

Wpływ pracy nowoczesnych urządzeń spawalniczych na jakość energii elektrycznej i ich energochłonność

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów parametrów określających jakość energii elektrycznej pobieranej przez nowoczesne urządzenia spawalnicze, spawające z wykorzystaniem metod: a) metoda MAG standard –stosując urządzenia transformatorowe i inwertorowe, b) metoda SpeedPulse - stosując urządzenia inwertorowe, dla dwóch stanów pracy. Dokonano również pomiarów energochłonności dla rozważanych metod.

Abstract. In this article we present the result of measuring the parameters defining the quality of electrical energy consumed by the modern welding equipment. The following welding methods were investigated: a) MAG standard method using transformer and inverter, b) SpeedPulse method using inverter, in two states of operation. Measurements of energy consumption for these methods were also conducted. (The impact of the work of modern welding equipment on quality and energy consumption)

Słowa kluczowe: energochłonność, parametry jakości energii elektrycznej, wyższe harmoniczne napięć i prądów, moc bierna, filtry pasywne.

Keywords: energy consumption, electric power quality, higher harmonics of voltages and currents, reactive power, passive filters.

Wstęp

W zakładach przemysłowych w procesach technologicznych wykorzystywane są urządzenia spawalnicze [1], [2], [3]. Charakteryzują się one niskim współczynnikiem mocy oraz odkształceniem przebiegu prądu od przebiegu sinusoidalnego, uważanego w energetyce za optymalny. Odkształcenie prądu powoduje generowanie do sieci elektroenergetycznej wyższych harmonicznych prądów. Najczęściej używanymi metodami spawalniczymi są metody MIG/MAG. Ze względu na zastosowane źródło prądowo-napięciowe, które ma istotny wpływ na proces spawania, urządzenia spawalnicze możemy podzielić m.in. na: transformatorowe, inwertorowe, inwertorowe po stronie wtórnej, procesorowe, z pulsem, z podwójnym pulsem, z funkcją SpeedPuls, z funkcją SpeedArc. Do analizy przyjęto najczęściej i powszechnie stosowane metody spawalnicze jakimi są półautomatyczna metoda spawania typu MAG za pomocą urządzeń transformatorowych i inwertorowych. Ze względu na występujący układ zasilania elektrody spawalniczej, urządzenie spawalnicze charakteryzuje się różnym oddziaływaniem na parametry jakości energii elektrycznej oraz energochłonności procesu spawalniczego.

Charakterystyka układu pomiarowego

Dla przedstawienia wpływu nowoczesnych urządzeń spawalniczych na jakość energii elektrycznej oraz ich energochłonności w procesie spawania wytypowano do porównania dwie grupy urządzeń, tj. transformatorowe i inwertorowe. Są to odpowiednio Powertec 500S firmy Lincoln Electric Bester S.A. oraz Saprom S5 SpeedPulse LORCH Schweißtechnik GmbH, których dane przedstawiono w tabeli 1. Za pomocą tych urządzeń dokonano analizy pracy urządzeń spawalniczych dla trzech metod spawalniczych:

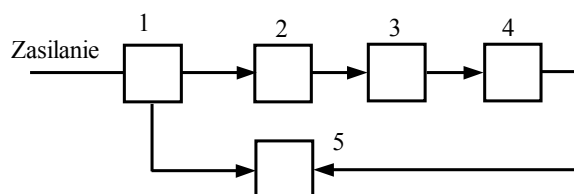
- metoda standard MAG urządzeniem transformatorowym Powertec 500S;
- metoda standard MAG urządzeniem inwertorowym Saprom S5 SpeedPulse;
- metoda SpeedPulse urządzeniem inwertorowym Saprom S5 SpeedPulse.

W celu dokonania analizy energochłonności i jakości energii pobieranej przez urządzenia spawalnicze dokonano spawania kilkunastu jednakowych próbek za pomocą układu przedstawionego na rys. 1.

W skład stanowiska spawalniczego wchodził automat spawalniczy Saprom S5 SpeedPulse Lorch oraz wózek spawalniczy Skorpion PRO 11. Układ badawczy został opomiarowany za pomocą analizatora jakości zasilania typu HIOKI 3196, którego wyniki pomiarów zostały następnie przetworzone w komputerze. Podczas prób spawania dokonano pomiarów nie tylko prądów, napięć i mocy w celu określenia energochłonności, ale również prądów i napięć wyższych harmonicznych w punkcie zasilania urządzenia spawalniczego.

