

# Ocena stabilności procesu ręcznego spawania łukowego elektrodami otulonymi

## WSTĘP

Wdrażanie nowych technologii spawalniczych jest nieodłącznie związane z koniecznością stosowania urządzeń o bardziej precyzyjnych, doskonalszych układach sterowania, wyższym stopniu automatyzacji, lepszej kontroli ilości dostarczanej energii itp. Z drugiej strony rozwój konstrukcji urządzeń jest uwarunkowany wymaganiami ochrony środowiska, bezpieczeństwa pracy oraz zapewnieniem ich kompatybilności elektromagnetycznej z innymi eksploatowanymi urządzeniami. Wymagania te precyzują też dyrektywy Unii Europejskiej. Z przebiegiem spawania jest związany trudny do określenia poziom ryzyka, wyrażający się tym, że poprawnie prowadzony proces nie daje 100-procentowej pewności uzyskania wymaganego poziomu jakości złącza spawanego. Ocena procesu spawania wymaga zatem zbierania szeregu informacji o jego przebiegu i uzyskanym złączu. Analiza tych informacji pozwala na określanie – przy założonym poziomie prawdopodobieństwa – stopnia stabilności procesu spawania oraz jakości wykonywanego złącza. W niektórych przypadkach możliwe jest także uruchomienie procedury korekcyjnej w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości. Ogromną rolę w tych procesach odgrywa rodzaj i właściwości spawalniczego źródła energii elektrycznej.

Najbardziej istotną cechą spawalniczych źródeł energii elektrycznej jest ich przydatność technologiczna określona zdolnością do zajarzania i stabilnego jarzenia łuku, wielkością rozprysku metalu podczas spawania oraz elastycznością łuku. Przydatność ta jest wynikiem właściwości technologicznych źródeł zobrazowanych ich charakterystykami statycznymi i dynamicznymi [1].

Każda metoda spawania łukowego ma swoją specyfikę, wynikającą z zakresu stosowanych parametrów, właściwości łuku (skład chemiczny przestrzeni łukowej, rodzaj elektrody itp.) oraz form przechodzenia metalu w łuku, a tym samym stwarza inne wymagania, dotyczące zarówno właściwości statycznych, jak i dynamicznych źródeł spawalniczych.

Pod pojęciem stabilności procesu spawania rozumie się odporność źródła na różnego rodzaju zakłócenia wewnętrzne lub zewnętrzne, na które może być ono narażone w czasie spawania. Zazwyczaj wynikiem stabilnego procesu jest dobrej jakości złącze spawane. Jeżeli ocena stabilności procesu spawania ogranicza się do możliwości uzyskania dobrej jakości spoiny o gładkiej powierzchni, przy praktycznie nie zmieniającej się na całej długości geometrii spoiny (szerokości, wysokości lica, głębokości wtopienia), to tak określona stabilność procesu spawania jest stabilnością technologiczną [2, 3]. Takiej oceny można dokonać dopiero po wykonaniu prób spawania i ocenie jakości złączy, natomiast w jaki sposób badać źródła spawalnicze w czasie rzeczywistym lub bez konieczności prowadzenia prób spawania?

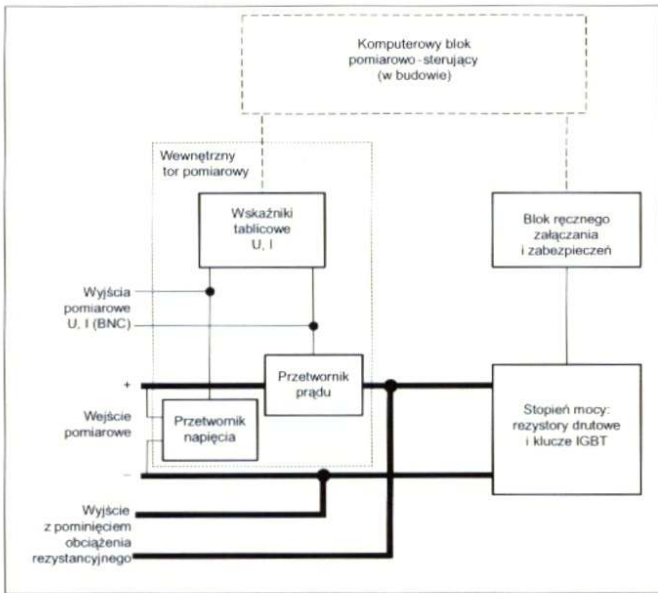
Jednym z możliwych podejść do rozwiązania tego problemu stanowią prace prowadzone w Zakładzie Inżynierii Spawania Politechniki Warszawskiej, które miały na celu m.in. podjęcie próby sformułowania możliwie obiektywnych kryteriów oceny właściwości dynamicznych nowoczesnych źródeł energii elektrycznej do ręcznego spawania łukowego elektrodami otulonymi. Zakres publikacji ograniczono do tych grup urządzeń, które mają coraz większe zastosowanie w praktyce przemysłowej, tj. źródeł energii elektrycznej z wewnętrzną przemianą częstotliwości, tzw. inwerterów spawalniczych.

