

Pomiar i określenie ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego oraz głębokości wtopienia spoiny w pulsacyjnym spawaniu MIG/MAG

Measurement and estimation of weld pool surface depth and weld penetration in pulsed gas metal arc welding

Streszczenie

Powierzchnia jeziorka spawalniczego może zawierać dane wystarczające do wyznaczenia głębokości wtopienia spoiny. W badaniach użyto szybkostrzelnego systemu wizyjnego z kamerą do rejestracji obrazu powierzchni jeziorka spawalniczego podczas spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazu (GMAW lub MIG/MAG). Aby wyliczyć ugięcie ciśnieniem łuku powierzchni jeziorka spawalniczego z uzyskanego obrazu zaproponowano procedurę kalibracji, która umożliwiłaby określenie parametrów do przeprowadzenia obliczeń. Ustalono parametry spawania do wykonania serii eksperymentów spawania prądem impulsowym metodą MIG/MAG. Modelowanie z użyciem danych eksperymentalnych wykazało, że zmiana ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego w fazie prądu impulsu może być wykorzystana do przewidywania głębokości wtopienia spoiny z wystarczającą dokładnością. Bezpośrednie zastosowanie tych wyników komplikuje jednak konieczność wykorzystania systemu wizyjnego. Aby znaleźć metodę, którą można zastosować do monitorowania wtopienia spoiny przy użyciu sygnałów łatwych do zmierzenia w warunkach produkcyjnych, przeanalizowano potencjalny związek pomiędzy zmianą ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego a napięciem łuku. Analiza wykazała, że zmiana napięcia łuku w fazie prądu impulsu może precyzyjnie odzwierciedlać zmianę wartości ugięcia powierzchni jeziorka w fazie prądu impulsu. W związku z tym, proponuje się określanie wtopienia spoiny ze zmiany napięcia łuku w fazie prądu impulsu. Wyniki modelowania pokazują, że zmiana napięcia łuku w fazie prądu impulsu może umożliwiać dokładne przewidywanie głębokości wtopienia podczas spawania impulsowego MIG/MAG.

Abstract

The weld pool surface may contain sufficient information to determine weld penetration. In this study, a high-speed camera-based vision system was used to image the weld pool surface during gas metal arc welding (GMAW). To calculate the depth of the weld pool surface from the acquired image, a calibration procedure is proposed to determine the parameters in the calculation equation. Welding parameters were designed to conduct a series of pulsed GMAW (GMAW-P) experiments. Modeling using experimental data shows that the change of the weld pool surface depth during the peak current period can predict the depth of the weld penetration with adequate accuracy. However, a direct application of this result is complicated by the need for a vision system. To find a method that can be used to monitor the weld penetration using signals that are easily measurable in manufacturing facilities, a possible relationship between a change in weld pool surface depth and a change in arc voltage was analyzed. The analysis suggested that the change in arc voltage during the peak current period may reflect accurately the change in weld pool surface depth during the peak current period. As a result, it is proposed that the depth of the weld penetration be determined from the change in arc voltage during the peak current period. The modeling result shows that the change in arc voltage during peak current can indeed provide an accurate prediction for the depth of the weld penetration during GMAW-P.

Z. Wang, Y. M. Zhang – University of Kentucky, Lexington, USA, L. Wu – Harbin Institute of Technology, Chiny.

Wstęp

Spawanie łukowe elektrodą topliwą MIG/MAG (w Stanach Zjednoczonych GMAW) można uznać za najbardziej rozpowszechnioną metodę spawania, wybieraną ze względu na wszechstronność, prędkość i łatwość użycia w spawaniu zrobotyzowanym. Z impulsowego spawania GMAW-P korzysta się w celu uzyskania kontrolowanego przenoszenia kropli metalu w szerokim zakresie poziomów wprowadzonego ciepła i masy [1, 2].

W metodzie tej niskie natężenie prądu (prąd bazy) utrzymuje łuk elektryczny, natomiast maksymalne natężenie prądu (prąd impulsu) służy do topienia drutu spawalniczego i odłączania powstałej kropli. W rezultacie – osiąga się pożądany mechanizm natryskowego przenoszenia kropli metalu przy niskiej średniej prądu [3, 4].

Wtopienie spoiny odgrywa zasadniczą rolę w określaniu jej wytrzymałości mechanicznej i wymiarowaniu spoin, toteż kontrola nad nim jest niezwykle istotna. Niniejszy artykuł dotyczy zastosowań z częściowym przetopem, w którym nie jest przetapiana cała grubość materiału spawanego. W przypadku spoin z niepełnym przetopieniem, głębokość szczeliny wypełniona stopiwem określa wymiar obliczeniowy spoiny. Głębokość ta jest często wykorzystywana do pomiaru wtopienia spoiny. Oczywiście oznacza to, że głębokość wtopienia spoiny nie jest bezpośrednio mierzalna i nie jest wliczana do wymiaru wytrzymałościowego spoiny, którą z konieczności jest głębokość rowka spawalniczego wypełnionego stopiwem. W celu jej określenia wprowadzono wiele metod opierających się na pomiarach pośrednich, takich jak: geometryczne parametry jeziora spawalniczego [5] pole temperatury [6], częstotliwość drgań [7, 8] i napięcie łuku [9]. Aby uzyskać pomiary pośrednie, stosowano różnorodne techniki, takie jak: wizyjne [5, 10], ultradźwiękowe [11], emisji akustycznej [12] oraz termiczne [6]. Niemniej jednak większość tych wysiłków koncentrowała się na spawaniu łukowym elektrodą wolframową TIG (w Stanach Zjednoczonych GTAW).

Metoda TIG (GTAW) jest mniej skomplikowana i dużo bardziej stabilna w porównaniu z GMAW, na której skupiają się poniższe badania. W celu poprawy wydajności, w spawaniu GMAW jako elektrodę wykorzystuje się topliwą drut, a powstały w wyniku tego sposób przenoszenia kropli stopionego drutu komplikuje proces. Ze względu na przenoszenie ciekłego metalu, kropelki okresowo uderzają w ciekłe jezioro i powodują jego drganie. W przypadku pulsacyjnego spawania GMAW, które jest przedmiotem obecnego badania, ciśnienie łuku również okresowo się zmienia, co powoduje dużą fluktuację powierzchni jeziora. Wynikająca z tego złożoność przysporzyła dodatkowych trudności w uzyskaniu pośrednich pomiarów, koniecznych do określenia głębokości wtopienia spoiny. Spośród możliwych pomiarów pośrednich, mierzenie ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego wydaje się najbardziej obiecujące, dostarczając dostatecznej ilości danych koniecznych do oceny wtopienia spoiny. Wynika to z tego, że wielu doświadczonych spawaczy potrafi

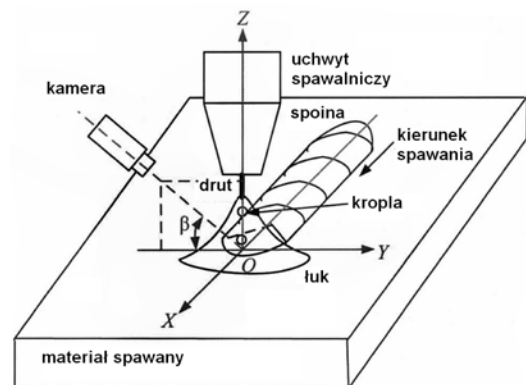
kontrolować głębokość wtopienia spoiny tylko na podstawie obserwacji powierzchni jeziora spawalniczego.

