 10% sau 15 A. La 2 kHz, forma și valorile curentului de arc sunt garantate numai la un curent de bază ridicat (85% sau 135,5 A- figura 2d), adică la o diferență mai mică între valorile curentului de puls și cele ale curentului de bază.

O creștere a diferenței dintre curentul de puls și cel de bază la 2 kHz modifică forma curentului de puls. La valoarea definită a curentului de bază de 50% sau 75 A, se atinge valoarea de bază (figura 2c), în timp ce la 10% sau 15 A, valoarea minimă a curentului de bază atinge doar aproximativ 35 A. Frecvența de 1 kHz poate fi, prin urmare, definită ca limita superioară la care sursa de putere reacționează în mod satisfăcător la diferite valori ale curentului de bază.

3.1.3 Influența frecvenței pulsurilor și a curentului de bază asupra curentului de sudare al sursei de putere
Figura 3 arată influența frecvenței pulsurilor (între

the margin between pulse and base current is even smaller. Here, the power source does not even reach the target value of the pulse current. Instead, the pulse and base current move around the averaged RMS value, i.e. a constant DC current of 112.5 A with an amplitude of approx. 14 A. This indicates that the welding power source transitions to welding conditions with a constant DC current in the mentioned conditions.

3.1.2 Influence of the base current

The time available for the step-by-step change of the welding parameters plays a decisive role in the optimum response of the welding power source.

To make the influence of the different target base current values clearer, we carried out measurements at the frequencies of 1 kHz and 2 kHz, by changing the base current setting at 10%, 50% and 85% of the pulsed current value of 150 A. These values are shown as black dashed lines in figure 2. The results show that increasing the difference between the pulsed and base current significantly affects the response behaviour itself, so that in all the examples shown, except at 2 kHz and a base current of 85% (figure 2d), the desired square wave pulse is not achieved. The reason again lies in the limited rise and fall speed of the power source, which allows a greater difference between the pulse and the base current value. As can be seen from the diagram in figure 2a), the power source still achieves acceptable response behaviour at a frequency of 1 kHz, even with a greater difference between pulsed and base current, i.e. at low base current values of 10% or 15 A. At 2 kHz, the arc current shape and values are only guaranteed at a high base current (85% or 135.5 A- figure 2d), i.e. with a smaller difference between pulsed and base current values.

An increase in the difference between the pulse and base current at 2 kHz changes the shape of the pulse current. At the set value of the base current of 50% or 75 A, the base value is reached (figure 2c), while at 10% or 15 A, the minimum base current value only reaches approx. 35 A.

The frequency of 1 kHz can therefore be defined as the upper limit at which the welding power source still reacts satisfactorily at different values of the base current.

3.1.3 Influence of the pulse frequency and the base current on the welding current of the power source
Figure 3 shows the influence of the pulse frequency