Przedstawione wyniki badań wykonano przy wsparciu finansowym ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004 – 2007 w ramach projektu badawczego [9].

## Cel i metodyka badań

Celem prowadzonych badań była ocena przydatności technologicznej spawalniczych, inwerterowych źródeł zasilania przeznaczonych do spawania łukowego ręcznego elektrodami otulonymi na podstawie analizy dynamicznych przebiegów prądu i napięcia spawania oraz jakości wykonywanych napoin. W ramach prowadzonych badań wykonano próby napawania na próbkach ze stali St3S, o długości 100 mm i grubości 5 mm. Powierzchnia próbek była metalicznie czysta, bez zanieczyszczeń. Do badań wykorzystano elektrodę otuloną o otulinie zasadowej typu

Ok. 48.00 firmy ESAB i średnicy 3,25. Próby spawania wykonywano przy trzech nastawach prądu (A): 90, 115 i 140. Dobór takich wartości prądu spawania wynikał z zalecenia producenta elektrod Ok. 48.00, mówiącego, że dobrą jakość spawania uzyskuje się w zakresie prądu roboczego 90 ÷ 140 A. Z uwagi na charakter metody spawania, próby napawania prowadzono ręcznie przez wykwalifikowanego spawacza z długim stażem pracy, napoiny zaś wykonywano wielokrotnie w celu uzyskania możliwie największej reprezentatywności. Do badań wytypowano trzy urządzenia o podobnych danych technicznych, pochodzące od różnych producentów, oznaczone literami A, B i C.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy systemu pomiarowego

