

Możliwości użycia fali akustycznej do diagnozy procesów spawalniczych

Possibility of using acoustic wave for diagnosis of welding processes

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania analizy zmian w fali akustycznej emitowanej w czasie spawania zrobotyzowanego metodą MAG do oceny stabilności procesu. Stwierdzono pewną korelację pomiędzy natężeniem prądu spawania a charakterystykami amplitudowo-częstotliwościowymi. Prezentowane wyniki mają charakter poznawczy i mogą stanowić podstawę do przyszłych prac.

Słowa kluczowe: spawanie; jakość procesu; fala akustyczna; przetwarzanie sygnałów; parametry spawania

Abstract

In the paper a possibility of application analysis of the changes in acoustic wave emitted in the welding time of robotized GMA for evaluation of process stability was presented. It was stated some correlation between welding current and amplitude-frequency characteristics. Given results are preliminary studies and could be a basement for future works.

Keywords: welding; quality of the process; acoustic wave; signal processing; welding parameters

Wprowadzenie

Podstawowym warunkiem wykonania poprawnych złączy spawanych jest stabilność procesu spawania. Monitorowanie stabilności łuku spawalniczego powszechnie realizuje się stosując pomiar i rejestrację oraz analizę parametrów: natężenia prądu spawania i napięcia łuku, oraz dodatkowo: natężenia przepływu gazu osłonowego, prędkości spawania i prędkości podawania drutu. Spośród niekonwencjonalnych metod oceny stabilności jarzenia się łuku największe znaczenie mają systemy wizyjne, jednak można stosować również bardziej czułe techniki rentgenowskie, ultradźwiękowe i emisji akustycznej. Osobną, perspektywiczną metodą jest analiza dźwięku generowanego przez łuk spawalniczy [1,2].

W praktyce przemysłowej często stwierdza się, że wrażenia słuchowe dźwięku spawania są odmienne dla różnych metod oraz parametrów spawania. Zbadanie zjawiska zmian emisji ciśnienia akustycznego emitowanego w procesie ma na celu usystematyzowanie ich zależności ze zmiennością parametrów spawania odpowiadających za jakość procesu. Poszukiwania takich związków sprowadzały się do analizowania przebiegów widmowych uzyskanych sygnałów dźwiękowych oraz przeprowadzenia badań wizualnych próbek. Celem niniejszej pracy jest zweryfikowanie możliwości zastosowania analizy dźwięku emitowanego przez łuk do oceny stabilności spawania metodą MAG.

Metodologia badań

Do badań wykorzystano zrobotyzowane stanowisko spawalnicze przystosowane do spawania metodą MAG. Fakt ten tłumaczy się potrzebą powtarzalności oraz dokładności przeprowadzonych testów [3]. Spośród wielu metod spawalniczych została wybrana powyższa ze względu na powszechność użycia [4]. Testy polegały na wykonywaniu napoin próbnych o jednakowej długości, odzwierciedlających zjawiska zachodzące podczas procesu spawania. Ich jakość określono na podstawie badań wizualnych [5]. Badania przeprowadzono na zrobotyzowanym (Fanuc Arc Mate 120/12L) stanowisku do spawania składającym się z urządzenia spawalniczego (Fronius TPSi 500) oraz stołu i układu rejestrującego dźwięk. Sygnał pomiarowy został rejestrowany za pomocą dwóch przetworników pomiarowych: mikrofonu o charakterystyce dynamicznej (Audio-Technica Pro41) i pojemnościowej (Rode VideoMic). Ponieważ przeprowadzane badania są wysoce teoretyczne, a wyżej opisane zależności dotychczas raczej nieznanne, układ pomiarowy zapewnia wystarczająco dobrą jakość przy zachowaniu prostoty. Mikrofony zostały umieszczone w bezpiecznej odległości od łuku spawalniczego i skierowane w jego stronę [5].

Napoiny próbne wykonano na blachach ze stali S235JR o grubości 2 mm. Jako materiały dodatkowe zastosowano drut elektrodowy G3Si1 (Benmag SG3, firmy Darnet)

Inż. Maciej Pluta – ZAP-Robotyka Sp. z o.o.; **dr inż. Leszek Łatka** – Politechnika Wrocławska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: leszek.latka@pwr.edu.pl

oraz gaz osłonowy Ferroline C12 X2 (M24 wg PN-EN ISO 14175) o składzie chemicznym 86% Ar + 12% CO₂ + 2% O₂ [6]. Gaz osłonowy został dobrany tak, aby zapewnić wysoką wydajność procesu w połączeniu z dobrą jakością spoin.

