

# Wpływ częstotliwości prądu pulsującego w metodzie TIG na wybrane aspekty doprowadzania ciepła podczas spawania stali 321

Influence of pulse current frequency in the TIG method on selected aspects of heat supply during welding of 321 steel

## Streszczenie

Energia liniowa jest jednym z głównych parametrów opisujących proces spawania łukowego, m.in. na potrzeby ścisłej dokumentacji technologicznej. Coraz częściej słyszy się jednak o potrzebie doprecyzowania tego parametru. Jednym z problemów jest wyznaczanie energii liniowej podczas spawania odmianami z pulsacją łuku. W artykule przedstawiono eksperyment obrazujący wpływ częstotliwości prądu pulsującego na wybrane aspekty doprowadzania ciepła przy spawaniu stali 321 metodą TIG.

**Słowa kluczowe:** spawanie TIG; energia liniowa spawania; prąd spawania; napięcie łuku

## Abstract

Heat input is one of the main parameters describing the arc welding process, among others for the needs of strict technological documentation. However, we are hearing more and more about the need to clarify this parameter. One of the problems is determining the heat input during welding of varieties with arc pulsation. The article presents an experiment illustrating the influence of the pulse current frequency on selected aspects of heat supply during welding of the 321 steel with the TIG method.

**Keywords:** TIG welding; heat input of welding; welding current; arc voltage

## Wprowadzenie

Zagadnienie energii liniowej jako miary dostarczonego ciepła w odniesieniu do jednostki długości spoiny stale wywołuje kontrowersje. W ostatnich latach powstało wiele opracowań, które mówią o konieczności doprecyzowania tego parametru technologicznego, który jest szeroko stosowany w przemyśle i wymieniany w karcie technologicznej spawania (WPS). Szczególnie dyskusyjnym jest wykorzystywanie podawanego w normach wzoru w odniesieniu do procesów impulsowych tym bardziej, że najczęstszą praktyką jest sprowadzanie wartości natężenia prądu nie do wartości skutecznej, lecz średniej, co z założenia jest błędem i może prowadzić do dużych rozbieżności [1,2]. Firmy zajmujące się sprzedażą urządzeń spawalniczych i materiałów dodatkowych posiadają w swojej ofercie urządzenia do pomiaru energii liniowej procesu, dokonujące pomiaru tego parametru zgodnie z nową interpretacją norm amerykańskich. Niestety korzystanie z tych urządzeń na polskim rynku należy jeszcze do rzadkości.

W przypadku spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych prądem pulsującym o różnych częstotliwościach można uzyskać odmienne wyniki, przy tych samych

wartościach energii liniowej określonych zgodnie z podanymi w normach wzorami. Różnice te powstaną niezależnie od zastosowanej metodyki obliczeniowej lub pomiarowej. Można zatem postawić pytanie o użyteczność parametru technologicznego, który przy stałej wartości nie gwarantuje uzyskania takiego samego rezultatu spawania.

## Metodyka badań

W celu oceny wpływu częstotliwości prądu pulsującego na wybrane aspekty doprowadzania ciepła przy spawaniu metodą TIG łukiem pulsującym przeprowadzono eksperyment obejmujący:

- zautomatyzowane, liniowe przetapianie blach ze stali 321,
- pomiary i rejestracje oscyloskopowe prądu spawania i napięcia łuku,
- obliczenia wartości energii liniowej,
- obserwacje makro- i mikroskopowe struktur przetopin.

Mgr inż. Małgorzata Ostromecka, dr inż. Paweł Cegielski, prof. dr hab. inż. Andrzej Kolasa – Politechnika Warszawska.