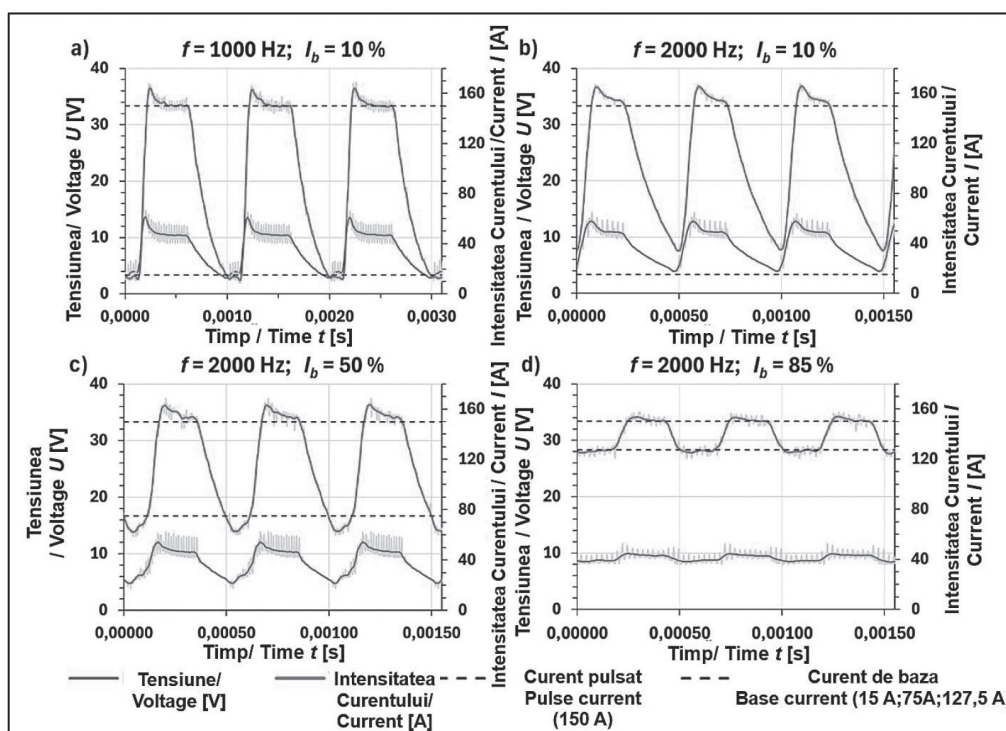


Figure 2. Diagrame ale răspunsului puterii de sudare și tensiunii de sudare ale sursei de alimentare pentru sudare pentru diferite valori ale curentului de bază, la frecvențe de la 1 la 2 kHz

Figure 2. Diagrams of the welding power and welding voltage response of the welding power source for different values of the base current, at frequencies from 1 to 2 kHz

0,5 Hz și 10 kHz) și a componentei curentului de bază, la frecvența pulsurilor de 2 kHz asupra vitezei de creștere (coloane albastre) și a vitezei de scădere (coloane roșii) a curentului de sudare în kA/s. Se poate observa că sursa de putere atinge mai mult sau mai puțin forma dreptunghiulară a curentului de sudare și valorile dorite ale curentului de puls și de bază atunci când ambele valori ale vitezelor de creștere și scădere ale curentului de sudare sunt egale și mai mici decât aproximativ 500 kA/s (figura 3a). Forma dreptunghiulară a pulsului este distorsionată în timpul primei schimbări între viteza de creștere și cea de scădere și este distorsionată și mai mult dacă aceste schimbări sunt mai mari. Sursa de putere analizată are o viteză de creștere limitată a curentului de sudare de aproximativ 1570 kA/s și o viteză de scădere limitată a curentului de sudare de aproximativ 570 kA/s. La frecvențe ale pulsurilor de 5 kHz și mai mari, viteza de creștere începe să scadă spre 1000 kA/s, în timp ce viteza de scădere crește ușor la 610 kA/s. Același efect poate fi observat și la frecvențe mai mici de 2 kHz, când se modifică valoarea curentului de bază (figura 3b). Când diferența dintre curentul de puls și cel de bază crește la valori mai mari, iar sursa de putere nu poate atinge o formă dreptunghiulară a curentului pulsului, vitezele de creștere și de scădere ale curentului încep să difere.

(between 0.5 Hz and 10 kHz) and the base current component at 2 kHz pulse frequency on the rate of rise (blue columns) and the rate of fall (red columns) of the welding current in kA/s. It can be seen that the power source more or less achieves the rectangular shape of the welding current and the desired values of the pulse and base current when both values of the rise and fall rates of the welding current are equal and less than approx. 500 kA/s (figure 3a). The rectangular shape of the pulse is distorted during the first change between rising and falling speed, and it is distorted even more if these changes are greater. The analysed welding power source has a limited rising rate of the arc current of approx. 1570 kA/s and a limited falling rate of the arc current of approx. 570 kA/s. At pulse frequencies of 5 kHz and higher, the rate of rise begins to decrease towards 1000 kA/s, while at the same time the rate of fall increases slightly to 610 kA/s. The same effect can also be observed at lower frequencies of 2 kHz when the value of the base current is changed (figure 3b). When the change between pulse current and base current increases to larger values, and the power source cannot achieve a rectangular shape of the pulse current, the rise and fall rates of the arc current start to differ.