Tabela 1. Podstawowe parametry zastosowanych urządzeń spawalniczych typu Saprom S5 SpeedPulse i Powertec 500S/W

Typ urządzenia	Saprom S5	Pwertec 500
Prąd spawania	(25-400) A	(30-500) A
Napięcie spawania	(15,2-34) V	34,5 V (dla 400 A/60%)
Napięcie biegu jałowego	81 V	55 V
Regulacja prądu	Ciągła	skokowa 30 zakresów
Cykl pracy 100% (40°)	320 A	315 A
Cykl pracy 60% (40°)	350 A	400 A
Ø drutu stalowego (mm)	0,6-1,6	0,6-1,6
Ø drutu aluminiowego (mm)	1,0-1,6	1,0-1,6
Ø elektrod MMA (mm)	1,0-8	brak funkcji
Napięcie zasilania 3~50/60 Hz	400 V ±15%	400 V ± 10%
Prędkość podawania (m/min)	0,1-25	1,0-20
Klasa ochrony (EN 60529)	IP 23	IP 23



Rys.1. Schemat ideowy układu pomiarowego, 1 - analizator jakości zasilania typu HIOKI 3196, 2 - urządzenia spawalnicze, 3 - wózek spawalniczy Skorpion PRO 11, 4 - elektroniczna waga techniczna DS-673DR, 5-komputer do obróbki danych

W procesie spawania można określić sprawność cieplną procesu spawania, sprawność topienia [6] oraz określić całkowitą energochłonność procesu spawania [4] wyrażoną w g/kW·h. Do tego celu stosowane są różne metody pomiarowe i obliczeniowe [4], [5], [6]. Do określenia energochłonności, wykorzystuje się pomiar energii

elektrycznej potrzebnej do spawania oraz masę stopionego spoiwa. Niektóre metody wykorzystują gęstość materiału spoiny oraz powierzchnię spawania, w celu określenia masy stopionego spoiwa [4], [5] oraz uwzględniają szybkość posuwu procesu spawania. Do pomiaru miary masy stopionego spoiwa wykorzystano elektroniczną wagę techniczną DS-673DR, na której dokonano pomiaru masy próbki przed i po spawaniu. Do analizy wzięto pod uwagę tylko te próbki, których napoiny były tej samej szerokości (10 mm na całej długości spoiny) oraz wysokości dla każdej z badanych metod (rys. 2). Ocenę wykonanej spoiny dokonano na podstawie oględzin i pomiarów zgodnie z normą [7], [8] i [9]. Ocenie podlegały między innymi następujące wady [7]: 514 – nierówność lica, 5011 i 5012 – podtopienie lica oraz 502 – nadmierny nadlew lica.



Rys.2. Próbkki napoin

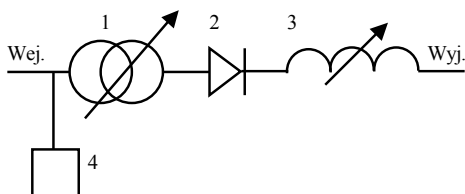
Do określenia stopnia energochłonności procesu spawania wykorzystano wzór 1:

$$(1) \quad K = \frac{m}{A}$$

gdzie: K – wartość energochłonności procesu spawania w $g/kW \cdot h$, m – masa spoiwa definiowana jako różnica masy próbki po spawaniu do masy próbki przed spawaniem w g , A – wartość energii zużytej do procesu spawania w $kW \cdot h$.

Budowa urządzeń spawalniczych

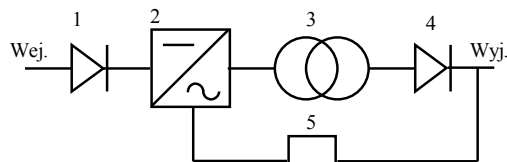
Transformatorowe urządzenia spawalnicze składają się z transformatora trójfazowego najczęściej o połączeniu gwiazda/trójkąt i prostownika mostkowego. Regulację prądu spawania dokonuje się poprzez regulację napięcia spawania po stronie pierwotnej transformatora zasilającego za pomocą przełącznika zaczeów. W celu doboru charakterystyki dynamicznej spawania za prostownikiem mostkowym włączono dławik z dwoma lub trzema odczepami (regulacja indukcyjności) - rys. 3.



