



Spektrofotometryczne pomiary widma promieniowania elektromagnetycznego łuku spawalniczego metody TIG

MAREK STANISŁAW WĘGŁOWSKI

Instytut Spawalnictwa, 44-100 Gliwice, ul. Bł. Czesława 16/18

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki rejestracji natężenia promieniowania widzialnego łuku spawalniczego metody TIG w zakresie od 340 do 860 nm. Zbadano zależność pomiędzy natężeniem prądu spawania, długością łuku spawalniczego a natężeniem promieniowania widzialnego łuku spawalniczego. Przeprowadzono modelowanie rozkładu widma promieniowania łuku spawalniczego funkcjami Lorentza, Voighta i Gaussa. Obliczono wybrane wielkości charakterystyczne linii widmowej. Do znalezienia zależności wiążącej natężenie promieniowania łuku spawalniczego dla wybranej linii widmowej 698,23 nm, natężenia prądu spawania w zakresie 25-300 A i długości łuku spawalniczego w zakresie 1-5 mm wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Stwierdzono, że monitorowanie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego metody TIG może być wykorzystywane do kontrolowania długości łuku.

Słowa kluczowe: spawanie i procesy pokrewne, pomiary spektrofotometryczne, promieniowanie łuku spawalniczego

Symbole UKD: 621.791

1. Wstęp

W pracy przedstawiono wyniki badań nad łukiem spawalniczym metody TIG, która została zapoczątkowana przez patenty zgłoszone w 1926 roku przez H. M. Hobarta i P. K. Deversa, dotyczące spawania łukowego w osłonie helu. Spawanie metodą TIG jest jednym z podstawowych procesów wytwarzania konstrukcji, zwłaszcza ze stali wysokostopowych, stali specjalnych, stopów niklu, aluminium, magnezu, tytanu i innych metali reaktywnych i żaroodpornych oraz różnorodnych stopów metali, w szerokim zakresie grubości złączy, począwszy od dziesiątych części milimetra.

Jedną z głównych metod oceny stabilności i poprawności procesu spawania jest obserwacja łuku spawalniczego i analiza uzyskanych wyników. Informacje dotyczące łuku spawalniczego można uzyskać metodą szybkich zdjęć, rejestracji i analizy dźwięku łuku [3] lub przebiegów wartości chwilowych charakteryzujących go wielkości elektrycznych [4]. Metoda szybkich zdjęć jest kosztowana i z tego względu w badaniach wymagających wykonania licznych prób spawania może być wykorzystana jedynie jako metoda uzupełniająca. Analiza dźwięku jest mało rozpowszechniona, a prace nad jej wykorzystaniem pokazały, że uzyskane wyniki są wrażliwe na zakłócenia i nie dają jednoznacznej informacji o przebiegu procesu spawania, szczególnie w warunkach produkcyjnych. Powszechnie stosowane są konwencjonalne metody monitorowania procesów spawalniczych tzw. „trough the arc sensing” [5, 6], które bazują przede wszystkim na pomiarze i rejestracji natężenia prądu spawania i napięcia łuku spawalniczego. Do oceny stabilności procesu spawania w metodach konwencjonalnych najczęściej wykorzystuje się zaawansowaną analizę sygnałów, sieci neuronowe, metody zbiorów rozmytych, algorytmy genetyczne, statystyczną kontrolę jakości lub systemy ekspertowe [4].

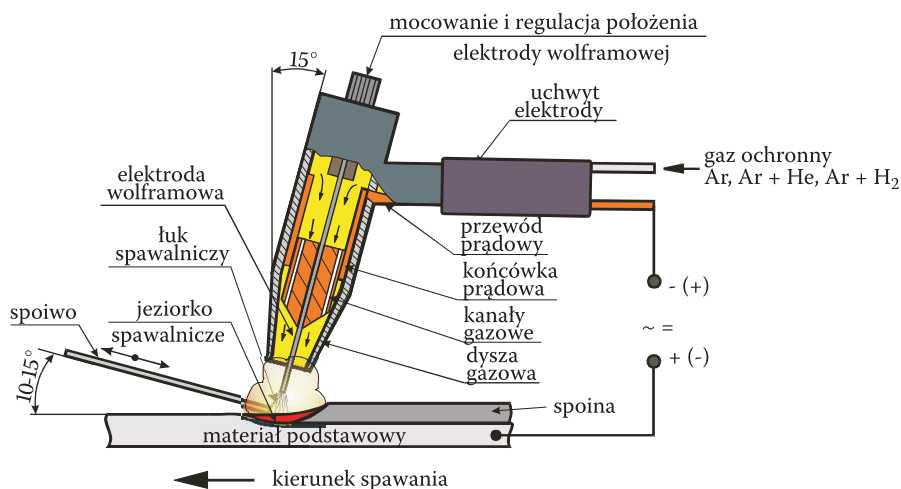
Małe koszty inwestycyjne i brak dodatkowych czujników są cechą charakterystyczną metod konwencjonalnych. Pomimo tego w wielu przypadkach są one zastępowane i/lub uzupełniane metodami niekonwencjonalnymi, które cechują się zdecydowanie większą czułością [7-10].

Nową metodą kontroli jakości połączeń spawanych w czasie rzeczywistym jest analiza promieniowania łuku spawalniczego. Metodę tę po raz pierwszy zastosowano w kontroli długości łuku spawalniczego metody MAG w roku 1966 [11].

Nowoczesne techniki monitorowania procesów spawalniczych wymagają użycia zaawansowanych urządzeń pomiarowych, które w większości przypadków muszą być dostosowane do szczególnych warunków panujących w trakcie spawania. W pracy została wykorzystana karta spektrofotometryczna oparta na technologii CCD (*Charge Coupled Devices* — fotodetektor ze sprzężeniem ładunkowym). Karta umożliwia rejestrację widma promieniowania elektromagnetycznego łuku spawalniczego w zakresie od 200 nm do 1100 nm w czasie 3 ms. Daje to możliwość analizy prowadzonego procesu w czasie rzeczywistym.

2. Charakterystyka metody

W procesie spawania łukowego elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej TIG (*Tungsten Inert Gas*) znanym również pod nazwą GTA (*Gas Tungsten Arc*), połączenie spawane otrzymuje się przez stopienie metalu spawanych przedmiotów i materiału dodatkowego ciepłem łuku elektrycznego, jarzącego się pomiędzy nietopliwą elektrodą i spawanym przedmiotem w osłonie gazu obojętnego lub redukującego. Przepływ prądu w łuku spawalniczym odbywa się w zjonizowanym gazie, a głównymi nośnikami prądu są elektrony wybite z atomów gazu osłonowego (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu spawania ręcznego TIG z zastosowaniem materiału dodatkowego [2]

Elektroda nietopliwa wykonana jest z wolframu lub stopu wolframu z pierwiastkami obniżającymi pracę wyjścia elektronów i zamocowana jest w specjalnym uchwycie palnika, umożliwiającym regulację położenia elektrody i jej wymianę. Koniec elektrody wystaje poza dyszę gazową od kilku do nawet kilkudziesięciu milimetrów, w zależności od warunków technologicznych [1, 2].