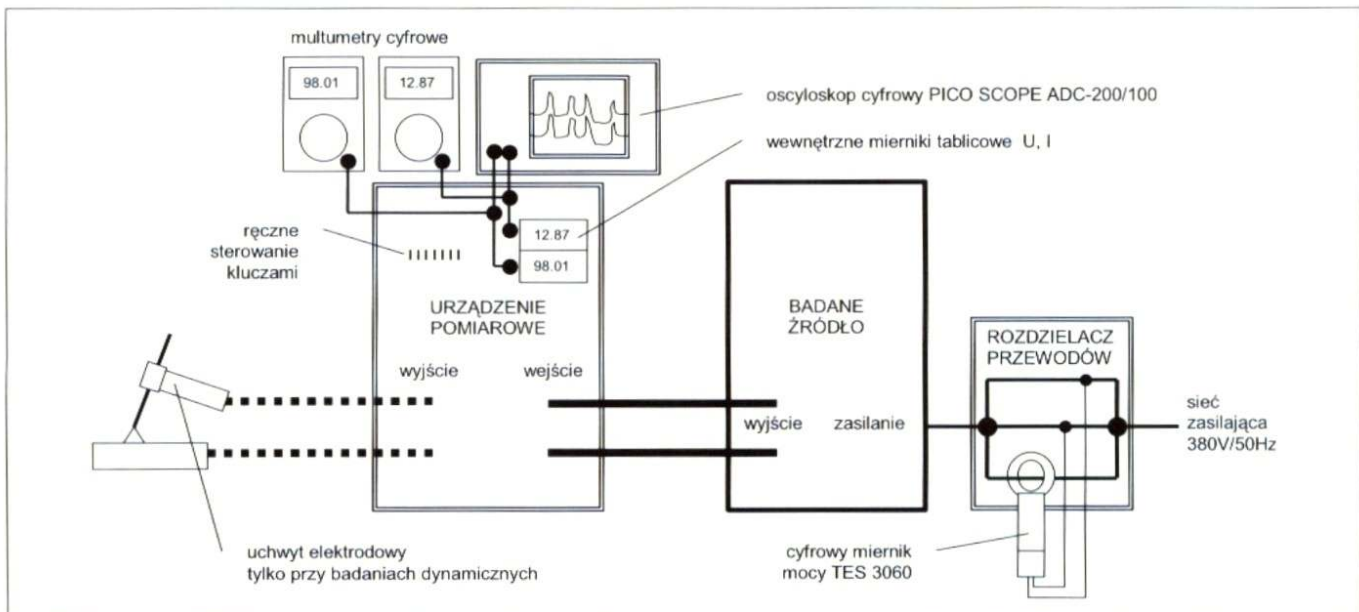
## Stanowisko pomiarowe

Wszystkie badania elektryczne badanych źródeł prowadzono z wykorzystaniem obecnie budowanego, komputerowego systemu pomiarowego o szerokich możliwościach badawczych [9]. System jest tworzony w formie stanowiska integrującego wszystkie obwody toru pomiarowego z przeznaczeniem do wyznaczania zarówno charakterystyk statycznych, jak i dynamicznych przebiegów prądu i napięcia spawania, w tym dynamicznych charakterystyk prądowo-napięciowych z wykorzystaniem unikalnego modułu symulacji obciążeń dynamicznych badanego źródła (rys. 1). Istota jego działania została oparta na sterowanym obciążeniu rezystancyjnym, przełączanym na drodze elektronicznej za pośrednictwem kluczy tranzystorowych IGBT, przy jednoczesnej rejestracji wszystkich mierzonych parametrów, takich jak prąd, napięcie, a nawet emisja akustyczna łuku spawalniczego lub źródła. Zarówno zadawanie kolejnych wartości obciążenia, jak i pomiar oraz rejestracja mierzonych parametrów wyjściowych badanego zasilacza spawalniczego są realizowane przez nadzorujący pracę stanowiska komputerowy blok pomiarowo-sterujący.

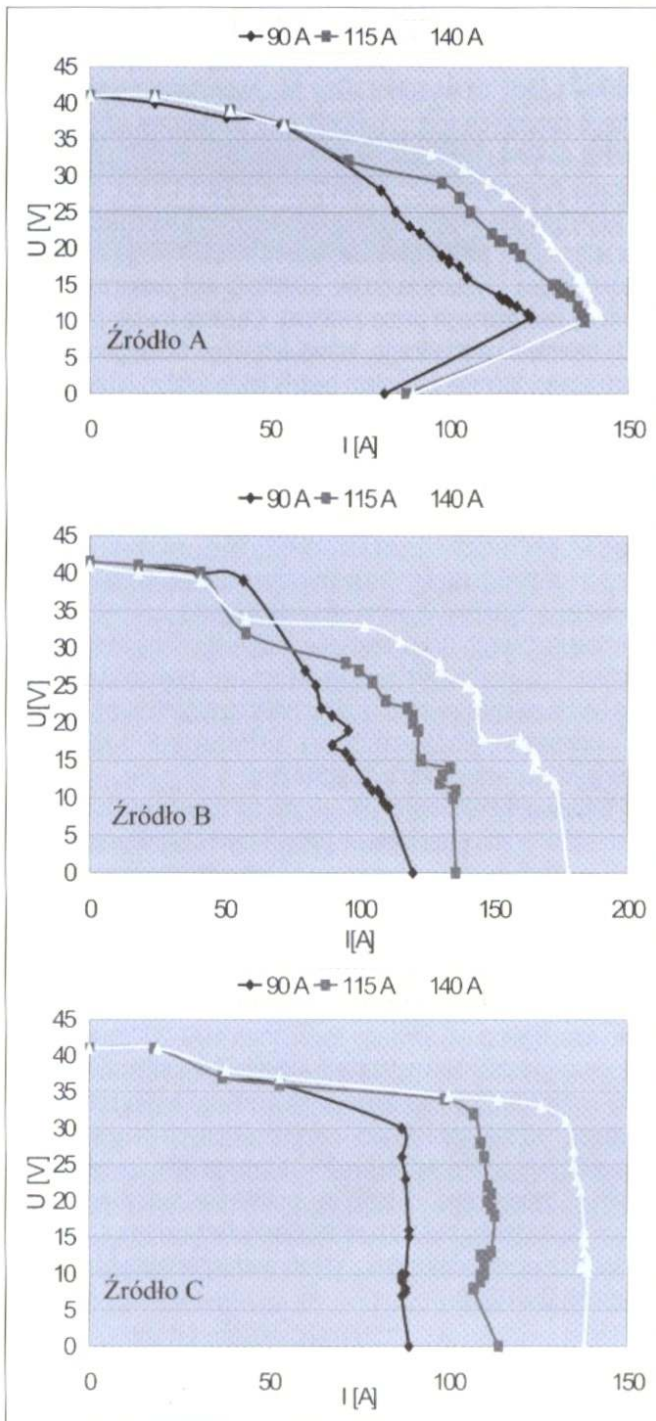
W toku dotychczasowych prac uruchomiono stopień mocy, blok ręcznego sterowania i zabezpieczeń oraz wewnętrzny tor pomiarowy oparty na wysokiej klasy przetwornikach pomiarowych i filtrach cyfrowych (rys. 1). Obciążenie pomiarowe uzyskuje się poprzez dowolną kombinację równolegle włączanych sześciu rezystorów drutowych (0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 2,0 i 1,0  $\Omega$ ), uzyskując 64 kroki pomiarowe (od stanu jałowego do pełnego zwarcia), a przełączające je klucze tranzystorowe IGBT mogą pracować z maksymalną szybkością do ok. 20 kHz (z wyłączeniem stycznika mocy realizującego pełne zwarcie). Obecnie trwają prace nad doskonaleniem nadrzędnego, komputerowego bloku pomiarowo-sterującego, którego zadaniem będzie także analiza otrzymanych wyników. Wobec trwających prac nad systemem pomiarowym, ostatecznie do omawianych w dalszej części badań wykorzystano ręcznie sterowany stopień mocy oraz wewnętrzny tor pomiarowy.

