

Zastosowanie metody Taguchi w spawalnictwie

Application of Taguchi method in welding technology

Streszczenie

Metoda Taguchi jest stosowana przy planowaniu eksperymentu do optymalizacji wybranych parametrów spawania w celu poprawy jakości złączy. W opracowaniu przedstawiono przegląd aktualnej literatury dotyczącej metodyki Taguchi wykorzystanej w różnych procesach spawalniczych.

Słowa kluczowe: optymalizacja; metoda Taguchi; spawalnictwo

Abstract

Taguchi method is used as a statistical design of experiment technique for optimizing selected welding parameters in terms of improvement of the weld quality. The present study reviews current literature on the Taguchi methodology applied for various welding processes.

Keywords: optimization; Taguchi method; welding technology

Wprowadzenie

Procesy spawalnicze są powszechnie stosowane do wytwarzania wielu rodzajów wyrobów. W niektórych przedsiębiorstwach stanowią one podstawowe procesy produkcyjne. Określenie wymagań dotyczących jakości dla procesów spawania jest niezmiernie ważne, ponieważ jakość tych procesów nie może być łatwo weryfikowana, a skutki usunięcia wykrytej wady mogą generować olbrzymie koszty i opóźnienia. Kontrola i badania jakości pozwalają wykryć wadliwe warunki spawalnicze tylko po ich wystąpieniu. Z tego powodu konieczne jest stosowanie działań zapobiegawczych w postaci sterowania tymi parametrami procesu, które mogą powodować obniżenie jakości lub jej brak.

Norma ISO 9001 zwraca uwagę na procesy specjalne, które muszą być monitorowane i nadzorowane w sposób ciągły w celu spełnienia określonych wymagań jakościowych. Dotyczy to w szczególności tych parametrów wyrobu, których pomiary są kosztowne lub trudne do wykonania, a także w przypadku wyrobu lub wyników procesu, które nie mogą być w pełni sprawdzone przez późniejsze kontrole i badania. Spawanie zostało uznane jako proces specjalny, a Europejski Komitet Normalizacyjny opublikował normę EN 729 (obecnie ISO 3834) dotyczącą systemów jakości w przedsiębiorstwach stosujących procesy spawalnicze. Spawanie musi być nadzorowane przed, w trakcie i po zakończeniu procesu. Jakość wyrobu musi być tożsama z wyrobem i dlatego powinna być razem z nim tworzona [1,2].

Dla przedsiębiorstw produkcyjnych kluczowym elementem zapewniającym wysoką konkurencyjność i jakość oferowanych produktów jest zapewnienie powtarzalności i stabilności podstawowego procesu produkcyjnego. Prawidłowo zaprojektowany i wdrożony proces stwarza możliwości uzyskania zamierzonych wyników, a kontrola poszczególnych jego elementów jest kluczem do jego optymalizacji.

Nadmienić należy jednak, że istotnym warunkiem uzyskania zamierzonych efektów jest właściwa identyfikacja i ilościowe ujęcie pojawiających się problemów.

Metoda opracowana przez Gen'ichi Taguchi może być szczególnie pomocnym narzędziem w początkowej fazie rozwoju lub przy modyfikacji istniejącego już produktu lub procesu ukierunkowanego na uzyskanie maksymalnej „odporności” na działanie różnych zakłóceń [3÷5]. Doskonale może się również sprawdzać w spawalnictwie przy optymalizacji parametrów spawania.