Spośród wielu parametrów spawania analizowano tylko niektóre, najbardziej podstawowe: natężenie prądu spawania i jego tryb (standardowy lub impulsowy) oraz prędkość spawania. W przypadku analizy ściśle określonego parametru pozostałe przyjmowały wartości referencyjne przypisane wg tablicy 1.

Tablica I. Wartości referencyjne parametrów spawania

Table I. Reference values of the welding parameters

Parametr	Wartość
Natężenie prądu spawania	120 A
Prędkość spawania	60 cm/min
Średnica drutu	1 mm
Pochylenie uchwytu	15° w kierunku toru spawania
Przepływ gazu	12 l/min
Wolny wylot drutu	6±8 mm

Na potrzeby analizy wprowadza się pojęcia próby o charakterze statycznym i dynamicznym [5]. W pierwszym przypadku natężenie prądu spawania oraz prędkość spawania zmieniano o stałe wartości po każdej z trzech prób. W drugim przypadku wartości natężenia prądu spawania lub prędkości spawania zmieniały się płynnie od pewnej wartości minimalnej do maksymalnej w ramach jednego przejścia. Systematyzacja wartości parametrów spawania jest zawarta w tablicy 2.

Tablica II. Wartości parametrów spawania dla prób o charakterze statycznym i dynamicznym

Table II. Welding parameters values for samples for static and dynamic testing

Parametr	Wartość			
	Próby statyczne			Próby dynamiczne
Natężenie prądu spawania [A]	90	120	150	$I_0 = 50$, $I_{max} = 160$
Prędkość spawania [cm/min]	30	60	90	$V_0 = 30$, $V_{max} = 100$

Proces spawania prowadzono z wykorzystaniem prądu standardowego i prądu impulsowego [7]. Dla obu trybów pracy analizowano te same parametry i przyjęto takie same wartości wg tablicy 2. Pominięto wpływ dodatkowych współczynników takich jak stabilizacja wtopienia, korekcja dynamiki łuku lub bezodpryskowe zajarzenie łuku. Zostały one wyłączone lub wyzerowane [5].

Interpretacja sygnału dźwiękowego

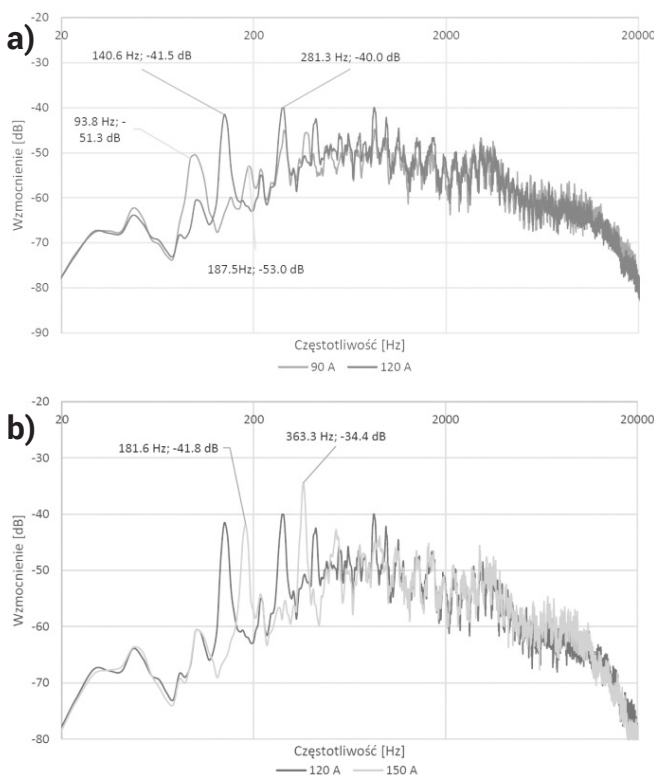
Analiza uzyskanych próbek sygnałów pomiarowych sprowadza się do obserwacji przebiegów widmowych powstałych w oparciu o algorytm transformaty Fouriera, FFT (ang. *fast Fourier transform*). Testy o charakterze statycznym rozważa się ze względu na charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową, natomiast te o formie dynamicznej należy analizować przez śledzenie spektrogramu próbki sygnału pomiarowego. Zastosowanie spektrogramu pozwala

w dowolnej chwili czasu określić wartości poziomu wzmacnienia [dB] z pożądanego zakresu widma [8]. Znając intensywność zmian zdefiniowanego parametru spawania, można oszacować zależność pomiędzy tym parametrem i zmianami zachodzącymi w fali akustycznej emitowanej w badanym procesie [5].