**Badania statyczne** prowadzono przy założonej (średnio 20) liczbie kroków zmiany rezystancji obciążenia – od stanu jałowego do zwarcia, z równoczesnym pomiarem wartości średnich prądu i napięcia. W tym celu wykorzystywano mierniki wewnętrzne systemu pomiarowego, jak i dokładne multimetry laboratoryjne. Na rysunku 2 pokazano konfigurację stanowiska pomiarowego podczas badań zewnętrznych charakterystyk statycznych źródeł. Przy tych pomiarach nie korzystano z oscyloskopu, a przewody uchwytów spawalniczych były odłączone.

**Badania dynamiczne**, polegające na rejestracji czasowych przebiegów prądu i napięcia spawania oraz charakterystyk prądowo-napięciowych, wykonywano z pominięciem wewnętrznego układu obciążenia rezystancyjnego stanowiska, a jedynie z wykorzystaniem wewnętrznego toru pomiarowego, w tym przetworników pomiarowych, układów filtrujących itp. Na rysunku 2 pokazano konfigurację stanowiska. Do pomiaru i rejestracji użyto oscyloskopu cyfrowego PicoScope ADC-200/100, wykonanego w postaci zewnętrznego modułu komputera klasy PC, który oprócz funkcji interfejsu operatorskiego wykorzystano do akwizycji, wizualizacji i analizy zarejestrowanych danych. W celu dodatkowej analizy właściwości badanego urządzenia, tor pomiarowy uzupełniono o blok do pomiarów mocy pobieranej z sieci zasilającej przez badane źródło. W tym celu zastosowano rozdzielacz przewodów zasilających oraz specjalistyczny miernik mocy TES 3060.



Rys. 2. Konfiguracja stanowiska podczas badań statycznych i dynamicznych



Rys. 3. Zewnętrzne charakterystyki statyczne badanych źródeł prądu

## Wyniki badań

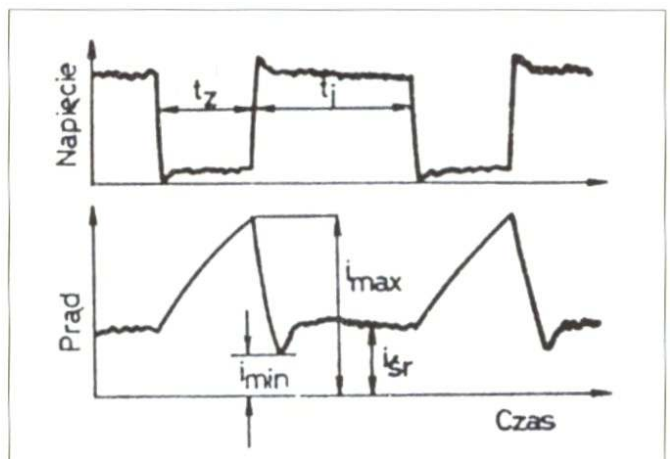
Urządzenia do spawania łukowego ręcznego powinny charakteryzować się niewielkimi zmianami prądu, nawet przy gwałtownych spadkach lub wzrostach napięcia łuku. Spełnienie tego warunku wymaga, aby ich zewnętrzne charakterystyki statyczne miały charakter opadający – stałoprądowy (tzw. źródła prądu). Przykładowo, od źródeł do spawania metodą TIG, wykorzystywanych często również do spawania elektrodami otulonymi, wymagana jest wysoka stabilizacja prądowa, co oznacza, że ich wewnętrzna charakterystyka statyczna powinna być stromo opadająca lub pionowa w zakresie roboczych wartości napięcia spawania. W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że wszystkie badane w ramach niniejszej pracy urządzenia mają opadające zewnętrzne charakterystyki statyczne (rys. 3).