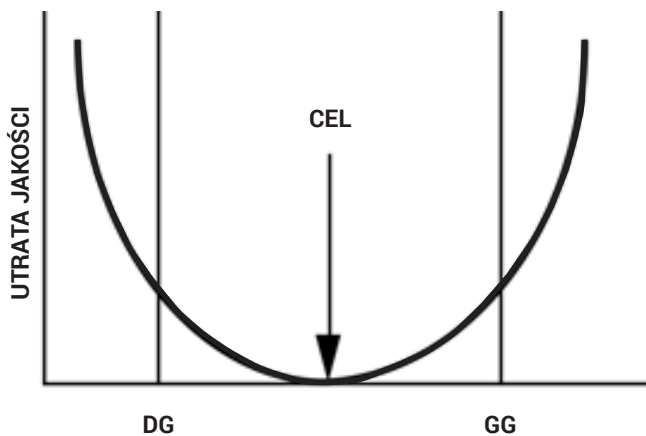
Idea Gen'ichi Taguchi

Podejście Taguchiego opiera się na koncepcji społecznych kosztów jakości i teorii zmienności [6]. Zmienność uważana jest za stan niepożądany, a jej eliminacja jest celem usprawniania procesów. Zdaniem G. Taguchi producenci zbyt często ograniczają się do utrzymania jakości produktu w granicach tolerancji. Istotą modelu japońskiego inżyniera w odróżnieniu od tradycyjnego podejścia jest założenie, że utrata jakości jest kwadratową funkcją odchylenia parametrów produktu od wartości nominalnych, a ograniczenie zmienności produktów jest możliwe dzięki wytwarzaniu ich z najmniejszą możliwą wariancją.

Główną ideą metody nie jest stworzenie matematycznego modelu procesu, lecz ustalenie wartości parametrów, które zapewnią uzyskanie najlepszej jakości według zdefiniowanego kryterium. Natomiast celem projektowania parametrów jest poszukiwanie takich nominalnych wartości dla czynników sterowalnych, które spełnią warunki maksymalnej zgodności produktu przy najniższych kosztach i najmniejszej wrażliwości na działanie zakłóceń [3,7] (rys.1).

Mgr inż. Małgorzata Ostromecka – Politechnika Warszawska.

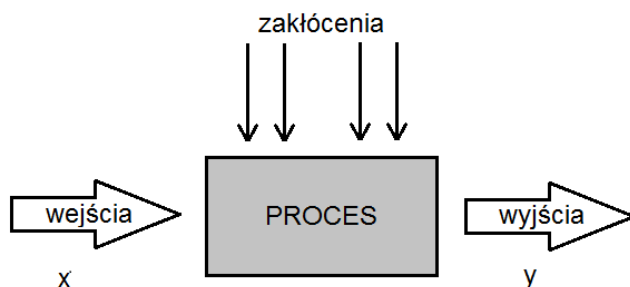
Autor korespondencyjny/Corresponding author: malgorzata@ostromecka.pl



Rys. 1. Funkcja strat jakości Taguchi, DG i GG – odpowiednio dolna i górna granica tolerancji [6,7]

Fig. 1. Taguchi Loss Function; DG i GG – lower and upper specification limits respectively [6,7]

Na charakterystyki funkcjonalne wyrobu, określające jego wartość użytkową, oddziałują dwa rodzaje czynników: czynniki sterowalne (sygnał – S) i czynniki zakłócające (szum – N) (rys. 2). Za powstawanie odchyłeń charakterystyk wyrobu od wartości pożądaných odpowiadają najczęściej czynniki pozostające poza kontrolą użytkownika, spowodowane niedoskonałością procesów wytwarzania, starzeniem się maszyn i urządzeń, a także temperaturą otoczenia, wilgotnością itp. Ponieważ kontrola tych czynników jest często niemożliwa lub bardzo kosztowna nie dąży się do ich identyfikacji, ale dobiera się takie parametry dla czynników sterowalnych, aby proces uczynił jak najmniej wrażliwym na zakłócenia. Optymalizacja parametrów realizowana jest poprzez zmaksymalizowanie stosunku sygnału do szumu (signal/noise ratio – S/N).



