

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

Benedykt Ślązak, Ryszard Krawczyk
Marek Fidali, Jacek Słania

**WŁAŚCIWOŚCI SPAWALNICZE ELEKTROD OTULONYCH
I ICH OCENA Z WYKORZYSTANIEM SYGNAŁÓW PROCESOWYCH**

Monografia



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

CZĘSTOCHOWA 2022

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Tomasz Chmielewski
dr hab. inż. Anna Timofiejczuk, prof. PŚ

Redakcja
Anita Ganoun

Redakcja techniczna
Robert Świerczewski

Projekt okładki
Dorota Boratyńska

ISBN 978-83-7193-889-4
e-ISBN 978-83-7193-890-0

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
Częstochowa 2022

WSTĘP

Spawanie ręczne elektrodą otuloną (oznaczenie 111 wg PN-EN ISO 4063) zapoczątkowane przez Oscara Kjellberga na początku XX wieku, jest najstarszą metodą spawania łukowego stosowaną w praktyce. Pomimo rozwoju wielu bardziej zaawansowanych i wydajnych metod spawania łukowego (spawanie metodami 114, 135, 131, 136 i 138) metoda 111 jest wciąż szeroko stosowana w różnych gałęziach przemysłu, głównie ze względu na wszechstronność oraz prostotę użycia. Spawanie elektrodą otuloną jest często wykorzystywane do budowy różnorodnych konstrukcji montowanych na wolnym powietrzu, takich jak statki, rurociągi, platformy wiertnicze czy różnego rodzaju obiekty inżynierii budowlanej. Podobnie wysoki udział tej metody obserwuje się w zakładach produkujących urządzenia i instalacje na potrzeby bardzo wymagających gałęzi przemysłu energetycznego, chemicznego, petrochemicznego czy offshore. Metoda 111 ma również szerokie zastosowanie w procesach regeneracji i naprawy uszkodzeń części maszyn i urządzeń. W tych warunkach wykorzystuje się jej istotne zalety związane ze stabilnością procesu realizowanego w różnych warunkach, często w wąskich przestrzeniach o utrudnionym dostępie, a także z ograniczoną energią cieplną wprowadzaną do materiału. Elektrody otulone cieszą się niemalejącą popularnością również wśród mniej doświadczonych użytkowników i spawaczy do prowadzenia różnorodnych prac remontowych w gospodarstwach domowych, rolnych czy w małych warsztatach ślusarskich.

Otulina elektrod, która w zależności od rodzaju stanowi minimum 25% masy elektrody, daje jak dotąd duże możliwości bardzo precyzyjnego kształtowania składu chemicznego stopiwa i tym samym oddziaływania na przyszłe właściwości złączy spawanych. Niejednokrotnie wybór metody spawania ręcznego elektrodą otuloną jest rozwiązaniem najlepszym, stanowiącym kompromis pomiędzy wysokimi wymaganiami eksploatacyjnymi połączeń a wydajnością spawania. Z drugiej strony znaczny postęp w zakresie konstrukcji urządzeń spawalniczych, a w szczególności zastosowanie technik inwertorowych, czyni metodę 111 wciąż interesującą. Urządzenia z wewnętrzną przemianą częstotliwości są kilkakrotnie lżejsze i wyraźnie tańsze w porównaniu do tradycyjnych prostowników diodowo-tyrystorowych [1, 2, 3]. Poza tym źródła tego typu oferują dodatkowe możliwości w zakresie sterowania i regulacji procesem spawania, tj. *Hot Start*, *Arc Force*, *Anti Stic* [4, 5, 6], czyniąc go łatwiejszym i bardziej przyjaznym dla użytkownika – spawacza. Niemalejącą popularność metody 111 potwierdzały badania statystyczne z lat 2002-2007, kiedy to obserwowano nieznaczny wzrost udziału urządzeń do spawania elektrodą otuloną w strukturze sprzedaży ogółu urządzeń spawalniczych w Polsce [7]. Biorąc pod uwagę powyższe informacje, można stwierdzić, że metoda 111 pozostaje wciąż wszechstronną metodą spawania stosowaną w praktyce.

Bez względu na przeznaczenie i obszar zastosowania elektrody otulone powinny spełniać szereg wymagań, które w konsekwencji przekładają się na jakość wykonanych połączeń spawanych. Obok odpowiedniego składu chemicznego czy minimalnych właściwości mechanicznych stopiwa jednym z najważniejszych wymagań są właściwości spawalnicze elektrod, rozumiane jako zdolność do prowadzenia procesu spawania w sposób stabilny i równomierny [8]. Ocena właściwości spawalniczych oraz stabilności procesu spawania prowadzona jest przez producentów dla każdej partii produkcyjnej elektrod. Weryfikacja właściwości spawalniczych może być również przeprowadzana przez odbiorców i użytkowników elektrod otulonych.

Właściwości spawalnicze elektrod otulonych, w tym stabilność procesu spawania, istotnie wpływają na jakość wykonywanych połączeń spawanych. Dlatego jednym z najważniejszych etapów kontroli jakości elektrod są badania i ocena stabilności procesu spawania dla poszczególnych partii elektrod. Tradycyjnym sposobem oceny właściwości spawalniczych elektrod są próby wykonywane przez wykwalifikowanego spawacza klasyfikatora w ramach kontroli końcowej procesu produkcyjnego. Producenci elektrod otulonych zazwyczaj bardzo precyzyjnie i szczegółowo określają kryteria tej oceny w zależności od gatunku, rodzaju otuliny, pozycji spawania czy średnicy elektrody. Ocena człowieka z natury jest oceną subiektywną, zależną od wiedzy, doświadczenia, sposobu odczuwania i percepcji obserwowanych zjawisk. Subiektywna z natury ocena spawacza klasyfikatora jest jedynym stosowanym w praktyce sposobem weryfikacji właściwości spawalniczych elektrod otulonych. Jednak, ze względu na oczywiste ograniczenia wynikające z subiektywnego charakteru oceny, a niejednokrotnie również z braku doświadczonych pracowników kontroli dokonujących oceny, bardzo istotne staje się wprowadzenie systemu oceny opartego na metodach ilościowych, być może systemu eksperckiego, którego zadaniem byłoby wspomaganie procesu oceny i podejmowania decyzji nt. jakości elektrod, a co za tym idzie możliwości uzyskiwania stabilnego łuku podczas spawania.

Źródłem informacji dla takiego systemu eksperckiego mogą być sygnały procesowe, a w szczególności przebiegi napięcia łuku i natężenia prądu spawania rejestrowane w trakcie procesu spawania. Jak dotąd sygnały procesowe znajdują głównie zastosowanie w ocenie procesów spawania realizowanych metodami zautomatyzowanymi i zmechanizowanymi. W bardzo ograniczonym natomiast zakresie przebiegi napięciowo-prądowe stosowane są do analizy procesu spawania ręcznego elektrodą otuloną. Dlatego zagadnienie to obszernie opisano w niniejszej monografii.

Wykorzystanie przebiegów napięciowo-prądowych do opisu i analizy procesów spawalniczych sięga lat 50. ubiegłego wieku. Pierwsze badania opisujące zjawiska zachodzące w łuku spawalniczym, jak również zaproponowane kryteria oceny stabilności różnych procesów spawalniczych, były prowadzone na podstawie rzeczywistych sygnałów analogowych, nieprzetworzonych jeszcze do postaci cyfrowej. Niemniej doświadczenia i wiedza z tego okresu badań zjawisk zachodzących w łuku spawalniczym stanowią podstawę i bardzo dobry punkt wyjścia do budowy nowych, rozszerzonych kryteriów oceny stabilności procesów spawalniczych na podstawie

rzeczywistych chwilowych przebiegów napięcia łuku i natężenia prądu spawania. Szybki rozwój monitoringu procesu spawania opartego na analizie cyfrowych sygnałów napięcia i prądu spawania nastąpił w latach 70. wraz z rozwojem metod spawania o dużej wydajności z jednej strony oraz sprzętu komputerowego i technik cyfrowego przetwarzania sygnałów z drugiej. Od tego czasu obserwowany jest stały rozwój systemów pomiaru, monitoringu i analizy procesów spawalniczych wykorzystywanych nie tylko do badania stabilności jarzenia się łuku, ale również do oceny i optymalizacji właściwości źródeł prądu, kontroli i kształtowania parametrów napięciowo-prądowych w czasie rzeczywistym, a także w celu zweryfikowania praktycznych umiejętności spawacza [7, 9-12]. W obszarze analizy procesów spawalniczych prowadzi się też badania nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, które m.in. na podstawie sygnałów napięciowo-prądowych pozwoliłyby na rozpoznawanie niestabilności procesu spawania i wskazanie jej przyczyny [13, 25, 32].

Problematyka opisu zjawisk zachodzących w łuku spawalniczym, w szczególności ilościowej oceny stabilności procesu spawania, obecna jest w literaturze technicznej i naukowej głównie w kontekście metod umożliwiających ich automatyzację czy mechanizację, co wynika przede wszystkim z możliwości zapewnienia wysokiej powtarzalności warunków prowadzenia eksperymentu, tj. prędkości spawania i położenia uchwytu względem złącza spawanego. Zapewnienie powtarzalności eksperymentu w przypadku procesu ręcznego spawania elektrodą otuloną jest trudne. Poza tym przedmiotem badań i analiz w przeważającej większości są źródła prądu spawania, w mniejszym zaś stopniu właściwości spawalnicze samych materiałów dodatkowych do spawania. Jest to o tyle uzasadnione i zrozumiałe, że jakość i stabilność procesu spawania są w głównej mierze uzależnione od charakterystyki dynamicznej i statycznej zastosowanego urządzenia spawalniczego. Należy wspomnieć, że łuk spawalniczy zasilany jest przez przepływający prąd, którego źródłem jest urządzenie spawalnicze. Innymi słowy, łuk spawalniczy stanowi element spawalniczego obwodu elektrycznego, w którym przepływ prądu generowany jest przez zewnętrzne źródło prądu o określonych właściwościach spawalniczych. W odniesieniu do urządzeń spawalniczych problematyką analizy i opisu zjawisk zachodzących w układzie źródło prądu – łuk spawalniczy zajmowano się już w latach 50. ubiegłego wieku. Do najbardziej rozpowszechnionych można zaliczyć prace [13-34]. W początkowym okresie badania dotyczyły głównie transformatorów spawalniczych, w późniejszym okresie zostały rozszerzone o prostowniki spawalnicze, w szczególności zyskujące coraz większą popularność urządzenia zmechanizowane do spawania w osłonie gazów drutem litym i proszkowym [109, 110].

W mniejszym zakresie – jak do tej pory – zajmowano się zagadnieniami opisu i analizy stabilności procesu spawania w kontekście właściwości spawalniczych samych materiałów dodatkowych, w tym elektrod otulonych [35-40]. Badania, które obejmowały wyłącznie proces spawania elektrodą otuloną [37, 39, 40], nie doprowadziły do opracowania jednoznacznych metod opisu zjawisk zachodzących

podczas spawania czy wreszcie kryteriów oceny stabilności procesu. Jedną z nielicznych prac badawczych z zakresu stabilności procesu spawania elektrodą otuloną [37] prowadzona była w ramach analizy porównawczej właściwości spawalniczych i stabilności procesu spawania elektrodami zasadowymi tego samego typu E7018 trzech różnych producentów. W eksperymencie zastosowano jeden rodzaj źródła prądu, tym samym zmienną eksperymentu były elektrody otulone i ich właściwości spawalnicze. Do analizy stabilności procesu spawania wykorzystano przetworzone do postaci cyfrowej przebiegi napięcia i prądu spawania oraz wyliczone na ich podstawie wybrane wskaźniki statystyczne, tj. wartość średnią, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności obu mierzonych wielkości oraz ich histogramy. Poza tym analizowano wpływ liczby i częstotliwości zwarć oraz średni czas zwarć na stabilność jarzenia się łuku. Wyniki przeprowadzonych badań nie ujawniają jednak jednoznacznych zależności pomiędzy stabilnością procesu a wskaźnikami uzyskanymi dla poszczególnych elektrod, co po części może być efektem dość wąskiego zakresu eksperymentu, który ograniczał się jedynie do wykonania kilku prób, po jednej dla każdej elektrody. Nieznaczne różnice we właściwościach spawalniczych i stabilności procesu dla poszczególnych grup elektrod wymagają, jak się wydaje, analizy większej liczby przebiegów, oceny odchylenia wokół wartości oczekiwanej wyników pomiędzy poszczególnymi przebiegami dla poszczególnych grup elektrod, co być może zwiększy szanse na ujawnienie spodziewanych i zarazem subtelnych zależności.