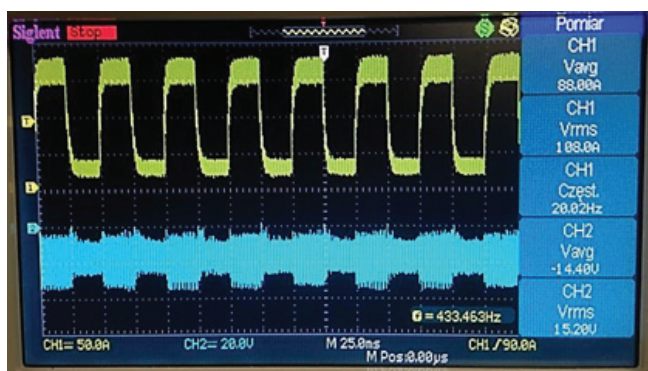
Autor korespondencyjny/Corresponding author: malgorzata@ostromecka.pl

**Tablica I.** Skład chemiczny, własności mechaniczne i fizyczne stali AISI 321 [3]  
**Table I.** Chemical composition, mechanical and physical properties of AISI 321 steel [3]

Pierwiastek	C	Si	Mn	P max	S	Cr	Ni	Ti			
[%]	≤0,08	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	17,0÷19,0	9,0÷12,0	5-%C do 0,70			
Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> [MPa]	Granica plastyczności R <sub>0,2</sub> [MPa]	Wydłużenie A[%]	Twardość HB	Moduł sprężystości w 20 °C [MPa]	Gęstość właściwa [g/cm <sup>3</sup> ]	Przewodność cieplna w 20 °C [W/mxK]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej pomiędzy 20 °C α[10 <sup>6</sup> K <sup>-1</sup> ]				Elektryczny opór właściwy [Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]
							100°C	200°C	300°C	400°C	
≥490	≥216	40	128÷207	200	7,9	15	16	16,5	17	17,5	0,73

Próbki o wymiarach 250 x 50 x 3 mm ze stali 321 (tabl. I) odtłuszczono i umieszczono w uchwycie roboczym na podkładce miedzianej. Z uwagi na możliwość precyzyjnego i powtarzalnego nastawiania parametrów pulsacji prądu spawania zastosowano urządzenie TIG MagicWave 2500 firmy Fronius. Uchwyt elektrodowy z elektrodą nietopliwą umocowano na wózku automatu liniowego, aby zapewnić stałą szybkość przetapiania oraz stałą odległość elektrody od przedmiotu przetapianego. Pomiar prędkości posuwu palnika wykonano ręcznym tachometrem (Lutron DT-2236). Elektroda wolframowa złota (z dodatkiem tlenku lantanu) została naostrzona pod kątem 60° i umieszczona w głowicy z dyszą ceramiczną nr 6 prostopadle do przedmiotu spawanego. Proces przeprowadzono bez materiału dodatkowego, przy ustawieniach dla prądu pulsującego w czystym argonie o przepływie 9 l/min. Zajarzanie łuku realizowane było ręcznie na elektrodzie grafitowej, bez wysokiej częstotliwości, ze względu na ochronę podłączonego do obwodu spawania oscyloskopu.

Pomiary prowadzono w oparciu o oscyloskop Siglent SDS 1072CML oraz pośredniczącą kasetę pomiarową KWR1 (opracowanie własne PW) zawierającą niezbędne przetworniki pomiarowe prądu i napięcia [4]. Oscyloskop posiada 2 niezależne kanały pomiarowe o paśmie 70 MHz. Na ekranie wyświetlane były przebiegi napięcia (niebieski) i natężenia prądu (żółty) w funkcji czasu oraz zmierzone wartości skuteczne i średnie dla tych parametrów (rys. 1).



**Rys. 1.** Obraz przebiegu zarejestrowanego przez oscyloskop Siglent 1072CML dla natężenia I<sub>p</sub>=150 A, I<sub>b</sub>=20 A i częstotliwości f=20 Hz  
**Fig. 1.** Image of the waveform recorded by the Siglent 1072CML oscilloscope for I<sub>p</sub>=150 A, I<sub>b</sub>=20 A and f=20 Hz

**Tablica II.** Zaplanowane parametry procesu  
**Table II.** Scheduled process parameters

Kolor przebiegu na rysunku 2	Prąd impulsu I <sub>p</sub>	Prąd podstawy I <sub>b</sub>	Prąd średni I <sub>sr</sub>	Prąd skuteczny I <sub>sk</sub>	Współczynnik wypełnienia r <sub>i</sub>	Współczynnik prądowy r <sub>e</sub>	Prędkość przetapiania v [mm/s]
niebieski	150	20	85	107	50%	0,13	2,33
czerwony	130	40	85	96	50%	0,31	2,33
zielony	110	60	85	88,6	50%	0,55	2,33