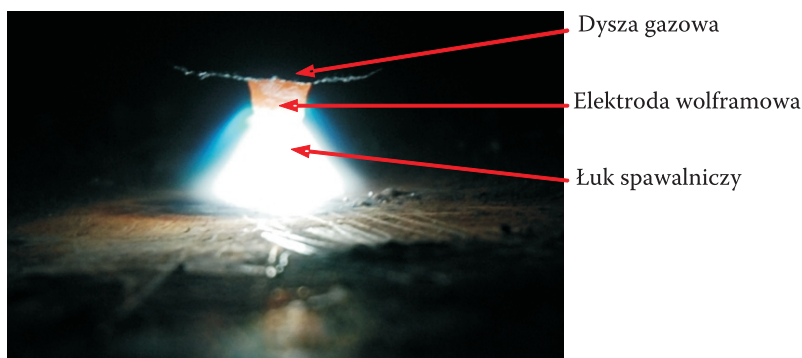
Do podstawowych parametrów technologicznych procesu spawania metodą TIG możemy zaliczyć [2]: rodzaj i natężenie prądu spawania, napięcie łuku spawalniczego, prędkość spawania, rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego, rodzaj materiału i średnicę elektrody nietopliwej, rodzaj i wymiary materiału dodatkowego.

3. Promieniowanie łuku spawalniczego

Źródłami promieniowania w łuku spawalniczym są: kolumna łuku, obszary przyelektrodowe, ciekły metal transportowany przez łuk, jezioro spawalnicze, nagrany obszar materiału podstawowego wokół jeziora, rozgrzany koniec drutu elektrodowego. Zakres długości emitowanych fal świetlnych oraz ich skład widmowy jest zależny od parametrów spawania, atmosfery, w jakiej jarzy się łuk, rodzaju materiału podstawowego i dodatkowego oraz wielu innych parametrów [12, 13].

Energia wydzielana w słupie łuku jest rozpraszana głównie przez przewodzenie i konwekcję. Emisja promieniowania elektromagnetycznego stanowi 10-15% energii dostarczonej do łuku [14]. Promieniowanie termiczne, którego źródłem jest ciało o wysokiej temperaturze, charakteryzuje się ciągłym widmem promieniowania. Źródłem widma ciągłego w obszarze łuku spawalniczego jest głównie ciekłe jezioro

spawalnicze [15]. Promieniowanie charakterystyczne jonów i atomów w łuku ma charakter dyskretny [16]. Natężenie promieniowania łuku spawalniczego jest największe w przedziale długości fal pomiędzy 200÷1300 nm. Udział promieniowania podczerwonego, widzialnego i nadfioletowego w widmie promieniowania łuku spawalniczego zależy od metody spawania, a w każdej metodzie spawania zależy od parametrów spawania [13].



Rys. 2. Kształt łuku spawalniczego metody TIG, natężenie prądu spawania $I = 100$ A, długość łuku spawalniczego $L = 2$ mm

Największe natężenie promieniowania widzialnego wśród procesów spawania łukowego obserwuje się przy spawaniu metodą MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas* — spawania drutem elektrodowym w osłonie gazu obojętnego i spawanie w osłonie gazu aktywnego), a następnie MMA (*Manual Metal Arc* — spawanie ręczne elektrodami otulonymi), TIG i PAW (*Plasma Arc Welding* — spawanie plazmowe). Stwierdzono również, że natężenie promieniowania ultrafioletowego wzrasta wraz z kwadratem natężenia prądu spawania, zaś natężenie promieniowania widzialnego nie rośnie tak intensywnie [13].

Natężenie promieniowania ultrafioletowego i widzialnego, emitowane przy spawaniu elektrodami otulonymi i drutami proszkowymi w obecności dymów spawalniczych, jest mniejsze niż przy spawaniu TIG (dla zbliżonego natężenia prądu spawania). W tych samych warunkach natężenie promieniowania podczerwonego nie ulega dużym zmianom. Przy spawaniu łukiem krytym promieniowanie widzialne i ultrafioletowe absorbowane jest przez warstwę topnika [13, 17].

Badania widma dyskretnego dostarczają informacji o temperaturze emitującej promieniowanie cząstki, ponieważ wzbudzenie cząstki wymaga dostarczenia jej określonej ilości energii, której miarą może być temperatura. Źródłem tego rodzaju promieniowania w łuku spawalniczym jest głównie plazma słupa łuku, ale także metal transportowany przez łuk, żużel oraz powierzchnia elementów spawanych [12]. Energia obszarów bliskich anody i katody łuku spawalniczego jest zużywana

na podgrzewanie i topienie elektrody i materiału podstawowego. Wiadomo, że energia potencjalna i kinetyczna elektronów zamieniana jest na powierzchni anody w energię ciepłą, powodując jej intensywne nagrzewanie [2].

Widmo promieniowania łuku spawalniczego podzielone wg długości fali przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Podział widma promieniowania łuku spawalniczego [12]

| Zakres promieniowania | Długość fali [nm] |
|--|-------------------|
| Promieniowanie nadfioletowe krótkofalowe UV-C | 100÷280 |
| Promieniowanie nadfioletowe średniofalowe UV-B | 280÷315 |
| Promieniowanie nadfioletowe długofalowe UV-A | 315÷400 |
| Promieniowanie widzialne | 400÷700 |
| Promieniowanie podczerwone bliskie IRA | 700÷1400 |
| Promieniowanie podczerwone dalekie IRB | 1400÷3000 |

Promieniowanie łuku spawalniczego jest złożonym zjawiskiem, zależnym od wielu parametrów spawania. Bez zrozumienia występujących mechanizmów, wykorzystanie promieniowania opiera się jedynie na prostych założeniach i doświadczeniu. Musi być znany mechanizm powstawania promieniowania, aby można było zastosować promieniowanie łuku do monitorowania procesu spawania z dużą dokładnością i wiarygodnością. Należy zatem stworzyć model wiążący natężenie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego z parametrami spawania [18, 19].

Prowadzone do tej pory badania skoncentrowane były głównie na badaniu luminancji łuku [20], wpływu promieniowania łuku na zdrowie spawacza [12, 13, 14] i systemów jego ochrony [21], jak również do opracowywania systemów śledzenia osi złącza (położenia palnika) [22]. Analiza widma promieniowania widzialnego, emitowanego przez łuk spawalniczy służy do badania rozkładu temperatury w łuku [23], obliczenia średniej temperatury łuku spawalniczego [24], ilości wodoru w osłonie gazowej [25], jak również temperatury jeziorka ciekłego metalu [26]. Analiza widma promieniowania łuku spawalniczego jest pomocna do opracowania techniki fotografowania łuku spawalniczego [15]. Metody spektroskopowe są użytecznym narzędziem do badania zawirowań gazu osłonowego po wyjściu z dyszy gazowej metody TIG i MIG/MAG [27], związku pomiędzy wymiarami spoiny a rozkładem widmowym łuku [28] oraz rodzajem spawanego materiału a rozkładem gęstości elektronów [29].

Należy podkreślić, iż badanie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego metody MIG/MAG służy również do monitorowania sposobu przenoszenia metalu w łuku [30]. Metody wykorzystujące sygnały elektryczne (pomiar napięcia

łuku spawalniczego i natężenia prądu spawania) są skuteczne jedynie do śledzenia procesu spawania łukiem zwarciovym i z grubokropowym przenoszeniem metalu w łuku spawalniczym. Gdy metal przenoszony jest natryskowo, stosunek sygnał/szum jest za mały i wówczas większą dokładność uzyskuje się przez pomiar natężenia promieniowania świetlnego łuku spawalniczego [31]. Metodę opartą na pomiarze promieniowania łuku spawalniczego wykorzystuje się także do śledzenia długości łuku w metodzie TIG [32] i MIG/MAG [33, 34]. Badając wpływ długości łuku spawalniczego metody TIG na natężenie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego, odkryto, że analiza wybranej linii widmowej (najlepiej odpowiadającej ArI — atom niewzbudzony), pozwala na dokładniejsze obliczenie rzeczywistej długości łuku spawalniczego. Metodę można wykorzystywać do śledzenia oscylacji jeziora ciekłego metalu (TIG), a wyniki są lepsze niż te z wykorzystaniem napięcia łuku [32]. Celem badań promieniowania łuku spawalniczego jest również stworzenie modelu łuku jako źródła promieniowania [19, 35]. Modele te są pomocne do opracowywania systemów wizyjnych funkcjonujących jako układy monitorujące procesy spawalnicze.

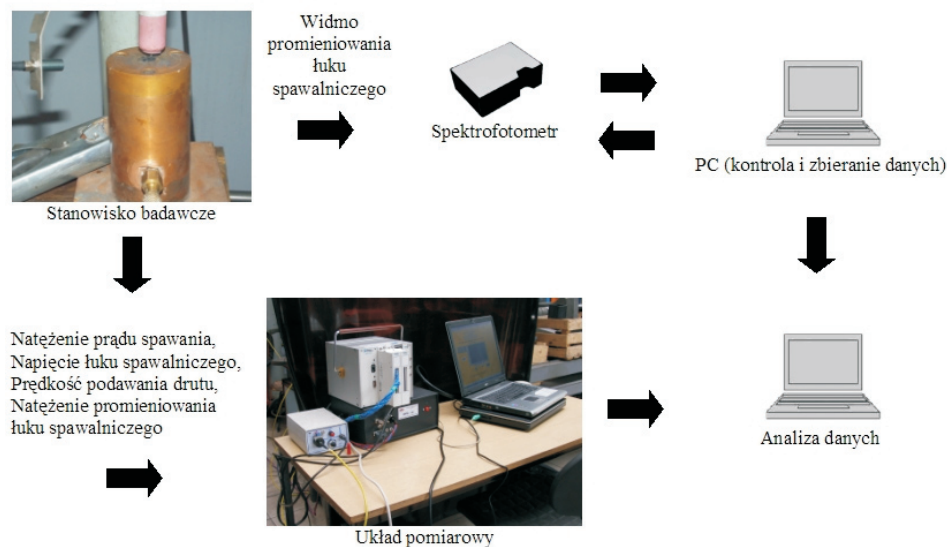
4. Stanowisko badawcze

W skład stanowiska badawczego do badania rozkładu widma promieniowania widzialnego łuku spawalniczego metody TIG wchodziły: suport z zamocowanym miedzianym elementem cylindrycznym chłodzony wodą, na powierzchni którego jarzono łuk spawalniczy, urządzenie spawalnicze Kemppi Pro 5000 z przystawką Pro TIG 400, układ pomiarowy IPPS-01 oraz karta spektrofotometryczna PC 2000 ISA-A firmy Ocean Optics oparta na detektorze CCD Sony typ ILX511. Stanowisko do badania promieniowania łuku spawalniczego wraz z układem pomiarowym IPPS-01, opracowanym w Instytucie Spawalnictwa pokazano na rysunku 3. Stanowisko oraz układ pomiarowy zostały dokładniej opisane przez autora we wcześniejszej publikacji [36].

Karta spektrofotometryczna umożliwiała badanie widma promieniowania elektromagnetycznego łuku spawalniczego w zakresie 200-1100 nm. Czas pomiaru wynoszący 3 ms umożliwia rejestrację rozkładu widmowego on-line. W badaniach wykorzystywano zakres pomiarowy od 340 do 860 nm. W pracy zostało wykorzystane oprogramowanie służące do sterowania pracą karty pomiarowej LabView oraz do sterowania pracą spektrofotometru OII Base 32 firmy Ocean Optics. Dane pomiarowe były analizowane przy pomocy programów Statistica, Array Viwer oraz OriginPro. Do analizy rozkładu widma promieniowania łuku spawalniczego zostało wykorzystane oprogramowanie stworzone w ramach pracy badawczej prowadzonej w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Politechniki Śląskiej w Katowicach. W trakcie badań przyjęto następujące warunki eksperymentu:

- łuk jarzy się między elektrodą wolframową torowaną (katoda) a płytą miedzianą (anoda), chłodzoną wodą,
- uchwyt elektrody jest nieruchomy,
- przyjęto, że długość łuku jest równa odległości elektrody od materiału spawanego (przerwa międzyelektrodowa). Pod pojęciem długości łuku w fizyce plazmy rozumie się długość przestrzennej linii prądu łuku elektrycznego, która może znacznie się różnić od odległości L stanowiącej przerwę międzyelektrodową. Pojęcie długości łuku spawalniczego istnieje jednak od lat w spawalnictwie i taką wielkością powszechnie się operuje również w trakcie modelowania łuku spawalniczego,
- próby spawania przeprowadzono przy biegunowości ujemnej, ponieważ jest częściej stosowana w przemyśle,
- natężenie prądu zmieniano w zakresie 25-300 A,
- długość łuku spawalniczego zmieniano w zakresie 1-5 mm,
- jako gaz osłonowy stosowano czysty argon, natężenie przepływu wynosiło 10 l/min,
- w badaniach wykorzystywano elektrodę torowaną z 2% dodatkiem ThO_2 , o średnicy 3,2 mm i kącie wierzchołkowym 30° .

Zarejestrowane rozkłady widma były następnie przeliczane z uwzględnieniem charakterystyki widmowej karty spektrofotometrycznej.

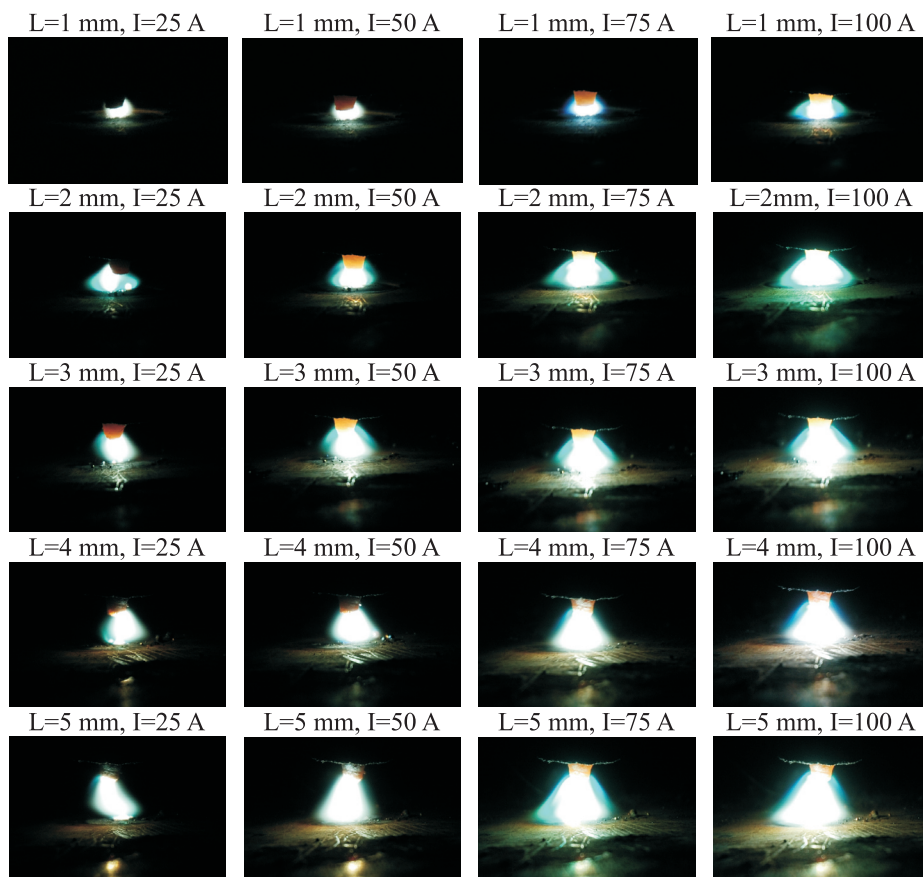


Rys. 3. Stanowisko do badania promieniowania łuku spawalniczego wraz z układem pomiarowym [36]

5. Wpływ zmiany natężenia prądu spawania i długości łuku spawalniczego metody TIG na rozkład widmowy promieniowania łuku spawalniczego

Natężenie prądu spawania i długość łuku spawalniczego są zasadniczymi parametrami procesu spawania metodą TIG, które mają wpływ na ilość ciepła wprowadzonego do złącza spawanego.

Długość łuku spawalniczego jest jednym z podstawowych parametrów spawania metodą TIG, który bezpośrednio decyduje o napięciu łuku spawalniczego. Pomiar i kontrola długości łuku są jednym z głównych zadań układów monitorujących w zrobotyzowanych i zautomatyzowanych stanowiskach spawalniczych. Długość

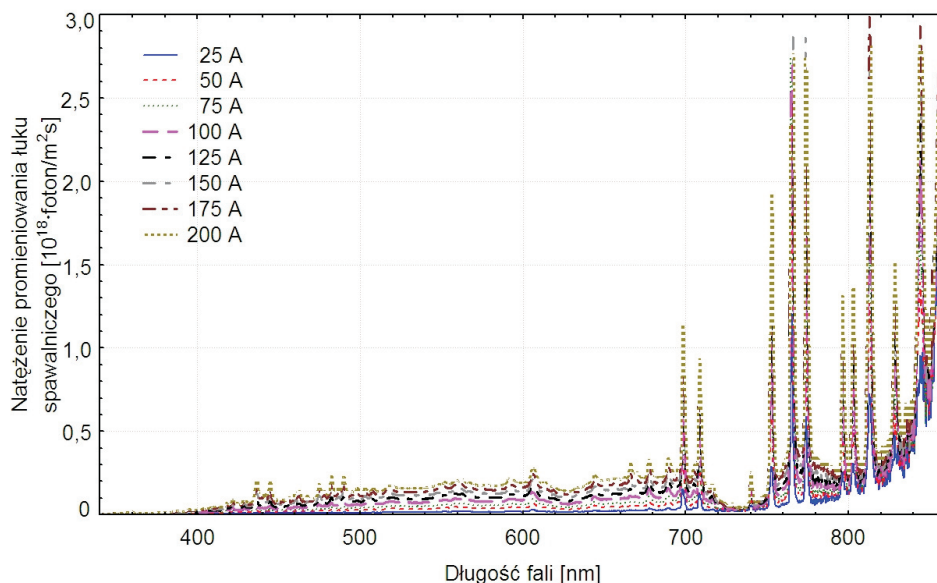


Rys. 4. Zdjęcia łuku spawalniczego metody TIG dla długości łuku w zakresie 1-5 mm i natężenia prądu od 25 do 100 A, jako gaz osłonowy zastosowano 100% Ar

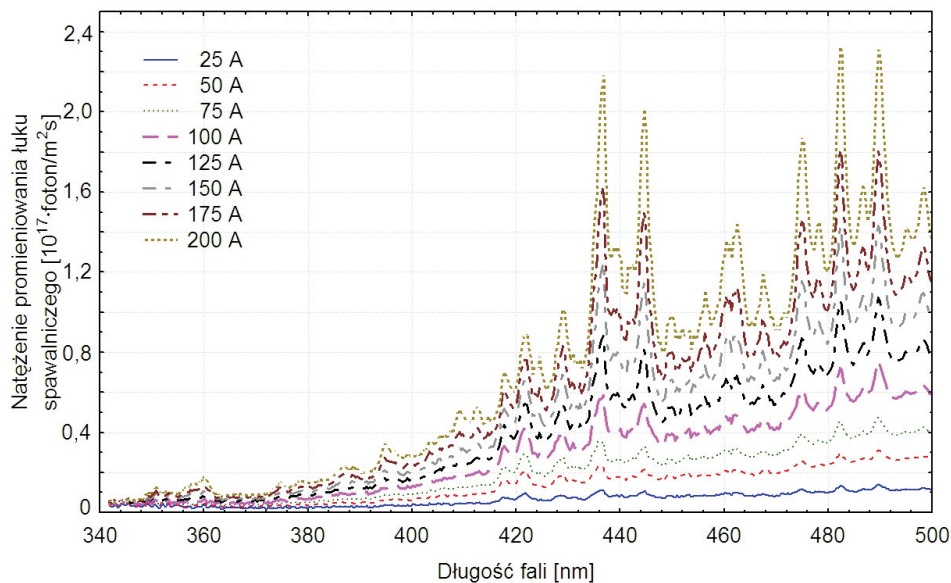
łuku wpływa na rozkład energii łuku, a w konsekwencji na ilość ciepła wprowadzonego do złącza i na szerokość spoiny [2].

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcia łuku spawalniczego metody TIG w zależności od natężenia prądu spawania I w zakresie 25-100 A i długości łuku spawalniczego L w zakresie 1-5 mm. Zdjęcia wykonano przy użyciu aparatu cyfrowego Nikon D80. Zastosowano filtry optyczne, które pozwoliły na zmniejszenie natężenia promieniowania łuku spawalniczego 500 razy. Jak widać, przy stałej długości łuku, wzrost natężenia prądu spawania powoduje, że łuk spawalniczy metody TIG jest stabilniejszy i wykazuje większą symetrię.

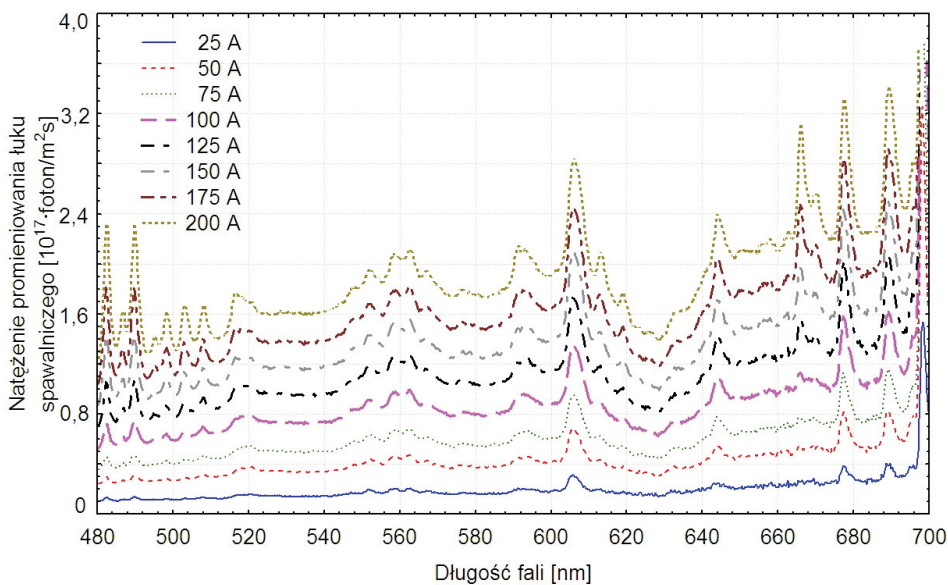
Na rysunkach od 5 do 8 przedstawiono wpływ natężenia prądu spawania I na rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego, przy stałej długości łuku L . W celu łatwiejszej interpretacji otrzymanych wyników zarejestrowany rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego podzielono na trzy zakresy: 340-500 nm, 480-700 nm i 680-860 nm.



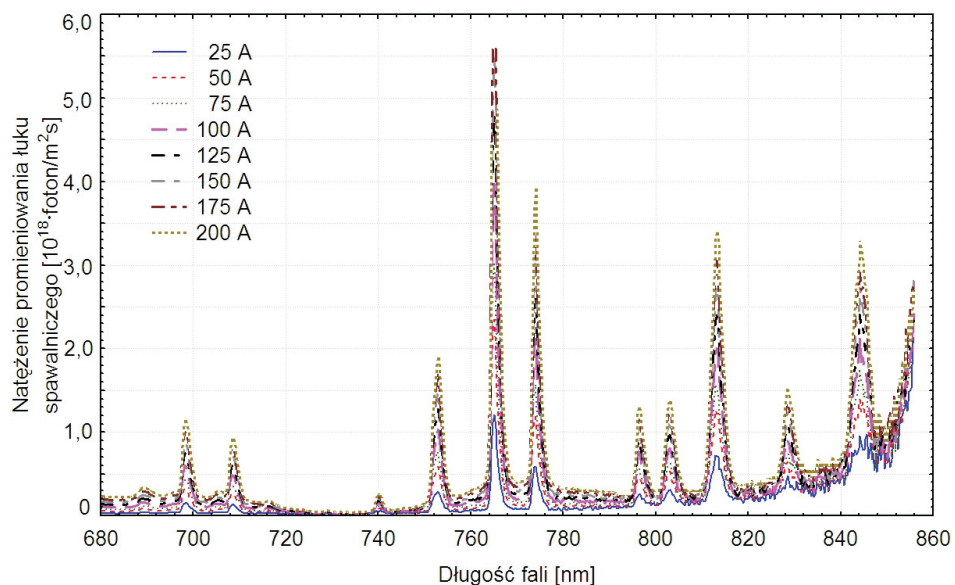
Rys. 5. Rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego metody TIG w zależności od natężenia prądu spawania I . Długość łuku $L = 2$ mm. Natężenia prądu spawania w zakresie 25-200 A. Długość fali od 340 do 860 nm. Gaz osłonowy 100% Ar



Rys. 6. Rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego metody TIG w zależności od natężenia prądu spawania I. Długość łuku L = 2 mm. Natężenia prądu spawania w zakresie 25-200 A. Długość fali od 340 do 500 nm. Gaz osłonowy 100% Ar



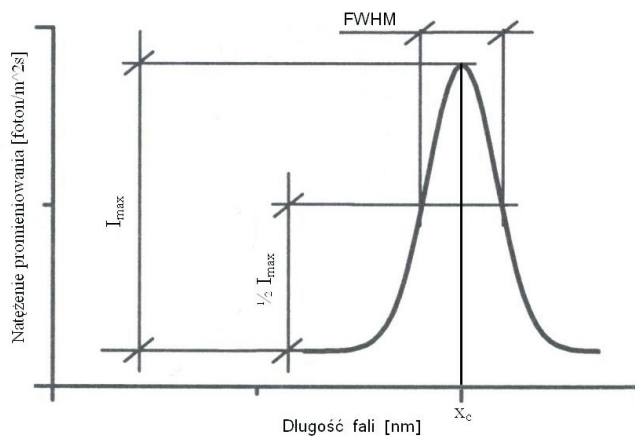
Rys. 7. Rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego metody TIG w zależności od natężenia prądu spawania I. Długość łuku L = 2 mm. Natężenia prądu spawania w zakresie 25-200 A. Długość fali od 480 do 700 nm. Gaz osłonowy 100% Ar



Rys. 8 Rozkład widma promieniowania łuku spawalniczego metody TIG w zależności od natężenia prądu spawania I. Długość łuku $L = 2$ mm. Natężenia prądu spawania w zakresie 25-200 A. Długość fali od 680 do 860 nm. Gaz osłonowy 100% Ar

6. Analiza linii widmowych

Typowy kształt linii widmowej przedstawiono na rysunku 9 wraz z charakterystycznymi wielkościami: x_c — linia centralna, FWHM (*Full With at Half Maximum*) — szerokość połówkowa linii widmowej.



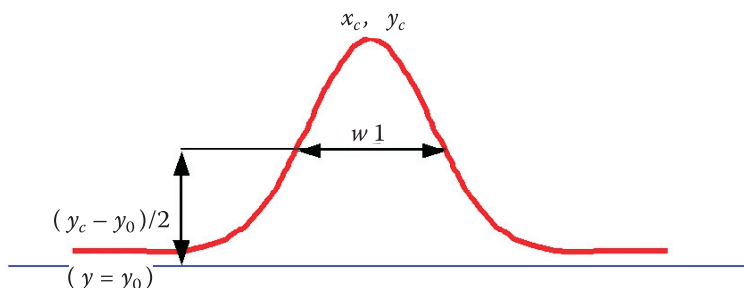
Rys. 9. Typowy kształt linii widmowej [37]

Dla obliczenia charakterystycznych wielkości linii widmowych: linii centralnej, szerokości połówkowej FWHM i natężenia promieniowania, profile linii dopasowywane były funkcjami Gaussa, Lorentza [38] i Voigta [39]. Stosowano metodę najmniejszych kwadratów, używając algorytmu Levenberg-Marquardt zaadaptowanego w programie OriginPro. Najlepszą dokładność uzyskano, stosując funkcję Lorentza [38]:

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2}, \quad (1)$$

gdzie: A — amplituda;
 w — szerokość połówkowa linii widmowej (FWHM);
 x_c — linia centralna.

Na rysunku 10 przedstawiono wielkości charakterystyczne dla funkcji Lorentza.



Rys. 10. Charakterystyczne wielkości dla funkcji Lorentza

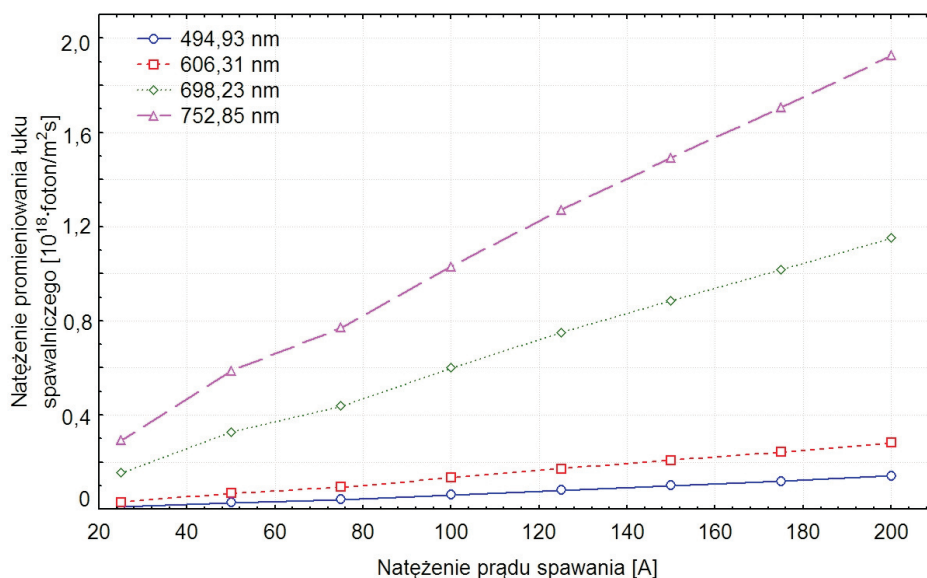
Program umożliwiał jednocześnie dopasowanie jednej lub wielu profili linii widmowych. Na podstawie dopasowanych parametrów funkcji obliczano położenie maksimum linii widmowej (x_c) i szerokość linii widmowej FWHM. W sumie wyodrębniono 41 linii widmowych na podstawie atlasu linii widmowych [40]. W tabeli 2 podano charakterystykę linii widmowych dla natężenia prądu spawania $I = 150$ A i długości łuku spawalniczego $L = 2$ mm. Jako gaz osłonowy zastosowano 100% Ar.

W celu określenia wpływu parametrów spawania na natężenie promieniowania łuku spawalniczego z zarejestrowanych rozkładów widma wyodrębniono cztery przykładowe linie widmowe 494,93, 606,31, 698,23 i 752,85 nm. Na rysunku 11 przedstawiono wpływ natężenia prądu spawania przy stałej długości łuku spawalniczego na natężenie promieniowania wybranych linii widmowych. Natomiast na rysunku 12 przedstawiono wpływ długości łuku spawalniczego.

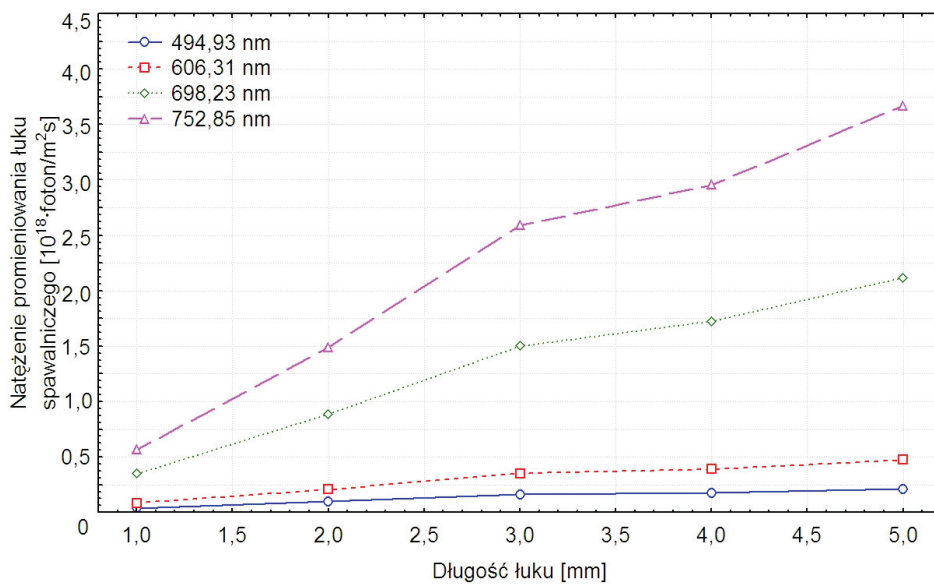
TABELA 2

Charakterystyka linii widmowych, I = 150 A, L = 2 mm, 100% Ar jako gaz osnowowy

| Lp. | Długość fali zmierzona kartą spektrofotometryczną [nm] | Natężenie promieniowania [foton/m ² s] | Długość fali (x_c) obliczona wg modelu Lorentza [nm] | Szerokość linii widmowej FWHM obliczona wg modelu Lorentza [nm] | Przyporządkowanie wg danych literaturowych |
|-----|--|---|--|---|--|
| 1 | 412,50 | $1,49 \cdot 10^{16}$ | 412,47±0,03 | 1,67±0,22 | Ar |
| 2 | 417,68 | $5,84 \cdot 10^{16}$ | 417,97±0,11 | 2,36±2,99 | Ar |
| 3 | 421,77 | $1,13 \cdot 10^{17}$ | 421,71±0,04 | 2,53±0,33 | Ar |
| 4 | 428,93 | $1,27 \cdot 10^{17}$ | 428,88±0,05 | 2,81±0,59 | Ar II |
| 5 | 436,74 | $3,95 \cdot 10^{17}$ | 436,31±0,04 | 2,99±0,26 | Ar II |
| 6 | 444,54 | $2,22 \cdot 10^{17}$ | 444,46±0,02 | 2,31±0,15 | Ar II |
| 7 | 449,95 | $6,56 \cdot 10^{16}$ | 449,78±0,13 | 2,65±1,54 | Ar II |
| 8 | 456,36 | $1,34 \cdot 10^{16}$ | 456,37±0,07 | 0,91±0,31 | Ar II |
| 9 | 460,42 | $8,95 \cdot 10^{16}$ | 460,22±0,13 | 2,71±0,48 | Ar II |
| 10 | 462,44 | $8,39 \cdot 10^{16}$ | 462,50±0,09 | 2,18±0,32 | Ar I |
| 11 | 467,48 | $4,22 \cdot 10^{16}$ | 467,55±0,06 | 1,91±0,37 | Ar II |
| 12 | 474,87 | $1,15 \cdot 10^{17}$ | 475,05±0,04 | 3,26±0,30 | Ar I |
| 13 | 478,22 | $9,61 \cdot 10^{16}$ | 478,13±0,04 | 1,57±0,28 | Ar |
| 14 | 482,24 | $1,43 \cdot 10^{17}$ | 482,37±0,03 | 1,89±0,17 | Ar I |
| 15 | 486,59 | $1,08 \cdot 10^{17}$ | 486,67±0,03 | 1,91±0,26 | Ar I |
| 16 | 489,59 | $1,43 \cdot 10^{17}$ | 489,76±0,01 | 2,27±0,07 | Ar I |
| 17 | 494,93 | $9,99 \cdot 10^{16}$ | 495,05±0,03 | 1,30±0,15 | Ar II |
| 18 | 498,26 | $1,09 \cdot 10^{17}$ | 498,25±0,02 | 2,37±0,09 | Ar I |
| 19 | 502,91 | $1,13 \cdot 10^{17}$ | 503,17±0,05 | 3,32±0,67 | Ar |
| 20 | 507,89 | $1,17 \cdot 10^{17}$ | 508,05±0,03 | 2,21±0,25 | Ar I |
| 21 | 552,23 | $1,43 \cdot 10^{17}$ | 552,27±0,07 | 4,17±0,74 | Ar I |
| 22 | 559,18 | $1,53 \cdot 10^{17}$ | 559,01±0,07 | 12,46±6,74 | Ar |
| 23 | 562,43 | $1,55 \cdot 10^{17}$ | 562,53±0,02 | 3,83±0,39 | Ar I |
| 24 | 593,48 | $1,51 \cdot 10^{17}$ | 593,59±0,10 | 9,96±0,96 | Ar I |
| 25 | 606,31 | $2,07 \cdot 10^{17}$ | 606,31±0,04 | 4,56±0,25 | Ar I |
| 26 | 644,40 | $1,71 \cdot 10^{17}$ | 644,45±0,12 | 4,23±0,59 | Ar |
| 27 | 665,71 | $1,96 \cdot 10^{17}$ | 665,94±0,04 | 1,85±0,16 | Ar I |
| 28 | 669,77 | $1,75 \cdot 10^{17}$ | 669,72±0,18 | 7,71±1,26 | Ar I |
| 29 | 677,54 | $2,41 \cdot 10^{17}$ | 677,67±0,06 | 2,80±0,35 | Ar I |
| 30 | 689,30 | $2,50 \cdot 10^{17}$ | 689,59±0,06 | 3,62±0,55 | Ar I |
| 31 | 698,23 | $8,85 \cdot 10^{17}$ | 698,45±0,03 | 2,07±0,15 | Ar I |
| 32 | 708,66 | $7,03 \cdot 10^{17}$ | 708,61±0,03 | 2,14±0,19 | Ar I |
| 33 | 740,23 | $2,02 \cdot 10^{17}$ | 740,19±0,04 | 1,60±0,14 | Ar I |
| 34 | 752,85 | $1,49 \cdot 10^{18}$ | 752,79±0,03 | 1,93±0,13 | Ar I |
| 35 | 765,08 | $5,53 \cdot 10^{18}$ | 765,17±0,04 | 1,65±0,20 | Ar II |
| 36 | 774,28 | $2,65 \cdot 10^{18}$ | 774,04±0,04 | 1,61±0,18 | Ar I |
| 37 | 796,34 | $1,04 \cdot 10^{18}$ | 796,53±0,04 | 1,86±0,19 | Ar I |
| 38 | 803,05 | $1,07 \cdot 10^{18}$ | 803,05±0,03 | 2,49±0,19 | Ar I |
| 39 | 813,22 | $2,75 \cdot 10^{18}$ | 813,19±0,02 | 2,54±0,09 | Ar |
| 40 | 828,50 | $1,23 \cdot 10^{18}$ | 828,74±0,04 | 2,97±0,29 | Ar I |
| 41 | 844,21 | $2,72 \cdot 10^{18}$ | 844,33±0,03 | 5,07±0,34 | Ar I |



Rys. 11. Wpływ zmiany natężenia prądu spawania w metodzie TIG na natężenie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego, przy stałej długości łuku spawalniczego $L = 2$ mm, dla wybranych długości fal. Gaz osłonowy Ar



Rys. 12. Wpływ zmiany długości łuku spawalniczego w metodzie TIG na natężenie promieniowania widzialnego łuku spawalniczego, przy stałym natężeniu prądu spawania $I = 150$ A, dla wybranych długości fal. Gaz osłonowy Ar

Do znalezienia zależności wiążącej natężenie promieniowania łuku spawalniczego dla wybranej linii widmowej 698,23 nm, natężenia prądu spawania w zakresie 30-300 A i długości łuku spawalniczego w zakresie 2-5 mm wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.

Zbudowano sieć neuronową [41] przy pomocy automatycznego kreatora sieci neuronowych w programie Sieci Neuronowe ver. 6. Kreator przetestował sieci neuronowe w trzech kolejnych krokach. Na wejściu sieci neuronowej podawano wartości natężenia prądu spawania i wartości natężenia promieniowania widzialnego łuku spawalniczego dla długości fali 698,23 nm. W tabeli 3 przedstawiono założenia [41] i wyniki w procesie uczenia sieci neuronowych, natomiast w tabeli 4 — charakterystyki opisowe badanych sieci.

TABELA 3

Założenia i wyniki w procesie uczenia sieci neuronowych

| Lp. | Wielkość | Krok 1 | Krok 2 | Krok 3 | |
|-----|---------------------------------------|---|---|--|----|
| 1 | Liczba testowanych sieci | 300 | 1000 | 1000 | |
| 2 | Liczba zachowanych sieci | 15 | 20 | 20 | |
| 3 | Do analizy zostały wybrane sieci typu | sieć liniowa | | | |
| | | sieć RBF | | | |
| | | perceptron trójwarstwowy | | | |
| 4 | Liczność podzbiorów | uczący | 56 | 56 | 78 |
| | | walidacyjny | 28 | 28 | 28 |
| | | testowy | 28 | 28 | 6 |
| 5 | Kryterium wyboru najlepszej sieci | współczynnik korelacji Pearsona ≈ 1 | | | |
| | | iloraz odchyień: ≈ 0 | | | |
| 6 | Rodzaj wybranej sieci | sieć perceptron trójwarstwowy typu 2:2-7:1 | sieć typu perceptron trójwarstwowy typu 2:2-4:1 | sieć perceptron trójwarstwowy typu 2:2-8:1 | |

TABELA 4

Charakterystyki opisowe badanych sieci

| Lp. | Cecha | Typ sieci neuronowej — perceptron trójwarstwowy | | |
|-----|-------------------------|---|-------|-------|
| | | 2-7-1 | 2-4-1 | 2-8-1 |
| 1 | Średnia | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| 2 | Odchylenie standardowe | 1,118 | 1,118 | 1,118 |
| 3 | Średni błąd | 0,006 | 0,016 | 0,005 |
| 4 | Odchylenie błędu | 0,186 | 0,145 | 0,129 |
| 5 | Średni błąd bezwzględny | 0,112 | 0,099 | 0,080 |
| 6 | Iloraz odchyień | 0,167 | 0,129 | 0,115 |
| 7 | Korelacja | 0,987 | 0,992 | 0,993 |

Z porównania wyników w tabeli 4 widać, że najlepsze rezultaty regresyjne uzyskano dla badanego przypadku przy wykorzystaniu sieci typu perceptron trójwarstwowy typu 2:8:1.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań rozkładu widma promieniowania łuku spawalniczego metody TIG.

Zwiększenie natężenia prądu spawania przy stałej długości łuku spawalniczego powoduje wzrost natężenia promieniowania widzialnego łuku. Przy wzroście prądu spawania występuje widoczna zmiana rozkładu widma promieniowania łuku spawalniczego charakteryzująca się zwiększającą się ilością linii widmowych. Jest to spowodowane wzrastającym stopniem jonizacji gazu osłonowego. Analiza poszczególnych linii widmowych wykazała, że dominujące są linie odpowiadające jonom argonu w przypadku, gdy gazem osłonowym jest argon.

Zmiana długości łuku spawalniczego metody TIG powoduje zmiany natężenia promieniowania widzialnego łuku spawalniczego i zmiany rozkładu widma promieniowania. Zwiększenie długości łuku powoduje wzrost natężenia promieniowania widzialnego łuku spawalniczego metody TIG całego zakresu widmowego 340-860 nm. Wzrost natężenia promieniowania widzialnego łuku spawalniczego jest uzależniony od natężenia prądu spawania. Również wzrost długości łuku spawalniczego, podobnie jak wzrost natężenia prądu spawania, zwiększa stopień jonizacji gazu osłonowego, a tym samym zwiększa się liczba obserwowanych linii widmowych, które odpowiadają jonom argonu.

Postawiono tzw. problem regresyjny, z którym najlepiej poradziła sobie sieć typu perceptron z jedną warstwą ukrytą. Współczynnik korelacji na poziomie 0,99 (sieć idealna ≈ 1) wskazuje na dobrą zgodność wyników. Sieć ta posiada iloraz odchyień na poziomie 0,115 (sieć idealna 0-0,1). Taki model sieci zapewnia najdokładniejsze odwzorowanie zależności pomiędzy długością łuku spawalniczego a natężeniem promieniowania łuku i natężeniem prądu spawania.

Przeprowadzone eksperymenty pozwolą określić dalsze kierunki badań zjawiska promieniowania łuku spawalniczego i możliwości jego wykorzystania do monitorowania procesów spawalniczych na stanowiskach zautomatyzowanych i zrobotyzowanych. Szczegółowa analiza rozkładów widma promieniowania elektromagnetycznego łuku spawalniczego pomoże opracowywać nowe układy widzenia maszynowego, wykorzystywane coraz częściej w spawalnictwie.

Systemy monitorujące oparte na pomiarze promieniowania łuku spawalniczego będą użyteczne zwłaszcza w przemyśle wykonującym konstrukcje stalowe, ponieważ pozwolą one na obniżenie kosztów produkcji poprzez wyeliminowanie wadliwych połączeń już w trakcie spawania.

Podziękowania

Badania były częściowo finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego 3 T10C 021 28 w latach 2005-2007. Część badań została wykonana w ramach programu Junior Fulbright Grant w latach 2007-2008 na University of Kentucky College of Engineering Center for Manufacturing Welding Research and Developed Laboratory.