Inne prace [7, 38] prowadzone były głównie w zakresie oceny jakości procesu spawania elektrodami otulonymi w kontekście oceny właściwości inwertorowych źródeł prądu. Stanowią one bardzo cenne źródło informacji nt. sposobu opisu zjawisk zachodzących w łuku, jak również wyboru kryteriów oceny stabilności procesu spawania. Jednak podstawowym celem prowadzonych badań było zaproponowanie kryteriów oceny właściwości różnego rodzaju inwertorowych źródeł prądu, nie zaś samych elektrod spawalniczych. Niemniej zastosowana metodyka badań, plan eksperymentu oraz użyte wskaźniki oceny bardzo dobrze opisują zjawiska jarzenia się łuku elektrod otulonych i stanowią bogate źródło informacji o samym procesie spawania i jego stabilności.

W ramach badań opisanych w monografii podjęto próbę opracowania zbioru wskaźników oraz liczbowych kryteriów oceny właściwości spawalniczych elektrod otulonych na podstawie analizy przebiegów napięcia i prądu spawania. Przebiegi pozyskano w trakcie badań polegających na wykonaniu szeregu pomiarów podczas spawania dwoma rodzajami elektrod otulonych przy zastosowaniu dwóch źródeł prądu. Zebrane dane poddano analizie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Do analizy sygnałów w dziedzinie czasu zastosowano następujące parametry statystyczne:

- a) wartość średnią napięcia i prądu spawania,
- b) odchylenie standardowe σ od wartości średniej napięcia i prądu,
- c) współczynnik zmienności napięcia i prądu spawania K_v ,
- d) współczynnik Carrera n ,

- e) średni czas jarzenia T_j ,
- f) średni czas zwarcia T_z ,
- g) średnia liczba zwarć w czasie 1 sekundy spawania Z ,
- h) histogramy – procentowy rozkład napięcia i prądu spawania.

Dla lepszego zrozumienia i opisu zjawisk zachodzących w łuku spawalniczym przebiegi czasowe natężenia prądu i napięcia łuku poddano przetwarzaniu do dziedziny częstotliwościowej oraz czasowo-częstotliwościowej, wykorzystując do tego odpowiednio szybką transformatę Fouriera FFT (ang. *Fast Fourier Transfer*) oraz jej odmianę dedykowaną do analizy sygnałów niestacjonarnych – krótkoczasową analizę Fouriera STFT (ang. *Short Time Fourier Transfer*).

Analiza struktury częstotliwościowej sygnałów pozwoliła na omówienie zależności pomiędzy charakterystycznymi częstotliwościami poszczególnych sygnałów napięcia i prądu spawania a stabilnością jarzenia się łuku. Ponadto widma krótkoczasowe posłużyły jako dane wejściowe dla sztucznej sieci neuronowej, która w tym przypadku stosowana była jako klasyfikator jakości elektrod otulonych.

Celem przeprowadzonych badań było z jednej strony wskazanie istotnych parametrów sygnałów napięciowo-prądowych przydatnych w opisie właściwości spawalniczych elektrod otulonych, a z drugiej strony pokazanie przykładu użycia wybranych danych do zautomatyzowanej klasyfikacji jakości elektrod otulonych z użyciem wybranej metody sztucznej inteligencji, w tym przypadku sztucznej sieci neuronowej. Przedstawiony przykład może być pomocny w opracowaniu systemu eksperckiego umożliwiającego ocenę właściwości spawalniczych elektrod otulonych w sposób automatyczny, bez udziału spawacza klasyfikatora.

Zagadnienia przedstawione w opracowaniu mogą być źródłem przydatnej wiedzy dla szerokiej grupy odbiorców: od inżynierów i technologów związanych z produkcją spawalniczą po pracowników naukowo-dydaktycznych i studentów wydziałów mechanicznych (zwłaszcza specjalności spawalnictwo) wyższych uczelni technicznych oraz uczestników kursów Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika, Międzynarodowego Technologa Spawalnika, Międzynarodowego Mistrza Spawalnika i Międzynarodowego Inspektora Spawalniczego.