Pomiary były wykonywane w momencie stabilizacji procesu (w środkowej części próbki) i obejmowały średnią obliczaną z minimum 5 okresów (impulsów prądu). Wykonano kilka serii pomiarowych w celu upewnienia się o powtarzalności wyników. Wyniki zawarte w opracowaniu odnoszą się bezpośrednio do próbek, z których zostały wykonane zglądy metalograficzne.

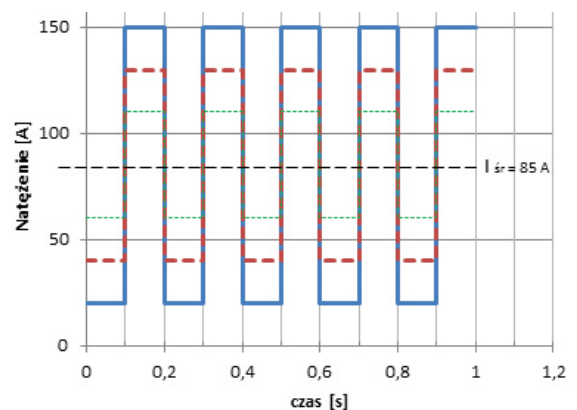
Do wykonania zglądów zostały pobrane próbki ze środkowej części przetopiny, trawienie wykonane zostało odczynnikiem Mi16Fe. Ocena mikrostruktury wykonana była na podstawie porównania obrazów przetopin wykonanych przy tym samym powiększeniu, poczynając od powiększeń najmniejszych.

Eksperyment obejmował realizację przebiegów przedstawionych na rysunku 2 dla trzech częstotliwości pulsacji: 5, 20 i 100 Hz. Ustawienia na urządzeniu i obliczone wartości natężenia średniego i skutecznego dla współczynnika wypełnienia impulsu 50% podano w tablicy II.

Rozpatrując idealny prostokątny przebieg impulsów, można analizować aspekt elektryczny działania łuku w kategoriach średnich lub skutecznych wartości prądu. Natężenie średnie impulsu można obliczyć stosując poniższy wzór (1):

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{(I_p \cdot t_p) + (I_b \cdot t_b)}{(t_p + t_b)} \quad (1)$$

gdzie: T=t<sub>p</sub>+t<sub>b</sub> (czas trwania jednego cyklu); t<sub>p</sub> – czas trwania impulsu; t<sub>b</sub> – czas trwania przerwy; I<sub>p</sub> i I<sub>b</sub> – odpowiednio natężenie prądu impulsu i prądu przerwy.



**Rys. 2.** Przebiegi odwzorowujące ustawienia na urządzeniu dla f= 5 Hz  
**Fig. 2.** The waveforms representing the settings on the device for f=5 Hz

Przy obliczaniu wartości skutecznej prądu należy posłużyć się wzorem następującym (2):

$$I_{sk} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^T I^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{(I_p^2 \cdot t_p) + (I_b^2 \cdot t_b)}{(t_p \cdot t_b)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Jeżeli współczynnik prądowy opiszemy jako:

$$r_E = \frac{I_b}{I_p}$$

współczynnik wypełnienia impulsu jako:

$$r_I = \frac{t_p}{T}$$

wtedy można zapisać zależność pomiędzy wartością średnią i skuteczną prądu (3) [5]:

$$\frac{I_{sr}}{I_{sk}} = \frac{r_I + r_E \cdot (1 - r_I)}{\{r_I + r_E^2 \cdot (1 - r_I)\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Powyższa zależność wskazuje na to, że natężenie średnie prądu będzie zawsze niższe niż skuteczne, przy czym różnica pomiędzy natężeniem  $I_{sk}$  a  $I_{sr}$  jest tym większa, im niższe są wartości  $r_E$  i  $r_I$ , co znajduje potwierdzenie zarówno na etapie teoretycznym (tabl. II), jak i podczas pomiarów wykonanych w ramach niniejszej pracy (tabl. III). Prowadzi to do wniosku, że stosowanie wartości średnich przy obliczeniach przebiegów impulsowych będzie powodować duże odchyłki od rzeczywistych wartości, a dla energii liniowej będzie to wartość zaniżona nawet o 30% [2].