Rys. 2. Model procesu
Fig. 2. Process model

Projektowanie parametrów jest kluczowym etapem w metodzie Taguchi, w którym można najskuteczniej spełnić warunek podniesienia jakości bez relatywnego wzrostu kosztów. Wykorzystuje się do niego teorię planowania eksperymentu (ang. *Design of Experiment* – DOE), jednak w przeciwieństwie do innych metod statystycznych [5,8] metoda Taguchi nie prowadzi do budowy związków aproksymacyjnych – powstają one w sposób niejawnny i od razu przechodzi się do określenia wartości optymalnych procesu.

Metodologia poprawy jakości w odniesieniu do procesu obejmuje kolejno działania:

- Określenie optymalizowanej właściwości i wariantu funkcji strat jakości (najczęściej według kryterium: im mniejsze – tym lepsze, najlepsze – nominalne lub im większe – tym lepsze).
- Określenie parametrów wejściowych procesu technologicznego (rodzaju parametrów i zakresów zmienności).

- Wybór tablicy ortogonalnej, przygotowanie planu eksperymentu.
- Przeprowadzenie eksperymentów zgodnie z przyjętym planem.
- Opracowanie wyników, wyznaczenie zoptymalizowanych wartości parametrów wejściowych.
- Obliczenie przewidywanej wartości wyjściowej przy zastosowaniu optymalnych wartości parametrów wejściowych.
- Przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu weryfikującego w celu określenia zgodności przewidywanych wyników z rzeczywistością.

Projektowanie parametrów jest istotą metody Taguchi. Jednakże w przypadkach, w których zmniejszenie wariacji uzyskane na etapie projektowania parametrów nie jest wystarczające, stosuje się dodatkowo projektowanie tolerancji. Nie może być to jednak działaniem zasadniczym i zgodnie z filozofią japońską praktykuje się to jedynie w sytuacjach koniecznych.

Metoda Taguchi w spawalnictwie

Podczas optymalizacji procesu spawania podstawowym etapem jest określenie parametrów wejściowych procesu, czyli np.: natężenia prądu, napięcia i długości łuku, szybkości spawania, przepływu gazu itp. W zależności od wybranej metody spawania parametry wejściowe mogą się zmieniać, a więc np.: przy spawaniu laserowym rozpatruje się parametry wiązki – jej moc, szybkość przesuwu, średnicę płamki. Kryterium wyjściowe, czyli jakość pod kątem której dokonujemy optymalizacji, zależy od dalszego zastosowania elementu. Może być to osiągnięcie jak najwyższej wytrzymałości, udarności, odporności na ścieranie lub korozję – albo uzyskanie określonej geometrii spoiny. W przypadku spawania stali duplex kryterium jakościowym może być otrzymanie odpowiednich proporcji ferrytu i austenitu w mikrostrukturze.

Główną zaletą metody Taguchi jest ograniczona ilość eksperymentów, które planuje się w celu optymalizacji parametrów procesu. W planach wykorzystywane są tablice ortogonalne umożliwiające obliczenie maksymalnej liczby nieobciążonych efektów głównych przy minimalnej liczbie układów planu. W praktyce rozpatrując np.: cztery parametry wejściowe na trzech poziomach przyjmowanych wartości korzysta się z tablicy L9 (3^4), czyli wykonywane jest dziewięć spoin przy konkretnie ustawionych konfiguracjach parametrów (tabl. I). Badając pięć parametrów wejściowych na pięciu poziomach ustawień stosuje się tablicę L25 (5^5) – w tym przypadku wykonywane jest 25 próbek. Metody projektowania eksperymentów mogą być w praktyce zadaniem bardzo kosztownym i żmudnym. Taguchi zaproponował uproszczoną metodę planowania eksperymentów [9] i analizowania wyników, opartą na osiągnięciach statystyki matematycznej oraz klasycznej teorii planowania eksperymentów R. A. Fisher'a. Plany Taguchi mają wiele zalet z punktu widzenia statystycznego. W szczególności pominięcie w modelu pewnych członów nie powoduje konieczności przeliczania oszacowań pozostałych jego parametrów, o ile tylko pomiary wykonywane były zgodnie z planem ortogonalnym dla tego modelu.