Autor składa gorące podziękowania Profesorowi Marianowi Nowakowi i dr Mirosławie Kępińskiej z Zakładu Fizyki Ciała Stałego Politechniki Śląskiej za pomoc merytoryczną, jak również dr. YuMing Zhang — kierownikowi Welding Research and Developed Laboratory za umożliwienie prowadzenia badań.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.11.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. PILARCZYK, *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, WNT, Warszawa, 2004.
- [2] A. KLIMPEL, *Technologie spawania, zgrzewania i cięcia metali*, WNT, Warszawa, 1999.
- [3] K. LUKSA, *Wykrywanie braku osłony gazowej łuku w metodzie GMA na podstawie wyników monitorowania procesu spawania*, Przegląd Spawalnictwa, t. 74, nr 4, 2002, 6-9.
- [4] X. Q. CHEN, *Advanced automation techniques in adaptive material processing*, Word Scientific Publishing, New Jersey, 2002.
- [5] T. SIEWERT, B. MADIGAN i in., *Trough the arc sensing for measurement Gas Metal Arc weld quality in real time*, Materials Evaluation, vol. 50, no 11, 1992, 1314-1318.
- [6] P. J. BLAKELEY, *Who should be using arc monitoring?*, Welding and Metal Fabrication, vol. 58, no 6, 1990, 268-272.
- [7] J. S. SMITH, C. BALFOUR i in., *Advances in sensor technology for controlling arc welding processes*, dokument Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa MIS XII-1790-04.
- [8] A. C. GUU, S. I. ROKHLIN, *Arc welding process control using radiographic sensing*, Materials Evaluation, vol. 50, no 11, 1992, 1344-1348.
- [9] N. M. CARLSON, J. A. JOHNSON, *Ultrasonic NDT methods for weld sensing*, Materials Evaluation, vol. 50, no 11, 1992, 1338-1343.
- [10] K. L. TAYLOR-BURGE, T. J. HARRIS i in., *The real time analysis of acoustic weld emission using neural networks*, Proceedings of the International Conference on the Joining of Materials JOM-6, 1993, 60-67.
- [11] C. A. JOHNSON, *System for controlling length of welding arc*, Patent US, 1966, no 3236997.
- [12] S. MARZEC, E. JANOSIK, *Wpływ promieniowania łuku spawalniczego na organizm spawacza*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, t. 39, nr 6, 1995, 33-37.
- [13] H. E. PATTEE, L. B. MYERS i in., *Effect of Arc Radiation and Heat on Welders*, Welding Journal, vol. 52, no 5, 1973, 297-308.
- [14] Y. OGAWA, *Effect of active flux on anode reaction*, dokument MIS XII-1797-04.
- [15] K. INOUE, *Image processing for on-line detection of welding process (Report III) — improvement of image quality by incorporation of spectrum of arc*, Transaction of JWRI, vol. 10, no 1, 1981, 13-18.
- [16] G. AGAPIOU, C. KASIOURAS i in., *A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensor*, Optics & Laser Technology, vol. 31, no 31, 1999, 157-161.
- [17] J. F. HINRICHS, *Radiation and arc welding: New data to enhance safety*, Welding and Metal Fabrication, vol. 46, no 3, 1978, 102-103.

- [18] J. HAIDAR, *A theoretical model for gas metal arc welding and gas tungsten arc welding*, Journal of Applied Physics, vol. 83, no 7, 1998, 3518-3529.
- [19] P. J. LI, Y. M. ZHANG, *Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the GTAW process*, Welding Journal, vol. 79, no 9, 2000, 252-260.
- [20] L. ZABORSKI, *Studies on the luminance of welding arc*, Biuletyn Instytutu Medycyny Morskiej, nr 6, 1976, 267-277.
- [21] J. D. FERGASON, *Detector system for detecting the occurrence of welding*, Patent US, 1993, nr 5248880.
- [22] A. ANCONA, P. M. LUGARÀ i in., *A sensing torch for on-line monitoring of the gas tungsten arc welding process of steel pipes*, Measurement Science and Technology, vol. 15, no 12, 2004, 2412-2418.
- [23] S. GLICKSTEIN, *Temperature measurements in a free burning arc*, Welding Journal, vol. 55, no 8, 1976, 222-229.
- [24] M. WĘGŁOWSKI, *Determination of GTA and GMA welding arc temperatures*, Welding International, vol. 19, no 3, 2005, 186-192.
- [25] L. GROVE, W. A. LOSEKE i in., *Development of portable direct reading spectrometer to monitor oxygen-hydrogen containing contaminants in gas tungsten-arc process shields*, Welding Journal, vol. 49, no 11, 1970, 538-545.
- [26] H. G. KRAUS, *Surface Temperature Measurements of GTA Weld Pools Thin-Plate 304 Stainless Steel*, Welding Journal, vol. 68, no 3, 1989, 84-91.
- [27] T. OKADA, H. YAMAMOTO i in., *Observation of the shielding gas flow pattern during arcing by the use of laser light source*, International Conference Proceedings Arc physics and weld pool behaviour, Londyn, 1980, 203-213.
- [28] J. C. METCALFE, B. C. QUIGLEY, *Arc and pool instability in GTA welding*, Welding Journal, vol. 56, no 5, 1977, 133-139.
- [29] K. ETEMADI, E. PFENDER, *Computer-controlled plasma emission spectroscopy*, Rev. Sci. Instrument, vol. 53, no 2, 1982, 255-257.
- [30] Q. L. WANG, P. J. LI, *Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW processes*, Welding Journal, vol. 76, no 11, 1997, 458-469.
- [31] Q. L. WANG, P. J. LI i in., *A new close-loop droplet transfer control system in the pulsed GMAW*, Welding in the World, vol. 34, no 1994, 217-226.
- [32] M. WĘGŁOWSKI, *Sensing of arc length in the TIG welding method based on arc light intensity*, Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 29, no 2, 2005, 31-41.
- [33] C. D. YOO, Y. S. YOO i in., *Investigation on arc light intensity in gas metal arc welding. Part 1: relationship between arc light intensity and arc length*, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 211, no B5, 1997, 345-353.
- [34] C. D. YOO, Y. S. YOO i in., *Investigation on arc light intensity in gas metal arc welding. Part 2: application to weld seam tracking*, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 211, no B5, 1997, 355-363.
- [35] J. Y. YU, J. I. KIM i in., *Influence of reflected arc light on vision sensor for automatic GTAW systems*, Welding Journal, vol. 82, no 2, 2003, 36-42.
- [36] M. WĘGŁOWSKI, Z. MIKNO, M. WELCEL, M. KĘPIŃSKA, *Kontrola procesu spawania TIG w oparciu o promieniowanie łuku spawalniczego*, Przegląd Spawalnictwa, nr 12, 2007, 15-20.
- [37] A. MIERNIKIEWICZ, *Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektro-erozyjnej (EDM)*, Politechnika Krakowska, Kraków, 2000.
- [38] J. W. GOODMAN, *Statistical optics*, John Wiley & Sons inc., New York, 1985.

- [39] R. H. HUDDLESTONE, S. L. LEONARD, *Plasma diagnostic techniques*, Academic Press, New York, 1965.
- [40] G. B. HARISON, *Wavelength tables*, John Wiley & Sons inc., New York, 1939.
- [41] R. TADEUSIEWICZ, P. LULA, *Materiały szkoleniowe firmy StatSoft. Sieci neuronowe*, Kraków, 2004.

M. S. WĘGŁOWSKI

Spectrophotometric measurements of welding arc light emission in TIG method

Abstract. The results of visible radiation intensity of the TIG welding arc in the range of 340-860 nm have been presented. The correlation between welding current, arc length and the intensity of welding arc visible radiation has been examined. Distribution of a radiation spectrum of the electric arc light emission was modeled with Lorentz, Gauss, and Voigt fitting functions. Selected characteristic values of a spectral line were calculated. The fitting for single wavelength and multi wavelengths was carried out. The best result was obtained with the Lorentz function. Artificial neuron networks were used to find a correlation between the intensity of arc light emission for single emission line 698.23 nm, welding current in the range of 30-300 A, and the arc length in the range of 2-5 mm. It was stated, that monitoring of the TIG welding arc visible radiation can be used to control the welding arc length.

Keywords: welding and allied techniques, spectrophotometric measurements, welding arc light

Universal Decimal Classification: 621.791