## Wyniki

W tablicy III zestawiono rzeczywiste wartości parametrów wyznaczone za pomocą oscyloskopu.

Zaobserwowano, że wraz ze zmianą współczynnika prądowego następuje zmiana napięcia zarówno dla wartości średnich, jak i skutecznych. Natężenie średnie pozostaje wartością stałą we wszystkich przypadkach, natomiast skuteczne maleje ze wzrostem współczynnika prądowego. Częstotliwość pulsacji prądu nie ma wpływu na napięcie i natężenie prądu w badanych zakresach parametrów. Chwilowe zmiany napięcia można interpretować oscylacją jeziora spawalniczego podczas działania źródła ciepła, która prowadzi do krótkotrwałych zmian w długości łuku. W przypadku niniejszych badań zmiany napięcia przy przetapianiu różnymi wartościami prądu impulsu należy tłumaczyć także zaobserwowanym wyginaniem się blachy na skutek cyklu cieplnego. W badaniach [6] wykazano, że zmiana długości łuku z 3 do 2 mm powoduje trzykrotne zwiększenie gęstości prądu w płamce anodowej. Sugerowałoby to, że zmiana długości

łuku mając wpływ na gęstość prądu może znaleźć swoje odzwierciedlenie w kształcie spoiny i głębokości wtopienia.

Rzeczywiste wartości zmierzone przy pomocy oscyloskopu wykorzystano do obliczenia energii liniowej w oparciu o powszechnie stosowaną zależność (4) [7]:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

gdzie: Q – energia liniowa [kJ/mm]; k – sprawność cieplna, U – napięcie łuku; I – natężenie prądu spawania; v – prędkość spawania.

Zgodnie z konwencjonalnym podejściem, przyjęto współczynnik sprawności cieplnej  $k = 0,6$ , jako stały dla wszystkich procesów zrealizowanych podczas niniejszych badań. Obliczono wartości energii liniowej w oparciu o wartości średnie i skuteczne napięcia i natężenia prądu, a wyniki przedstawiono w tablicy IV.

**Tablica IV.** Wartości energii liniowej  $E_l$  obliczanej według parametrów średnich oraz skutecznych

**Table IV.** Heat input values calculated according to average and RSM parameters

Nr próbki	$E_{l\ sr}$ [kJ/mm]	$E_{l\ sk}$ [kJ/mm]
1	0,33	0,42
2	0,33	0,42
3	0,33	0,42
4	0,29	0,34
5	0,30	0,36
6	0,30	0,35
7	0,29	0,34
8	0,29	0,34
9	0,32	0,35

Najwyższe wartości energii liniowej (zarówno dla parametrów średnich, jak i skutecznych) uzyskano dla procesu, w którym współczynnik prądowy wynosił 0,13 (próby 1÷3 w tabl. IV). W przypadku procesów realizowanych dla współczynników prądowych 0,31 i 0,55 wartości energii liniowej były zbliżone do siebie. Jednakże można zaobserwować tendencję obniżania się wartości energii liniowej wraz ze wzrostem współczynnika prądowego. Wartości energii liniowej obliczanej w oparciu o wartości skuteczne były wyższe w stosunku do tych obliczanych z wartości średnich. Biorąc pod uwagę fakt, że we wzorze (4) nie uwzględnia się częstotliwości pulsacji, należałoby wykluczyć jej wpływ na obliczoną energię liniową procesu.

**Tablica III.** Rzeczywiste wartości parametrów zmierzone za pomocą oscyloskopu

**Table III.** Actual parameter values measured using an oscilloscope

Nr próbki	Nastawy prądu	$I_{sr}$ [A]	$I_{sk}$ [A]	$U_{sr}$ [V]	$U_{sk}$ [V]	f [Hz]
1	150/20	88	108	14,4	15,2	5
2	150/20	88	108	14,4	15,2	20
3	150/20	88	108	14,4	15,2	100
4	130/40	88	98	12,8	13,6	5
5	130/40	90	98	12,8	14,4	20
6	130/40	90	100	12,8	13,6	100
7	110/60	88	92	12,8	14,4	5
8	110/60	88	92	12,8	14,4	20
9	110/60	90	94	13,6	14,4	100

Na rysunku 3 zestawiono makrostruktury uzyskanych przetopin. Zmiany w powierzchni przekroju poprzecznego przetopiny można uznać za niewielkie. Jednakże obserwacja makrostruktury i porównanie powierzchni przekrojów poprzecznych przetopin może dostarczyć informacji na temat różnic w skuteczności wprowadzania ciepła do materiału. Informacja ta ma jednak charakter ogólny i jej wartość sprowadza się jedynie do relatywnego określenia, w którym przypadku objętość stopionego materiału reprezentowana przez przekrój poprzeczny przetopiny jest większa w stosunku do pozostałych próbek.

Powiązanie ilości wprowadzonego ciepła z przekrojem poprzecznym uzyskanej spoiny stanowi aktualnie przedmiot zainteresowania badaczy [8,9] i stanowi ważny element analizy parametru technologicznego, jakim jest energia liniowa. Ilościowy aspekt zależności pomiędzy polem przetopiny, a energią liniową można opisać wzorem (5)[10]:

$$A = \frac{f_s \cdot f_e \cdot I \cdot U}{Q \cdot v} \quad (5)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego [mm<sup>2</sup>]; f<sub>s</sub> i f<sub>e</sub> odpowiednio sprawność stapiania i przejmowania ciepła w łuku; I – natężenie prądu spawania [A]; U – napięcie łuku [V]; v – prędkość spawania [mm/s]; Q – teoretyczna ilość ciepła niezbędna do stopienia metalu [J/mm<sup>3</sup>],

dla stali austenitycznej typu 18-8 ilość ta będzie równa: Q = (T<sub>m</sub> + 273)<sup>2</sup>/3x10<sup>5</sup> = 9,67 J/mm<sup>3</sup>.

Najwyższą wartość przekroju poprzecznego przetopiny równą 9 mm<sup>2</sup> uzyskano dla próbki 3 wykonanej przy parametrach: I<sub>p</sub> = 150 A, I<sub>b</sub> = 20 A i f = 100 Hz. Najniższe pole przekroju poprzecznego wynosiło 4,95 mm<sup>2</sup> i otrzymane zostało dla próbki 9 przy parametrach: I<sub>p</sub> = 110 A, I<sub>b</sub> = 60 A i f = 100 Hz. Nawiązując do wzoru (5) i biorąc pod uwagę stałe dla danego współczynnika prądowego parametry I, U, v i Q można wnioskować, że zmiana częstotliwości pulsacji wpływa

na sprawność stapiania i/lub sprawność przejmowania ciepła w łuku.

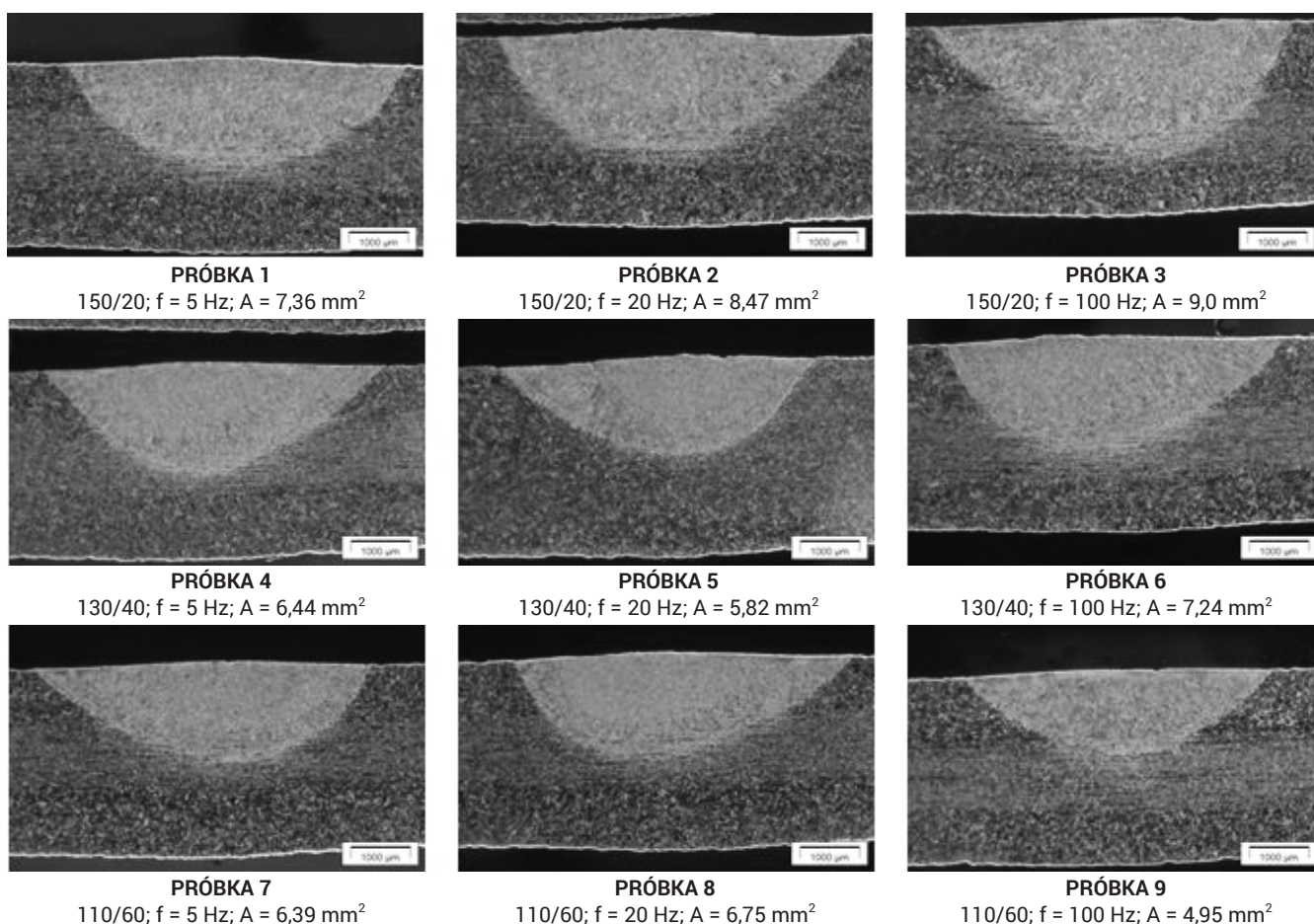
Objętość stopionego materiału dla współczynnika prądowego 0,13 rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Należy zwrócić uwagę, że dla różnych współczynników prądowych częstotliwość pulsacji wykazuje różne tendencje zmian.

Rysunek 4 przedstawia mikrostruktury uzyskane w środkowej części przetopin przy powiększeniu x500.

Mikrostruktury przetopin zawierają osnowę austenityczną z ferrytem delta w postaci wydłużonych siatek i płytek (rys. 4). W strukturze przetopiny, strefy wpływu ciepła jak i materiału rodzimego obecne są wydzielenia kryształków – najprawdopodobniej węgla tytanu. Bliżej powierzchni lica, w osi przetopiny można było zaobserwować zarodkowanie heterogeniczne dendrytów austenitu, co może świadczyć o dużym przechłodzeniu stężeniowym. Ferryt delta zaobserwowano również w SWC w postaci długich pasm układających się zgodnie z kierunkiem walcowania stali. Pasma te były najdłuższe w środkowej części przetapianej blachy. Obecność ferrytu delta w strukturze takiej stali tłumaczy się zwykle małą stabilnością struktury austenitycznej danego wytopu.