Metodykę Taguchi zastosowano do optymalizacji parametrów różnych procesów spawalniczych.

E. M. Anawa i A. G. Olabi [10] optymalizowali parametry spawania laserowego CO₂ połączenia wykonanego ze stali niskowęglowej AISI 1009 ze stalą AISI 316. Wykorzystali tabelę ortogonalną L25 (3^5) dla trzech parametrów procesu (moc wiązki, prędkość spawania i średnica płamki) badanych

Tablica I. Tablica ortogonalna L9 (3⁴) [9]
Table I. Orthogonal array L9 (3⁴) [9]

PRÓBA	PARAMETRY WEJŚCIOWE			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

na pięciu poziomach ustawień. Parametrami wyjściowymi była szerokość spoiny, głębokość wtopienia i powierzchnia przekroju poprzecznego. A. Khajanchee et al. [11] zastosowali metodę Taguchi przy spawaniu laserowym CO₂ kół zębatych dla przemysłu motoryzacyjnego. Jako czynniki sterujące obrano moc wiązki i szybkość spawania, a kryterium wyjściowe stanowiła głębokość wtopienia (im większa, tym lepsza) i szerokość spoiny (im węższa, tym lepsza). W metodyce posłużono się tabelą L9.

Planowanie eksperymentu oraz tabele ortogonalne wykorzystano również przy optymalizacji parametrów spawania laserowego stali superaustenitycznej AISI 904L [12] oraz stali P92 odpornej na pełzanie [13]. L. Dubourg i L. ST-Georges zastosowali metodykę Taguchi przy napawaniu laserowym. [14]

M. Ishak et al. [15] optymalizowali parametry spawania metodą GMAW złącza wykonanego z dwóch różnych stopów aluminium. Jako czynniki sterujące wybrano natężenie i napięcie prądu spawania oraz prędkość spawania. W badaniach wykorzystano tablicę L16 (parametry badane były na czterech poziomach ustawień), a za kryterium jakościowe obrano wytrzymałość na rozciąganie.

Metodykę Taguchi zastosowano do optymalizacji spawania różnych materiałów, stali austenitycznych [16], stali węglowej AISI 1020 [17], stopów magnezu, tytanu, aluminium, [18] a także do wykonywania połączeń różnoimiennych [10].

N. K. Sahu et al. [19] badali złącza ze stali niskowęglowej spawane metodą GMAW. Jako czynniki sterowalne

wybrali natężenie i napięcie prądu spawania oraz grubość blachy. Za kryterium jakościowe przyjęli geometrię spoiny. P. S. Rao et al. [20] badając wpływ parametrów procesu spawania prądem pulsującym GMAW na geometrię spoiny posłużyli się metodą Taguchi w celu zaplanowania eksperymentu. Utworzyli tablicę L18, obierając jako czynniki sterujące grubość blachy, częstotliwość pulsacji, prędkość podawania drutu, natężenie prądu impulsu oraz stosunek prędkości podawania drutu do prędkości posuwu.

Y. S. Tarng i W. H. Yang [21] wykorzystali metodę Taguchi przy optymalizacji procesu spawania łukiem krytym blachy wykonanej ze stali niskowęglowej o grubości 30 mm. Podobne badania przeprowadzone zostały przez N. Ene i E. Scutelnicu [20]. A. Sarkar et al. optymalizowali parametry procesu spawania łukiem krytym pod kątem geometrii złącza oraz wytrzymałości na rozciąganie [23]. K. Gowthaman et al. jako kryterium jakościowe dla tego procesu przyjęli twardość [24]. A. Kumar et al. [25] poddali optymalizacji skład chemiczny topnika do spawania łukiem krytym jako kryterium stosując pracę łamania i twardość Vickersa dla połączeń wykonanych przy stałych parametrach procesu.

