

Nr 100/2017, 187–199
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW NAPAWANIA STALI C45E DRUTEM CASTOMAG 4554S Z WYKORZYSTANIEM METODY TAGUCHIEGO

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF PAD WELDING STEEL C45E BY WIRE CASTOMAG 4554S USING TAGUCHI METHOD

Paulina Woźniak*, **Robert Starosta**

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Wydział Mechaniczny,
Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów,
e-mail: p.wozniak@wm.am.gdynia.pl.

*Adres do korespondencji/Corresponding author:

Streszczenie: Artykuł jest wstępem do serii badań, pozwalających dobrać najlepsze parametry napawania metodą GMA stali C45E drutem CastoMag 4554S. Próbki stali zostały przygotowane oraz wstępnie podgrzane do temperatury 300°C. Plan eksperymentu opracowano na podstawie metody Taguchiego. Celem przeprowadzenia optymalizacji był dobór odpowiednich parametrów technologicznych i uzyskanie najmniejszego udziału materiału podłoża w napoinie. Do analizy wyników wykorzystano regresję wielokrotną oraz metodę Taguchiego.

Słowa kluczowe: metoda Taguchiego, optymalizacja, parametry napawania.

Abstract: The article is an introduction to a series of investigations that will allow to choose the best parameters of pad welding with GMA method of steel C45E by wire CastoMag 4554S. Steel samples were prepared and preheated to 300 degrees Celsius (C). The plan of experiment was developed on the basis of the Taguchi method. The purpose of the optimization was to select appropriate technological parameters and to obtain the smallest proportion of the substrate material in the padding weld. Analysis of the results was performed using multiple regression and Taguchi method.

Keywords: Taguchi method, optimization, pad welding parameters.

1. WSTĘP

Zużycie elementów maszyn następuje we wszystkich dziedzinach przemysłu. Niektóre części przestają funkcjonować tylko z powodu uszkodzeń o mniejszym znaczeniu. Wykorzystując technikę napawania, możliwa jest regeneracja części maszyn lub poprawa właściwości powierzchni, takich jak: odporność na ścieral-

ność, korozja i starzenie [Nowacki i Wypych 2011]. Proces regeneracji z wykorzystaniem napawania można przeprowadzić, stosując ten sam sprzęt, jakiego używa się do spawania. Na materiał dodatkowy dobiera się odpowiednio metale i ich stopy o wymaganych właściwościach w postaci drutu, drutu z proszkiem, proszku lub pręta. Do zapewnienia optymalnych warunków technologicznych i ekonomicznych należy dążyć przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej wydajności napawania i małego udziału metalu podłoża w napoinie. Proces napawania trzeba prowadzić z zastosowaniem podgrzania wstępnego w celu odparowania wilgoci oraz ograniczenia porowatości napoiny [Skorupa 2012].

Przeprowadzone niżej badania są wstępem do cyklu badań doboru odpowiednich parametrów napawania, materiału podłoża w przypadku regeneracji elementów klasy wał [Bogdanowicz i Grzelak 2010; Gradzik i in. 2016; Bober 2017]. Pierwszymi branymi pod uwagę parametrami zmiennymi będą natężenie prądu oraz prędkość podawania drutu. Natężenie prądu napawania przy niezmiennych pozostałych wartościach zmienia się wraz ze zmianą prędkości podawania drutu. Wzrost natężenia wpływa na podwyższenie wydajności napawania, ale też powoduje wzrost wielkości jeziorka i głębokość wtopienia, co skutkuje większym udziałem materiału podłoża w napoinie [Klimpel 1999].

Efektywność badań eksperymentalnych w dużym stopniu zależy od umiejętności wykorzystania i zastosowania nowoczesnych metod planowania badań, które pozwalają na znaczące ograniczenie liczby eksperymentów, ale także umożliwiają uzyskanie wartościowych i wiarygodnych informacji dotyczących przedmiotu badań. Problem w stosowaniu tego typu metod nie polega tylko na wyborze odpowiedniej metody do rozwiązania zagadnienia, lecz także na poprawnej interpretacji wyników. Korzyści wynikające z zastosowania statycznych metod planowania eksperymentu omawiane są często w artykułach naukowych [Lewandowski 2013; Bober 2017].