Porównanie mikrostruktur wykonanych przy różnych natężeniach prądu nie dostarcza jednoznacznych wniosków, choć może wydawać się, że wraz ze wzrostem współczynnika prądowego struktura stawała się bardziej drobnoziarnista. Natomiast można stwierdzić, że przy wzroście częstotliwości struktura ulega wyraźnej zmianie, gdyż następuje rozrost austenitu, co trzeba tłumaczyć wydłużeniem czasu chłodzenia, a zatem zmniejszeniem prędkości chłodzenia.

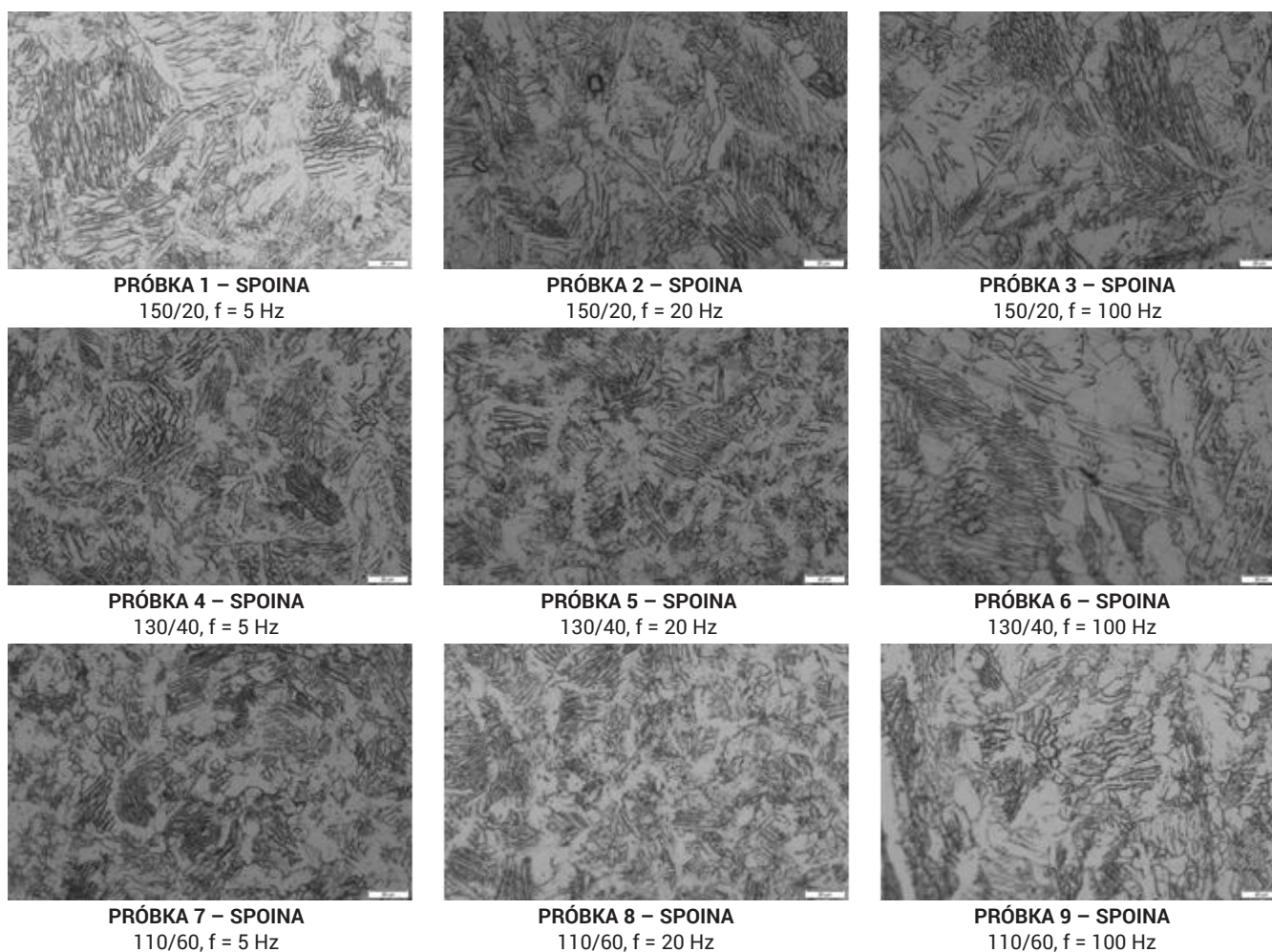
Obserwacja mikrostruktury prowadziła do wniosku, że dla badanych próbek największa ilość ciepła została wprowadzona do materiału przy przetapianiu próbki nr 3 przy ustawieniach I<sub>p</sub> = 150 A, I<sub>b</sub> = 20 A, f = 100 Hz. Wpływ częstotliwości na mikrostrukturę jest widoczny w przypadku