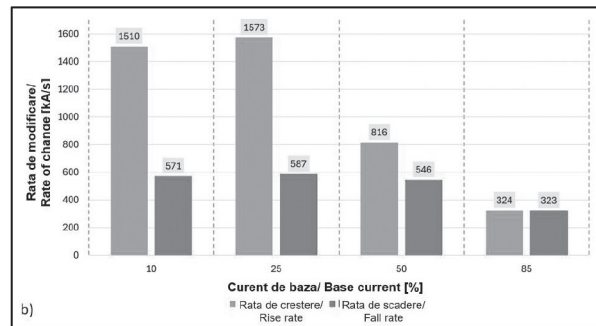
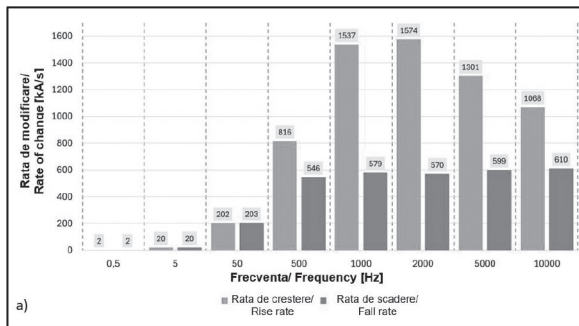


Figura 3. a) Influența frecvenței impulsului (între 0,5 Hz și 10 kHz) și b) proporția curentului de bază la o frecvență a impulsului de 2 kHz asupra vitezei de creștere și scădere a curentului de sudare

Figure 3. a) The influence of the pulse frequency (between 0.5 Hz and 10 kHz) and b) the proportion of the base current at a pulse frequency of 2 kHz on the rate of rise and fall of the welding current

3.2 Influența frecvenței impulsurilor asupra aportului de căldură liniar

Figura 4 arată influența frecvenței pulsurilor asupra valorilor RSM ale curentului de sudare, tensiunii arcului și energiei liniare calculate cu ecuația 1. Se poate observa că modificările energiei liniare urmează modificările răspunsului sursei de putere (figura 1). Forma răspunsurilor afectează valoarea integrată sau aria de sub curbele curentului de sudare și tensiunii arcului, ceea ce se reflectă în valorile RMS ale curentului și tensiunii măsurate. Aceste valori sunt variabile cheie pentru calcularea aportului termic liniar. Pe măsură ce frecvența crește, valoarea RMS a curentului de sudare crește, ceea ce este evident în special peste o frecvență de 1 kHz, deoarece sursa de putere utilizată nu atinge valoarea țintă a curentului de bază. La o frecvență de 10 kHz, sursa de putere nu atinge nici valoarea țintă a curentului de puls, astfel încât valorile efective ale curentului de sudare și tensiunii arcului scad semnificativ, ceea ce reduce și aportul liniar de căldură.

3.2 Influence of the pulse frequency on the linear heat input

Figure 4 shows the influence of the pulse frequency on the RSM values of welding current; welding voltage and linear heat input calculated with equation 1. The changes in linear heat input follow the changes in the response of the power source (figure 1). The shape of the responses affects the integrated value or area under the welding current and voltage curves, which is reflected in the RMS values of the measured welding current and voltage. These values are key variables for calculating the linear heat input. As the frequency increases, the RMS value of the current increases, which is particularly evident above a frequency of 1 kHz, as the welding source does not reach the target value of the base welding current. At a frequency of 10 kHz, the power source does not reach the target value of the pulse welding current either, so that the effective values of the welding current and the welding voltage decrease significantly, which also reduces the linear heat input.