Źródło A ma charakterystyki statyczne o małym nachyleniu, co sprzyja przechodzeniu topionego w łuku metalu w sposób drobnokropelkowy, np. podczas stapiania elektrod celulozowych [8]. Dodatkowo źródło to ma układ zmniejszający prąd zwarcia, w celu zapobiegania przyklejaniu się elektrody do materiału spawanego (tzw. funkcja *anti stick*). Taka właściwość źródła spawalniczego ma znaczenie przy spawaniu w pozycjach przymusowych lub wówczas, gdy spawanie jest prowadzone przez mniej doświadczonych spawaczy. Źródło B ma również opadające charakterystyki statyczne o kształcie typowym dla źródeł o naturalnych charakterystykach bez układów stabilizacji prądu roboczego. Najbardziej stromo opadającą charakterystykę, zbliżoną do pionowej w zakresie roboczym, ma źródło C. Oznacza to, że źródło C ma dobrą stabilizację prądu spawania.

W celu weryfikacji powyższych stwierdzeń przeprowadzono ocenę tzw. zdolności spawania według metody opracowanej w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach, nazywanej subiektywną metodą naturalną. Polega ona na porównaniu badanego źródła z dwoma innymi źródłami, jednym symulacyjnym i drugim wzorcowym, o uznanych, dobrych właściwościach spawalniczych [1]. Porównania dokonują dwaj wykwalifikowani spawacze, oceniając przebieg procesu spawania elektrodami zasadowymi z użyciem każdego źródła w skali ocen 0-6 punktów, a średnią ocen przyjmuje się jako subiektywną ocenę zdolności spawania badanego źródła. Przeprowadzone w ten sposób badania wykazały, że najgorszą zdolność spawania wykazuje źródło A, średnią źródło B, a najlepszą źródło C. O takiej ocenie zdecydowały takie cechy, jak elastyczność łuku, łatwość jego zajarzania i subiektywnie oceniany stopień rozprysku.

Kolejną próbą była rejestracja dynamicznych przebiegów czasowych prądu i napięcia spawania z użyciem elektrod zasadowych Ok. 48.00. Na ich podstawie wyznaczono współczynnik Carrera  $n$ , będący stosunkiem najmniejszej wartości prądu po zakończeniu zwarcia kropłą ciekłego metalu do średniej wartości prądu spawania  $n = i_{\min} / i_{sr}$  (oznaczenia zgodne z rys. 4). Spawalnicze źródła energii elektrycznej do spawania łukowego elektrodami otulonymi, dla których wyznaczony w ten sposób współczynnik Carrera  $n \geq 0,7$ , uważa się za źródła o dobrych właściwościach spawalniczych [10]. W tabelicy I zestawiono uśrednione wartości współczynników Carrera  $n$  dla badanych źródeł, obliczone dla pięciu kolejnych zwarć kropłą ciekłego metalu.

Jak widać z podanych w tabelicy I danych, wszystkie badane urządzenia spełniają kryterium Carrera, a nawet dla średnich wartości nastawionego prądu 115 A wartości współczynnika  $n$  są nie-



Rys. 4. Typowy przebieg napięcia i prądu przy spawaniu elektrodami zasadowymi z oznaczonymi wielkościami dla wyznaczenia współczynnika Carrera [1]

mal takie same. Wyniki tej próby wykazały, że dla nowoczesnych konstrukcji spawalniczych źródeł energii kryterium Carrera, opracowane i skutecznie stosowane w latach 60. nie jest przydatne, ponieważ nie pozwala na zróżnicowanie oceny właściwości spawalniczych urządzeń, chociaż inne próby na występowanie takich różnic wskazują. Zachodzi zatem konieczność poszukiwania innych kryteriów takiej oceny.

Na podstawie analizy zarejestrowanych dynamicznych przebiegów prądu i napięcia spawania wydaje się, że kryterium takie można byłoby oprzeć o histogramy obrazujące procentowy udział poszczególnych wartości prądu w całym przebiegu prądu spawania. Przyjęcie do analizy przebiegów prądu spawania wydaje się uzasadnione w przypadku źródeł o opadających, prądowych charakterystykach statycznych. Istotę przekształcenia przebiegów dynamicznego prądu spawania do postaci histogramu pokazano na rysunku 5. Zaproponowane kryterium ma charakter porównawczy, a ogólny wniosek wynikający z porównania kształtu histogramu z wynikami subiektywnej oceny przebiegu procesu spawania mówi, że im źródło osiągnęło wyższy udział procentowy nastawionej wartości prądu spawania (wysoki i wąski histogram), tym wyższa jest stabilność procesu spawania. Słuszność takiego kryterium potwierdza porównanie wyznaczonych histogramów dla badanych urządzeń z wynikami subiektywnej oceny zdolności spawania poszczególnych źródeł (rys. 6). Przy wszystkich nastawach prądowych, to jest: 90, 115 i 140 A, największą stabilność procesu spawania wykazują źródła A i C, dla których histogramy dynamicznego prądu spawania wykazują najwyższe procentowe udziały nastawionych wartości prądu roboczego. Taka ocena jest zgodna z oceną zdolności spawania, dokonaną przez spawaczy w próbie bezpośredniej. Oczywiście, metoda oceny źródeł na podstawie histogramów dynamicznego prądu spawania pozwala jedynie na uszeregowanie ocenianych źródeł pod względem ich właściwości spawalniczych. Przyjęcie miar takiego kryterium, które pozwoliłyby na obiektywną ocenę właściwości spawalniczych badanego urządzenia, wymaga dalszych badań z użyciem większej liczby urządzeń.

Wnioski wynikające z oceny dynamicznych przebiegów prądu i napięcia spawania oraz ocen zdolności spawania badanych źródeł spawalniczych, dokonane przez spawaczy w próbie bezpośredniej, zweryfikowano poprzez ocenę wyglądu zewnętrznego wykonywanych napoin na podstawie oględzin. Oceny dokonano w oparciu o następujące normy: PN-85/M-69775 „Spawalnictwo.

**Tablica I.** Wartości współczynnika Carrera  $n$  oraz czasy zwarcia  $t_z$  kroplą płynnego metalu

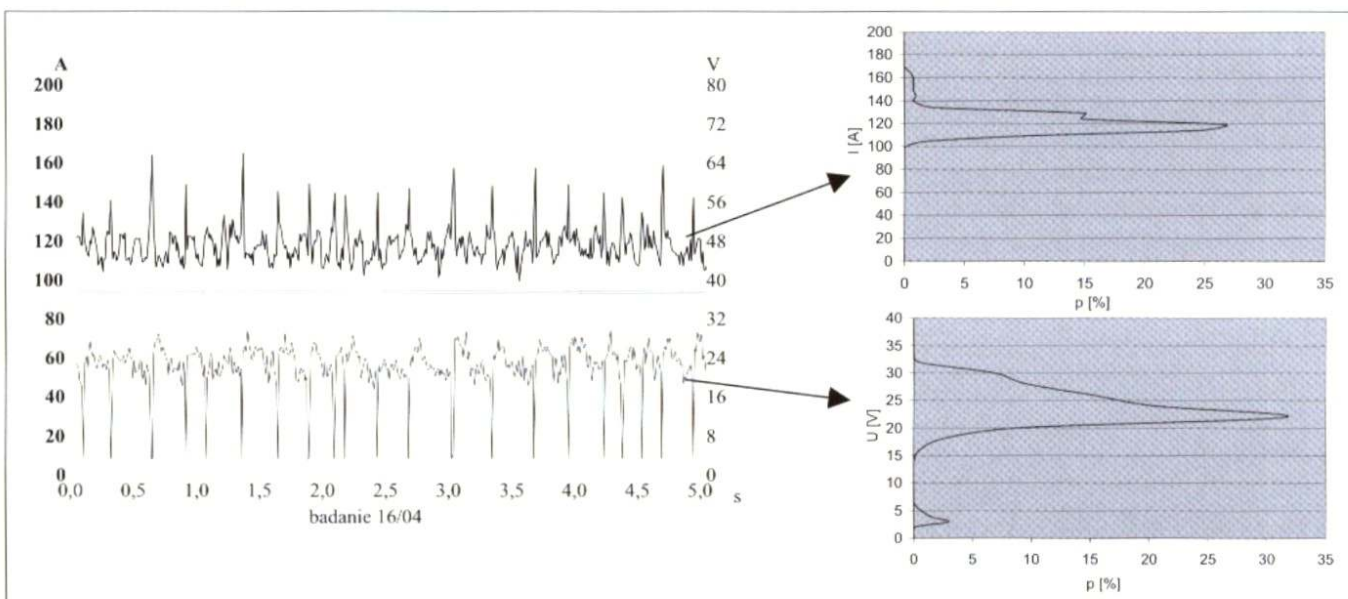
Badane źródło	Nastawa prądu	$n_{\text{śred}} = i_{\text{min}}/i_{\text{sr}}$	$t_z$ [ms]	$t_f$ [ms]
Źródło A	90 A	0,88	1,3÷14,1	47÷306
	115 A	0,88	1,1÷16,0	87÷355
	140 A	0,87	10,3÷11,5	296÷325
Źródło B	90 A	0,87	1,0÷15,8	68÷431
	115 A	0,83	1,0÷13,9	5÷178
	140 A	0,78	1,3÷18,8	69÷219
Źródło C	90 A	0,91	9,2÷18,8	300÷363
	115 A	0,91	7,4÷15,1	207÷284
	140 A	0,92	11,0÷16,3	196÷231