Rys. 3. Makrostruktury przetopin  
Fig. 3. Macrograph of bead profile

wszystkich trzech ustawień współczynników prądowych. Pomiary energii liniowej wykonane w oparciu o zawarty w normach wzór nie wykazują różnic w wartościach w zależności od częstotliwości, a zatem nie są zgodne z obserwacjami rzeczywistych mikrostruktur.

Porównanie wyników badań makroskopowych i mikroskopowych prowadzi do stwierdzenia, że odwzorowują one inne aspekty transportu ciepła do materiału. Podobne objętości stopionego metalu mogą różnić się znacznie mikrostrukturą.



Rys. 4. Mikrostruktura w środkowej części przetopiny przy powiększeniu x500  
Fig. 4. Microstructure in the middle of weld metal. Magnification x500

## Wnioski

1. Częstotliwość pulsacji prądu nie wpływa ani na wartość natężenia, ani napięcia łuku w badanym zakresie częstotliwości. Zmiany napięcia przy różnych współczynnikach prądowych związane są najprawdopodobniej z powstającymi podczas spawania odkształceniami próbki.
2. Wyliczone wartości energii liniowej nie zmieniają się ze zmianą częstotliwości, co wynika z pominięcia we wzorze częstotliwości pulsacji prądu podczas gdy, zmiana częstotliwości pulsacji powoduje powstawanie spoin o różnej powierzchni przekroju i o różnej mikrostrukturze. Objętość stopionego metalu i mikrostruktura informują o innych aspektach transportu ciepła.
3. Wzrost częstotliwości pulsacji prądu nie musi prowadzić do wzrostu głębokości wtopienia.
4. Należy zrewidować przydatność wzoru na energię liniową w kontekście spawania metodą TIG prądem pulsującym.

## Literatura

- [1] Cegielski P., Kolasa A., Kuczyński M., Rostkowska R.: Wybrane aspekty pomiarów i monitorowania podczas spawania łukowego, Przegląd Spawalnictwa Vol. 88, No 12, 2016.
- [2] Zmiany w normach ASTM dotyczących obliczania energii liniowej – Biuletyn Informacji Technicznej LEB2/2010 Lincoln Electric.
- [3] Welding Handbook Volume 4. Materials and applications – Part 2.1998. Chapter 5 pp. 233-332.
- [4] Cegielski P., Bugyi Ł.: Wybrane aspekty identyfikacji zakłóceń procesu spawania łukowego MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa Vol. 89, No 6, 2017.
- [5] Kim W.H., Na S.J.: Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool, Int. J. Heat Transfer 41,1998, pp. 3213-3227
- [6] Fan H.G., Na S.J., Shiz Y.W.: Mathematical model of arc in pulsed current gas tungsten arc welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 1997, pp. 94-102
- [7] PN-EN 1011-1 Spawanie – Zalecenia dotyczące spawania metali – Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego
- [8] Wojsyk K., Macherzyński M.: Determination of Welding Linear Energy by Measuring Cross-Sectional Areas of Welds, Biul. Inst. Spaw. No 5/ 2016.
- [9] Wojsyk K., Macherzyński M., Lis R.: Ocena ilości ciepła wprowadzonego do spoin i napoin metodą pomiaru ich pól poprzecznych w konwencjonalnych i hybrydowych procesach spawalniczych, Przegląd Spawalnictwa Vol. 89, No 10, 2017.
- [10] Klimpel A.: Technologia spawania i cięcia metali, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.