Wśród wielu metod na szczególną uwagę zasługuje metoda Taguchiego, która ma na celu eksperymentalną optymalizację jakości wieloparametrowych procesów. W istotny sposób ogranicza się liczbę eksperymentów niezbędnych do zbadania wpływu wielu zmiennych eksperymentu na właściwości badanego obiektu [Lewandowski 2013].

2. METODA TAGUCHIEGO

Podstawowym celem metody opracowanej przez Taguchiego była optymalizacja jakości wyrobów (procesów technologicznych) poprzez właściwy dobór odpowiednich wartości, cech wyrobu lub parametrów procesu technologicznego. Fazę wstępną Taguchiego stanowiło skupienie uwagi na konsekwencjach straty jakości zamiast popularnie stosowanego w tej dziedzinie dążenia do zwiększenia samej jakości. Zaobserwował on, że każdy produkt w procesie eksploatacji generuje określoną stratę, której wielkość jest odwrotnie proporcjonalna do jakości wyrobu,

co według niego uzasadnia przyjęcie jako głównego miernika spadku jakości wyrobu. Metoda opracowana przez Taguchiego może być wykorzystywana zarówno do optymalizacji nowego procesu (produktu), jak i do doskonalenia obiektów już istniejących.

W metodzie Taguchiego podstawowe znaczenie odgrywają pojęcia: funkcja straty, współczynnik stosunku sygnału do szumu (S/N) oraz tablice ortogonalne. Przyjmując zupełny brak jakości jako rezultat całkowitej straty zarówno użytkownika, jak i jego otoczenia z powodu odchyień funkcjonalnych i szkodliwych efektów ubocznych danego produktu, Taguchi ocenia jego jakość poprzez wielkość tej straty. W dalszym etapie precyzuje pojęcie jakości, określa tzw. jakość idealną produktu jako taką, dla której brak jakichkolwiek strat oraz zakłada, że stopniowe cofanie właściwości produktu od cech produktu idealnego można opisać funkcją kwadratową, co z kolei daje ocenę wysiłków na rzecz poprawy jakości poprzez minimalizację kwadratów odchyień mierzalnych cech produktu od wartości produktu idealnego. W kolejnym etapie przyjął, że produkt o idealnej jakości zawsze powinien w taki sam sposób odpowiadać na wszelkie działania jego użytkownika oraz w jak najdokładniejszym stopniu być odporny na wszelkiego rodzaju czynniki zakłócające jego działanie.

Podsumowując swoje rozważania, Taguchi do mierzenia jakości przyjął minimalizację zmienności działania produktu w odpowiedzi na czynniki zakłócające N (*noise factors*), przy równoczesnej maksymalizacji zmienności w odpowiedzi na czynniki sygnału S (*signal factors*). Oba te kryteria można analizować łącznie, maksymalizując funkcję kryterium $ETA = S/N$. W zależności od rodzaju właściwości obiektu wybiera się kryterium rozpatrywania wyników.

Istotnym elementem metody Taguchiego jest system stabilizowanych planów doświadczenia, które umożliwiają obliczenie maksymalnej liczby nieobciążonych efektów głównych przy minimalnej liczbie układów planu. Plan eksperymentu jest ortogonalny, n -wymiarowe kolumny macierzy pomiarów są względem siebie ortogonalne jako wektory w przestrzeni R^n . Pominięcie w modelu pewnych członów nie powoduje konieczności przeliczenia oszacowań pozostałych jego parametrów, o ile tylko pomiary wykonywane były zgodnie z planem ortogonalnym dla badanego modelu [Mitra 2008].

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Do przeprowadzenia procesu napawania wykorzystano metodę GMA w celu oznaczenia materiału napawanego. Jako materiał dodatkowy zastosowano drut lity CastoMag 4554S, który w składzie chemicznym zawiera chrom, nikiel i mangan, jak podaje producent. Średnica drutu wynosiła 1,2 mm. Jako materiał podłoża zastosowano stal C45E w postaci próbek o wymiarach 90×50×6 mm. Celem napawania stali C45E było zwiększenie wytrzymałości materiału przy jak najmniejszym udziale materiału podłoża.