W przypadku stwierdzenia wyraźnej zależności podjęto działania mające na celu wprowadzenie jej matematycznego opisu. Do tego celu posłużono się różnymi algorytmami przetwarzania sygnału, np. filtracja, obliczanie wartości średniej etc. Wskaźnikiem pozwalającym zobrazować dokładność opisu jest współczynnik korelacji regresji liniowej [9].

Natężenie prądu spawania – prąd impulsowy

Wykonano łącznie cztery napojiny w celu dokonania analizy wpływu natężenia prądu spawania na zmiany zachodzące w fali akustycznej. Pierwsze trzy próby miały charakter statyczny. Wartości trzech kolejnych nastaw zmieniały się w kolejności: 90, 120 oraz 150 A wg tablicy 2. Wartość środkowa jest referencyjna, stąd do tego przebiegu będą przyrównywane pozostałe, przyjęte jako wartości skrajne. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe tych prób zostały przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe dla prądu impulsowego:

a) porównanie 90 A ze 120 A; b) porównanie 120 A ze 150 A

Fig. 1. Amplitude-frequency characteristics for impulse current:

a) comparison 90 A with 120 A; b) comparison 120 A with 150 A

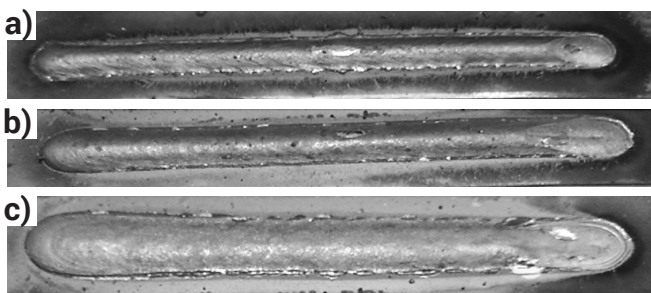
Na rysunku 1a zaobserwowano zjawisko znacznej różnicy we wzmacnieniu ścisłych zakresów niektórych częstotliwości. Odnotowano również zjawisko harmoniczności [10]. Na wykresie zaznaczono tylko dwie podstawowe wartości, natomiast podczas szerszej analizy zaobserwowano przynajmniej trzy kolejne, o relatywnie wysokiej amplitudzie, harmoniczne częstotliwości podstawowej. Występują one dla obu wartości parametrów, a ich położenie na osi czasu

można porównać do przesunięcia w fazie o pewną wartość: $f_{1,120\text{ A}} - f_{1,90\text{ A}} = 141\text{ Hz} - 94\text{ Hz} = 47\text{ Hz}$ [5]. Poziom wzmacnienia otoczenia częstotliwości podstawowej (w obu przypadkach) jest ok. 20 dB niższy, a więc jest to 100-krotnie mniejsza wartość. Zauważalna jest również różnica w sumarycznym wzmacnieniu obu sygnałów. Wrażenia słuchowe potwierdzają to, że nagranie dla 90 A jest cichsze i sprawia wrażenie bardziej zaszumionego niż nagranie dla 120 A.

Bardzo podobne spostrzeżenia notuje się dla kolejnego porównania widocznego na rysunku 1b, tym razem wartości wyższej z wartością referencyjną. Wzmacnienie częstotliwości podstawowej oraz jej harmoniczne są bardziej wyraźne na tle całego widma niż dla poprzedniej próby. Wartość „przesunięcia w fazie” jest zbliżona i wynosi: $f_{1,150\text{ A}} - f_{1,120\text{ A}} = 181\text{ Hz} - 141\text{ Hz} = 40\text{ Hz}$. W odczuciu zmysłu słuchu dźwięk próbki dla najwyższego natężenia prądu jest jeszcze bardziej wyrazisty i lekko kłujący.

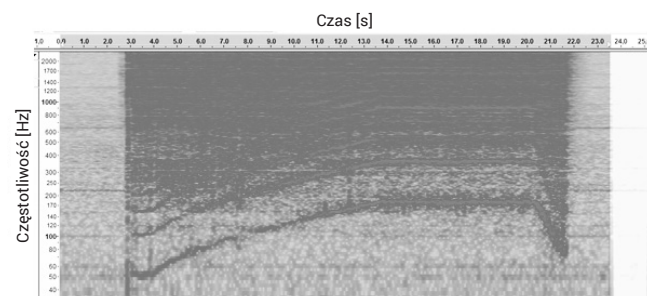
Wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu rosną wymiary geometryczne lica (rys. 2). Wszystkie trzy próbki prezentują się wizualnie poprawnie, nie występują podtopienia, pory powierzchniowe czy pęknięcia, a ilość odprysków jest niska. Zaobserwowano przetopienie blachy dla natężenia prądu 150 A.

Następnie program źródła prądu ustawiono tak, aby wartość natężenia prądu płynnie zwiększała się od wartości początkowej $I_{\min} = 50\text{ A}$ do wartości $I_{\max} = 160\text{ A}$ w chwili od 1 do 9 sekundy. Następnie wartość I_{\max} została podtrzymywana przez 6 sekund po czym zmalała do końcowej w przeciągu ok. sekundy. Podobieństwo między tym ciągiem zmian wartości natężenia prądu a zmianami w widmie obserwowalnymi na rysunku 3 jest bardzo wysokie. W zakresie pierwszych 9 sekund wzmacnienie zmieniających się częstotliwości (podstawowej i harmonicznych) rośnie proporcjonalnie w czasie. Następnie wartości przebiegu ulegają „stabilizacji”, aby po chwili zmaleć do wartości końcowej. Stwierdzono również przerwę w pierwszej fazie próby, jest to spowodowane chwilową utratą stabilności łuku i jego ponownym zajarzeniem [5].



Rys. 2. Widok uzyskanych napoin od strony lica dla prądu impulsowego: a) 90 A, b) 120 A, c) 150 A

Fig. 2. View of obtained weld belds from the face for impulse current: a) 90 A, b) 120 A, c) 150 A



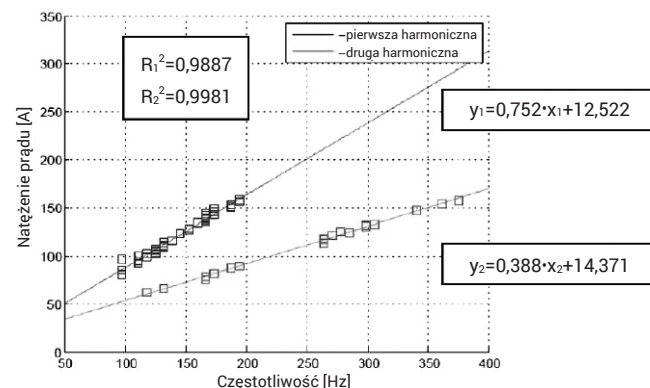
Rys. 3. Spektrogram sygnału dla próby o płynnej zmianie natężenia prądu (prąd impulsowy)

Fig. 3. Signal spectrum for sample smooth current change (impulse current)

Zauważono wyraźną zależność pomiędzy zmianami natężenia prądu i zmianami zachodzącymi w fali akustycznej emitowanej podczas procesu. Tłumaczyć to można zmianą częstotliwości przeskoku łuku pomiędzy elektrodą a materiałem podstawowym oraz ilości kropelek ciekłego metalu transferowanych do jeziora ciekłego metalu. Badaną korelację postanowiono opisać matematycznie oraz oszacować dokładność tego opisu. W tym celu wycięto fragment nagrania, a mianowicie zakres czasu, w którym nastąpił tylko wzrost wartości natężenia prądu (od 1 do 9 sekundy), tak aby uniknąć czasu dojazdu robota oraz chwili zajarzenia łuku [5].