Rys.3. Schemat ideowy transformatorowego urządzenia spawalniczego typu MIG/MAG, 1 - transformator z przełącznikiem zaczeów, 2 - prostownik mostkowy, 3 - dławik, 4 - urządzenia pomocnicze wentylator, chłodnica, wskaźniki prądu i napięcia itp.

W nowszych konstrukcjach zamiast transformatora z odczepami stosuje się transformatory z prostownikiem sterowanym za pomocą tyrystorów lub tranzystorów. Prostowniki tyrystorowe pozwalają na automatyczne kształtowanie charakterystyk statycznych i dynamicznych łuku elektrycznego oraz umożliwiają sterowanie energią w zależności od programów spawania.

W urządzeniach spawalniczych inwerterowych napięcie trójfazowe jest prostowane z wykorzystaniem prostownika mostkowego, a następnie za pomocą falownika zamieniane na napięcie wysokiej częstotliwości, które to z kolei jest obniżane za pomocą transformatora do napięcia roboczego i prostowane prostownikiem mostkowym po raz drugi (rys. 4). Dzięki wykorzystaniu falownika (inwertera) można płynnie regulować wartość prądu i napięcia na zaciskach elektrody.



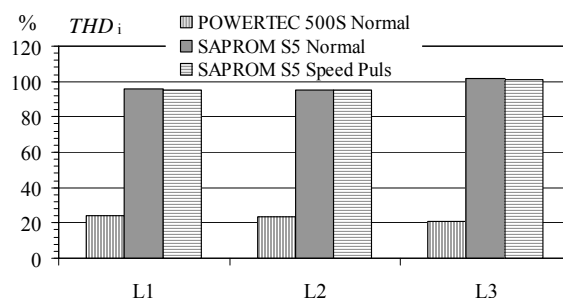
Rys.4. Schemat ideowy inwerterowego urządzenia spawalniczego typu MIG/MAG, 1 - prostownik wejściowy, 2 - falownik (inwerter), 3 - transformator główny, 4 - prostownik wyjściowy, 5 - procesor

Analiza wyników pomiarów

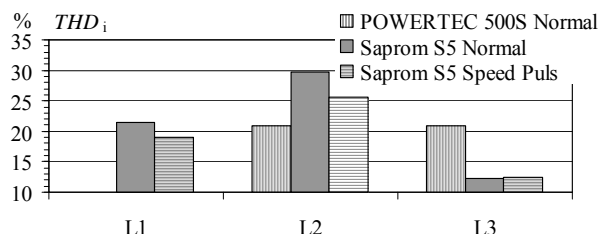
Pomiarów mocy oraz napięć i prądów podstawowej harmonicznej i wyższych harmonicznych dokonano dla trzech metod spawalniczych w dwóch stanach pracy tych urządzeń:

- stan obciążenia, jeżeli źródło zasilia łuk spawalniczy;
- stan jałowy, gdy urządzenie jest podłączone do sieci, a nie pali się łuk.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono procentową zawartość wyższych harmonicznych prądów THD_i w prądzie zasilania urządzeń spawalniczych w dwóch stanach pracy, tj. obciążenia i jałowym. Z pomiarów wynika, iż urządzenia spawalnicze inwerterowe pobierają odkształcony prąd nawet do $THD_i=100\%$ w czasie stanu obciążenia i ok. $THD_i=15\%$ w czasie stanu jałowego. Urządzenia transformatorowe w czasie stanu obciążenia pobierają prąd odkształcony tylko w 20%. Powertec 500S w czasie pracy jałowej w fazie L1 nie pobiera prądu (rys. 12) stąd brak THD_i w fazie L1 na rys. 6.

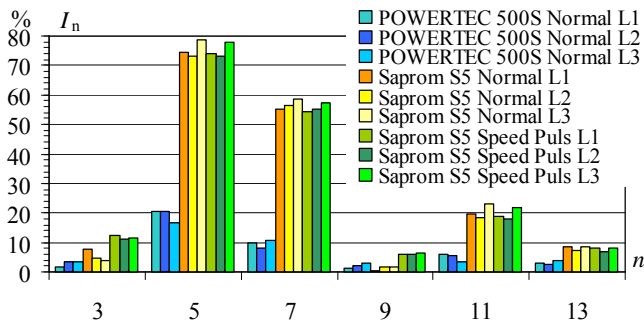


Rys.5. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych prądu THD_i pobieranego z sieci zasilającej nn przy pracujących urządzeniach spawalniczych