Stosunkowo nowa technologia, opracowana w 1991 r. w Welding Institute w Wielkiej Brytanii – zgrzewanie tarciove z przemieszaniem (FSW) również stała się obiektem zainteresowania naukowców zajmujących się optymalizacją parametrów procesu. W pracy [26] badano parametry wejściowe procesu zgrzewania stopu aluminium RDE-40 metodą FSW. Eksperyment przeprowadzono zgodnie z planem tablicy ortogonalnej L9, a za kryterium jakościowe obrano maksymalną wytrzymałość na rozciąganie. Podobne badania przeprowadzono również dla stopu 6061 [27]. A. G. Chand et al. [28] poszukiwali odpowiedniego materiału narzędzia do zgrzewania FSW stopu 6061. Wykorzystując metodę Taguchi przyjęli jako jeden z parametrów wejściowych materiał narzędzia. S. Prasath et al. [29] badali połączenia różnych stopów magnezu. Jako czynniki sterujące w metodyce Taguchi zostały wybrane: prędkość obrotowa, siła docisku i kształt trzpienia narzędzia. Kształt trzpienia rozpatrywany był również jako parametr wejściowy w badaniach S. Kumar et al. [30] dla stopu aluminium 6056. J. Kundu et al. [31] poszukiwali możliwości osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości dla połączeń ze stopu AA5083 wykonanych metodą FSW. Wykorzystali w tym celu tablicę ortogonalną L9, a jako czynniki sterujące ustalili prędkość obrotową, prędkość posuwu i kąt pochylenia narzędzia.

Wiele badań zostało poświęconych optymalizacji metodą Taguchi parametrów spawania GTAW prądem pulsującym [32-35]. Przy procesie spawania prądem pulsującym elektrodą nietopliwą za parametry wejściowe przyjmuje się najczęściej natężenie prądu impulsu i podstawy, współczynnik wypełnienia oraz częstotliwość pulsacji.

Podsumowanie

Metoda Taguchi może być doskonałym narzędziem optymalizacyjnym przy procesach zautomatyzowanych realizowanych na dużą skalę. Od wielu lat metodyka ta stosowana jest w przemyśle motoryzacyjnym w firmach takich jak: Ford, Chrysler, Toyota, General Motors. (Ford po raz pierwszy przeszkolił swoich inżynierów w zakresie metod Taguchi już w latach 80-tych). Olbrzymią zaletą metody jest prostota i szybkość zastosowania, z tego też powodu adresowana jest głównie do przemysłu. Wielu badaczy zarzuca jej możliwość stosowania jedynie w trybie off-line, choć sam Taguchi proponował wykorzystanie metody również w trakcie produkcji poprzez niewielkie modyfikacje parametrów procesu. Pewnym ograniczeniem jest fakt, że sama metoda nie skutkuje utworzeniem żadnych związków aproksymacyjnych, nie daje też możliwości uzyskania informacji na temat wzajemnej korelacji badanych zmiennych. Z tego powodu, w niektórych pracach wykorzystywane są techniki hybrydowe stanowiące kombinacje metod optymalizacyjnych tworzonych na potrzebę danego procesu [22]. W celu zbadania siły związku pomiędzy badanymi zmiennymi metoda Taguchi łączona jest często z teorią szarego

systemu GRA [13,16,18,22,30,31] lub sztuczną siecią neuronową ANN [36]. Optymalizacja parametrów zazwyczaj zakończona zostaje także analizą wariancji ANOVA, która ma na celu wykazanie, które zmienne niezależne mają wpływ na poziom zmiennej zależnej. Przy stosowaniu połączeń tych metod statystycznych otrzymuje się nie tylko zestaw optymalnych parametrów wejściowych i odpowiadającą mu przewidywaną jakość, lecz również informację, które z badanych czynników mają decydujący wpływ na wynik procesu. Pamiętać należy jednak, że metoda Taguchi ogranicza możliwe rozwiązania do wybranych poziomów parametrów sterowalnych, podczas gdy zmienne mogą przyjmować wartości z ciągłego zakresu.

Metoda Taguchi, mimo iż posiada swoje ograniczenia w zastosowaniu, może stanowić bardzo poważną alternatywę optymalizacyjną w przypadku procesów spawalniczych. Największą redukcję kosztów może przynieść przy zastosowaniu w zautomatyzowanych liniach produkcyjnych np.: przy spawaniu lub zgrzewaniu w przemyśle samochodowym lub w przypadku, gdy konieczne jest seryjne wyprodukowanie takich samych elementów. Podczas wykonywania konstrukcji składających się z wielu złączy spawanych w różnych warunkach, często manualnie – nie zaleca się stosowania tej metody. W wielu jednak przypadkach wykonanie eksperymentów zaplanowanych na bazie metody Taguchi w celu optymalizacji warunków spawania dla danego procesu może przynieść wymierne korzyści.

Literatura

- [1] T. Sałaciński, W. Sosnowski: System nadzorowania jakości procesów spawalniczych zgodny z wymaganiami ISO 3834 w oparciu o standardy ISO 9001 – część 1, Przegląd Spawalnictwa Vol. 87, No 4, 2015.
- [2] T. Sałaciński, W. Sosnowski: System nadzorowania jakości procesów spawalniczych zgodny z wymaganiami ISO 3834 w oparciu o standardy ISO 9001 – część 2, Przegląd Spawalnictwa Vol. 87, No 6, 2015.
- [3] G. Taguchi, D. Clausing: Robust Quality, Harvard Business Review, Jan.-Feb. 1990.
- [4] G. J. Park, T. H. Lee, K. H. Lee: Robust Design: An Overview, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal Vol. 44, No. 1, January 2006
- [5] J. Antony: Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner, Sensor Review, Vol 26, No 3, 2006, pp. 227-230.
- [6] Z. Zymonik: Koszty jakości w zarządzaniu przedsiębiorstwem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [7] Resit Unal, Edwin B. Dean: Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview, 1991 Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040121019.pdf>.
- [8] M. Bober: Badania wpływu głównych parametrów napawania plazmowego na geometrię napoju w oparciu o metody planowania eksperymentu, Przegląd Spawalnictwa Vol 89, No 4, 2017.
- [9] Taguchi's Quality Engineering Handbook, Appendix C, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470258354.app3/pdf>.
- [10] E. M. Anawa, A. G. Olabi: Using Taguchi Method to Optimize Welding Pool of Dissimilar Laser Welded Components, Optics and Laser Technology, 40(2) pp. 379-388, 2008.
- [11] A. Khajanchee, P. Jain, S. K. Pradhan: Optimization of CO₂ Laser Welding Process Parameters for Automotive Gear using Taguchi Method, International Journal of Engineering Science and Computing, Vol. 6 Issue No. 8, 2016.
- [12] P. Sathiya, M. Y. Abdul Jaleel, D. Katherasan: Optimization of welding parameters for laser bead-on-plate welding using Taguchi method, Production Engineering, Research and Development, 2010, 4:465-476.
- [13] B. Shanmugarajan, Rishabh Shrivastava, P. Sathiya, G. Buvanashakaran, Optimization of laser welding parameters for welding of P92 material using Taguchi based grey relational analysis, Defence Technology 12, 2016, pp. 343-350
- [14] L. Dubourg, L. St-Georges: Optimization of Laser Cladding Process Using Taguchi and EM Methods for MMC Coating Production, Journal of Thermal Spray Technology Vol. 15(4), 2006, pp. 790-795.
- [15] M. Ishak, N. F. M. Noordin, L. H. Shah: Parametric studies on tensile strength in joining AA6061-T6 and AA7075-T6 by gas metal arc welding process, Material Science and Engineering 100, 2015, 012042.
- [16] P. K. Giridharan, N. Murugan: Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40: 478-489.
- [17] A. Kumar, M. K. Khurana and P. K. Yadav: Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Parameters, Material Science and Engineering 149, 2016, 012002.