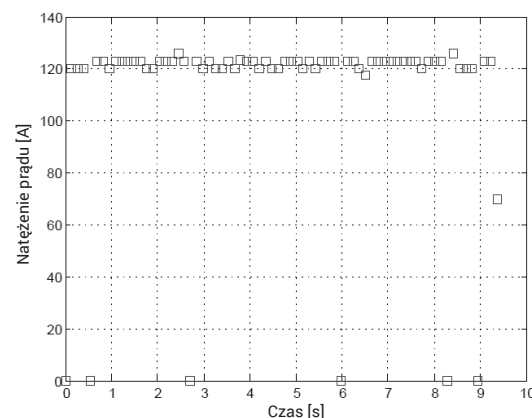
W rezultacie wykonania obliczeń oraz przetwarzania cyfrowego sygnału uzyskano charakterystyki zależności natężenia prądu od wartości częstotliwości badanej fali akustycznej dla dwóch różnych mikrofonów. Różnice między nimi są niewielkie, więc przedstawiony zostanie tylko jeden wykres dla mikrofonu o charakterystyce pojemnościowej (rys. 4) ze względu na szersze pasmo przenoszenia [11]. Sygnał filtrowano, ponieważ powyżej 500 Hz pojawiały się niepożądane szumy, a zakres potrzebny do analizy nie wykraczał ponad tę wartość.

Jak można zauważyć dokładność przybliżenia liniowego (współczynnik determinacji „ R^2 ”) jest bardzo wysoka [12]. Dokonując pomiaru można w prosty sposób obliczyć natężenie prądu spawania w każdej chwili trwania procesu. Potwierdzeniem tego jest rysunek 5, który powstał w wyniku wykonania szeregu obliczeń na próbce nagrania dla parametrów referencyjnych. Niebieskie punkty oznaczają chwilową wartość natężenia prądu. Program „rozpoznał” wartości prądu spawania. Niektóre punkty zostały przez program nierozpoznane, więc domyślnie przypisano im wartość zero. Ostatni punkt oznacza bardzo gwałtowny spadek natężenia prądu towarzyszący zakończeniu procesu.



Rys. 4. Zależność częstotliwości fali akustycznej od natężenia prądu spawania

Fig. 4. Dependence of acoustic wave frequency vs welding current



Rys. 5. Przebieg wartości natężenia prądu w czasie dla próbki z parametrami referencyjnymi

Fig. 5. Welding current values in time for sample with reference parameters

Natężenie prądu spawania – prąd standardowy

Po wykonaniu prób z wykorzystaniem prądu stałego w trybie bez pulsacji można zauważyć brak dominującej częstotliwości, widmo jest spłaszczone, wyglądem przypomina szum. Natomiast kształt charakterystyk dla każdej wartości prądu jest niemal identyczny. Spektrogram próby o charakterze dynamicznym potwierdza powyższe wnioski. Podczas płynnej zmiany wartości natężenia prądu nie odnotowano dużych zmian, oprócz rosnącej amplitudy sygnału na przestrzeni całego widma (rys. 6).

Prędkość spawania

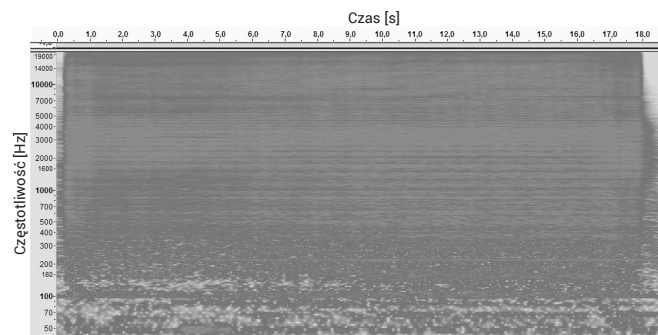
W przypadku analizy próbek wykonanych z różnymi prędkościami spawania stwierdzono, że przebiegi fali akustycznej niemal nie różniły się od siebie. Wzmocnienie częstotliwości podstawowych i harmonicznym pozostawało na podobnych poziomach. Dodatkowa próba polegała na stworzeniu programu, podczas wykonywania którego zwiększano prędkość przesuwu uchwytu względem materiału spawanego od wartości $V_{\min}=30$ cm/min do $V_{\max}=100$ cm/min. Spektrogram fali akustycznej wyemitowanej podczas tego przejścia jest jednostajny. Wzmocnienie częstotliwości w zakresie całego widma jest w przybliżeniu stałe, nie zmienia się również kształt przebiegu.

W impulsowym trybie pracy nie stwierdzono zależności między prędkością spawania a zmianami zachodzącymi w fali akustycznej emitowanej w procesie. Na podstawie

powyższych badań można sformułować tezę, że nie istnieje zależność między wyżej opisanymi zjawiskami [5].