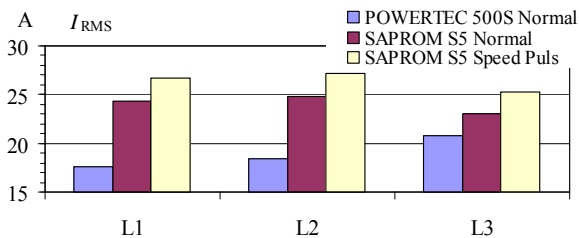


Rys.6. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych prądu THD_i pobieranego z sieci zasilającej nn przy jałowej pracy urządzeń spawalniczych

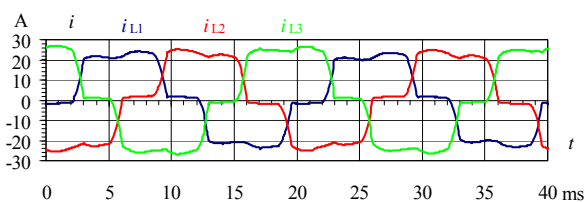
Tak duża zawartość procentowa wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym urządzenia inwerterowego jest spowodowana poborem piątej harmonicznej powyżej 70% (rys. 7), siódmej harmonicznej powyżej 50%, oraz w mniejszym stopniu jedenastej i trzynastej harmonicznej (odpowiednio ok. 20% i 10%) w stosunku do podstawowej harmonicznej. Podczas spawania metodą MAG urządzenie inwerterowe pobiera prąd o 20% większej wartości skutecznej niż klasyczne urządzenie spawalnicze (rys. 8). Zastosowanie metody SpeedPulse zamiast metody standard MAG powoduje zwiększenie poboru wartości skutecznej o 8,8%. Duże zawartości wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym powodują zniekształcenie jego przebiegu od kształtu przebiegu sinusoidalnego (rys. 9 do rys. 11).



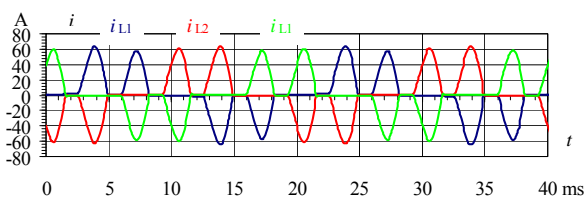
Rys.7. Wartości skuteczne wyższych harmonicznych prądów generowanych przez urządzenia spawalnicze w poszczególnych fazach, gdzie wartości skuteczne prądów wynoszą odpowiednio jak na rys.8



Rys.8. Wartości skuteczne prądów pobieranych przez urządzenia spawalnicze podczas ich pracy w poszczególnych fazach



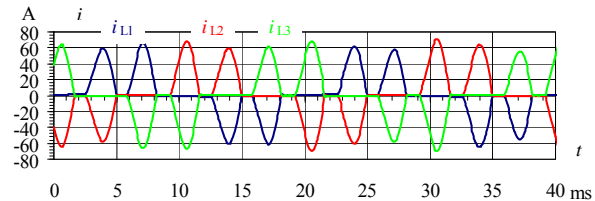
Rys.9. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie transformatorowe Powertec 500S w czasie pracy znamionowej metodą standard MAG



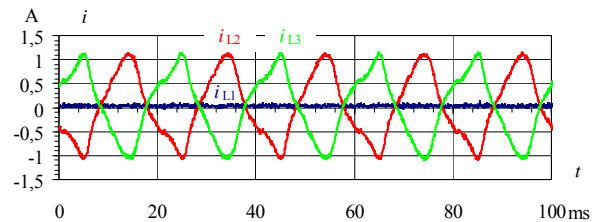
Rys.10. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie inwerterowe Saprom S5 SpeedPulse w czasie stanu obciążenia metodą standard MAG

Podczas pracy jałowej urządzenia spawalnicze pobierają prąd o mniejszej zawartości wyższych

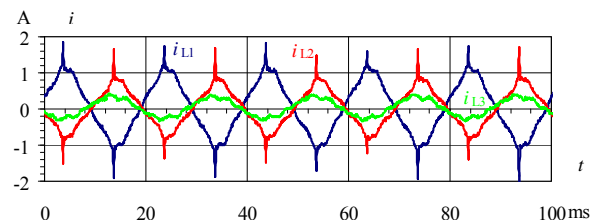
harmonicznych, czego dowodem jest mniejsze odkształcenie przebiegu (rys. 12 do rys. 14).