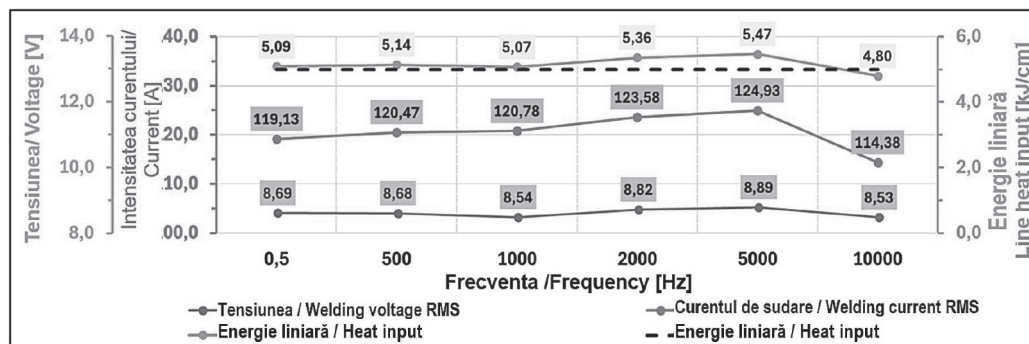


Figura 4. Efectul frecvenței impulsurilor asupra aportului liniar de căldură

Figure 4. Effect of the pulse frequency on the linear heat input

3.3 Efectul frecvenței pulsurilor asupra geometriei sudurii

Figura 5 prezintă aspectul suprafeței sudurii la diferite frecvențe de puls. Este prezentat, de asemenea, aspectul unei suduri realizate cu curent constant

3.3 Effect of the pulse frequency on the weld seam geometry

Figure 5 shows the appearance of the weld face appearance at different pulse frequencies. The appearance of a weld performed with constant current

(112,5 A). O analiză vizuală a aspectului suprafeței sudurii arată clar că la frecvența foarte scăzută de 0,5 Hz influența curentului de puls și a celui de bază afectează lățimea sudurii, în timp ce la toate celelalte frecvențe, precum și cu curent continuu valorile sunt similare. Toate probele sudate au fost secționate o singură dată, cu excepția eșantionului realizat la o frecvență de 0,5 Hz, care a fost tăiat de două ori, în punctul cel mai îngust (figura 5 – b) (1)) și cel mai lat (figura 5 – c) (2)) al suprafeței sudurii.

(112.5 A) is also presented. A visual analysis of the appearance of the weld face clearly shows that at the very low frequency of 0.5 Hz the influence of the pulse and the base current affect the weld width, while at all other frequencies and with direct current the values are similar. All test welds were cut once, except for the sample at a frequency of 0.5 Hz, which was cut twice, at the narrowest (figure 5 – b) (1)) and the widest (figure 5 – c) (2)) point of the weld face.

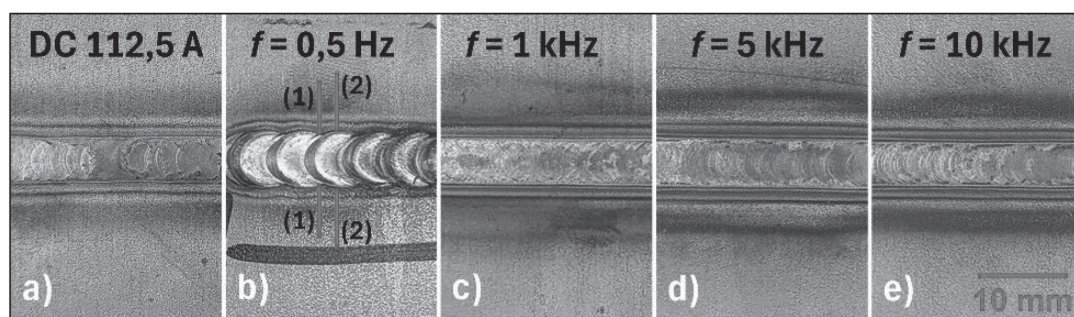


Figura 5. Aspectul suprafeței sudurii la diferite frecvențe de impuls
Figure 5. Appearance of the weld surface at different pulse frequencies

Caracteristicile geometrice se modifică de-a lungul sudurii, iar aceste valori sunt semnificativ mai mari în zona curentului de puls, după cum se poate observa din secțiunile transversale (figura 6) și din graficul din figura 7. Această influență nu mai este pronunțată peste o frecvență de 5 Hz, datorită vitezei mai mari a pulsului.

The geometric characteristics change along the weld itself, and these values are significantly higher in the pulse current region, as can be seen from the cross-sections (figure 6) and the plot in figure 7. This influence is no longer pronounced above a frequency of 5 Hz due to the higher pulse speed.

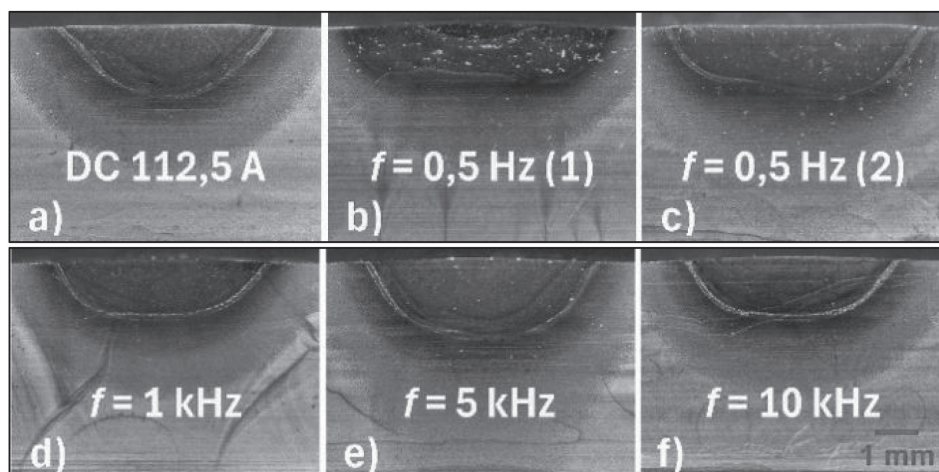


Figura 6. Ilustrare a aspectului suprafeței sudurii la diferite frecvențe de puls
Figure 6. Illustration of the weld face appearance at different pulse frequencies

Cu toate acestea, figura 6 arată că suprafața materialului topit diferă între frecvențele individuale, în special la 0,5 Hz.

În același timp, partea inferioară a sudurii (rădăcina sudurii) devine mai plată și mai lată, în comparație cu sudura realizată în curent continuu. Suprafața sudurii și valorile caracteristicilor geometrice ale sudurii sunt în concordanță cu valorile energiei liniare și cu răspunsurile corespunzătoare ale sursei de alimentare

However, figure 6 shows that the surface of the melted material differs between the individual frequencies, especially at 0.5 Hz.

At the same time, the lower part of the weld seam, i.e. the weld root, becomes flatter and wider, compared to the weld seam welded with direct current. The weld surface and weld characteristic values are consistent with the values of the linear heat input and the corresponding responses of the welding

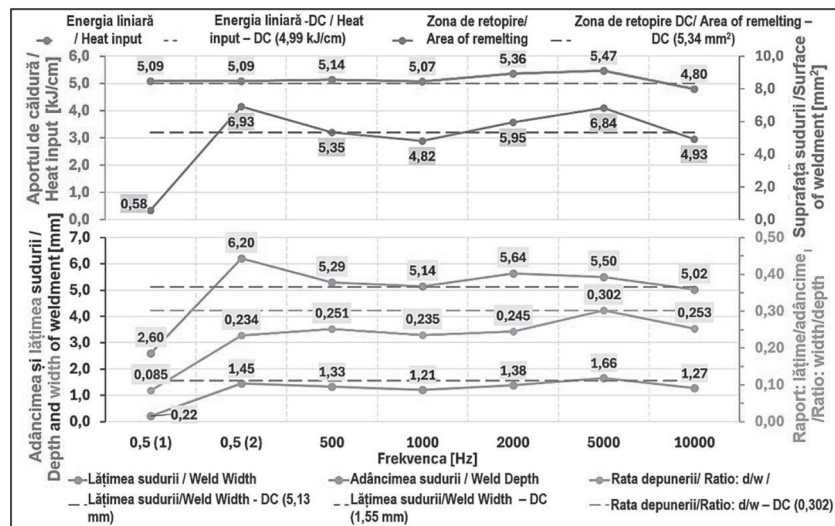


Figura 7. Compararea energiei liniare, a suprafeței sudurii, a adâncimii și lățimii sudurii și a raportului dintre lățimea și adâncimea sudurii în funcție de frecvența impulsului

Figure 7. Comparison of the linear heat input, weld surface area, the weld depth and width and the ratio between weld width and depth as a function of the pulse frequency

pentru sudare prezentate în figura 7. În aceeași figură, culorile liniilor punctate corespund culorilor variabilelor urmărite.