Nieco inaczej prezentują się wyniki dla napoin wykonanych za pomocą trybu standardowego. We wszystkich próbach zauważa się różnice we wzmocnieniu całego widma lecz, kształt przebiegu charakterystyk jest taki sam. Efektem tego jest wrażenie różnego poziomu głośności każdej kolejnej próbki, lecz „barwa” dźwięku spawania pozostaje niezmienna.

Spektrogram ostatniej próbki dla płynnego zwiększania prędkości jest jednostajny. Dla pierwszych kilku sekund wartości amplitud sygnału są relatywnie wysokie, po czym łagodnie maleją aż do zakończenia próby. Poszukiwanie zależności dla tego trybu pracy i parametru stanowi interesujący problem do rozwiązania w przyszłości. Proponuje się wykonanie dodatkowych testów, w których analiza będzie dotyczyć także przebiegów czasowych. Wskazane jest użycie dokładniejszej aparatury pomiarowej (np. przetworniki o lepszej jakości oraz czujniki drgań).



Rys. 6. Spektrogram sygnału dla próby o płynnej zmianie natężenia prądu (prąd standardowy)

Fig. 6. Signal spectrum for sample smooth current change (standard current)

Podsumowanie

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że zagadnienia analizy fali akustycznej emitowanej podczas procesu spawania są bardzo rozbudowane i nietypowe. Badając niektóre parametry spawania w sposób klarowny można było zdefiniować i opisać związki zachodzące między rozpatrywanymi zjawiskami. W innych było to niemożliwe z powodu małych znaczących różnic między badanymi próbkami sygnałów. Ponadto postawiono tezę, że może istnieć całkowity brak zależności między zmianami wartości parametru spawania a zmianami ciśnienia akustycznego zachodzącymi podczas procesu. Jednak jest to tylko częściowe zobrazowanie problemu, całość wymaga zbadania wielu innych parametrów takich jak wpływ zmian napięcia łuku, pochylenia uchwytu etc.

Z całą pewnością można ograniczyć zastosowanie tych zagadnień do działań czysto laboratoryjnych oraz diagnostycznych. Użycie czujnika pomiarowego w postaci mikrofonu w środowisku przemysłowym jest problematyczne, z powodu zbyt dużej wrażliwości na hałas zewnętrzny, pomimo relatywnie wysokiego poziomu natężenia dźwięku generowanego przez źródło. Obecność np. tokarki, układów hydraulicznych czy silników elektrycznych wprowadza zbyt silne zakłócenia uniemożliwiając prawidłową analizę.

Powyższe problemy traktując jako zagadnienie czysto teoretyczne mogą wspomóc opis i interpretację zjawisk zachodzących podczas procesu spawania. Patrząc od strony praktycznej istnieje możliwość stworzenia układu diagnozującego proces, jak i urządzenie spawalnicze w ściśle określonym zakresie i trybie pracy.

Literatura

- [1] Węglowski M.: Wykorzystanie promieniowania emitowanego przez łuk elektryczny do monitorowania procesu spawania metoda TIG, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2010.
- [2] Luksa K.: Porównanie sygnałów rejestrowanych w obwodzie łuku spawalniczego i sygnałów dźwiękowych łuku metody GMA, Przegląd Spawalnictwa, vol. 74, (8-10), s. 66-69, 2002.
- [3] Honczarenko J.: Roboty przemysłowe, Warszawa, WNT, 2004.
- [4] Klimpel A.: Podręcznik spawalnictwa. T.1, Technologie spawania i cięcia, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [5] Pluta M.: Badania jakości zrobotyzowanego spawania poprzez analizę fali akustycznej emitowanej w procesie, Praca Dyplomowa, Politechnika Wroclawska, 2017.
- [6] Pilarczyk J. (red.): Poradnik Inżyniera – Spawalnictwo, T.1., Warszawa, WNT, 2003.
- [7] Pilarczyk J. (red.): Poradnik Inżyniera – Spawalnictwo, T.2., Warszawa, WNT, 2005.
- [8] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, Warszawa, WKiŁ, 2003.
- [9] Koronacki J., Mielniczuk J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych, Warszawa, WNT, 2006.
- [10] Kirpluk M.: Podstawy akustyki, Warszawa, NTLMK, 2012.
- [11] Sztekmiller K.: Podstawy nagłośnienia i realizacji nagrań. Podręcznik dla akustyków, Warszawa, WKiŁ, 2011.
- [12] Klonecki W.: Elementy statystyki dla inżynierów, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996.