**Tablica II.** Wadliwość napoin oceniona na podstawie oględzin zewnętrznych.

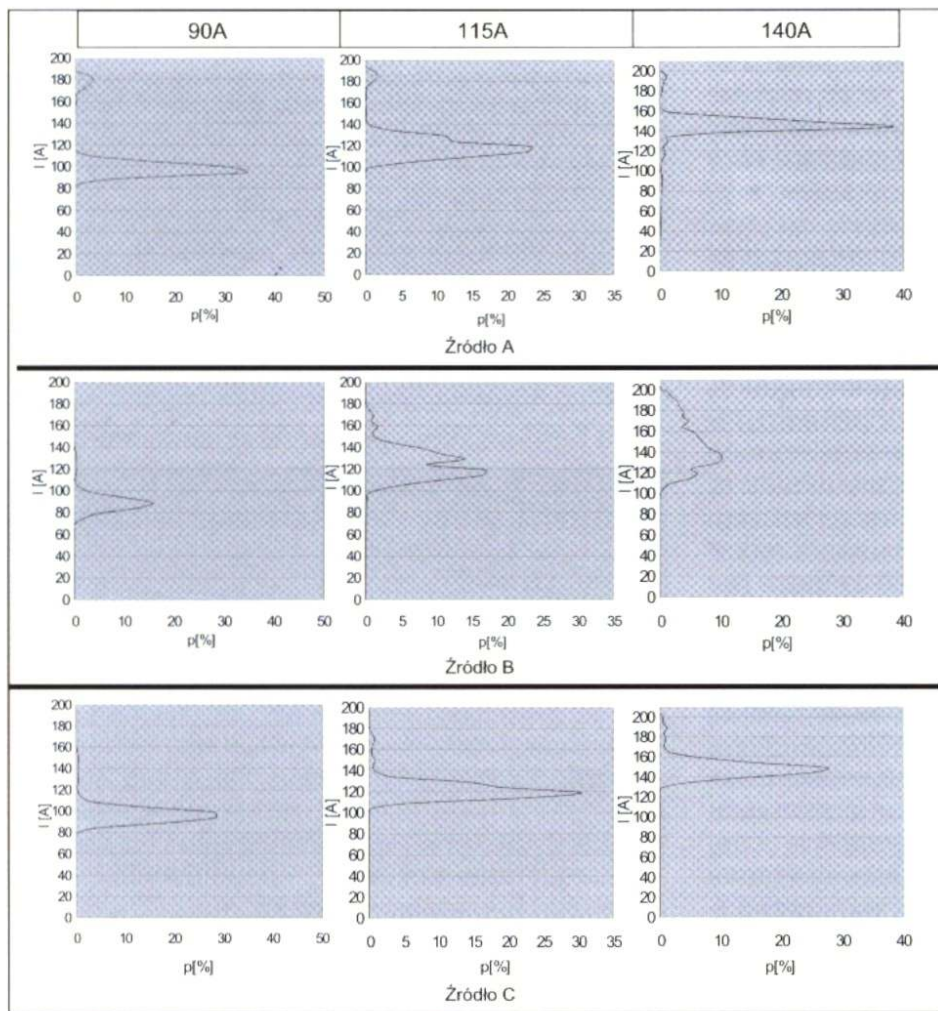
	$F_b$			$F_k$		
	90 A	115 A	140 A	90 A	115 A	140 A
Źródło A	W2	W2	W1	W2	W2	W3
Źródło B	W4	W1	W2	W4	W3	W3
Źródło C	W1	W1	W2	W1	W1	W1

Wadliwość złączy spawanych. Oznaczenie klasy wadliwości spoin na podstawie oględzin zewnętrznych” oraz PN-EN 970 „Badania nieniszczące złączy spawanych”, PN-EN 25817 „Wytyczne do określenia poziomów jakości według niezgodności spawalniczych” i PN-EN 6520-1 „Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometryczna niezgodności spawalniczych w metalach”. Ocenie podlegały następujące wady:  $F_b$  – nierówność lica,  $F_c$  – podtopienie lica i  $F_k$  – nadmierny nadlew lica.