Pătrunderea și lățimea sudurilor se modifică, de asemenea, în funcție de energia liniară, dar pe baza raportului dintre acestea, nu se poate afirma că o frecvență mai mare a pulsurilor contribuie la o pătrundere mai mare a sudurii, așa cum se confirmă în studiul [3].

4. Concluzii

Studiul include o analiză a influenței frecvenței pulsurilor reglată la sudarea WIG pulsant a oțelului inoxidabil martensitic 20XCr13 asupra răspunsului sursei de putere utilizate pentru sudare și, în consecință, asupra aportului liniar de căldură și geometria caracteristică a sudurii.

Această analiză generează următoarele concluzii:

1) Creșterea frecvenței de pulsare și diferența dintre valorile de bază și de puls ale curentului de sudare și tensiunii arcului împing sursa de putere către limitele sale și influențează în mod semnificativ comportamentul de răspuns al acesteia atinsă. Dacă frecvența pulsurilor de formă dreptunghiulară este crescută peste 1 kHz la 50% din curentul de bază, forma pulsului începe să se distorsioneze, ceea ce afectează aportul liniar de căldură. Până la 5 kHz, viteza de scădere a curentului de sudare devine prea mică, și nu se atinge valoarea curentului de bază. La frecvențele cele mai ridicate (10 kHz) sursa de putere nu atinge nici măcar valoarea curentului de puls reglată, ceea ce înseamnă un aport de căldură mai mic.

power source shown in figure 7. In the same figure, the colours of the dashed lines correspond to the colours of the tracked variables.

The depth and width of the welds also change as a function of the linear heat input, but based on their ratio, it cannot be claimed that a higher pulse frequency contributes to a higher weld penetration depth, as confirmed in the study [3].

4. Conclusions

The investigation includes an analysis of the influence of the set pulse frequency in pulsed TIG welding of martensitic stainless steel 20XCr13 on the response of the welding power source and consequently on the linear heat input and the characteristic welding geometry.

This analysis leads to the following conclusions:

1) The pulsation frequency and the difference between the base and pulse values of the welding current and the welding voltage push the welding power source to its limits and significantly influence the response behaviour of the welding power source. The pulsation frequency is always reached. If the pulse frequency of the rectangular pulse shape is increased above 1 kHz at 50% base current, the pulse shape begins to distort, which impairs the linear heat input. Up to 5 kHz, the falling rate of the arc current becomes too slow, and the base current value is not reached. At the highest frequencies (10 kHz) the welding power source does not even reach the set pulse current value, resulting in lower heat input.

2) Dacă ambele valori ale vitezei de creștere și de scădere a curentului de sudare sunt egale și sub aproximativ 500 kA/s sursa de putere atinge forma dreptunghiulară a curentului de sudare și valorile dorite ale curentului de puls și de bază. La modificări mai mici între aceste viteze, forma pulsului este distorsionată, iar dacă aceste modificări sunt mai mari, valorile țintă pentru curentul de puls și cel de bază nu sunt atinse. Sursa de putere analizată are o viteză limitată de creștere a curentului de sudare de aproximativ 1570 kA/s și o viteză limitată de scădere de aproximativ 570 kA/s.

3) La frecvențe de impuls reduse, duratele curentului de puls și curentului de bază sunt mai lungi și influențează modificarea geometriei sudurii. La frecvențe de puls mai mari, această influență asupra geometriei sudurii nu este vizibilă datorită frecvenței ridicate a pulsurilor.

4) Prin creșterea frecvenței pulsurilor (până la 5 kHz), se obține o pătrundere și o lățime a sudurii mai mari, deoarece limitarea răspunsului sursei de putere pentru sudare afectează aportul liniar de căldură. Caracteristicile dimensionale ale sudurii sunt determinate în primul rând de aportul de căldură, fără ca frecvența pulsurilor să aibă o influență semnificativă. Rezultatele arată că sursa de putere atinge întotdeauna frecvența țintă, dacă pulsul se păstrează dreptunghiular. Dacă forma pulsului este distorsionată prin forțarea sursei există riscul de a nu se atinge valorile țintă ale pulsului și curentului de bază.

Mulțumiri

Autorii mulțumesc Agenției Slovene pentru Cercetare și Inovare (ARIS) pentru sprijinul financiar acordat prin finanțarea de bază nr. P2-0270, proiectele bilaterale ARIS N2-0328 (Weave-NCN) și BI-BA/24-25-034, precum și proiectul de cercetare ARIS nr. J2-60033 (SuperShocked). Cercetarea a fost susținută parțial și de Parteneriatul strategic ERASMUS+ al UE, Acțiunea-cheie 2, numărul: 2024-1-RO01-KA220-HED-000244949 (SMARTIE) și 2023-1-RO01-KA220-HED-000158031 (ANGIE). Autorii doresc să mulțumească, de asemenea, Parteneriatului pentru Economie Durabilă din cadrul Programului Europa Orizont pentru finanțarea proiectului CORRASBlue.

2) If both values of the rate of rise and fall of the welding current are equal and below approx. 500 kA/s the welding power source achieves the rectangular shape of the welding current and the desired values of pulse and base current. With smaller changes between these speeds, the pulse shape is distorted, and if these changes are greater, the target values for pulse and base current are not achieved. The analysed welding power source has a limited rate of rise of the arc current of approx. 1570 kA/s and a limited rate of fall of the arc current of approx. 570 kA/s.

3) At low pulse frequencies, the pulse and base current time is longer and influences the change in the weld geometry. At higher pulse frequencies, this influence on the weld geometry is not noticeable due to the high pulse frequency.

4) By increasing the pulse frequency (up to 5 kHz), we obtain a greater penetration depth and weld seam width, as the response limitation of the welding power source affects the linear heat input. The characteristic weld seam dimensions are primarily determined by the heat input, without the pulse frequency having a significant influence.

The results show that the welding power source always reaches the target frequency. If the limitation of the power source is exceeded, the pulse shape is distorted and eventually the target values of pulse and base current are not reached.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Slovenian Research and Innovation Agency (ARIS) with core funding no. P2-0270, the bilateral ARIS projects N2-0328 (Weave-NCN) and BI-BA/24-25-034, and the ARIS research project no. J2-60033 (SuperShocked). The research was also partially supported by the EU ERASMUS+ Strategic Partnership Key Action 2, number: 2024-1-RO01-KA220-HED-000244949 (SMARTIE) and 2023-1-RO01-KA220-HED-000158031 (ANGIE). The authors would also like to thank the Partnership for a Sustainable Blue Economy under Horizon Europe for funding the CORRASBlue project.

Bibliografie / References

- [1] Lothongkum, G., Viyanit, E., Bhandhubanyong, P., 2001. Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate. *Journal of Materials Processing Technology* 110, 233–238. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00875-X
- [2] Sundaresan, S., Janaki Ram, G.D., Madhusudhan Reddy, G., 1999. Microstructural refinement of weld fusion zones in b- β titanium alloys using pulsed current welding. *Mater. Sci. Eng.* 88, 88–100
- [3] Wang, Z., Jiang, D., Wu, J., Xu, M., 2020. A review on high-frequency pulsed arc welding. *Journal of Manufacturing Processes* 60, 503–519. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.054
- [4] Wang, Z., Gui, Z., Wu, J., Zhang, Q., Wu, X., Lin, S., Tian, J., Guo, C., 2023. Microstructure and high-temperature mechanical properties of Inconel 718 superalloy weldment affected by fast-frequency pulsed TIG welding. *Journal of Manufacturing Processes* 89, 338–348. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.076
- [5] Manikandan, M., Nageswara Rao, M., Ramanujam, R., Ramkumar, D., Arivazhagan, N., Reddy, G.M., 2014. Optimization of the Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding Process Parameters for alloy C-276 using the Taguchi Method. *Procedia Engineering* 97, 767–774. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.348
- [6] Ahmad, A., Alam, S., (Year not given). A Review on Pulsed TIG Welding. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 5, (Pages not given)
- [7] Venkatesh, R., Manivannan, S., Kaliappan, S., Socrates, S., Sekar, S., Patil, P.P., Natrayan, L., Bayu, M.B., 2022. Influence of Different Frequency Pulse on Weld Bead Phase Ratio in Gas Tungsten Arc Welding by Ferritic Stainless Steel AISI-409L. *Journal of Nanomaterials* 2022, 9530499. doi: 10.1155/2022/9530499
- [8] Dong, Z., Li, Y., Miu, J., Liu, Z., Chang, C., Chang, Y., 2023. Study on arc characteristics under high-frequency sine wave pulse current and effect of weld appearance and microstructure of AISI444 ferritic stainless steel. *Welding International* 37, 309–323. doi: 10.1080/09507116.2023.2222550
- [9] Mashiachidi, M.H., Desai, D.A., 2023. Fatigue life prediction of turbine blades with geometric imperfections made of stainless steel. *Tribology and Materials* 2, 172–180. doi: 10.46793/tribomat.2023.017
- [10] Wang, Z., Lu, G., Hu, C., Lin, S., Ren, X., Wu, J., Tian, J., 2022. A review on fast-frequency pulse TIG welding technology. *Welding International* 36, 510–521. doi: 10.1080/09507116.2022.2109448
- [11] Tran, N.-H., Bui, V.-H., Hoang, V.-T., 2023. Development of an Artificial Intelligence-Based System for Predicting Weld Bead Geometry. *Appl. Sci.* 13, 4232. doi: 10.3390/app13074232
- [12] Wu, J., Wang, Z., Zhu, Z., Fan, W., Lin, S., Cai, X., Tian, J., Guo, C., 2023. Effect of Fast-Frequency Pulsed Current Parameters on FFP-TIG Arc Behavior and Its Implications for Inconel 718 Welding. *Metals* 13, 848. doi: 10.3390/met13050848
- [13] Vahdatkhah, P., Tabatabaee Kopaei, S.R., Vahdat Khah, H., 2022. Weld repair of gas turbine disc: optimization of pulsed TIG welding process parameters and microstructural analysis of Cr–Mo V Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 123, 213–232. doi: 10.1007/s00170-022-10174-7
- [14] Manti, R., Dwivedi, D.K., Agarwal, A., 2006. Microstructure and hardness of Al-Mg-Si weldments produced by pulse GTA welding. *Int J Adv Manuf Technol* 36, 263–269. doi: 10.1007/s00170-006-0849-z
- [15] Naing, T.H., Muangjunburee, P., 2023. Effect of Conventional and Pulsed TIG Welding on Microstructural and Mechanical Characteristics of AA 6082-T6 Repair Welds. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 38, 865–876. doi: 10.1007/s11595-023-2770-9
- [16] Reyaz, M.S.B., Sinha, A.N., Mehdi, H., Murtaza, Q., 2024. Effect of Pulsed TIG Welding Parameters on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 Weldments. *Arabian Journal for Science and Engineering* 49, 10891–10911. doi: 10.1007/s13369-023-08563-5
- [17] Cunha, T.V.D., Bohórquez, C.E.N., 2021. Effects of current pulsation at ultra-high frequency on physical aspects of the arc and its implications in the weld bead morphology in the GTAW process. *Welding in the World* 65, 251–261. doi: 10.1007/s40194-020-01016-9
- [18] Chandrasekhar, N., Muthukumaran, V., Das, C.R., 2025. Real-time determination of weld penetration status during A-TIG welding of stainless steel employing deep learning approach. *Welding in the World* 69, 2727–2744. doi: 10.1007/s40194-025-02021-6
- [19] Zhang, S., Zhao, H., Li, Y., Miao, J., Chang, C., Chang, Y., 2025. TIG-based hybrid arc welding: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 139, 1105–1121. doi: 10.1007/s00170-025-15833-z
- [20] Liu, Y., Zhao, H., Li, Y., Zhang, S., Miao, J., Xing, S., Dong, H., Chang, Y., 2025. Arc Characteristics and Welding Joints in Pulsed TIG Welding with Different Current Waveforms. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 26, 1643–1653. doi: 10.1007/s12541-025-01236-3

Pentru citare:

Klobčar, D., Markič, N., Bračun, D., Selak, L., Trdan, U., Ščetinec, A., Debevec, T., Đurić, A., Feier, A., *Response of the welding power source in pulsed TIG welding of stainless steel, Sudura, nr. 3 (2025), year XXXV, 4-16*