

Wpływ energii liniowej na wybrane aspekty jakości połączeń spawanych elektrodą nietopliwą z zastosowaniem prądu pulsującego

Effect of Heat Input on Selected Quality Aspects of Pulsed Current GTAW Joints

Streszczenie

Istnieje wiele opracowań naukowych, które podkreślają wpływ energii liniowej spawania na mikrostrukturę i własności złącza. Niemniej jednak znane są przypadki, gdy elementy spawane przy tej samej lub zbliżonych wartościach energii liniowej różnią się znacznie jakością. Artykuł zawiera przegląd literatury poświęconej zagadnieniom związanym z energią liniową oraz z możliwościami optymalizacji parametrów procesu przy spawaniu metodą GTAW prądem pulsującym.

Słowa kluczowe: energia liniowa; spawanie elektrodą nietopliwą; prąd pulsujący

Abstract

There are many papers and investigations concerning the major influence of heat input on microstructure and mechanical properties of welded joints. However, welded joints made with the same heat input don't exhibit the same quality and properties in every case. The article presents the review of literature dealing with heat input issues and possibilities of optimization of pulsed current GTAW process parameters.

Keywords: heat input; GTAW; pulsed current

Energia liniowa

Pojęcie energii liniowej spawania jest powszechnie stosowanym wskaźnikiem określającym ilość wprowadzanego do materiału ciepła na jednostkę długości spoiny. Od ilości wprowadzonego ciepła zależą własności stopiwa i spoiny. Duża ilość ciepła sprzyja powstawaniu struktur gruboziarnistych, dlatego też własności mechaniczne często pogarszają się jeśli proces spawania prowadzony jest przy zbyt wysokich wartościach energii liniowej. Energia liniowa spawania jest zatem podstawowym parametrem doboru warunków spawania oraz wielkością będącą bazą dla innych wskaźników obliczanych i stosowanych w spawalnictwie.

Energii liniowej nie można zmierzyć bezpośrednio. Jej oceny dokonuje się na podstawie obliczeń opartych na pomiarach wartości napięcia i natężenia prądu oraz prędkości spawania [1÷4]. PN-EN 1011-1 [5] w ogólnych wytycznych dotyczących spawania łukowego podaje wzór o następującej postaci:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ/mm}] \quad (1)$$

gdzie:

Q – energia liniowa,
k – sprawność cieplna,

U – napięcie łuku [V],

I – natężenie prądu spawania [A],

v – prędkość spawania [mm/s].

W przypadku spawania prądem pulsującym najczęściej stosuje się do obliczeń wartości średnie natężenia prądu obliczając je z zależności [25]:

$$I_{sr} = \frac{I_i \cdot t_i + I_p \cdot t_p}{t_i + t_p} \quad (2)$$

gdzie:

I_{sr} – średnie natężenie prądu [A],

I_{ip} – natężenie prądu impulsu i podstawy (odpowiednio) [A],

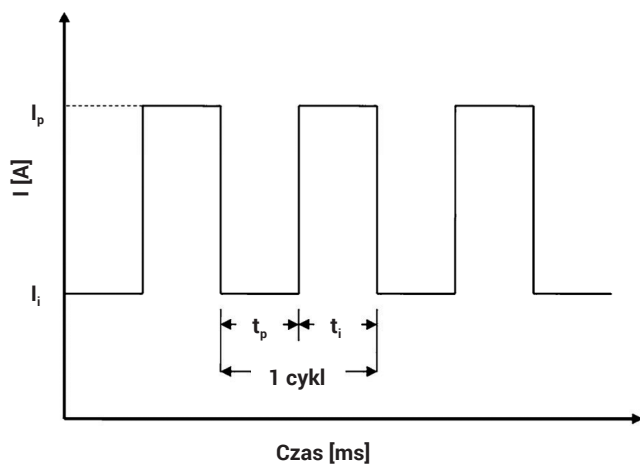
t_{ip} – czas trwania impulsu i prądu podstawy (odpowiednio) [ms].

W podstawowym wzorze na energię liniową spawania pomija się niektóre czynniki wpływające pośrednio lub bezpośrednio na ilość dostarczonego w trakcie spawania ciepła [2,11]. Biorąc pod uwagę możliwości sterowania procesem poprzez regulację kształtu przebiegu impulsu (rys. 1) klasyczne podejście do określania energii liniowej spawania może doprowadzić do jej niedoszacowania lub przeszacowania, a w konsekwencji – skutkować brakiem korelacji pomiędzy wartością energii liniowej a własnościami uzyskanego złącza [4,24].