Zaproponowano metody pomiaru trójwymiarowej powierzchni jeziora poprzez użycie oświetlenia strukturalnego i szkła rozpraszającego [13], oświetlenia strukturalnego i skalibrowanej kamery [14], odbicia zwierciadlanego od jeziora [15, 16], kształtu z cieniowania [17], dwukamerowego, stereowizyjnego systemu [10] oraz systemu stereowizyjnego z bipryzmatem [18].

W innym badaniu Zhang i Yan zmierzili średnią wysokość granicy brzegu jeziora, tj. parametr dotyczący głębokości z modelu aproksymacji geometrycznej w spawaniu GMAW prądem impulsowym cienkich blach [19]. Niestety, metody te w znacznym stopniu opierają się na systemach wizyjnych, a ich użyteczność w warunkach produkcyjnych należy poprawić przed zastosowaniem w praktyce. W artykule przedstawiono opracowanie prostej, ale innowacyjnej metody, która pozwoli efektywnie uzyskać głębokość ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego pod łukiem elektrycznym (odtąd określaną jako głębokość ugięcia powierzchni jeziora lub d_j) i porównuje się tę głębokość z głębokością wtopienia spoiny przez nią uzyskanego (odtąd głębokość wtopienia lub d_w). W celu zbadania związku pomiędzy nimi, głębokość ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego d_j zmierzono bezpośrednio za pomocą widzenia maszynowego przez zastosowanie szybkostrzelnej kamery. Chcąc wykorzystać sygnały, które są łatwe do zmierzenia, żeby przewidzieć głębokość wtopienia d_w , mierzono również napięcie łuku elektrycznego w odniesieniu do głębokości wtopienia d_w .

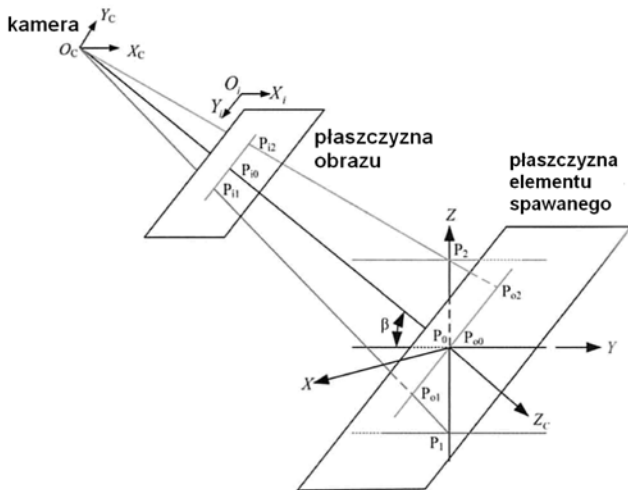
Zasada pomiaru z wykorzystaniem obrazowania

Szybkostrzelna kamera, OLYMPUS i- SPEED, która jest w stanie uchwycić do 33 000 klatek na sekundę i bezpośrednio rejestrować obraz jeziora spawalniczego w obecności łuku, została umocowana z górnej strony jeziora spawalniczego pod kątem β w celu obrazowania jeziora, tak jak pokazano na rysunku 1. Uchwyt spawalniczy jest prostopadły do powierzchni elementu spawanego.



Rys. 1. Schemat pomiaru głębokości ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego

Fig. 1. Schematic diagram for SD measurement.



Rys. 2. Zasada pomiaru głębokości ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego
Fig. 2. The SD measurement principle

Dla wygody dyskusji naniesiony został układ współrzędnych OXYZ (rys. 1), przy czym górna powierzchnia elementu spawanego została przedstawiona jako płaszczyzna OXY; oś uchwytu spawalniczego odzwierciedla oś Z, a połączenie spawane i kierunek spawania – oś X. Metodę pomiaru ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w oparciu o system wizyjny przedstawiono na rysunku 2.

Ugięcie powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w tym artykule odnosi się do maksymalnej wartości ugięcia powierzchni jeziorka poniżej płaszczyzny OXY, którą można zmierzyć za pomocą współrzędnej osi Z: punktu przecięcia osi Z i powierzchni jeziorka spawalniczego.

Wykorzystano model kamery otworkowej (wirująca tarcza z otworkiem chroni układ optyczny przed odpryskami spawalniczymi), (rys. 2). Zastosowano trzy układy współrzędnych: układ współrzędnych kamery ($O_c X_c Y_c Z_c$), układ współrzędnych obrazu ($O_i X_i Y_i$) i układ współrzędnych uchwytu spawalniczego. Płaszczyzna obiektu jest równoległa do płaszczyzny obrazu i tworzy kąt β z osią Z.

Kiedy powierzchnia jeziorka podnosi się tak, że punkt przecięcia się osi Z z powierzchnią jeziorka spawalniczego podnosi się z P_0 do P_2 , odpowiadający mu punkt na płaszczyźnie elementu zmienia się z P_{00} na P_{02} , a odpowiadający im punkt na płaszczyźnie obrazu zmienia się z P_{i0} na P_{i2} (rys.2). Głębokość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j można zmierzyć zatem jako:

$$d_j = -|P_2 P_0| = -|P_{02} P_{00}| \cos \beta \quad (1)$$

gdzie: d_j oznacza wartość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego, a ujemne/dodatnie d_j odnosi się do powierzchni jeziorka spawalniczego powyżej/poniżej płaszczyzny OXY.

Podobnie, jeśli powierzchnia jeziorka spawalniczego się obniży, ugięcie jego powierzchni d_j będzie następujące:

$$d_j = |P_{01} P_{00}| \cos \beta \quad (2)$$

powiększenie S_c definiujemy jako

$$S_c = |P_{0j} P_{00}| P_{ij} P_{i0} \quad (3)$$

gdzie: P_{ij} jest punktem obrazu P_{ij} ($j = 1, 2$) na płaszczyźnie obrazu, podczas gdy P_{0j} jest odpowiadającym mu punktem na płaszczyźnie elementu.

Wtedy:

$$d_j = \pm S_c \times |P_{ij} P_{i0}| \cos \beta \quad (4)$$

Stąd:

$$d_j = S_c \times (y_{ij} - y_{i0}) / \cos \beta \quad (5)$$

gdzie: y_{ij} i y_{i0} są współrzędnymi y punktu P_{ij} ($j = 1, 2$), a początek układu współrzędnych, odpowiednio, na obrazie.

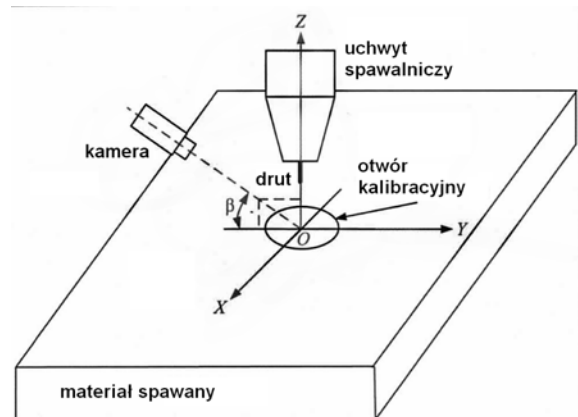
Parametry powiększenie S_c i kąt filmowania β oraz pozycja początku układu współrzędnych na obrazie tj. $O(x_{i0}, y_{i0})$ są potrzebne do wyliczenia ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j . W tym celu zastosowano kalibrację.