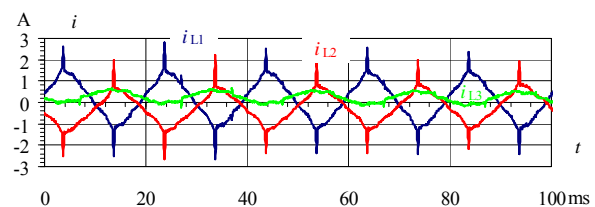
Rys.11. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie inwerterowe Saprom S5 SpeedPulse w czasie stanu obciążenia metodą SpeedPulse



Rys.12. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie transformatorowe Powertec 500S w czasie pracy jałowej metodą standard MAG



Rys.13. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie inwerterowe Saprom S5 SpeedPulse w czasie pracy jałowej metodą standard MAG



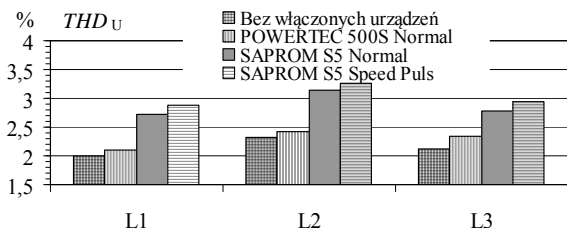
Rys.14. Przebieg prądu pobieranego przez urządzenie inwerterowe Saprom S5 SpeedPulse w czasie pracy jałowej metodą SpeedPulse

Generowanie do sieci elektroenergetycznej wyższych harmonicznych prądów powoduje zwiększenie odkształcenia w napięciu zasilającym (rys. 15). Ze względu na małe moce badanych urządzeń wzrost THD_U był niewielki tj. od 2% do 3%. Głównym powodem wzrostu tej wartości był wzrost piątej, jedenastej i trzynastej harmonicznej (rys. 16). Przy pracy jałowej urządzenia generują znacznie mniejsze wartości wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia, co przekłada się na znacznie mniejszy wpływ odkształcenia napięcia sieci elektroenergetycznej.

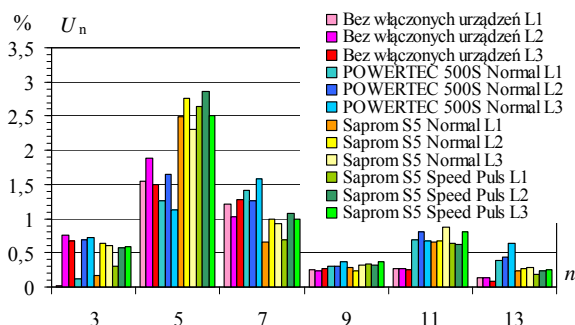
W celu precyzyjnego określenia stopnia energochłonności procesu spawania stanowisko zostało wyposażone w półautomat spawalniczy, który umożliwił ustalenie takich samych warunków spawania dla wszystkich próbek, takich jak:

- stały prąd spawania o wartości 300 A,
- stała szerokość napoiny o wartości 10 mm,
- stała długość napoiny o wartości 450 mm,

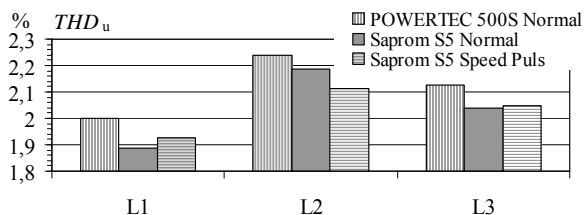
- ustalenie palnika pod stałym kątem wynoszącym 90° w stosunku do badanej próbki,
- stała wartość osłony gazowej - mieszanka M21 wg [10],
- brak podmuchów powietrza,
- stały odciąg dymów spawalniczych.