Wielkością charakterystyczną wady nierówności lica jest różnica wysokości dwóch sąsiednich wgłębień i wypukłości lica (głębokości karbu). Do oceny przyjmuje się największą występującą na długości napoiny różnicę sąsiednich wgłębień i wypukłości. Wielkością charakterystyczną podtopienia lica jest głębokość wady, o którą jest zmniejszony przekrój spoiny, lub elementu łączącego (w przypadku napawania – przekrój próbki). Do oceny przyjmuje się również wadę o największej głębokości. Jako wielkość charakterystyczną nadmiernego nadlewu lica przyjmuje się stosunek wysokości lica do jego szerokości. Wielkość ta jest średnią arytmetyczną z trzech pomiarów, z których jeden wykonywany jest w środku napawanej próbki, natomiast dwa pozostałe w odległości po 10 mm od jej środka.



**Rys. 5.** Sposób przekształcenia czasowych przebiegów prądu i napięcia spawania na procentowe rozkłady ich wartości (histogramy)



Rys. 6. Histogramy procentowego rozkładu prądu spawania dla badanych źródeł

Wyniki, ze wskazaniem na klasy wadliwości, zestawiono w tablicy II. Klasa W1 oznacza najmniejszą, a W5 – największą wadliwość złącza. W żadnej z próbek nie stwierdzono podtopienia lica  $F_c$ .

Proces spawania uważa się za stabilny, a spoinę (napoinę) za prawidłową wówczas, gdy ma ona dostatecznie gładkie lico bez podtopień, a jej wymiary (szerokość i wysokość nadlewu) na całej długości są niezmiennie. Oceniana w ten sposób stabilność procesu spawania wchodzi w zakres tzw. stabilności technologicznej. Jak wynika z danych, najlepsze wyniki według tego kryterium uzyskano dla urządzenia C, najgorsze dla urządzenia B i pozostają one w zgodności z wcześniej wykonanymi ocenami.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że nowoczesne konstrukcje źródeł zasilania do spawania lukowego ręcznymi elektrodami otulonymi mają zazwyczaj dobre właściwości spawalnicze, których ocena według tradycyjnych metod, stosowanych dla starszych konstrukcji tego typu urządzeń, np. na podstawie wyznaczonego współczynnika Carerra nie daje oczekiwanych wyników. Z drugiej jednak strony często zachodzi konieczność dokonania takiej oceny, czy to dla potrzeb oceny nowych rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w urządzeniach, czy to dla potrzeb systemów zapewnienia jakości prac spawalniczych. Pojawia się zatem potrzeba poszukiwania innych metod oceny, w oparciu o inne kryteria. Uzyskane w niniejszej pracy wyniki wskazują, że metodą taką może być analiza przebiegów dynamicznego prądu spawania elektrodami otulinię zasadowej, a kryterium oceny – histogram rozkładu wartości tego prądu. Ustalenie miar takiego kryterium powinno być przedmiotem dalszych prac badawczych. Jak się wydaje, zaproponowaną metodę badawczą można będzie z powodzeniem odnieść do źródeł napięcia MIG/MAG.

## LITERATURA

- [1] Kolasa A.: „Właściwości dynamiczne źródeł energii elektrycznej do spawania lukowego oraz kryteria ich oceny” Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [2] Pakos R.: „Ocena stabilności procesu napawania metodą MAG drutem pełnym i proskowym” Przegląd Spawalnictwa nr 9-10/2003.
- [3] Dobaj E.: „Maszyny i urządzenia spawalnicze”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005.
- [4] Kang M. J., Kim Y., Ahn S., Rhee S.: „Spatter Rate Estimation in the Short-Circuit Transfer Region of GMAW” Welding Journal, 9/2003.
- [5] Stania J.: „Badania półautomatów do spawania metodą MIG/MAG prowadzone w Laboratorium Badawczym Spawalnictwa” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 2/1995.
- [6] Lucas B., Melton E. I. G.: „Let's get technical – choosing an arc welding power source”, Welding & Metal Fabrication, 5/1999.
- [7] Kang Y. H., Na S. J.: „A Study on Modeling of Magnetic Arc Deflection and Dynamic Analysis of Arc Sensor” Welding Journal, 1/2002.
- [8] Kensik R.: „Eksplotacja urządzeń spawalniczych. Część I. Źródła spawalnicze” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1995.
- [9] Projekt badawczy własny Komitetu Badań Naukowych nr 3T08C02126 pt. „Analiza zjawisk statycznych i dynamicznych w układzie: spawalnicze źródło energii elektrycznej – luk, z symulacją warunków obciążenia”. Kierownik: prof. nzw. dr hab. inż. Andrzej Kolasa.
- [10] Carrer A.: „Dynamic behaviour of DC arc welding generators for arc weeldding” IIW Doc. 11-31-58.