Kalibracja

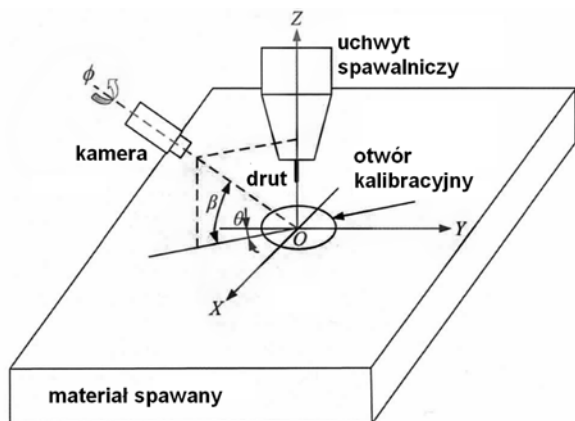
Koło nie ma kierunkowości – korzystając z tej cechy koła opracowano procedurę kalibracji, aby określić S_c , β oraz $O(x_{i0}, y_{i0})$. Koło kalibracji z krzyżykiem umieszczono tuż poniżej końcówki drutu i przyłożono do górnej powierzchni elementu spawanego (rys. 3).

Najlepiej byłoby, gdyby oś optyczna kamery nie tworzyła kąta z płaszczyzną OYZ, jednakże powinien istnieć niewielki kąt, oznaczony jako β , pomiędzy nimi wraz z niewielkim kątem obrotu θ (rys. 4). Wówczas obraz koła będzie elipsą, której dłuższa oś jest równa średnicy koła, a środek – środkiem koła.

Jeżeli parametry elipsy, włącznie z pozycją środka (X_0, Y_0), półosią wielką a półosią małą b, oraz kątem obrotu elipsy α , uzyskano z przetwarzania obrazu,



Rys. 3. Zasada kalibracji
Fig. 3. Calibration principle



Rys. 4. Ilustracja położenia punktu obserwacji przy kalibracji
Fig. 4. Illustration of observation orientation in calibration

można łatwo określić:

$$O = (X_0, Y_0) \quad (6)$$

$$\varphi = -\alpha \quad (7)$$

$$S_c = r/a \quad (8)$$

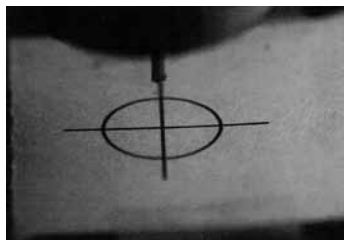
gdzie: r – rzeczywisty promień koła w mm,

a następnie

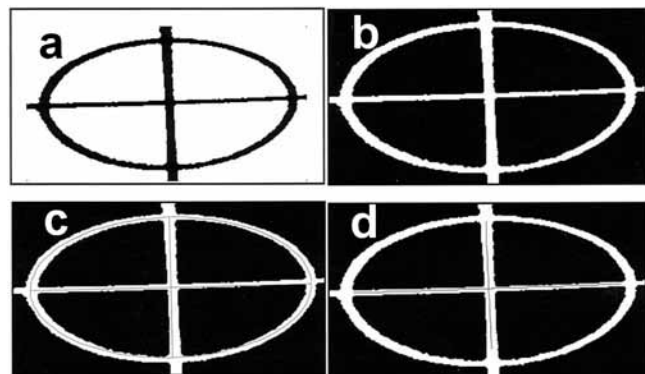
$$\beta = \arcsin(b/a) \quad (9)$$

Również nachylenia i przecięcia linii k_h, b_h, k_v, b_v można uzyskać z przetwarzania obrazu. Definiujemy $\alpha' = \arctan(k_h)$ i $\varphi = \alpha' - \alpha$, a następnie

$$\theta = \arcsin(\sin \varphi / \sin \beta) \quad (10)$$



Rys. 5. Obraz koła kalibracji z krzyżykiem
Fig. 5. Image of the calibration circle with cross



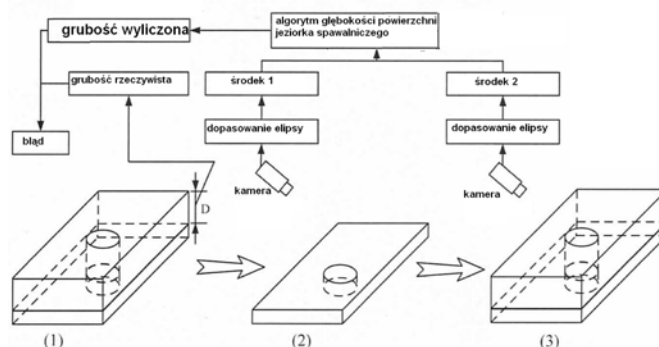
Rys. 6. Przetwarzanie obrazu i uzyskanie parametrów do kalibracji: a) binaryzacja; b) odwrócenie obrazu; c) dopasowanie elipsy; d) dopasowanie linii

Fig. 6. Image processing and parameters extraction for calibration: a) binarization; b) image inverting; c) ellipse fitting; d) lines fitting

Obraz koła kalibracji został pokazany na rysunku 5. Obszar, gdzie wybrano położenie koła kalibracji do przetwarzania, oraz wyniki przetwarzania obrazu pokazano na rysunku 6. Parametry elipsy oraz linii łatwo uzyskać z przetwarzanego obrazu.

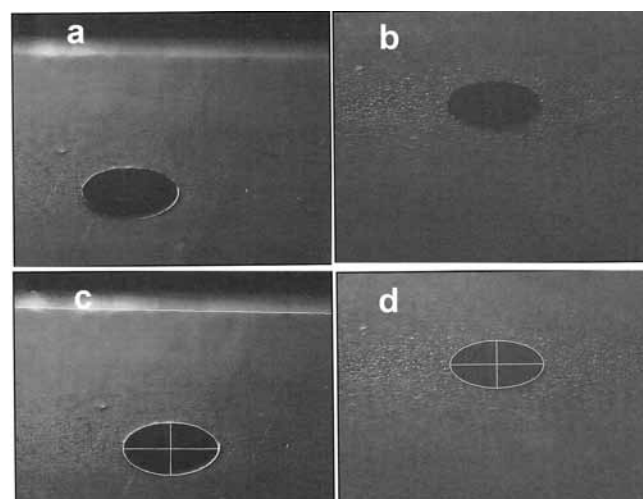
Test algorytmu pomiaru i analiza błędów

Zasady testu przedstawiono na rysunku 7. Przygotowano dwie metalowe blachy o identycznym rozmiarze, ale różnej grubości z identycznymi współosiowymi, okrągłymi otworami (1) z rysunku 7. Po ustawieniu kamery i blachy wzorcowej, płaszczyzna odniesienia, tj. górna powierzchnia blachy wzorcowej jest obrazowana tak, jak pokazano na (2). Następnie umieszcza się blachę testową na blasze wzorcowej tak, że ich otwory idealnie się pokrywają i są obrazowane (3). Te dwa obrazy są następnie przetwarzane w celu wykrycia punktów środkowych dwóch elips, które można wykorzystać do wyliczenia grubości blachy testowej. W badaniu obydwie blachy mają wymiary 100 × 50 mm, a ich grubości wynoszą: blachy wzorcowej 2,54 mm i blachy



Rys. 7. Schemat testu algorytmu pomiaru

Fig. 7. Schematic diagram for measurement algorithm test



Rys. 8. Obrazy testu algorytmu pomiaru: a) płaszczyzna wzorcowa; b) płaszczyzna testowa; c) wynik dopasowania dla płaszczyzny wzorcowej; d) wynik dopasowania do płaszczyzny testowej

Fig. 8. Measurement algorithm test images: a) reference plane; b) test plane; c) fitting result for the reference plane; d) fitting result for the test plane

Tablica I. Wynik testu algorytmu pomiaru
Table I. Measurement algorithm test result

Wyliczona grubość, mm	Rzeczywista grubość, mm	Błąd względny, %
6,72	6,35	5,76

testowej 6,35 mm. Średnica obydwu identycznych, okrągłych otworów wynosi 6,35 mm. Dwa oryginalne obrazy pokazano na rysunkach 8a i 8b. Wyniki ustawienia elipsy i linii przedstawiono na rysunkach 8c i 8d. Wyniki obliczeń grubości zawarto w tablicy I.

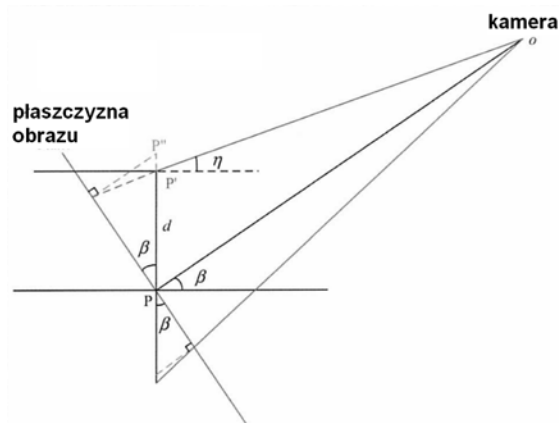
Jak wynika z tablicy I, wystąpił błąd obliczenia grubości w stosunku do grubości rzeczywistej, który można uznać za oszacowanie błędu dla zaproponowanego algorytmu obliczenia głębokości, kiedy powierzchnia jeziorka spawalniczego zmienia się na 6,35 mm. Błąd ten pojawia się, ponieważ algorytm przedstawiony na rysunku 2. jest w rzeczywistości przybliżeniem dokładnego modelu kamery. Na rysunku 9 przedstawiono błąd $|P'P''|$ spowodowany zastosowaniem przybliżenia, a więc nieodłączny błąd algorytmu obliczenia głębokości.

Względny błąd δ to:

$$\delta = \frac{(|PP''| - |PP'|)}{|PP'|} = \frac{\cos \eta}{\cos(\beta - \eta) \cos \beta} - 1 \quad (11)$$

Jak widać, jeżeli $\eta \rightarrow \beta$, to $\delta \rightarrow 0$. W powyższym przypadku, można wyliczyć zarówno β , jak i η z równania (9), tj. $\beta = \arcsin(b/a)$ bazując na a i b z obrazu płyty wzorcowej oraz $\eta = \arcsin(b/a)$, używając a i b z obrazu płyty testowej, z czego wynika $\beta = 0,576$, a $\eta = 0,548$.

Względny nieodłączny błąd wynosi zatem 2,67%. Są też inne źródła błędów, łącznie z możliwym niepożądanym samoistnym obrotem kamery, niewielką odległością pomiędzy dwoma blachami wykorzystanymi do testu, błąd obliczenia w wyliczaniu środków dwóch elips itd. Błąd podany w tablicy I jest pochodną wszystkich tych źródeł błędu. Jednakże w pomiarach zmiana wartość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego jest znacznie mniejsza niż



Rys. 9. Analiza błędu
Fig. 9. Error analysis

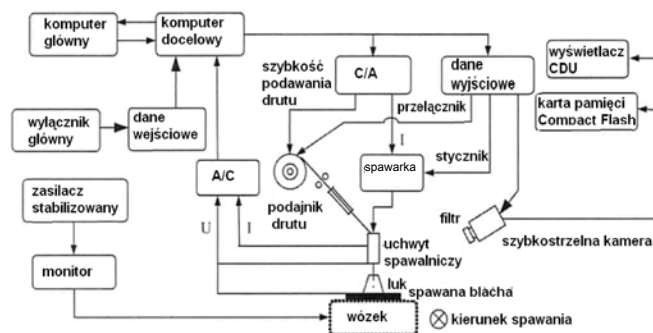
Tablica II. Obliczane parametry
Table II. Calculated parameters list

Parametry	Wartości
Średni prąd spawania I_a , A	192,0
Średnie napięcie prądu spawania U_a , V	30,4
Średnie napięcie fazy maksymalnego natężenia prądu U_p , V	33,6
Średnie napięcie prądu bazy U_b , V	27,7
Zmiana napięcia prądu spawania w każdej fazie maksymalnego natężenia prądu spaw. ΔU_{pi} , V	3,83
	2,13
	0,75
	3,33
	1,38
Średnia zmiana napięcia prądu w każdej fazie maks. natęż. prądu spaw. ΔU , V	2,28
Średnie ugięcie powierzchni jeziorka w fazie maks. natęż. prądu spaw. d_j , mm	0,56
Zmiana ugięcia powierzchni jeziorka w każdej fazie maks. natęż. prądu spaw. i Δd_j , mm	0,52
	1,01
	0,56
Średnia zmiana głębokości wtopienia w fazie maks. natęż. prądu spaw. Δd , mm	0,38
Średnia zmiana głębokości wtopienia w fazie maks. natęż. prądu spaw. Δd , mm	0,61
Szerokość spoiny W_s , mm	6,57
Średnie wtopienie spoiny d_s , mm	2,63

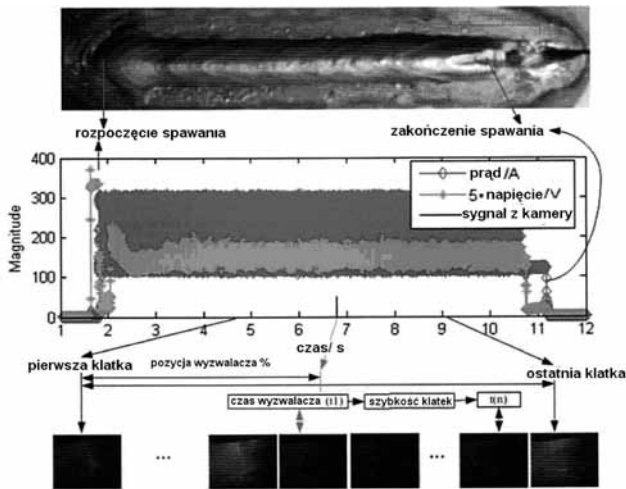
6,35 mm użyte w powyższym teście, tak więc błąd spowodowany zastosowaniem przybliżonego modelu kamery jest bardzo ograniczony. Stąd też we właściwych pomiarach błąd będzie znacznie mniejszy niż 5,76%, chociaż 5,76% należałoby uznać za dokładność wystarczającą dla kontroli wtopienia spoiny.

Stanowisko badawcze

Plan eksperymentu przedstawiono na rysunku 10. Źródło prądu jest ustawione w trybie prądu stałego (CC), a jego natężeniem steruje komputer docelowy za pomocą przetwornika C/A. Kamera Olympus i-Speed II rejestruje obrazy z prędkością 1000 klatek na sekundę i zapisuje je na karcie pamięci. Napięcie łuku i prąd rzeczywisty są synchronizowane z obrazami, mierzone przez komputer docelowy i przechowywane w komputerze głównym (rys. 11).



Rys. 10. Schemat aparatury badawczej
Fig. 10. Experimental setup



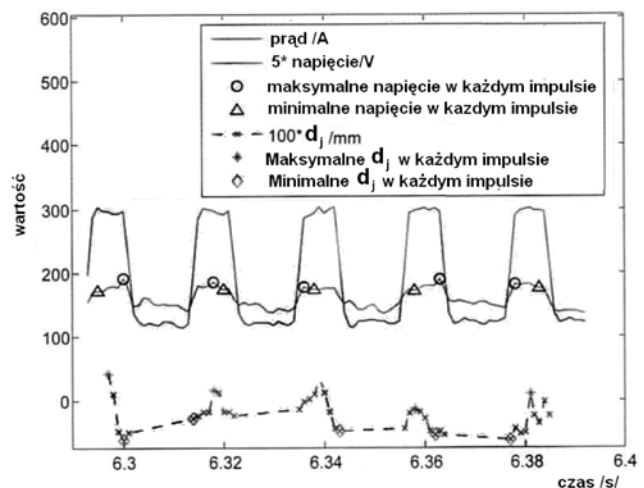
Rys. 11. Synchronizacja pomiarów
Fig. 11. Synchronization of measurements

Pomiar głębokości ugięcia powierzchni jeziorka

Przeprowadzono eksperyment, w którym mierzono ugięcie powierzchni jeziorka spawalniczego ugiętej pod łukiem. Dwa kawałki niskowęglowej stali o grubości 6,3 mm i wymiarach 300×25,4 mm połączono w pozycji podolnej spoiną doczołową na I ze szczeliną 1,5 mm. Uchwyt spawalniczy był ustawiony nieruchomo, a element spawany był przesuwany przez automat spawalniczy ze stałą prędkością 0,42 m/min. Odległość końcówki prądowej od elementu spawanego (CTWD) wynosiła 12 mm. Użyto drutu z niskowęglowej stali ER70S-3 o średnicy 1,2 mm. Prędkość podawania drutu V_d wynosiła 4,8 m/min. Natężenie prądu impulsu wynosiło 300 A, a prąd bazy 120 A (tabela III, próbka 13). Okres zmian prądu miał wartość 20,9 ms., a współczynnik wypełnienia 38,3%. Gazem osłonowym był czysty argon, a natężenie przepływu gazu wynosiło 18,9 l/min. Obraz jeziorka spawalniczego uzyskany z kamery szybkostrzelnej przedstawiono na rysunku 12. Środek powierzchni jeziorka spawalniczego zdefiniowano jako środek elipsy



Rys. 12. Klatka filmu rejestrującego zmiany jeziorka z zaznaczonym środkiem jeziorka spawalniczego
Fig. 12. Weld pool image and weld pool surface center



Rys. 13. Natężenie/napięcie prądu spawania i głębokości ugięcia jeziorka spawalniczego. Sygnały natężenia i napięcia prądu są średnimi obecnego i ostatniego poprzedniego punktu

Fig. 13. Welding current/voltage and SD. Current and voltage signals shown are averages of the measurements for the present and last previous point

jeziorka i oznaczono krzyżykowym punktem. Wykorzystując wcześniej opracowany algorytm, można wyliczyć głębokość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazie prądu impulsu i zsynchronizować z kształtem przebiegu prądu w czasie (rys. 13).

Można też wyliczyć średnią głębokość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j :

$$d_j = (\sum d_j) / k \quad (12)$$

gdzie: k – liczba zastosowanych pomiarów d_j .

Ponieważ powierzchnia jeziorka spawalniczego drga ze względu na przenoszenie metalu, konieczne jest uśrednienie pomiarów. Pomiaru ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w i-fazie prądu impulsu oznaczone zostają jako d_{ji} . Zmianę wartości ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w i-fazie prądu impulsu przedstawia wzór:

$$\Delta d_{ji} = \max(d_{ji}) - \min(d_{ji}) \quad (13)$$

Średnia zmiana w różnych fazach maksymalnego natężenia prądu wynosi:

$$\hat{d}_s = \left(\sum_{i=1}^n \hat{d}_{si} \right) / n \quad (14)$$

gdzie: n – liczba rozważanych faz maksymalnego natężenia prądu.

W tabelicy II umieszczono wszystkie powyższe pomiary eksperymentalne, wraz z innymi zmiennymi i parametrami takimi jak: zmiana napięcia prądu i-fazie prądu impulsu ΔU_{pi} i średnia zmiana napięcia w różnych fazach prądu impulsu ΔU (zostanie omówiona później) szerokość spoiny W_i i zmierzona przez szczelinę z drugiej strony spoiny średnie wtopienie spoiny d_s .

Plan eksperymentu

Gdy analizuje się metodę spawania GMAW, należy pamiętać, że na głębokość ugięcia powierzchni jeziorka (d_j) i głębokość wtopienia spoiny (d_w) mają wpływ nie tylko natężenie i napięcie prądu spawania, ale też prędkość podawania drutu V_d i prędkość spawania V_s .

W przypadku, gdy wzrasta prędkość podawania drutu lub zmniejsza się prędkość spawania, głębokość wtopienia d_w wzrasta.

Tablica III. Parametry spawania ($C = V_d / V_s = 11,4$)

Table III. Welding parameters when ($C = V_d / V_s = 11.4$)

Nr próby	V_s , m/min	V_d , m/min	I_a , A	I_p , A	t_p , ms	I_b , A	t_b , ms
11	0,30	3,43	135	300	8	70	20,3
12	0,36	4,11	162	300	8	70	12
13	0,42	4,80	189	300	8	120	12,9
14	0,48	5,49	216	300	8	180	18,7

I_a – prąd średni, I_p – prąd impulsy, I_b – prąd bazy, t_p – czas impulsu, t_b – czas bazy

Tablica IV. Parametry spawania ($C = V_d / V_s = 13,1$)

Table IV. Welding parameters when $C = 13.1$

Nr	V_s , m/min	V_d , m/min	I_a , A	I_p , A	t_p , ms	I_b , A	t_b , ms
21	0,30	3,94	155	300	8	70	13,6
22	0,36	4,72	186	300	8	70	7,9
23	0,42	5,51	217	300	8	120	6,8
24	0,48	6,30	248	300	8	180	6,1

Tablica V. Parametry spawania ($C = V_d / V_s = 14,8$)

Table V. Welding parameters when $C = 14.8$

Nr	V_s , m/min	V_d , m/min	I_a , A	I_p , A	t_p , ms	I_b , A	t_b , ms
31	0,30	4,45	175	300	8	70	9,5
32	0,36	5,33	210	300	8	70	5,1
33	0,42	6,22	245	300	8	120	3,5
34	0,48	7,11	280	300	8	180	1,6

Tablica VI. Parametry spawania ($C = V_d / V_s = 16,5$)

Table VI. Welding parameters when $C = 16.5$

Nr	V_s , m/min	V_d , m/min	I_a , A	I_p , A	t_p , ms	I_b , A	t_b , ms
41	0,30	4,95	195	300	8	70	6,7
42	0,36	5,94	234	300	8	70	3,2
43	0,42	6,93	273	300	8	120	1,4
44	0,48	7,92	312	324	8	300	8

Tablica VII. Parametry spawania ($C = V_d / V_s = 18,2$)

Table VII. Welding parameters when $C = 18.2$

Nr	V_s , m/min	V_d , m/min	I_a , A	I_p , A	t_p , ms	I_b , A	t_b , ms
51	0,30	5,46	215	300	8	70	4,7
52	0,36	6,55	258	300	8	70	1,8
53	0,42	7,65	301	302	8	300	8
54	0,48	8,74	344	388	8	300	8

Aby skupić się w tym badaniu na wpływie natężenia/napięcia prądu, odkładanie metalu można początkowo kontrolować za pomocą współczynnika:

$$C = V_d / V_s \quad (15)$$

Aby zbadać wpływ odkładania metalu na ugięcie powierzchni jeziorka spawalniczego d_j i głębokość wtopienia d_w można zmieniać ten współczynnik.

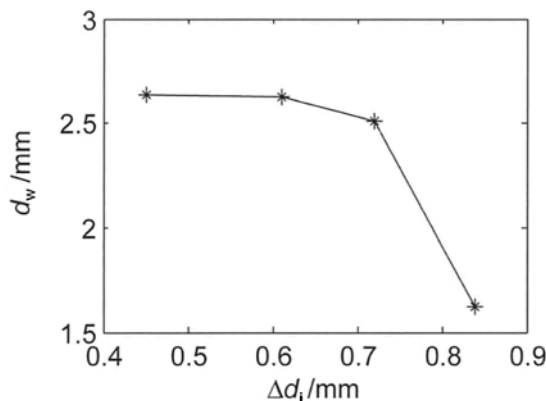
Planując eksperyment wstępnie dobrano typową dla spawania GMAW prędkość spawania V_s z zakresu 0,3 m/min÷0,48 m/min. Następnie na podstawie $C = V_d / V_s$ określono prędkość podawania drutu V_d . Wartość średniego natężenia prądu spawania ustalono w przybliżeniu dla prędkości podawania drutu i użyto jej jako ograniczenia przy doborze kształtu przebiegu prądu pulsacyjnego. Aby ułatwić pomiar ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w warunkach produkcyjnych za pomocą zmian napięcia łuku spawalniczego U należało również rozwiązać problem wpływu natężenia prądu na związek pomiędzy długością łuku a napięciem łuku.

Tak więc, natężenie prądu impulsu i okres trwania impulsu są wcześniej ustalonymi stałymi, a prąd bazy i czas trwania prądu bazy określa się na podstawie średniego prądu.

W tym badaniu zastosowano maksymalną wartość natężenia łuku 300 A i czas impulsu 8 ms. Ustalone parametry spawania dla serii eksperymentów z pięcioma wartościami $C = V_d / V_s$ przedstawiono w tablicach III÷VII

Wyniki eksperymentu i dyskusja

W tablicy VIII przedstawiono wyniki pięciu serii eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem parametrów spawania przedstawionych w tablicach III÷VII. Stosunek prędkości podawania drutu do prędkości spawania V_d / V_s jest stałą, średnie natężenie prądu wzrasta, średnia zmiana głębokość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazie maksymalnego natężenia prądu spada, a wartości wtopienia d_w wzrasta. Na rysunku 14 dla przykładowej wartości



Rys. 14. Zależność głębokości wtopienia spoiny d_w od przyrostu ugięcia jeziorka Δd_j ($C = V_d / V_s = 11,4$)

Fig. 14. Relationship between Δd_s and weld penetration when $C = 11.4$

Tablica VIII. Wyniki eksperymentu modelowania
Table VIII. Experimental Results for Modeling

Nr próby	C	I_a, A	U, V			d_j	Δd_j	ΔU	W_s	d_w
	–	d_w	U_a	U_p	U_b	mm	mm	V	mm	mm
11	11,4	136,8	26,4	31,3	22,4	0,45	0,84	3,59	6,38	1,62
12	11,4	158,6	28,2	32,4	24,4	0,28	0,72	2,46	6,70	2,51
13	11,4	192,0	30,4	33,6	27,7	-0,33	0,61	2,28	6,57	2,63
14	11,4	218,1	31,3	33,8	29,7	-0,16	0,45	1,93	5,61	2,64
21	13,1	154,1	27,9	31,9	23,8	0,33	0,68	3,19	7,85	1,93
22	13,1	182,1	30,1	34,1	25,7	0,16	0,49	1,65	6,87	2,58
23	13,1	212,1	30,4	33,4	27,1	-0,17	0,44	1,16	8,90	3,01
24	13,1	246,4	32,7	34,4	30,6	-0,31	0,41	1,05	6,59	3,23
31	14,8	176,4	30,1	34,1	26,4	0,31	0,57	2,23	8,17	2,45
32	14,8	211,4	31,7	35,2	27,6	0,05	0,43	1,28	8,81	2,83
33	14,8	243,6	32,0	34,2	28,8	0,04	0,40	0,99	11,13	3,27
34	14,8	275,9	34,8	35,9	33,4	0,69	0,38	0,76	7,88	3,31
41	16,5	192,4	30,7	34,3	26,6	0,15	0,42	1,82	8,66	2,60
42	16,5	230,1	32,5	34,8	28,8	0,02	0,37	1,22	10,83	3,27
43	16,5	271,7	34,5	35,5	32,4	0,30	0,33	0,81	8,98	3,33
44	16,5	308,2	35,6	36,2	35,0	1,00	0,17	0,74	8,55	3,45
51	18,2	211,1	31,5	34,6	27,6	-0,43	0,39	1,73	11,54	2,93
52	18,2	254,8	33,4	34,9	30,2	-0,01	0,30	1,06	9,17	3,74
53	18,2	298,3	35,1	35,6	34,5	0,33	0,24	0,79	14,69	4,09
54	18,2	334,9	37,1	38,4	35,7	1,05	0,16	0,94	7,41	4,35

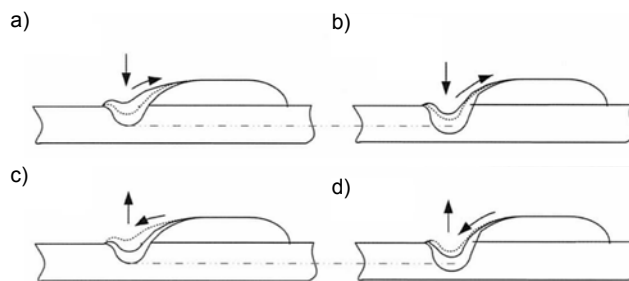
gdzie: d_j – głębokość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego, d_w – głębokość wtopienia, W_s – szerokość spoiny, Δd_j – przyrost głębokości ugięcia jeziorka spawalniczego, ΔU – przyrost napięcia w fazie prądu impulsu, $C = V_d / V_s$ – stosunek prędkości podawania drutu do prędkości spawania, U_a – średnie napięcie, U_p – impulsu napięcie, U_b – napięcie bazy

współczynnika odkładania metalu $C = V_d / V_s = 11,4$, pokazano związek pomiędzy średnią zmianą ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazach prądu impulsu i głębokości wtopienia d_w .

Z analizy metody spawania impulsowego GMAW-P wynika, że jeżeli nie bierze się pod uwagę uderzania kropli metalu, to przód jeziorka spawalniczego jest uginany przez ciśnienie łuku spawalniczego, a stopiony metal wypływa przy końcu jeziorka spawalniczego w fazie prądu impulsu (rys. 15 a, b). Jak pokazano na rysunku 15c, w fazie prądu bazy stopiony metal z powodu spadku ciśnienia łuku znowu wpływa na początek jeziorka, a jego powierzchnia podnosi się. Kiedy odkładanie metalu C pozostaje niezmiennie, głębokość wtopienia d_w wzrośnie gdy w wyniku wzrostu ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j wzrośnie długość łuku (rys. 15b).

Z innego punktu widzenia – ponieważ prąd impulsu i długość trwania tej fazy są utrzymywane na stałym poziomie, jeżeli wzrasta wtopienie spoiny, musi ono być spowodowane albo wzrostem natężenia prądu bazy, albo skróceniem okresu prądu bazy. Według rysunku 15d wtopienie będzie większe gdy na skutek wzrostu w fazie prądu bazy wzrośnie ciśnienie łuku, lub jeżeli mniej metalu podpływie z powrotem pod koniec trwania okresu prądu bazy, gdy ciekły metal będzie

miął mniej czasu na spłynięcie na skutek skrócenia okresu trwania prądu bazy. Co więcej, możliwe jest, że powierzchnia jeziorka spawalniczego zostanie zepchnięta na ten sam poziom z powodu niezmiennych wartości maksymalnego natężenia prądu i długości tej fazy. Stąd też zmiana głębokości ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazie maksymalnego natężenia prądu spadałaby tak, jak zaobserwowano w tablicy VIII i na rysunku 14.



Rys. 15. Zmiana głębokości ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego Δd_j , a) faza maksymalnego natężenia prądu; b) faza maksymalnego natężenia prądu przy większym wtopieniu; c) faza prądu bazy; d) faza prądu bazy przy głębszym wtopieniu,

Fig. 15 — Different penetrations Δd_s . a) Peak period; b) peak period in deeper penetration; c) base period; d) base period in deeper penetration.

Gdy weźmie się pod uwagę uderzenia kropli metalu, zmiana wartość ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazie prądu impulsu powinna się zmienić.

Jednakże prąd impulsu i długość fazy są podczas eksperymentów niezmiennie. Wpływ uderzenia kropli na zmianę ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j należy uznać za niezmienny przy każdym eksperymencie. Toteż kiedy stosunek prędkości podawania drutu do prędkości spawania V_d / V_s jest stały w metodzie spawania GMAW-P kropla nie powinna modyfikować tego, jak średnia zmiana ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego d_j w fazie prądu impulsu jest związana z wtopieniem spoiny.

Biorąc pod uwagę stosunek V_d / V_s , wtopienie spoiny jest funkcją ugięcia jeziorka spawalniczego Δd_j i V_d / V_s :

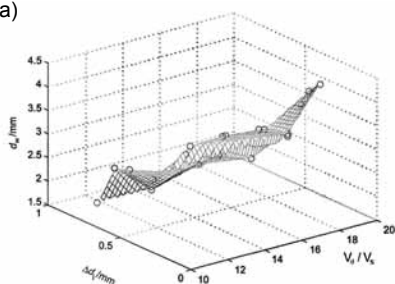
$$d_w = f(\Delta d_j, V_d / V_s) \quad (16)$$

Po wstawieniu danych można uzyskać przedstawiony na rysunku 16a nieparametryczny model graficzny dla tego związku. Jak można zauważyć, powierzchnia na rysunku 16a jest bliska płaszczyźnie. Stąd, przy standardowym odchyleniu 0,27 mm można dopasować model płaszczyzny:

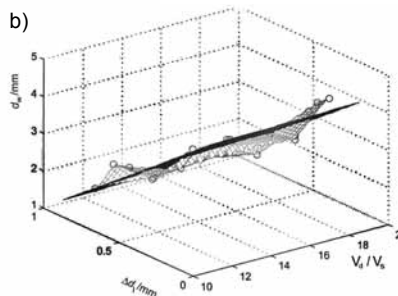
$$d_w = -3,34 \times \Delta d_j + 0,01 \times V_d / V_s + 4,31 \quad (17)$$

Dopasowanie płaszczyzny do wstawionych danych przedstawiono na rysunku 16b. Liniowy model płaszczyzny jest wystarczająco dokładny dla potrzeb kontroli wtopienia spoiny w metodzie spawania GMAW-P. Analiza wzoru (17) pokazuje, że drugi człon równania z stosunkiem prędkości podawania drutu do prędkości spawania V_d / V_s w niewielkim stopniu wpływa na wtopienie spoiny. Dlatego też możliwe jest uproszczenie modelu, bez uwzględnienia stosunku prędkości podawania drutu do prędkości spawania V_d / V_s .

a)

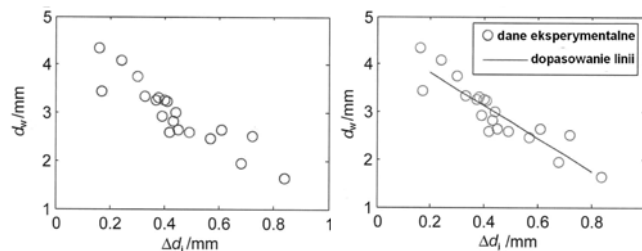


b)



Rys. 16. Modelowanie, a) nieparametryczny model graficzny; b) model płaszczyzny,

Fig. 16. Modeling. a) nonparametric graphic model; b) plane model.



Rys. 17. Modelowanie bez V_d / V_s , a) zależność wtopienia d_w od Δd_j , b) dopasowanie linii

Fig. 17. Modeling without WFS/TS: a) Δd_s vs. penetration; b) line fitting

Wyniki dopasowania linii prostej z rysunku 17b przy stałym odchyleniu 0,27 mm można przedstawić w postaci wzoru:

$$d_w = -3,45 \times \Delta d_j + 4,51 \quad (18)$$

Dokładność zależy od dokładności modelu płaszczyzny. Zatem na tej podstawie i zmiany głębokości jeziorka spawalniczego w fazie maksymalnego natężenia prądu można z dostateczną dokładnością przewidzieć głębokość wtopienia spoiny.

Modelowanie w zastosowaniu praktycznym

Rezultat świadczący o tym, że wtopienie spoiny można przewidzieć na podstawie zmiany głębokości powierzchni jeziorka spawalniczego w fazie prądu impulsu, jest fundamentalny, ale jego bezpośrednie zastosowanie do kontroli wtopienia w warunkach produkcyjnych może być skomplikowane, zwłaszcza jeśli ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego mierzy się metodą widzenia maszynowego.

Ponieważ zmiana ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego powoduje zmianę długości łuku, którą można zmierzyć z napięcia łuku, to aby znaleźć metodę monitorowania wtopienia spoiny za pomocą sygnałów, które łatwo zmierzyć w zakładach produkcyjnych, rozważano związek pomiędzy zmianą ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego a zmianą napięcia łuku. W fazie prądu impulsu prąd jest stały i tylko napięcie łuku określa długość. Stąd też możliwe jest, że zmiana napięcia łuku w fazie prądu impulsu może odzwierciedlać zmianę wartości ugięcia powierzchni jeziorka spawalniczego.

Dla badań ilościowych zdefiniujemy podobnie zmianę napięcia w i -tej fazie prądu impulsu jako:

$$\Delta U_{pi} = \max(U_{pi}) - \min(U_{pi}) \quad (19)$$

a średnią zmianę w różnych fazach prądu impulsu jako:

$$\Delta U = \left(\sum_{i=1}^n \Delta U_{pi} \right) / n \quad (20)$$

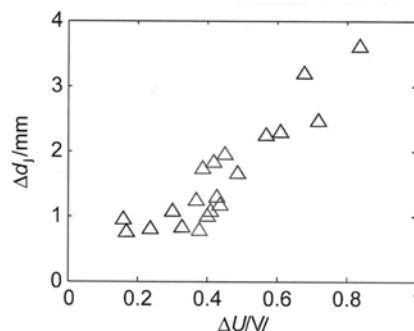
Z danych eksperymentalnych, przedstawionych w tabelicy VIII, uzyskano rysunek 18. Widać, tak jak oczekiwano, że istnieje duża korelacja pomiędzy przyrostem napięcia w fazie prądu impulsu ΔU i przyrostem ugięcia jeziora spawalniczego Δd_j . Z łatwością można je powiązać. Używając przyrostu napięcia w fazie prądu impulsu ΔU , zamiast przyrostu ugięcia jeziora spawalniczego Δd_s , przyjęto następujące równanie:

$$d_w = -0,56 \times \Delta U + 0,08 \times V_d / V_s + 2,69 \quad (21)$$

Standardowe odchylenie wynosi 0,27 mm i jest takie samo, jak w równaniu (17). Co więcej, na podstawie danych eksperymentalnych z tabelicy VIII równanie to można uprościć do postaci liniowej:

$$d_w = -0,71 \times \Delta U + 4,12 \quad (22)$$

Jego standardowe odchylenie wynosi 0,31 mm, nieco więcej niż przy użyciu ΔU , a stosunek prędkości podawania drutu do prędkości spawania $C = V_d / V_s$.



Rys. 18. Zależność głębokości ugięcia jeziora spawalniczego Δd_j od zmiany napięcia w fazie prądu impulsu ΔU

Fig. 18. ΔU vs. Δd_j (Δd_s)

Dla sterowania wtopienia spoiny można to równanie uznać za równie efektywne jak równanie (21). Ponieważ w równaniu (22) uwzględniono jedynie sygnały napięcia, nadaje się ono do wykorzystania w praktyce w zakładach produkcyjnych.

Wnioski

Powierzchnia jeziora spawalniczego jest rzeczywiście, tak jak oczekiwano, źródłem wystarczającej ilości informacji do określenia głębokości wtopienia spoiny w spawaniu impulsowym MIG/MAG-P.

Głębokość wtopienia spoiny można określić z wystarczającą dokładnością ze zmiany ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego podczas fazy maksymalnego natężenia prądu.

Głębokość wtopienia spoiny można też dość dokładnie określić ze zmiany napięcia łuku w fazie maksymalnego natężenia prądu.

Ponieważ napięcie łuku jest łatwo zmierzyć w zakładach produkcyjnych, potwierdzony w tej

pracy związek pomiędzy głębokością wtopienia spoiny i zmianą napięcia łuku w fazie maksymalnego natężenia prądu dostarcza prostą, lecz przydatną w zastosowaniach produkcyjnych metodę monitorowania wtopienia spoiny.

UWAGA: w tłumaczeniu zmieniono oznaczenia:
SD = d_s głębokość ugięcia powierzchni jeziora spawalniczego d_j
PD = d_p głębokość wtopienia d_w , WFS= prędkość podawania drutu = V_d
TS = prędkość spawania = V_s

Literatura

- [1] Kim, Y. S., and Eagar, T. W., 1993, Analysis of metal transfer in gas metal arc welding, *Welding Journal* 72: s. 269-278.
- [2] Esser, W. G., and van Gompel, M. R. M., 1984, Arc control with pulsed GMA welding, *Welding Journal* 63: s. 26-32.
- [3] Ueguri, S., Hara, H., and Komura, H., 1985, Study of metal transfer in pulsed GMA welding, *Welding Journal* 64: s. 242-250.
- [4] Allum, C. J., 1985, *Welding technology data: pulsed MIG welding*, *Welding and Metal Fabrication* 53: s. 24-30.
- [5] Kovacevic, R., Zhang, Y. M., and Ruan, S., 1995, Sensing and control of weld pool geometry for automated GTA welding, *ASME Journal of Engineering for Industry* 117(2): 210-222.
- [6] Chin, B. A., Madsen, N. H., and Goodling, J. S., 1983, Infrared thermography for sensing the arc welding process, *Welding Journal* 62: s. 227-234.
- [7] Madigan, R. B., Renwich, R. J., Farson, D. F., and et al., 1986, Computer-based control of full-penetration TIG welding using pool oscillation sensing, *Proceedings of First International Conference on Computer Technology in Welding*, The Welding Institute, London.
- [8] Xiao, Y. H., 1992, *Weld pool oscillation during gas tungsten arc welding*, Ph.D, dissertation, Delft, The Netherlands, Delft University of Technology.
- [9] Wang, Q. L., 1991, Real-time full-penetration control with arc sensor in the TIG welding of Al alloy, *Proceedings of the International Conference on Joining/Welding 2000*, IIW, the Netherlands.
- [10] Mnich, C., Al-Bayat, F., Debrunner, C., and et al., 2004, In situ weld pool measurement using stereovision, *ASME, Proceedings 2004, Japan – USA Symposium on Flexible Automation*, Denver, Colorado.

- [11] Siores, E., 1988, Development of a realtime ultrasonic sensing system for automated and robotic welding, PhD dissertation, West London, UK, Brunel University.
- [12] Groenwald, R. A., Mathieson, T. A., Kedzior, C. T., et al., 1979, Acoustic emission weld monitor system — data acquisition and investigation, US Army Tank-Automotive Research and Development Command Report ADA085-518.
- [13] Kovacevic, R., and Zhang, Y. M., 1997, Real-time image processing for monitoring of free weld pool surface, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 119(2): 161-169.
- [14] Saeed, G., and Zhang, Y. M., 2007, Weld pool surface depth measurement using calibrated camera and structured-light, Measurement Science & Technology 18: s. 2570-2578,
- [15] Song, H. S., and Zhang, Y. M., 2007, Three-dimensional reconstruction of specular surface for gas tungsten arc weld pool, Measurement Science & Technology 18: s. 3751-3767.
- [16] Song, H. S., and Zhang, Y. M., 2008, Measurement and analysis of three-dimensional specular gas tungsten arc weld pool surface, Welding Journal 87(4): s. 85-95.
- [17] Zhao, D. B., 2000, Dynamic intelligent control for weld pool shape during pulsed GTAW with wire filler based on three-dimension visual sensing, Ph.D, dissertation, Harbin, China, Harbin Institute of Technology (in Chinese).
- [18] Yoo, C. D., and Lee, J., 3D measurement of weld pool using biprism stereo vision sensor, <http://joining1.kaist.ac.kr/research/vision.htm>, Seoul National University.
- [19] Zhang, G. J., Yan, Z. H., and Wu, L., 2006, Reconstructing a three-dimensional PGMW weld pool shape from a two-dimensional visual image, Measurement Science and Technology 17(7): 1877 to 1882.
- [20] Lucas W., Smith J., Balfor C., Bertaso D., Melton G.: „Wizyjna kontrola rozmiaru jeziora spawalniczego w czasie rzeczywistym” Przegląd Spawalnictwa nr 1/2009 s. 11-16.

Podziękowanie

Praca ufundowana przez amerykańską Narodową Fundację na Rzecz Nauki (NSF), dzięki grantowi CMMI-0726123 o tytule: „Measurement and Control of Dynamic Weld Pool Surface in Gas Metal Arc Welding”. Badania przeprowadzono w Laboratorium Badań nad Spawalnictwem w University of Kentucky w USA.

Artykuł przedrukowano z dodatku naukowego Welding Journal vol. 89 za zgodą autora i właściciela praw autorskich Amerykańskiego Stowarzyszenia Spawalniczego AWS. Oryginał jest dostępny na stronie AWS: <http://www.aws.org/wj/supplement/wj0610-117.pdf>

Z języka angielskiego tłumaczyła Joanna Dobrowolska. Instytut Łączenia Metali w Krakowie dziękuje dr Katarzynie Sadowskiej-Dobrowolskiej z Instytutu Filologii Polskiej Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie za pomoc w tłumaczeniu tekstu technicznego z USA.

W następnym numerze

Anna Pocica

Od parowozu do lux-torpedy. Spawanie w naprawach i produkcji taboru kolejowego.
Część II (z teki Jacka Lassocińskiego)

Paweł Cegielski, Krzysztof Skrzyniecki, Andrzej Kolasa, Paweł Kołodziejczak

Badania stabilności układu łuk – urządzenie zasilające w warunkach symulowanych zakłóceń procesu spawania metodą MAG

Jacek Słania, Dariusz Kozik

Prefabrykacja elementów ciśnieniowych kotłów typu WR

Aneta Ziewiec, Janusz Stępiński, Edmund Tasak

Mikrostruktura połączeń różnorodnych stali 17-4PH ze stopami niklu