3.1. Parametry procesu

Badania przeprowadzono przy parametrach: napięcie łuku w granicach 15–25 V, długość wylotu drutu elektrodowego 12–15 mm, kąt pochylenia drutu popychający, kierunek napawania od lewej do prawej strony, biegunowość na drucie dodatnia, natężenie przepływu gazu osłonowego 16 l/min. Gazem osłonowym była mieszanina argonu 82% i 18% dwutlenku węgla. Pozostałe parametry, tj. natężenie prądu I oraz prędkość podawania drutu v_1 traktowano jako zmienne. W zależności od zmiennych napoiny nakładano przy prędkości napawania 1,6–3,1 mm/s.

3.2. Metodyka badań – plan eksperymentu i opracowanie matrycy doświadczeń

W celu oceny ilościowej wpływu parametrów napawania łukowego, tj. natężenia prądu I oraz prędkości podawania drutu v_1 na udział materiału podłoża w napoinie (UMP), posłużono się randomizowanym, ortogonalnym planem eksperymentu, uwzględniającym trójwartościowość zmiennych niezależnych (predyktorów, objaśniających, wejściowych), przewidującym wykonanie dziewięciu eksperymentów z pięcioma powtórzeniami (tab. 1). Dobór natężenia prądu podczas napawania stali C45E materiałem dodatkowym CastoMag 4554S był związany z zwarciovym (kroplowym) sposobem przeniesienia ciekłego metalu celem zapobieżenia nadmiernemu przetopowi.

Biorąc pod uwagę wartość prądu, zmienianą w zakresie 60–90 A oraz prędkość podawania drutu 1,5–2,5 m/min za pomocą programu statystycznego STATISTICA wygenerowano plan eksperymentów.

Tabela 1. Ortogonalny plan eksperymentu uwzględniający dwie trójwartościowe zmienne niezależne

Table 1. An orthogonal experiment plan taking into account two trivalent independent variables

Lp.	I [A]	v_1 [m/min]
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Oznaczenia: 1, 2, 3 – kody przyjmujące następujące wartości:

dla zmiennej niezależnej I : 1 – 60 A, 2 – 75 A, 3 – 90 A;

dla zmiennej niezależnej v_1 : 1 – 1,5 m/min, 2 – 2 m/min, 3 – 2,5 m/min.

3.3. Wykonanie i badanie napoiny

Do wykonania napoin wykorzystano spawarkę MIG/MAG model MAGster 250 firmy Bester Lincoln. Po wykonaniu napoiny próbki zostały przygotowane do badań mikroskopowych. Wykonane badania mają na celu określenie optymalnych parametrów w celu uzyskania jak najmniejszej wartości UMP w napoinie.

Wykorzystując mikroskop pomiarowy SmartZoom 5 firmy ZEISS z integralnym graficznym systemem QA/QC, zmierzono pola powierzchni napoiny.

Przykładowy obraz zglądu metalograficznego w poprzecznym przekroju próbki spod mikroskopu cyfrowego przedstawia rysunek 1. Po zmierzeniu wszystkich powierzchni obliczono współczynnik UMP, korzystając ze wzoru 1 [Klimpel 2000, Bogdanowicz i Grzelak 2010].

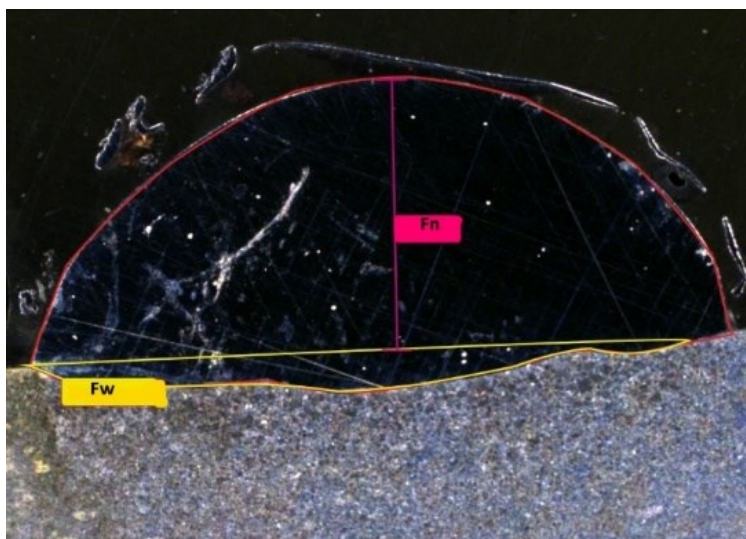
$$UMP = \frac{F_w}{F_w + F_n} \quad (1)$$

gdzie:

UMP – udział materiału podłoża [-],

F_n – pole powierzchni nadlewu napoiny [mm^2],

F_w – pole powierzchni wtopienia napoiny [mm^2].



Rys. 1. Sposób określenia UMP w napoinie na przykładzie badanej próbki
Fig. 1. Method of determination part of substrate material in padding weld of the test sample

4. WYKORZYSTANIE METODY TAGUCHIEGO DO OPTIMALIZACJI WARTOŚCI PARAMETRÓW

W zależności od rodzaju właściwości badanego obiektu Taguchi zaproponował wiele kryteriów. Do analizy stworzonego planu eksperymentu i przeprowadzonych badań wybrano założenie „Im mniejsze – tym lepsze”. Wybrane kryterium jest odpowiednie, gdy celowe jest zminimalizowanie wystąpienia niepożądanych cech produktu, co umożliwia funkcja kryterium:

$$ETA = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

gdzie:

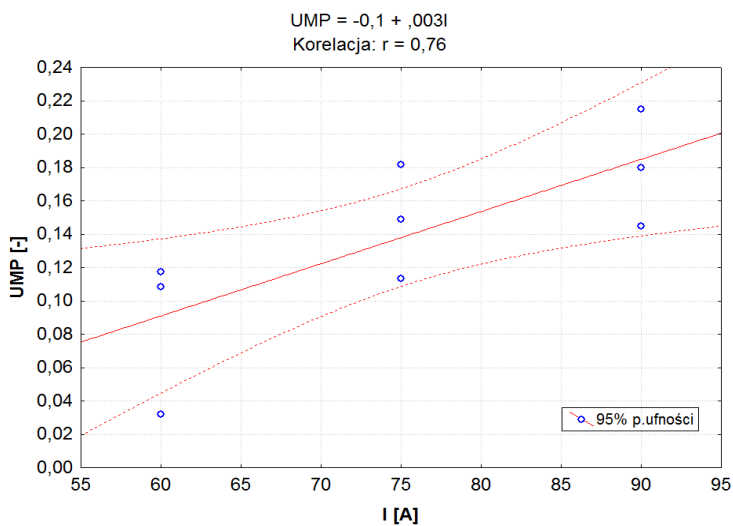
- $i = 1$ do n (liczba pomiarów),
- ETA – współczynnik S/N,
- n – liczba pomiarów dla konkretnego produktu,
- y – mierzona cecha.

Wyrząd logarytmu -10 gwarantuje, że współczynnik S/N mierzy odwrotność „złej jakości”, tzn. im większa suma kwadratów y (negatywnej cechy produktu), tym mniejszy współczynnik S/N, czyli wartość badanych cech x_j (procesu wytwarzania), które maksymalizując współczynnik ETA, dają najlepszą jakość [Lewandowski 2013].

W celu zbadania wpływu poszczególnych parametrów metody na wartość rozrzutu błędów względnych wykorzystano analizę wariancji wielokrotnej.

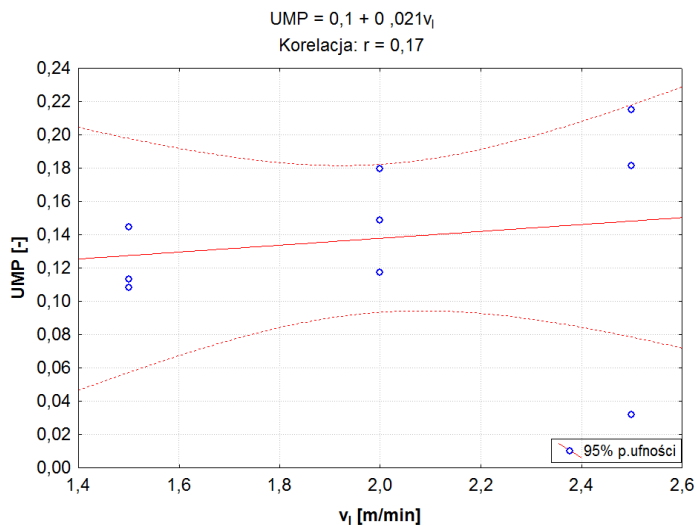
5. ANALIZA WYNIKÓW

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi niezależnymi i zależnymi. Z wykresów tych wynika, że wraz ze wzrostem natężenia prądu oraz prędkości podawania drutu zwiększa się udział materiału podłoża w napoinie. Stwierdzono dużą wartość korelacji liniowej ($r = 0,76$) pomiędzy zastosowanym natężeniem prądu a udziałem materiału podłoża w napoinie. Istnieje stosunkowo niewielka zależność ($r = 0,17$) pomiędzy prędkością podawania materiału dodatkowego a zmienną zależną UMP. Rozpatrując jednak zależności pomiędzy zmiennymi v_1 oraz UMP bez uwzględnienia wpływu zmiennej I stwierdzono, że wartość współczynnika korelacji cząstkowej jest większa od współczynnika korelacji Pearsona i równa się $r = 0,26$.



Rys. 2. Wpływ zależności UMP od wartości I

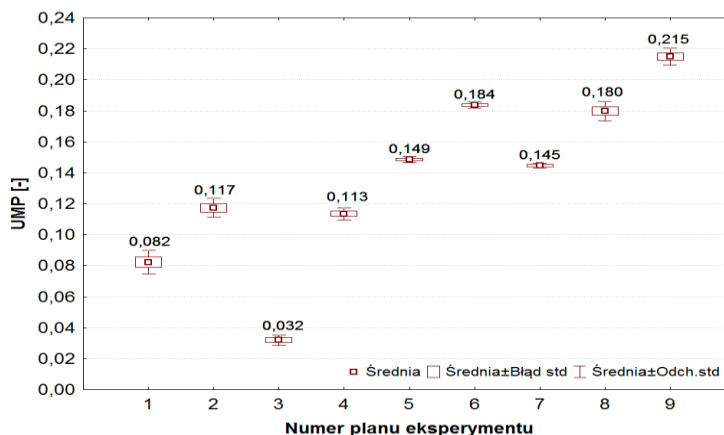
Fig. 2. Effect of dependencies part of substrate material from value I



Rys. 3. Wpływ zależności UMP od wartości v_i

Fig. 3. Effect of dependencies part of substrate material from value v_i

Na rysunku 4 przedstawiono wykres wartości uzyskanych współczynnika UMP w poszczególnych próbach.



Rys. 4. Wartość UMP dla danej próby

Fig. 4. Value part of substrate material for specific sample

W celu ilościowej oceny wpływu zmiennych wejściowych na wartość UMP posłużono się trzema następującymi metodami statystycznymi: analizą wariancji (ANOVA), optymalizacją matematyczną Taguchiego oraz regresją wielokrotną.

Tabela 2. Wyniki analizy wariancji wpływu wartości parametrów metody na wartość funkcji kryterium z tabeli 1

Table 2. Results of the variation analysis of the method parameters value influence on criterion function value from table 1

Efekt	SS	df	MS	F	p
I [A]	592,438	2	296,219	33,036	0,000
v_l [m/min]	65,018	2	32,509	3,626	0,036
Reszta	358,667	40	8,967		

Uzyskane wyniki analizy wariancji (tab. 2) pozwalają na spostrzeżenie, że natężenie prądu stosowanego podczas napawania w większym stopniu wpływa na udział materiału podłoża w napoinie niż prędkość podawania drutu spawalniczego. Świadczy o tym większa wartość sumy kwadratów (SS). Niepokoić może fakt, że duża część wariancji zmiennej zależnej nie jest wyjaśniona przez rozpatrywane zmienne niezależne (SS = 359). Zapewne jest to spowodowane nieuwzględnieniem wszystkich czynników, mogących mieć wpływ na oceniany parametr, np. prędkości napawania, długości wolnego wylotu drutu spawalniczego, napięcia łuku czy biegunowości elektrody. Rozpatrując wynik testu wariancji oraz obliczone poziomy istotności (p), przy ustalonym poziomie istotności $p = 0,05$ dla tej analizy, można wnioskować, że zmienne I oraz v_l mają statystycznie istotny wpływ na udział materiału podłoża w napoinie.

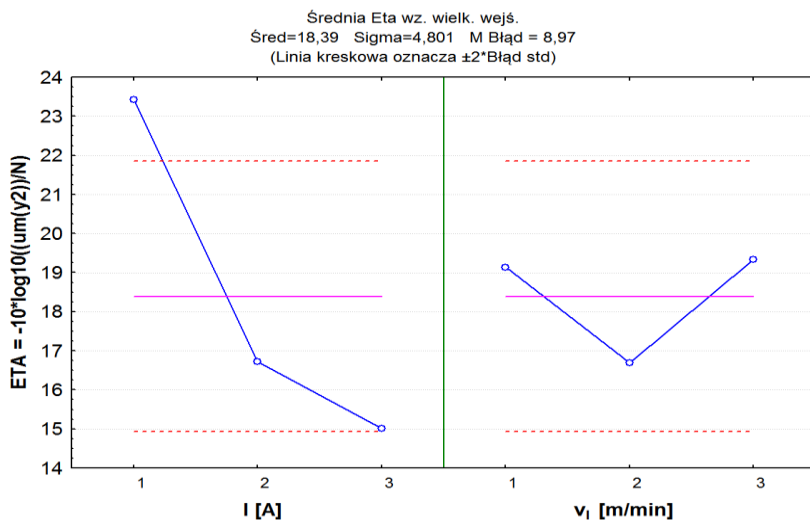
Optymalizację parametrów operacji napawania przeprowadzono dla celu „im mniejsze, tym lepsze” poprzez takie ustalenie parametrów procesu technologicznego, aby uzyskać jak największą wartość współczynnika S/N (ETA), wyliczonego ze wzoru (2).

W tabeli 3 przedstawiono wartości współczynnika ETA dla poszczególnych pomiarów, wykonanych według zaplanowanego eksperymentu.

Tabela 3. Wyniki obliczeń funkcji „sygnał szum”
Table 3. Calculation results of function „signal - noise”

Lp.	I [A]	v_1 [m/min]	ETA
1	60	1,5	21,724
2	60	2	18,615
3	60	2,5	29,936
4	75	1,5	18,905
5	75	2	16,558
6	75	2,5	14,715
7	90	1,5	16,791
8	90	2	14,906
9	90	2,5	13,354

Na rysunku 5 przedstawiono wartości średnie współczynnika ETA dla konkretnych wartości parametrów napawania I oraz v_1 .



Rys. 5. Wartość współczynnika ETA dla wartości zmiennych niezależnych

Fig. 5. Value of the coefficient ETA for independent variables

Największą wartość współczynnika stosunku sygnału (S) do szumu (N) uzyskano dla pomiarów z układu 3 planu eksperymentu. Wartość współczynnika ETA wyniosła 29,93. Na podstawie wartości średnich współczynnika ETA (rys. 5) można stwierdzić, że największy wpływ na maksymalną wartość współczynnika ETA ma natężenie prądu równe 60 A. Z kolei optymalną prędkością podawania drutu, po uwzględnieniu wpływu na tę zmienną wejściową niemierzalnych czynników zakłócających, jest $v_l = 2,5$ m/min. Na podstawie teorii Taguchiego dąży się do uzyskania maksymalnej wartości współczynnika ETA [Lewandowski 2013].

W celu predykcji udziału materiału podłoża posłużono się analizą regresji wielokrotnej, której wyniki zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry 1 i 2 podstawowego planu eksperymentów optymalizacyjnych

Table 4. Parameters of the 1 and 2 basic optimization experiment plan

R = 77884866 R ² = 60660524 Skorygowany R ² = 47547365 F(2,6) = 4,6259 p<,04088 Błąd standardowy estymacji:,03873						
N=9	BETA	Błąd standardowy BETA	B	Błąd standardowy B	t(6)	Poziom p
Wyraz wolny			-0,138	0,102	-1,356	0,224
Prąd	0,761	0,256	0,003	0,001	2,970	0,024
Prędkość podawania drutu	0,168	0,256	0,021	0,031	0,654	0,537

Oznaczenia:

- BETA – standaryzowany współczynnik regresji,
- B – współczynniki regresji,
- t(6) – wynik testu istotności t-Studenta,
- p – obliczony poziom istotności.

Uzyskane wyniki testu F dla analizy regresji wielokrotnej pozwalają z 96% prawdopodobieństwem na stwierdzenie statystycznie istotnego wpływu zmiennych wejściowych na wartość zmiennej zależnej. Wartość współczynnika korelacji wielokrotnej $r = 0,78$ świadczy o wysokiej zależności pomiędzy przyjętymi zmiennymi wejściowymi a zmienną zależną.

Rozpatrując wartości standaryzowanych współczynników regresji, można wnioskować, że natężenie prądu ma większy wpływ na udział materiału podłoża w napoinie niż prędkość podawania drutu spawalniczego. Na założonym poziomie istotności $p = 0,05$ można wnioskować o braku statystycznej istotności zmiennej objaśniającej v_l na wartość ocenianego parametru. Świadczą o tym wyniki testu t-Studenta. Można zatem przypuszczać, że ta zmienna może zostać usunięta z modelu.

Celem weryfikacji tej hipotezy wyznaczono współczynniki, określające nadmiarowość (współliniowość) predyktorów: tolerancję oraz czynnik inflacji wariancji – CIW (tab. 5), przeprowadzając również test autokorelacji reszt d Durbina-Watsona (tab. 6).

Tabela 5. Wyniki korelacji dla uzyskanych danych
Table 5. Results of correlation for the obtained data

Zmienna	Tolerancja	R-kwadrat	CIW	Korelacja cząstkowa
I [A]	0,39	0,58	2,37	0,77
v_l [m/min]	0,97	0,03	1,03	0,26

Tabela 6. Wynik autokorelacji reszty d
Table 6. Result of autocorrelation of rest d

	d Durbin – Watsona
Estymacja	2,06

Obliczone wartości powyższych współczynników oraz testu d nie pozwalają na usunięcie zmiennej v_l z modelu statystycznego. Predykcji udziału materiału podłoża w napoinie powłok można dokonać za pomocą następującego równania regresji wielokrotnej:

$$UMP = -0,138 + 0,003I + 0,021v_l \pm 0,039 \quad (3)$$

Przewidywany udział materiału podłoża, wyliczony z równania 3, dla parametrów optymalnych wyznaczonych metodą Taguchiego, powinien wynosić 0,1. Po uwzględnieniu błędu estymacji z prawdopodobieństwem 95% można stwierdzić że oczekiwana wartość udziału materiału podłoża w napoinie będzie się mieścić w przedziale od 0,04 do 0,016, jeżeli proces napawania przeprowadza się, stosując następujące parametry procesu technologicznego: $I = 60$ A, $v_l = 2,5$ m/min (tab. 7).

Tabela 7. Wyniki prawdopodobieństwa dla wybranych parametrów
Table 7. Probability results for selected parameters

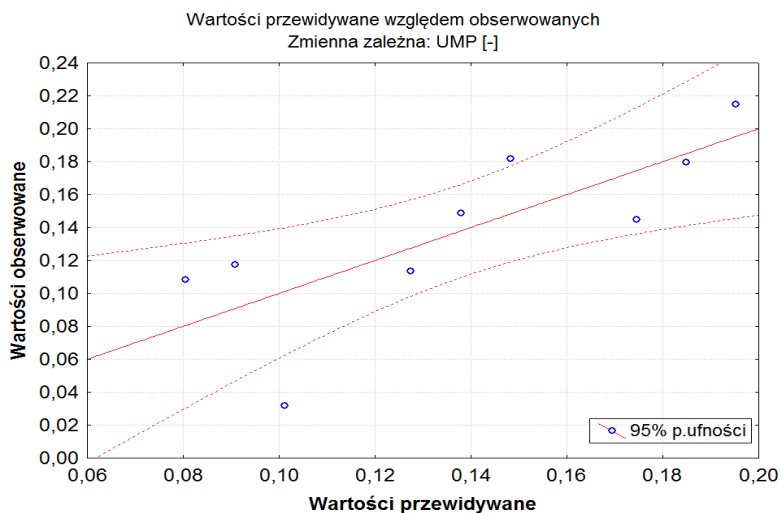
Zmienna	Waga B	Wartość	Waga B *Wartość
I [A]	0,003	60,000	0,188
v_l	0,021	2,500	0,052
Wyraz wolny			-0,138
Przewidywane			0,101
-95,0%GU			0,038
+95,0%GU			0,164

Tabela 8. Wyniki prawdopodobieństwa dla wybranych parametrów
Table 8. Probability results for selected parameters

Zmienna	Waga B	Wartość	Waga B * Wartość
I [A]	0,003	60,000	0,188
v_l	0,021	1,500	0,031
Wyraz wolny			-0,138
Przewidywane			0,081
-95,0%GU			0,017
+95,0%GU			0,144

Stwierdzono niewielką różnicę wynoszącą 0,19 w wartościach średnich współczynnika ETA dla prędkości podawania drutu spawalniczego 1,5 m/min oraz 2,5 m/min (rys. 5). W tabeli 8 zamieszczono wyniki predykcji dla następujących parametrów napawania: $I = 60$ A, $v_l = 1,5$ m/min.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność pomiędzy wartościami udziału materiału podłoża w napoinie, wyznaczonymi z równania 3, a wartościami obserwowanymi (zmierzonymi).



Rys. 6. Wykres zależności wartości obserwowanych do przewidywanych
Fig. 6. Graph relations of value dependences observed to predicted

6. WNIOSKI

W przeprowadzonych badaniach napoin, wykonanych drutem CastoMag 4554S na stali C45E przy zadanych parametrach, największa uzyskana wartość UMP wyniosła 22. Na podstawie wykonanej analizy statystycznej stwierdzono, że metodę Taguchiego można wykorzystać do optymalizacji parametrów napawania stali C45E z wykorzystaniem drutem CastoMag 4554S technologią MAG. Badania pozwoliły na wyznaczenie wartości parametrów napawania natężenia prądu I oraz szybkości podawania drutu v_f dla kryterium optymalizacji, związanego z minimalizacją współczynnika UMP. Przy wykorzystaniu warunków napawania przy natężeniu prądu 60 A i prędkości podawania drutu od 1,5 do 2,5 m/min wartość współczynnika UMP zmienia się w zakresie od 1,7 do 16.

Aby uzyskać opłacalne i najlepsze parametry procesu regeneracji poprzez napawanie, trzeba kontynuować badania z uwzględnieniem większej populacji zmiennych, np. różnej temperatury elementów napawanych i różnej prędkości napawania, mających wpływ na procesy dyfuzji w procesach spawalniczych.

LITERATURA

- Bober, M., 2017, *Badania wpływu głównych parametrów napawania plazmowego na geometrię napoin w oparciu o metody planowania eksperymentu*, Przegląd Spawalnictwa, vol. 89, nr 4,
- Bogdanowicz, Z., Grzelak, K., 2010, *Wpływ parametrów laserowego napawania proszkowego stali zaworowej na właściwości napoiny*, Biuletyn WAT, Warszawa.
- Gradzik, A., Mrówka-Nowotnik, G., Nawrocki, J., Sieniawski, J., 2016, *Wpływ warunków procesu napawania laserowego na mikrostrukturę i twardość napoiny Stellite 694 na podłożu z nadstopu niklu Inconel 738LC*, Mechanik, nr 4.
- Klimpel, A., 1999, *Technologie napawania i natryskiwania cieplnego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Klimpel, A., 2000, *Napawanie i natryskiwanie cieplne*, WNT, Warszawa.
- Lewandowski, A., 2013, *Wykorzystanie metody planowania badań G. Taguchi do analizy i optymalizacji procesu nagniatania żeliwa EN-GJLP-250*, Tribologia, nr 2.
- Mitra, A., 2008, *Fundamentals of Quality Control and Improvement*, Hoboken, Wiley, New Jersey.
- Nowacki, J., Wypych, A., 2011, *Napawanie w regeneracji głowic cylindrowych silników okrętowych*, Przegląd Spawalnictwa, nr 10.
- Skorupa, A., 2012, *Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoin z brązu układanych na podłożu stalowym metodą MIG*, Przegląd Spawalnictwa, nr 3.
- Źródła internetowe
- <http://www.katalogi-narzedziowe.pl/katalogi-pliki/spawalnictwo/castolin-eutectic-spawalnictwo-katalog-2012.pdf>, 19.05.2017.