Mgr inż. Małgorzata Ostromecka – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: malgorzata@ostromecka.pl

Pomimo braku możliwości bezpośredniego sterowania procesem za pomocą samej energii liniowej prowadzi się wciąż nowe badania, w których ocenia się jej wpływ na mikrostrukturę i własności złączy spawanych. Większość opracowań traktuje jednak energię liniową jako punkt wyjścia do optymalizacji parametrów procesu [13,14,16,25]. W nielicznych opracowaniach rozpatruje się konieczność równoległego uwzględnienia nie tylko ilości doprowadzonego do materiału ciepła, ale również sposobu jego doprowadzania i odprowadzania w zależności od czasu [22,23].



Rys. 1. Przebieg zmian natężenia prądu spawania GTA prądem jednokierunkowym [16]

Fig. 1. Current waveform for GTA welding process [16]

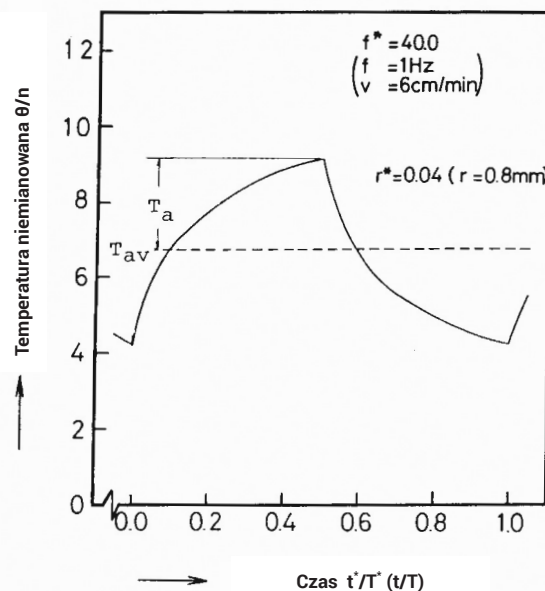
Wpływ energii liniowej na tworzenie się jeziorka i geometrię spoiny

Krystalizacja metalu spoiny przebiega w specyficznych warunkach, które różnią się znacznie od krzepnięcia wlewków. Objętość jeziorka spawalniczego jest bardzo mała, a w jego wnętrzu zachodzi nieustanne mieszanie się ciepłego metalu. Pole temperatur przemieszcza się, podążając za łukiem spawalniczym.

Na charakter krystalizacji spoiny wpływa ilość dostarczonego ciepła i prędkość spawania. W związku z tym przy spawaniu prądem o stałym natężeniu wraz ze wzrostem prędkości powinniśmy otrzymywać struktury drobniejsze, a ze wzrostem prądu spawania struktury bardziej gruboziarniste. Przy spawaniu prądem pulsującym, prąd o natężeniu wysokim trwa krótko, po czym następuje znaczne ochłodzenie jeziorka spawalniczego podczas przepływu prądu o niskim natężeniu. Spoina nie jest przegrzana, wzrasta prędkość krzepnięcia i powoduje to rozdrobnienie ziarna [6]. Struktura drobnoziarnista z nieznaczną niejednorodnością chemiczną zazwyczaj zapewnia wysoką wytrzymałość i plastyczność złącza.

W warunkach zmieniającej się mocy cieplnej łuku podczas spawania prądem pulsującym rozkład temperatury i kształt jeziorka spawalniczego również zmienia się w czasie (rys. 2). W celu wyjaśnienia tego zjawiska powstało kilka modeli, opisujących w sposób ilościowy wpływ prądu pulsującego na rozkład temperatur w jeziorku spawalniczym oraz geometrię spoiny [7÷10].

Model numeryczny przepływu cieczy oraz wymiany ciepła w jeziorku spawalniczym podczas spawania prądem pulsującym elektrodą nietopliwą został opracowany



Rys. 2. Zmiana temperatury w czasie przy spawaniu prądem pulsującym [7]

Fig. 2. Fluctuation of temperature due to pulsating moving heat source [7]

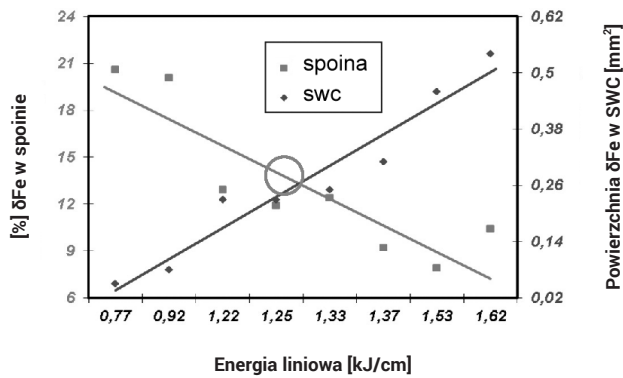
przez C. S. Wu et al. [9] Model ten przedstawiał m.in. rozkład temperatury oraz zmiany głębokości i szerokości jeziorka spawalniczego w charakterystycznych punktach cyklu. Wyniki badań wykazały zależność objętości jeziorka od natężenia prądu spawania. Główną siłą napędową przepływu cieczy były różnice napięcia powierzchniowego, a prędkość przepływu zmieniała się okresowo wraz z pulsacją prądu.

A. Traidia [10] w swoim modelu porównywał m.in. warunki spawania prądem pulsującym i prądem o stałym natężeniu. Stwierdził, że w zależności od zastosowania prądu pulsującego lub prądu o stałym natężeniu przy tej samej energii liniowej uzyskać można różne objętości jeziorka. Zauważył również, że aby wytworzyć spoinę o takiej samej geometrii jak przy danych parametrach prądu pulsującego, należy zwiększyć prąd spawania, powodując znaczny wzrost energii liniowej. Jednocześnie przy tej samej wartości prądu średniego spawania osiągamy różne rozmiary jeziorka spawalniczego, w zależności od różnicy pomiędzy wysokością natężenia prądu impulsu a prądem podstawowym.

P. Sejc i R. Kubicek [12] analizowali wpływ energii liniowej na zawartość ferrytu delta w strukturze stali austenitycznej 304L. Wyniki ich pomiarów wykazały wyraźnie, że ze wzrostem energii liniowej wzrasta zawartość ferrytu delta w strefie wpływu ciepła, jednocześnie spada jego zawartość w strukturze spoiny (rys. 3). Najwyższą zawartość ferrytu delta w spoinie otrzymano podczas spawania metodą GTAW prądem pulsującym przy energii liniowej 0,77 kJ/cm, a najniższą przy spawaniu prądem o stałym natężeniu przy energii liniowej 1,62 kJ/cm.

P. K. Giridharan i N. Murugan [13] optymalizowali parametry spawania stali 304L w celu otrzymania najkorzystniejszego kształtu spoiny. W swojej pracy brali pod uwagę: głębokość wtopienia, szerokość spoiny, powierzchnię ścięgu, współczynnik kształtu. Badania prowadzone były w warunkach zbliżonej wartości energii liniowej. Zaobserwowano, że na geometrię spoiny największy wpływ ma prędkość spawania oraz natężenie prądu impulsu.

Arivarasu M. et al. [14] badali możliwości optymalizacji parametrów spawania stali 304L przy różnych częstotliwościach prądu pulsującego. Zaobserwowali, że udział

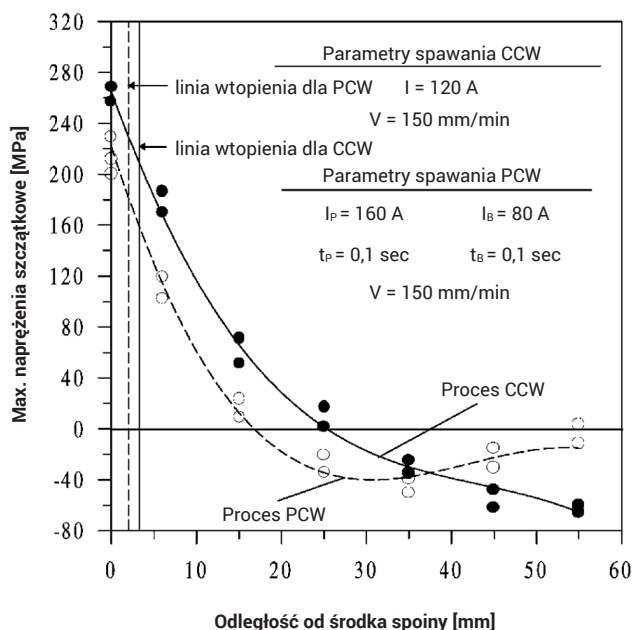


Rys. 3. Zawartość ferrytu delta w spoinie i w strefie wpływu ciepła w zależności od energii liniowej [12]

Fig. 3. Amount of delta ferrite in the structure of weld metal and heat affected zone in the dependence on the welding heat input [12]

czasu trwania impulsu do długości cyklu ma duży wpływ na geometrię spoiny w przypadku wysokich częstotliwości (150÷250 Hz), natomiast w zakresie niskich częstotliwości (6÷8 Hz) decydujące znaczenie ma wartość częstotliwości. Stwierdzili również, że przy spawaniu prądem pulsującym o wysokiej częstotliwości pełny przetop uzyskujemy przy niższych wartościach energii liniowej.

Naprężenia szczytkowe powstające w wyniku spawania GTAW prądem pulsującym oraz prądem o stałym natężeniu na stalach 304 i 310 badane były przez K. H. Tseng i C. P. Chou [15]. Zaobserwowali oni, że wzrost częstotliwości przy prądzie pulsującym powoduje zmniejszenie naprężeń szczytkowych przy spawaniu stali austenitycznych. Większy odstęp pomiędzy impulsami prowadzi do zmniejszenia energii liniowej. Przy spawaniu prądem pulsującym otrzymano znacznie niższe (niż dla prądu o stałym natężeniu) wartości naprężeń szczytkowych rozciągających w bliskiej odległości spoiny, natomiast w materiale rodzimym występowały niewielkie naprężenia ściskające (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład naprężeń szczytkowych w spoinach wykonanych metodą GTAW w stali 304 prądem pulsującym(PCW) i prądem o stałym natężeniu (CCW) [15]

Fig. 4. Distribution of the residual stresses in the weldment of 304 stainless steel for GTA pulsed current welding (PCW) and GTA constant current welding [15]

Wpływ parametrów spawania prądem pulsującym na własności mechaniczne złącza

M. Yousefieh et al. [16] badali wpływ parametrów spawania prądem pulsującym GTAW na twardość i pracę łamania w złączach ze stali superduplex. Analizowali zmiany natężenia prądu impulsu, prądu podstawowego, częstotliwości i udziału czasu trwania impulsu do czasu całego cyklu. Optymalizacja parametrów otrzymana metodą Taguchi i analiza wariancji ANOVA wykazała, że na twardość w złączu największy wpływ miało natężenie prądu impulsu (71,81%) oraz udział czasu trwania impulsu do czasu całego cyklu (21,99%). Na pracę łamania największy wpływ miała wartość natężenia prądu impulsu (78,18%), a następnie natężenie prądu podstawowego (17,81%). Na podstawie przedstawionych wyników można było również zaobserwować liniowy wzrost zawartości austenitu w mikrostrukturze wraz ze wzrostem energii liniowej.

Ravindra Kumar et al. [17] badali złącza wykonane metodą GTAW prądem pulsującym na blachach ze stali węglowej AISI 1008 przy różnych parametrach spawania. Podczas zmiany prędkości spawania zmieniano średnie natężenie prądu w taki sposób, aby energia liniowa nie ulegała zmianie. Zastosowanie prądu pulsującego prowadziło do podwyższenia twardości i wytrzymałości na rozciąganie złącza. Obrazy mikrostruktury otrzymane przy pomocy TEM przedstawiały w tym obszarze wzrost gęstości dyslokacji. Strefa stopienia posiadała znacznie drobniejsze ziarno, a szerokość SWC została zredukowana. Zastosowanie wysokiej prędkości spawania i wysokiego natężenia prądu umożliwiło ok. 12-procentowy wzrost twardości i wytrzymałości na rozciąganie.

N. Karunakaran [18] porównywał wpływ spawania prądem pulsującym i prądem o stałym natężeniu na rozkład temperatur, wygląd spoiny, własności mechaniczne i mikrostrukturę złącza. Badał twardość w spoinie oraz w odległości 5 i 15 mm od spoiny. W tych też odległościach umieścił termopary w celu pomiaru rozkładu temperatur. Wyniki jego badań potwierdziły tezę, że zastosowanie prądu pulsującego umożliwia obniżenie energii liniowej procesu. Próbkę wykonane z zastosowaniem pulsacji wykazywały się niższym poziomem naprężeń szczytkowych, co jest szczególnie istotne przy spawaniu elementów wykonanych z blach cienkich. Złącza te posiadały również wyższe wartości własności mechanicznych tzn.: wytrzymałości na rozciąganie i twardości. W mikrostrukturze zaobserwowano rozdrobnienie ziarna oraz fragmentację dendrytów spowodowaną pulsacją prądu. Karunakaran stwierdził, że jest to główna przyczyna wzrostu własności mechanicznych złącza.

Podczas badań prowadzonych na złączach ze stali AISI 4135 [19] zaobserwowano, że na wartość wytrzymałości na rozciąganie największy wpływ ma prędkość spawania, natomiast na odkształcenie – wysokość natężenia prądu impulsu. Inne badania [20] wykazały, że udział czasu trwania impulsu do długości cyklu ma największy wpływ na wartość wytrzymałości na rozciąganie – najwyższa wartość wytrzymałości została osiągnięta przy udziale 40% czasu trwania impulsu do długości cyklu (zakres badawczy wynosił 40÷80%).

J. Kangazian i M. Shamanian [21] badali złącze powstałe w wyniku spawania GTAW prądem pulsującym stali austenitycznej z węglową. Na podstawie analiz wyników stwierdzili, że największy wpływ na odporność korozyjną i mikro-twardość w złączu ma częstotliwość przy stosunkowo niewielkim znaczeniu natężenia prądu impulsu.

A. A. Ugla [22,23] badał wpływ parametrów procesu przy spawaniu prądem pulsującym i prądem o stałym natężeniu na geometrię, mikrostrukturę oraz własności mechaniczne złącza w stali 304L. Proces analizowany był w zależności od prędkości spawania, prędkości podawania drutu, częstotliwości prądu pulsującego oraz prędkości chłodzenia. Ustalił, że podczas spawania prądem o wysokiej częstotliwości w trakcie krzepnięcia dochodzi w spoinie do łamania ramion dendrytów, co z kolei sprzyja tworzeniu się struktury bardziej jednorodnej i poprawia własności

mechaniczne złącza. Wysokie wartości prędkości chłodzenia, uzyskiwane poprzez zastosowanie prądu pulsującego, zwiększenie prędkości posuwu palnika oraz włączenie dodatkowego obwodu chłodzącego (w tym przypadku chłodzenie ciągłe wodą) powodują utrudnienie przemiany ferrytu delta w austenit, co skutkuje zwiększeniem zawartości ferrytu szczytkowego w strukturze spoiny. Wytrzymałość na rozciąganie rosła w przypadku zwiększenia prędkości chłodzenia zarówno dla niskiej i wysokiej wartości prądu pulsującego, jak i przy spawaniu prądem o stałym natężeniu.

Możliwości optymalizacji parametrów procesu – podsumowanie

Na jakość połączeń spawanych ma wpływ wiele czynników, które też wzajemnie na siebie oddziałują. Ilość dostarczonego do materiału ciepła charakteryzowana jako energia liniowa może być jedynie punktem wyjścia do wstępnej analizy procesu spawania.

W literaturze obserwuje się w ostatnich latach wyraźną tendencję do wykorzystywania metod statystycznych w celu optymalizacji parametrów procesów produkcyjnych. Eksperymenty planowane są często metodą Taguchi, następnie wykonywana jest analiza wariancji ANOVA. Dzięki tym metodom można określić wpływ czynników sterowalnych na proces produkcyjny lub pożądaną jakość (wytrzymałość, twardość), a przede wszystkim zaplanować eksperyment w taki sposób, by po stosunkowo niedużej ilości prób umożliwić optymalizację i sterowanie procesem. Na bazie metody Taguchi nie można utworzyć modelu matematycznego procesu, a jedynie ustalić wartości parametrów, które zapewnią uzyskanie najlepszej jakości według zdefiniowanego kryterium. Niemniej jednak wyliczone parametry optymalne i odpowiadająca im wartość wyjściowa wykazują bardzo dużą zgodność z danymi otrzymanymi w eksperymentach weryfikujących.

Metodyka planowania eksperymentu i optymalizacji parametrów procesu Taguchi jest wykorzystywana w spawalnictwie coraz chętniej i z dużym powodzeniem. Jako kryterium jakościowe przyjmuje się zazwyczaj własności mechaniczne złącza. Jednakże w niektórych przypadkach (np.: dla stali duplex) bardzo przydatne byłoby opracowanie kryterium związanego z mikrostrukturą stali.

Literatura

- [1] R. Kensik: Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa 9-10/2006.
- [2] K. Kudła, K. Wojsyk: Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania, Przegląd Spawalnictwa 12/2010.
- [3] R. Scot Funderburk: A look at Heat Input, Welding Innovation Vol. XVI, NO. 1. 1999.
- [4] Zmiany w normach ASTM dotyczących obliczania energii liniowej, Biuletyn Informacji Technicznej LEB2/2010 Lincoln Electric.
- [5] PN-EN1011-1 Spawanie – Zalecenia dotyczące spawania metali – Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego.
- [6] E. Tasak: Metalurgia spawania, 2008, ISBN 978-83-923191-1-5.
- [7] Y. Hirata: Pulsed arc welding, Welding International, 2003, 17 (2), pp. 98-115.
- [8] M. Kureishi: A Study on Welding Conditions for the Pulsed TIG Welding by the Theory of Heat Conduction, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 48, 1979, No. 12 P, pp. 1033-1040.
- [9] C. S. Wu, W. Zheng and L. Wu: Modelling the transient behavior of pulsed current tungsten inert gas weldpools, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 7, 1999, pp. 15-23.
- [10] A. Traidia: Multiphysics modeling and numerical simulation of GTA weld pools (Ph. Thesis - 2011), HAL Archives Ouvertes.fr.
- [11] L. Verwaerde, R. Katiyar: Wpływ sterowania charakterystyką prądu na kształt spoiny i właściwości mechaniczne stopiwa, Przegląd Spawalnictwa 7-8/2009.
- [12] P. Sejc, R. Kubicek: Influence of Heat Input on the Content of Delta Ferrite in the Structure of 304L Stainless Steel GTA Welded Joints, Scientific Proceedings 2011, Vol. 19, 2011, pp. 8-14.
- [13] P. K. Giridharan, N. Murugan: Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, 40: 478-489.
- [14] M. Arivarasu, K. Devendranath Ramkumar, N. Arivazhagan: Comparative Studies of High and Low Frequency Pulsing On the Aspect Ratio of Weld Bead in Gas Tungsten Arc Welded AISI 304L Plates, Procedia Engineering 97, 2014, pp. 871-880.
- [15] K. H. Tseng, C. P. Chou: The Effect of Pulsed GTA Welding on the Residual Stress of a Stainless Steel Weldment, Journal of Materials Processing Technology 123, 2002, pp. 346-353.
- [16] M. Yousefieh, M. Shamanian, and A. Saatchi: Optimization of Experimental Conditions of the Pulsed Current GTAW Parameters for Mechanical Properties of SDSS UNS S32760 Welds Based on the Taguchi Design Method, JMEPEG (2012) 21: 1978-1988.
- [17] Ravindra Kumar, Ramkishor Anant, P. K. Ghosh, Ankita Kumar, and B. P. Agrawal: Influence of PC-GTAW Parameters on Microstructural and Mechanical Properties of Thin AISI 1008 Steel Joints, JMEPEG, 2016, 25: 3756-3765.
- [18] N. Karunakaran: Effect of Pulsed Current on Temperature Distribution, Weld Bead Profiles and Characteristics of GTA Welded Stainless Steel Joints, IJET Vol. 2, No. 12, Dec. 2012.
- [19] J. Joseph and S. Muthukumar: Optimization of pulsed current GTAW process parameters for sintered hot forged AISI 4135 P/M steel welds by simulated annealing and genetic algorithm, J. Mech. Sci. and Tech., 30 (1), 2016, pp. 145-155.
- [20] M. Yousefieh, M. Shamanian, A. R. Arghavan: Analysis of Design of Experiments Methodology for Optimisation of Pulsed Current GTAW Process Parameters for Ultimate Tensile Strength of UNS S32760 Welds, Metall. Microstruct. Anal., 2012, 1: 85-91.
- [21] J. Kangazian, M. Shamanian: Multiresponse Optimization of Pulsed-Current Gas Tungsten Arc Welding (PCGTAW) for AISI 304 Stainless Steel to St 52 Steel Dissimilar Welds, Metall. Microstruct. Anal., 2016, 5: 241-250.
- [22] A. A. Ugla: A Comparative Study of Pulsed and Non-Pulsed Current on Aspect Ratio of Weld Bead and Microstructure Characteristics of AISI 304L Stainless Steel, Innovative Systems Design and Engineering, Vol. 7 No.4, 2016.
- [23] A. A. Ugla: Characterisation of Metallurgical and Mechanical Properties of the Welded AISI 304L Using Pulsed and Non-Pulsed Current TIG Welding, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, Vol: 10, No: 4, 2016.
- [24] P. Cegielski, A. Kolas, M. Kuczyński, R. Rostkowska: Wybrane aspekty pomiarów i monitorowania podczas spawania łukowego, Przegląd Spawalnictwa 12/2016.
- [25] M. Yousefieh, M. Shamanian, and A. Saatchi: Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method, Journal of Alloys and Compounds 509, 2011, pp. 782-788.