- [18] J. S. Shih, Y. F. Tseng, J. B. Yang, Principal component analysis for multiple quality characteristics optimization of metal inert gas welding aluminum foam plate, Materials and Design 32, 2011, pp. 1253-1261.
- [19] N. K. Sahu, A. K. Sahu, A. K. Sahu: Optimization of weld bead geometry of MS plate (Grade: IS 2062) in the context of welding: a comparative analysis of GRA and PCA-Taguchi approaches, Sadhana Vol. 42, No. 2, Febr 2017, pp. 231-244.
- [20] P. S. Rao, O. P. Gupta, S. S. N. Murty, A. B. K. Rao: Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45: 496-505.
- [21] Y. S. Tarn, W. H. Yang: Application of the Taguchi Method to the Optimization of the Submerged Arc Welding Process, Materials and Manufacturing Processes Vol. 13, No. 3, pp. 455-467, 1998.
- [22] N. Ene, E. Scutelnicu: Application of the Taguchi Method Combined with Grey Relational Analysis for the Optimization of the Submerged Arc Welding Process, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Vol.24, 2013.
- [23] A. Sarkar, J. Roy, A. Majumder, S. C. Saha: Optimization of Welding Parameters of Submerged Arc Welding Using Analytic Hierarchy Process (AHP) Based on Taguchi Technique, Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, April-June 2014, 95(2):159-168.
- [24] K. Gowthaman, J. Saiganesh, C.S. Rajamanikam: Determination of Submerged Arc Welding Process, Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013, <http://ieeexplore.ieee.org/document/6533495/>
- [25] A. Kumar, S. Maheshwari, S. K. Sharma: Optimization of Vickers Hardness and Impact Strength of Silica based Fluxes for Submerged Arc Welding by Taguchi Method", 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, Materials Today: Proceedings 2, 2015, pp. 1092-1101.
- [26] A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian: Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminum alloy using Taguchi technique, Transactions of Nonferrous Metals Society of China 18, 2008, pp.548-554.
- [27] M. Nourani, A. S. Milani, S. Yannacopoulos: Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Stir Welding of 6061 Aluminum Alloy: A Review and Case Study, Engineering, 2011,3, pp. 144-155.
- [28] A. G. Chand, J. Bunyan. V.: Application of Taguchi Technique for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy AA6061, International Journal of Engineering Research and Technology Vol. 2 Issue 6, 2013.
- [29] S. Prasath, S. Vijayan, S. R. K. Rao: Optimization of Friction Stir Welding Process parameters for joining ZM21 to AZ31 of dissimilar Magnesium alloys using Taguchi technique, La Metallurgia Italiana, - No 5, 2016.
- [30] S. Kumar, S. Kumar: Multi-response optimization of process parameters for friction stir welding of joining dissimilar Al alloys by grey relation analysis and Taguchi method, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37:665-674.
- [31] J. Kundu, H. Singh: Friction stir welding of AA5083 aluminum alloy: Multi-response optimization using Taguchi-based grey relational analysis, Advances In Mechanical Engineering, 2016, Vol.8(11) pp. 1-10.
- [32] 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, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21: 1978-1988.
- [33] 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.
- [34] Joby 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, Journal of Mechanical Science and Technology, 30 (1), 2016, pp. 145-155.
- [35] 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, Metallography, Microstructure and Analysis, 2012, 1: 85-91.
- [36] D. Zhang, J. Niu: Application Of Artificial Neural Network Modeling To Plasma Arc Welding Of Aluminum Alloys, Journal of Advanced Metallurgical Sciences, 2000, Vol. 13 No.1, pp. 194-200.