Rys.15. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych THD_u w napięciu zasilania przy pracy urządzeń spawalniczych (stan obciążenia)



Rys.16. Wartości skuteczne wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym przy wyłączonych i włączonych urządzeniach spawalniczych (pracujących w stanie obciążenia) w poszczególnych fazach



Rys.17. Zawartość procentowa wyższych harmonicznych THD_u w napięciu zasilania przy jałowej pracy urządzeń spawalniczych

Dzięki zastosowaniu takich samych warunków pracy badane próbki miały ten sam wymiar spawu. Próbki, które mimo zastosowanych warunków miały spawy odbiegające od norm [7] i [8] zostały pominięte do obliczania wartości energochłonności. Dla każdej metody wykonano 10 próbek, na podstawie których obliczono średnią wartość energochłonności procesu spawania w g/kW·h według wzoru (1) i przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Średnia wartość energochłonności procesu spawania za pomocą różnych metod i urządzeń spawalniczych

Metoda spawalnicza	Wartość energochłonności procesu spawania
Metoda standard MAG urządzeniem transformatorowym Powertec 500S	438,9 g/kW·h
Metoda standard MAG urządzeniem inwerterowym Saprom S5 SpeedPulse	472,8 g/kW·h
Metoda SpeedPulse urządzeniem inwerterowym Saprom S5 SpeedPulse	482,6 g/kW·h

Z przedstawianych wyników pomiarów wynika, iż źródło inwerterowe pobiera o 7,7% mniej energii podczas spawania metodą MAG niż urządzenie transformatorowe.

Zastosowanie nowoczesnej metody SpeedPulse zamiast klasycznej metody standard MAG powoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej o 2,1%, przy zastosowaniu tego samego urządzenia oraz o 10% w stosunku do źródła transformatorowego. Jednakże urządzenie inwerterowe Saprom S5 Lorch pobiera ok. dwa razy więcej energii elektrycznej podczas pracy jałowej (253 W·h dla funkcji standard MAG i 236 W·h dla funkcji SpeedPuls) niż urządzenie transformatorowe Powertec 500S/W (130 W·h).

Uwagi i wnioski

- Urządzenia spawalnicze powodują:
 - pobieranie prądu odkształconego w stanie obciążenia (rys. 9 do rys. 11) i jałowym (rys. 12 do rys. 14), co wiąże się z generowaniem do sieci wyższych harmonicznych prądów (rys. 7),
 - pogorszenie współczynnika mocy podstawowej harmonicznej przy stosowaniu urządzeń inwerterowych ($dPF=0,70$) i transformatorowych ($dPF=0,95$),
 - wzrost wartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym w wyniku poboru wyższych harmonicznych prądów (rys. 16),
 - urządzenia inwerterowe pobierają o ok. 8% mniej energii elektrycznej do wykonania takiego samego spawu (tej samej masy spawu) jak urządzenia transformatorowe, pomimo poboru wyższego prądu (rys. 8),
 - zastosowanie metody inwerterowej SpeedPuls pozwala na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej o 10%.

Autorzy: dr inż. Andrzej Lange, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, E-mail: andrzej.lange@uwm.edu.pl

prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Politechnika Śląska, Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.pasko@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Kazała R., Ocena przebiegu procesu spawania metodą MAG na podstawie charakterystyk wyładowania łukowego. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, nr 7, 24
- [2] Kazała R., Badanie zjawisk w łuku elektrycznym z wykorzystaniem charakterystyk czasowo-częstotliwościowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, nr 2, 44-47
- [3] Dobaj E., Maszyny i urządzenia spawalnicze. *WNT*, Warszawa, 2005
- [4] Sproesser G., Pittner A., Rethmeier M., Increasing performance and energy efficiency of Gas Metal Arc Welding by a high power tandem process. *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use*, Procedia CIRP 40 (2016), 642 – 647
- [5] Ashwani Kumar, Shakti Singh Gautam, Alok Kumar, Heat input & joint efficiency of three welding processes TIG, MIG and FSW using AA6061. *National Conference on "Recent Advances in Mechanical Engineering" RAME – 2014*, Special Issue, Vol. 1, No. 1, January 2014
- [6] Orłowicz A.W., Trytek A., A study of arc and melting efficiency in GTAW process. *Archives of Foundry*, 2003, Volume 3, Book 8,131-140
- [7] PN-EN ISO 6520-1:2009, Spawanie i procesy pokrewne - Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach - Część 1: Spawanie
- [8] PN-EN ISO 5817:2014-05, Spawanie -- Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek) -- Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych
- [9] PN-EN ISO 17637:2011, Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych
- [10] PN-EN ISO 14175:2009, Materiały dodatkowe do spawania -- Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych