

Sylwia BAZYCHOWSKA, Robert STAROSTA, Krzysztof DUDZIK  
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

## QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF PLASMA HARDFACING PARAMETERS ON THE METALLURGICAL MELTING OF AN AUSTENITIC STEEL COATING WITH A SUBSTRATE MATERIAL MADE OF C45 STEEL

### Ilościowa ocena wpływu parametrów napawania plazmowego na stopienie metalurgiczne powłoki ze stali austenitycznej z materiałem podłoża wykonanego ze stali C45

**Abstract:** *In this paper, based on a quantitative analysis of the parameters of plasma hardfacing of C45 steel with CastoMag 45554S wire, an optimisation of the hardfacing process parameters has been carried out. Experimental researches were carried out on the basis of an orthogonal plan, and the optimum hardfacing parameters, e.g.: intensity, voltage, wire feeding speed, were determined by the multiple regression method and the Taguchi method. It was found that the main current of the plasma arc had the greatest influence on the value of the fusion index. The highest S/N value was obtained for the following parameters:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0.75$  m/min,  $v_d = 3.9$  m/min,  $z = 12$  mm.*

**Keywords:** plasma, hardfacing, C45 steel, experiment, weld deposit, S/N ratio, optimal hardfacing parameters, CastoMag45554S wire.

**Streszczenie:** *W oparciu o ilościową analizę parametrów napawania plazmowego stali C45 drutem CastoMag 45554S dokonano optymalizacji parametrów procesu napawania. Badania realizowano na podstawie planu ortogonalnego, a optymalne parametry napawania np.: natężenie, napięcie, prędkość podawania drutu zostały wyznaczone metodą regresji wielokrotnej oraz metodą Taguchi. Ustalono, że największy wpływ na wartość współczynnika wtopienia ma natężenie prądu głównego łuku plazmowego. Największą wartość współczynnika S/N uzyskano przy parametrach:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0,75$  m/min,  $v_d = 3,9$  m/min,  $z = 12$  mm.*

**Słowa kluczowe:** plazma, napawanie, stal C45, eksperyment, napoina, współczynnik S/N, optymalne parametry napawania, drut CastoMag45554S.

## **1. Introduction**

Machines and equipment are affected by ageing in the environment and during their work. The factor causing wear and tear of mechanical parts is friction. It is one of the most common causes of loss of a change in roughness. It leads to loss of quality of friction surfaces, which contributes to increased vibrations during operation and accelerates wear of parts [6, 7]. Apart from the friction process, there are also other forms of mechanical wear. One of the most frequently encountered during operation of ship machinery and equipment is corrosion. In order to increase the durability of machine parts, appropriate actions should be taken to reduce the possibility of wear and tear processes. One of such activities is regeneration of worn out elements [8]. The use of appropriate regeneration technology will allow to restore operating properties [9]. One of the commonly used regeneration methods is deposition of metal coatings by hardfacing. It consists in applying a layer of liquid metal on the regenerated component in order to increase its corrosion and wear resistance [8]. The following types of hardfacing are distinguished: gas, electric: arc, electroslag, electrofusion and plasma [9, 10].

In plasma hardfacing, a plasma arc is obtained at a temperature of 18 000-24 000°C. In it, the surfacing material - usually in powder or wire form - is placed. In the plasma arc, the material is melted and deposited on the substrate. On the welded surface, the substrate is melted and the melted material together with the additive material forms a surface layer, called a weld. Plasma spraying is used to create additional surface layers on metal substrates. The most important parameters for plasma spraying are the welding current  $I$  [A], the welding process speed  $v_n$  [m/min], the wire feed speed  $v_d$  [m/min], the nozzle-to-sample distance  $z$  [mm] and the voltage  $U$  [V] [4, 5]. Obtaining the most suitable parameters during plasma hardfacing allows to reduce costs by increasing the operating time of machine.

The most suitable parameters during plasma spraying allow to reduce costs by increasing the operating time of machine components and increasing productivity during new production [3].

The purpose of this research was to quantitatively evaluate the influence of selected plasma hardfacing parameters on the proportion of substrate material in the weld. The choice of optimal deposition parameters was made using statistical methods.

## **2. The research methodology**

The hardfacing technology is characterised by metallurgical fusion of the pad welding with the base material, which proportion can reach up to 60% and is characterised by an index called the material proportion in the pad welding, also referred to as the dilution coefficient. It is defined as the ratio of the cross-sectional area of the superfused substrate material to the sum of the cross-sectional areas of the alloy and the substrate material, as shown in formula (1) [1, 2, 11].

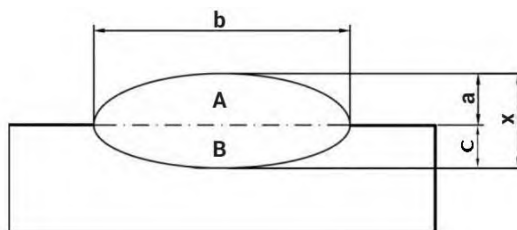
$$D = \frac{B}{A+B} [-] \quad (1)$$

where:

D - dilution;

A - area of deposit strengthening (fig. 1), [mm<sup>2</sup>];

B - area of remelted base metal (fig. 1) [mm<sup>2</sup>].



**Fig. 1.** Schematic of the characteristic geometric dimensions of the surfacing; where: a - height of the infill; b - width of the face; c = x – a depth of fusion [1]

The amount of molten additive (coating) material and the proportion of substrate metal in the deposit are factors closely related to the metallurgy of the hardfacing processes. In order to ensure optimum technical conditions, it is necessary to ensure simultaneously high deposition rates and low metal content in the deposit. In many hardfacing methods, it is very difficult, if not impossible, to fulfil these requirements at the same time, as a higher hardfacing efficiency is mainly achieved by increasing the line energy, which results in a higher share of substrate material in the deposit. The Gas Tungsten Arc technology makes it possible to simultaneously increase the efficiency of the process with a constant share of the substrate material in the deposit [6]. Therefore, plasma deposition (Plasma Transferred Arc) was used as a method for obtaining coatings.

Welding was carried out on an automated welding station equipped with a Panasonic TM-1400 GIII welding robot, a Castolin Eutectic GAP 2501 DC current source, a Castolin Eutectic E52 machine torch, which is adapted to both powder and wire hardfacing (PTA). The equipment also included a Castolin Eutectic WF wire feeder.

The workpiece consisted of flat bars made of unalloyed steel C45 with dimensions of 300x100x6 mm. The surface of the steel substrates was degreased before the hardfacing process. A Castolin Eutectic CastoMag 45554S wire with a diameter of 1.2 mm and the chemical composition shown in tab. 1 was used for the experiment.

**Table 1**

**Chemical composition of Castolin Eutectic CastoMag 45554S wire**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
0,035%	0,8%	1,6%	19,5%	11,5%	2,8%	0,7%

The following parameters were selected as variable parameters of plasma arc welding: main arc current  $I$ , plasma arc voltage  $U$ , welding speed  $v_n$ , feeding speed of additional (coating) material  $v_d$ , distance of torch from the welded surface  $z$ . The values of the input (independent) variables were determined on the basis of preliminary tests. The following values were assumed:  $I = 120, 140, 160$  A;  $U = 28, 32, 35$  V;  $v_n = 0.25, 0.50, 0.75$  m/min;  $v_d = 2.5, 3.2, 3.9$  m/min;  $z = 12, 16, 20$  mm.

Other parameters of the hardfacing process were determined at a constant level and did not change during hardfacing. The most important of these are shown in tab. 2.

**Table 2**

**The most important hardfacing process parameters**

Internal arc current	Gas generation output Plazma Varigon H9	Shielding gas output Argon N5.0	Cone nozzle diameter	Diameter of a non-melting electrode sharpened to 45°
50A	1 dm <sup>3</sup> /min	1.5 dm <sup>3</sup> /min	3 mm	1.2 mm

In order to quantitatively evaluate the effect of selected PTA hardfacing parameters, i.e. on dilution ( $D$ ), a randomised, orthogonal experimental design was used, taking into account the trivalence of 5 independent variables (predictors, explanatory, input), providing for eighteen experiments with five repetitions (tab. 3).

**Table 3**

**Plasma hardfacing parameters**

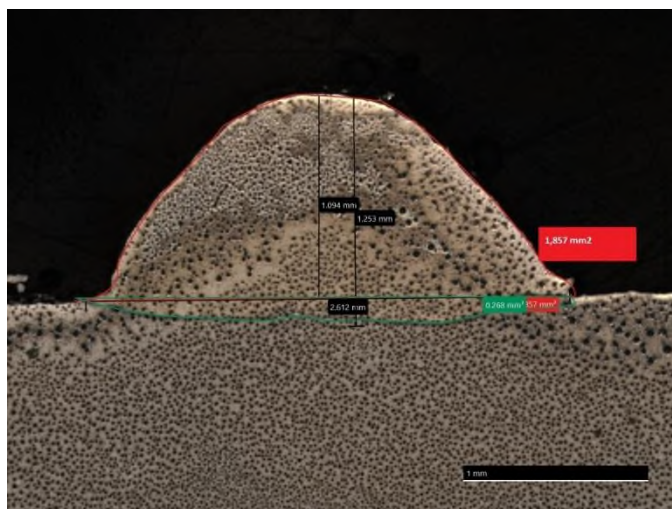
	Hardfacing parameters				
	$I$ [A]	$U$ [V]	$v_n$ [m/min]	$v_d$ [m/min]	$z$ [mm]
1	160	28	0.50	3.9	12
2	160	32	0.25	2.5	16
3	160	35	0.75	3.2	20
4	120	28	0.50	2.5	16
5	120	32	0.25	3.2	20
6	120	35	0.75	3.9	12
7	140	28	0.25	3.9	20
8	140	32	0.75	2.5	12
9	140	35	0.50	3.2	16
10	160	28	0.75	3.2	16
11	160	32	0.50	3.9	20
12	160	35	0.25	2.5	12
13	120	28	0.25	3.2	12

14	120	32	0.75	3.9	16
15	120	35	0.50	2.5	20
16	140	28	0.75	2.5	20
17	140	32	0.50	3.2	12
18	140	35	0.25	3.9	16

In order to evaluate the influence of selected independent (input) variables on the analysed characteristic - the dependent (output) variable, the following two statistical methods were used: analysis of variance (ANOVA) and multiple regression. The selection of plasma hardfacing parameters was carried out using the Taguchi mathematical optimisation method. The criterion for optimisation was the lowest mixing coefficient value.

### 3. The research results

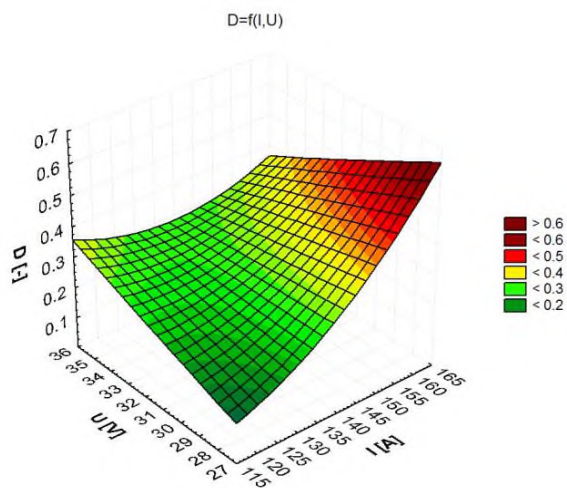
In fig. 2, an example of a sample used to determine the mixing coefficient  $D$  is shown. Depending on the plasma hardfacing parameters used, the average value of the mixing coefficient ranged from 0.05 to 0.62. The lowest value of the mixing coefficient was obtained using the following values of the independent variables:  $I = 120$  A,  $U = 32$  V,  $v_n = 0.75$  m/min,  $v_d = 3.9$  m/min,  $z = 16$  mm.



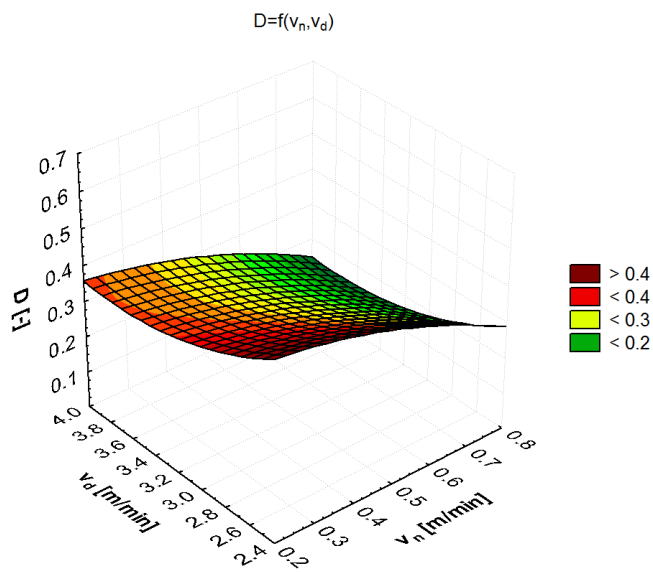
**Fig. 2.** Cross-section of a hardfaced sample

On the other hand, the highest value of mixing coefficient was observed in the case of samples, which were coated using the following welding parameters:  $I = 160$  A,  $U = 35$  V,

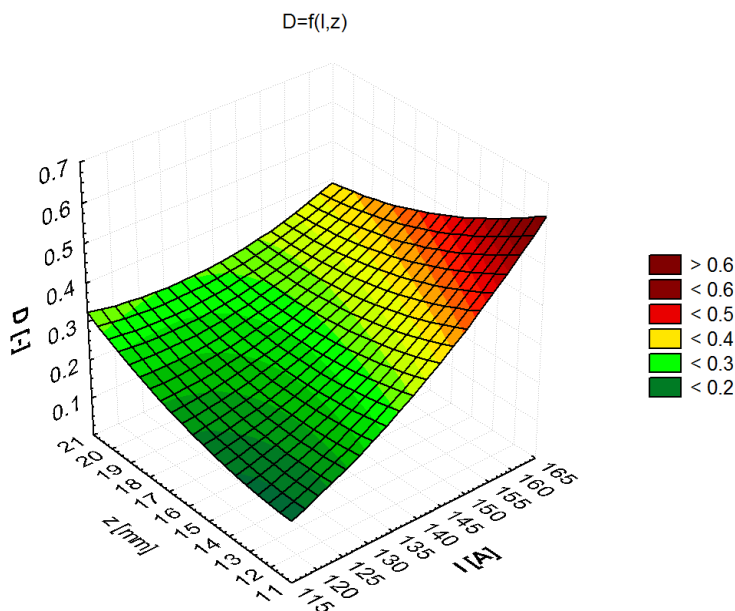
$v_n = 0.25$  m/min,  $v_d = 2.5$  m/min,  $z = 12$  mm. The graphs (figs. 3, 4, 5) show the results of the measurements of the mixing coefficient  $D$  as a function of the variable values of the adopted hardfacing parameters.



**Fig. 3.** Influence of plasma arc intensity and voltage on the mixing ratio value



**Fig. 4.** Influence of the hardfacing speed and feeding velocity of the additive material on the value of the mixing ratio



**Fig. 5.** Influence of current intensity and distance of the torch from the welded surface on the mixing coefficient value

The obtained results of the analysis of variance (tab. 4) allows the observation that all the adopted parameters of the hardfacing process have a statistically significant effect on the value of the dependent variable.

**Table 4**

**Results of the analysis of variance of the effect of independent variables (hardfacing parameters) on the value of the mixing coefficient D**

The independent variable	Sum of Squares (SS)	<i>F</i>	<i>p</i>
<i>I</i> [A]	508	46.96	<0.01
<i>U</i> [V]	52	4.78	0.013
<i>v<sub>n</sub></i> [m/min]	448	41.43	<0.01
<i>v<sub>d</sub></i> [m/min]	257	23.78	<0.01
<i>z</i> [mm]	38	3.54	0.04
Rest	233	-	-

where: *F* – Fisher–Snedecor test result, *p* – the calculated significance ratio for the *F* value; *p* < 0.05 it testifies to the existence of statistical significance.

This is confirmed by the values of the calculated significance level  $p$ , which took values smaller than the assumed  $p = 0.05$ . Analysing the further results, the intensity of the current used during hardfacing has the greatest influence on the value of the mixing coefficient, i.e. the share of the substrate material in the deposit. Nearly 30% of the variation in the variance, of the dependent variable is explained by the different values of the plasma arc current. The deposition speed ( $SS = 448$ ) also has a large influence on the value of the mixing ratio. The distance between the nozzle and the workpiece has the smallest influence on the proportion of parent material in the deposit.

Only 15% (Rest,  $SS = 233$ ) of the variance of the dependent variable is not explained by the adopted independent variables. In order to more accurately assess the factors influencing the value of the fusion coefficient of hardfacings made from wire material on C45 steel, the following process parameters would have to be taken into account:

- a) internal arc current,
- b) welding wire diameter,
- c) diameter of plasma nozzle,
- d) plasma gas flow,
- e) type of welding wire.

The obtained fusion index results were also subjected to multiple regression analysis, the results of which are shown in tab. 5.

**Table 5**

**Results of multiple linear regression for estimating the influence of independent variables**

$R=0.97; R^2=0.91; F(5,12)=36.05; p<0.01; \text{Standard error of the estimate: } 0.034$				
$N=18$	BETA	B	t	p
Constant term		0.14	0.96	0.35
$I [A]$	0.68	0.005	9.42	0.000001
$E [V]$	-0.05	-0.002	-0.65	0.53
$v_n [m/min]$	-0.57	-0.35	-7.85	0.000005
$v_d [m/min]$	-0.38	-0.08	-5.29	0.0002
$z [mm]$	-0.09	-0.003	-1.21	0.25
where: $R$ – multiple correlation coefficient, $R^2$ – coefficient of determination, $N$ – number of measurements, BETA – standardized multiple regression coefficient, $B$ – multiple regression coefficient, $t$ – Student's t-test result used to assess the significance of the multiple regression coefficient, $p$ – the calculated significance level for the student's t-test result.				

The quantitative evaluation of the influence of individual variables of the plasma hardfacing process parameters was carried out on the basis of the standardised multiple regression coefficients (BETA) and the calculated significance level for the result of the T-student test.



The highest value of the BETA coefficient equal to 0.68 was obtained for the independent variable main current of the plasma arc. It proves the biggest influence of this parameter on the obtained value of the fusion index. The relation between D and I is proportional. The deposition rate (BETA = -0.57) and the feed rate (BETA = -0.38) have a smaller influence on the share of the parent metal in the deposit. Note that the relationship between the determined value of D and the independent variables  $v_n$  and  $v_d$  is inversely proportional. The arc current voltage (BETA = -0.05) and the distance of the torch from the surface to be hardfaced (BETA = -0.09) have the smallest influence on the proportion of parent material in the hardfacing. When analysing the calculated significance levels ( $p$ ) for the obtained T-student test values, it can be seen that they assumed values greater than the assumed significance level ( $p = 0.05$ ). With 95% probability, it can be assumed that there are no grounds to reject the null hypothesis stating that these two hardfacing parameters do not influence the value of the coefficient D. Therefore, it can be assumed that the influence of the independent variables U and z on the value of the dependent variable is statistically insignificant.

The calculated significance level of  $p < 0.01$  for the analysis of variance, test  $F = 36.06$ , allows us to reject the zero hypothesis, which states that there is no statistical significance of the adopted hardfacing parameters on the value of the mixing coefficient. There is an almost full correlation of  $R = 0.97$  between the independent variables and the D factor for the welds obtained by plasma spraying. In turn, the value of the coefficient of determination (fit)  $R^2 = 0.91$  shows that 91% of the percentages of the obtained values of the dependent variable D are described by a linear model, where the regression coefficients B take the values shown in tab. 2.

Figures 3, 4, 5 show that there is a non-linear relationship between the independent variables and the dependent variable under study. Therefore, for the prediction of the dependent variable it was decided to use a second degree polynomial taking into account the interaction between the independent variables. The general mathematical model used can be represented as shown in formula (2):

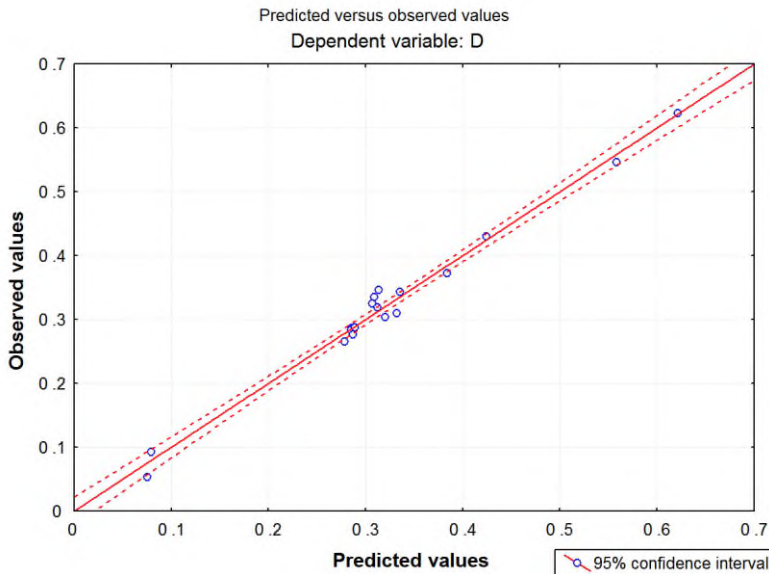
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (2)$$

In accordance with the adopted model, if all variables were taken into account, an  $18 \times 20$  matrix would be formed. In order to calculate the multiple regression coefficient, the number of columns must be smaller than the number of rows of the matrix. Therefore, for the analysis of the non-linear model, instead of separately analysed parameters of the intensity I and voltage U of the plasma arc, its energy (IU) determined in kJ was adopted. In order to determine the mathematical model for the prediction of the mixing ratio, a multiple regression step-by-step analysis was used. This analysis makes it possible to introduce into the model only those variables, predictors, which significantly predict the dependent variable.

The following multiple regression equation can be used to predict the amount of base material (C45 steel constituents) in the deposit obtained from CastoMag 45554S welding wire as shown in formula (3):

$$D = 1.63 - 0.05v_n v_d - 0.17IU - 0.01IUz - 0.47v_d - 0.21v_n^2 + 0.06v_d^2 + 0.06(IU)^2 + 0.04z \pm 0.02 \quad (3)$$

The above equation is adequate and it is confirmed by the result of F test (Fisher Snedecor test) equal to 76.78. The calculated significance level for this F test was  $p < 0.01$ . Therefore, with 99% probability it can be concluded that the multiple regression equation (3) is correct. On the other hand, the value of the coefficient of determination  $R^2 = 0.97$  informs that 97% of the obtained results of the  $D$  factor measurements are described by equation 3. Figure 6 presents the relation between the observed values of the mixing coefficient and the predicted values.



**Fig. 6.** Relationship between the observed values of the  $D$  factor and its values calculated from equation

The optimisation of the hardfacing parameters was based on Taguchi's method of reducing the variation of the dependent variable in response to disturbing factors, while maximising it in response to a change in the value of the independent variables. The measure proposed by Taguchi is the S/N ratio, which is inversely proportional to the loss function. Maximising this ratio means minimising losses while improving quality. This has a significant impact on determining the degree of wear on machine component parts. In this study, as an optimisation criterion, the lowest possible proportion of base material (C45

steel) was used in the deposit made with CastoMag 45554S wire. The S/N ratio was calculated from the formula (4):

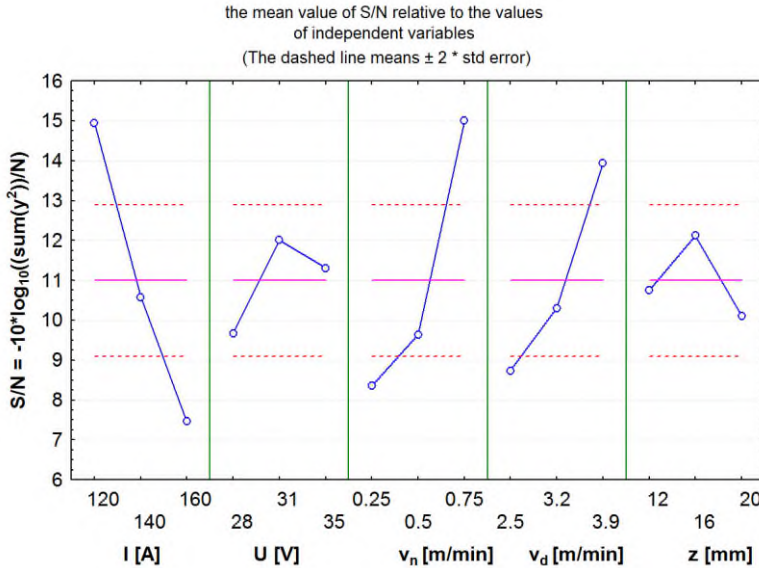
$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right] \quad (4)$$

where:

$y$  - the value of the characteristic being measured;

$n$  - number of measurements.

The average values of the S/N ratio for the different hardfacing parameters are shown in fig. 7.



**Fig. 7.** Average values of the S/N ratio for individual hardfacing parameters

The exponent of the optimisation carried out is obtaining the highest value of the S/N ratio. With the assumed optimization criterion, the process of plasma hardfacing of C45 steel with CastoMag 45554S material using Castolin Eutectic E52 torch and Castolin Eutectic GAP 2501 DC current source should be carried out using the following parameters:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0.75$  m/min,  $v_d = 3.9$  m/min and  $z = 12$  mm.

## 4. Conclusions

The results of the variance analysis show that all the adopted parameters of the hardfacing process have a statistically significant effect on the value of the dependent

variable, as evidenced by the values of the significance level  $p$ , which took values smaller than assumed ( $p = 0.05$ ). The current intensity has the greatest influence on the mixing coefficient and on the proportion of substrate material in the UMP deposit. The distance between the nozzle and the workpiece has the smallest influence on the UMP. The criterion for optimisation is the smallest mixing ratio value.

The criterion of the S/N ratio - the smaller the better - makes it possible to minimise component damage, which has a significant impact on increasing the reliability and operational safety of marine equipment machinery.

The results of the normalised multivariate regression coefficients showed that the arc current voltage and the distance of the torch from the surface to be surfaced have the least influence on the proportion of base material in the surfacing. It can therefore be assumed that their influence is statistically insignificant.

The distance of the nozzle from the workpiece has the least influence on the UMP. The smallest value of the mixing ratio was used as an optimisation criterion. Using the Taguchi method, it was shown that obtaining the highest value of the S/N ratio with the assumed optimisation criterion is possible with the following parameters:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0.75$  m/min,  $v_d = 3.9$  m/min and  $z = 12$  mm.

## 5. References

1. Bober M., Tobota K.: Study significance of the impact of the basic parameters of plasma surfacing on the geometry of the weld overlays. *Welding Technology Review*, Vol.87, No. 9, 2015, DOI 10.26628/wtr.v87i9.446.
2. Henzler W., Sawa M., Trębicki P., Szala M., Winiarski G.: Influence of austenitic interlayer on the properties of stellite padding welds after impact-hardening. *Welding Technology Review*, Vol. 93, No. 2, 2021, DOI 10.26628/wtr.v93i2.1134.
3. Kik T., Górka J., Czupryński A., Martyniszyn A.: Napawanie krawędzi przedmiotów metodami TIG i PTA. *Przegląd Spawalnictwa*, No. 9, 2011.
4. Klimpel A.: *Technologie laserowe*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
5. Klimpel A.: *Technologie laserowe w spawalnictwie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
6. Klimpel A.: *Hardfacing and thermal spraying. Technologies*. Publishing WNT, Warsaw 2000.
7. Legutko S.: *Eksplatacja maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
8. Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
9. Madej E., Wrotkowski J.: *Regeneracja części spawaniem i napawaniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
10. Nowak B., Kostrzewa S.: *Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.

11. Szymura M., Czupryński A., Różański M.: Research on the properties of high chromium cast iron overlay welds deposited by tubular electrodes. *Welding Technology Review*, Vol. 90, No. 10, 2018, DOI 10.26628/wtr.v90i10.963.

# **ILOŚCIOWA OCENA WPLYWU PARAMETRÓW NAPAWANIA PLAZMOWEGO NA STOPIENIE METALURGICZNE POWŁOKI ZE STALI AUSTENITYCZNEJ Z MATERIAŁEM PODŁOŻA WYKONANEGO ZE STALI C45**

## **1. Wstęp**

Maszyny i urządzenia ulegają procesom starzenia się w środowisku i podczas pracy. Czynnikiem powodującym zużywanie się części mechanicznych jest tarcie. Jest ono jedną z najczęstszych przyczyn zmiany chropowatości. Prowadzi to do utraty jakości powierzchni trących, co przyczynia się do zwiększenia drgań podczas pracy i przyspiesza zużycie części [6, 7]. Oprócz tarcia występują również inne formy zużycia mechanicznego. Jedną z najczęściej spotykanych podczas eksploatacji maszyn i urządzeń okrętowych jest korozja. W celu zwiększenia trwałości części maszyn należy podjąć odpowiednie działania ograniczające możliwość wystąpienia procesów zużycia, m.in. zastosować regenerację wyeksploatowanych elementów [8]. Odpowiedniej technologia regeneracji pozwala na przywrócenie właściwości eksploatacyjnych [9]. Jedną z powszechnie stosowanych metod regeneracji jest osadzanie powłok metalowych poprzez napawania. Polega ona na nałożeniu na regenerowany element warstwy ciekłego metalu w celu zwiększenia jego odporności na korozję i zużycie [8]. Wyróżnia się następujące rodzaje napawania: gazowe, elektryczne: łukowe, elektrożuźlowe, elektrooporowe i plazmowe [9, 10].

W napawaniu plazmowym łuk plazmowy uzyskuje się w temp. 18 000 – 24 000°C. W nim umieszcza się napawany materiał – zazwyczaj w postaci proszku lub drutu. W łuku plazmowym materiał ulega stopieniu i jest nakładany na podłoże. Na powierzchni napawanej podłoże ulega stopieniu, a stopiony materiał wraz z materiałem dodatkowym tworzy warstwę wierzchnią, zwaną napoiną. Natryskiwanie plazmowe jest stosowane do tworzenia dodatkowych warstw powierzchniowych na podłożach metalowych. Najważniejszymi parametrami napawania plazmowego są: natężenie prądu napawania  $I$  [A], prędkość procesu napawania  $v_n$  [m/min], prędkość podawania drutu  $v_d$  [m/min], odległość dyszy od próbki  $z$  [mm] oraz napięcie  $U$  [V] [4, 5]. Uzyskanie najbardziej odpowiednich parametrów podczas napawania plazmowego pozwala na redukcję kosztów poprzez wydłużenie czasu pracy podzespołów maszyny oraz zwiększenie wydajności podczas nowej produkcji [3].

Celem badań była ilościowa ocena wpływu wybranych parametrów napawania plazmowego na udział materiału podłoża w napoinie. Wyboru optymalnych parametrów napawania dokonano z wykorzystaniem metod statystycznych

## 2. Metodyka badań

Technologia napawania charakteryzuje się metalurgicznym stopieniem napawanego materiału z materiałem podłoża, którego udział może dochodzić do 60% i jest charakteryzowana wskaźnikiem – udziałem materiału w napawaniu, zwanym również współczynnikiem rozcieńczenia. Definiuje się go jako stosunek pola powierzchni przekroju poprzecznego materiału podłoża nadtopionego do sumy pól powierzchni przekroju poprzecznego stopu i materiału podłoża, tak jak jest to przedstawione we wzorze (1) [1, 2, 11].

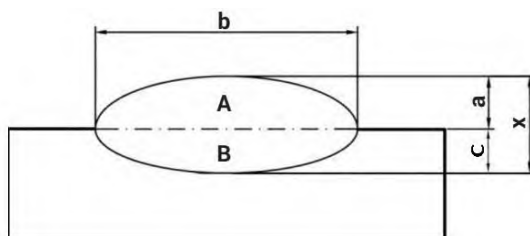
$$D = \frac{B}{A+B} [-] \quad (1)$$

gdzie:

$D$  – rozcieńczenie;

$A$  – powierzchnia umocnienia osadu (rys. 1) [ $\text{mm}^2$ ];

$B$  – powierzchnia przetopionego metalu podstawowego (rys. 1) [ $\text{mm}^2$ ].



**Rys. 1.** Schemat charakterystycznych wymiarów geometrycznych napawania; gdzie:  $a$  – wysokość napawania;  $b$  – szerokość lica;  $c = x - a$  – głębokość wtopienia [1]

Ilość roztopionego materiału dodatkowego (powłokowego) oraz udział metalu podłoża w napoinie są czynnikami ściśle związanymi z metalurgią procesów napawania. W celu zapewnienia optymalnych warunków technicznych należy dążyć jednocześnie do wysokiej wydajności napawania i małego udziału materiału metalu w napoinie. W wielu metodach napawania jednoczesne spełnienie tych wymagań jest bardzo trudne, a wręcz niemożliwe, gdyż wyższą wydajność napawania uzyskuje się głównie poprzez zwiększenie energii linii, co powoduje większy udział materiału podłoża w złożu. Technologia Gas Tungsten Arc pozwala na jednoczesne zwiększenie wydajności procesu przy stałym udziale materiału podłoża w złożu [6]. W związku z tym jako metodę otrzymywania powłok zastosowano napawanie plazmowe (Plasma Transferred Arc).

Napawanie przeprowadzono na zautomatyzowanym stanowisku spawalniczym wyposażonym w robota spawalniczego Panasonic TM-1400 GIII, źródło prądu stałego Castolin Eutectic GAP 2501, palnik maszynowy Castolin Eutectic E52 przystosowany do napawania zarówno proszkowego, jak i drutowego (PTA). W wyposażeniu znajdował się również podajnik drutu Castolin Eutectic WF.

Obrabiany przedmiot stanowiły płaskowniki wykonane ze stali niestopowej C45 o wymiarach 300x100x6 mm. Powierzchnia próbek stalowych przed procesem napawania została odfuszczone. Do eksperymentu użyto drutu Castolin Eutectic CastoMag 45554S o średnicy 1,2 mm i składzie chemicznym przedstawionym w tab. 1.

**Tabela 1**

**Skład chemiczny drutu Castolin Eutectic CastoMag 45554S**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
0,035%	0,8%	1,6%	19,5%	11,5%	2,8%	0,7%

Jako parametry zmienne spawania łukiem plazmowym wybrano: prąd łuku głównego  $I$ , napięcie łuku plazmowego  $U$ , prędkość spawania  $v_n$ , prędkość podawania materiału dodatkowego (powłokowego)  $v_d$ , odległość palnika od powierzchni napawanej  $z$ . Wartości zmiennych wejściowych (niezależnych) ustalono na podstawie badań wstępnych. Przyjęto następujące wartości:  $I = 120, 140, 160$  A;  $U = 28, 32, 35$  V;  $v_n = 0,25; 0,50; 0,75$  m/min;  $v_d = 2,5; 3,2; 3,9$  m/min;  $z = 12, 16, 20$  mm.

Pozostałe parametry procesu napawania były ustalone na stałym poziomie i nie ulegały zmianie w trakcie napawania. Najważniejsze z nich zostały przedstawione w tab. 2.

**Tabela 2**

**Najważniejsze parametry procesu napawania**

Natężenie prądu łuku wewnętrznego	Wydatek gazu generującego Plazma Varigon H9	Wydatek gazu osłonowego Argon N5.0	Średnica dyszy stożkowej	Średnica elektrody nietopliwej zaostrzonej na 45°
50A	1 dm <sup>3</sup> /min	1,5 dm <sup>3</sup> /min	3 mm	1,2 mm

W celu ilościowej oceny wpływu wybranych parametrów napawania PTA, tj. na rozcieńczenie ( $D$ ), zastosowano ortogonalny plan eksperymentalny z randomizacją, uwzględniający trójwartościowość pięciu zmiennych niezależnych (predyktorów, objaśniających, wejściowych), przewidujący wykonanie osiemnastu eksperymentów z pięcioma powtórzeniami (tab. 3).



**Tabela 3**

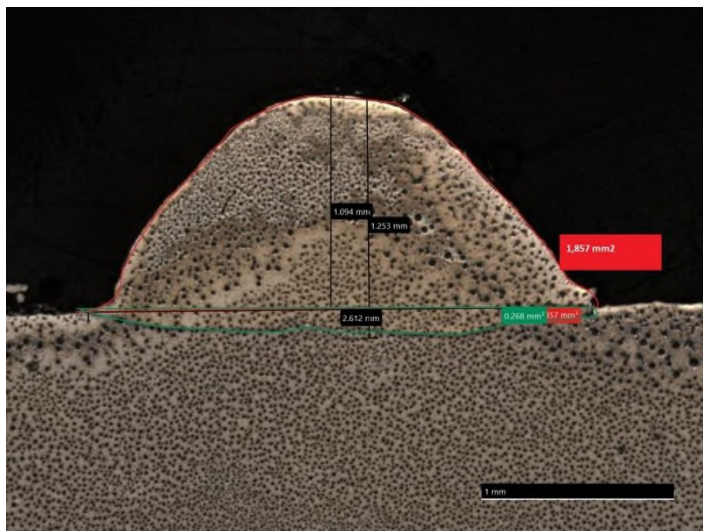
**Doświadczalne parametry napawania**

	Parametry napawania				
	$I$ [A]	$U$ [V]	$v_n$ [m/min]	$v_d$ [m/min]	$z$ [mm]
1	160	28	0,50	3,9	12
2	160	32	0,25	2,5	16
3	160	35	0,75	3,2	20
4	120	28	0,50	2,5	16
5	120	32	0,25	3,2	20
6	120	35	0,75	3,9	12
7	140	28	0,25	3,9	20
8	140	32	0,75	2,5	12
9	140	35	0,50	3,2	16
10	160	28	0,75	3,2	16
11	160	32	0,50	3,9	20
12	160	35	0,25	2,5	12
13	120	28	0,25	3,2	12
14	120	32	0,75	3,9	16
15	120	35	0,50	2,5	20
16	140	28	0,75	2,5	20
17	140	32	0,50	3,2	12
18	140	35	0,25	3,9	16

W celu oceny wpływu wybranych zmiennych niezależnych (wejściowych) na analizowaną cechę – zmienną zależną (wyjściową) zastosowano dwie metody statystyczne: analizę wariancji (ANOVA) oraz regresję wielokrotną. Dobór parametrów napawania plazmowego przeprowadzono z wykorzystaniem metody optymalizacji matematycznej Taguchi. Kryterium optymalizacji stanowiła najmniejsza wartość współczynnika wymieszania.

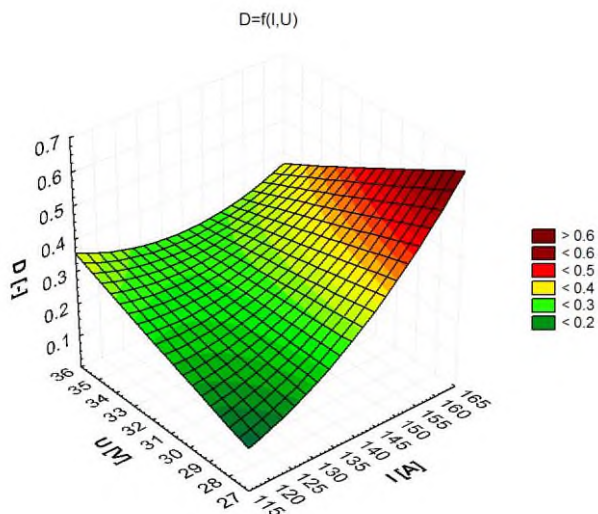
### **3. Wyniki badań**

Na rys. 2 pokazano przykład próbki użytej do określenia współczynnika mieszania  $D$ . W zależności od zastosowanych parametrów napawania plazmowego średnia wartość współczynnika mieszania wahała się od 0,05 do 0,62. Najniższą wartość współczynnika mieszania uzyskano przy zastosowaniu następujących wartości zmiennych niezależnych:  $I = 120$  A,  $U = 32$  V,  $v_n = 0,75$  m/min,  $v_d = 3,9$  m/min,  $z = 16$  mm.

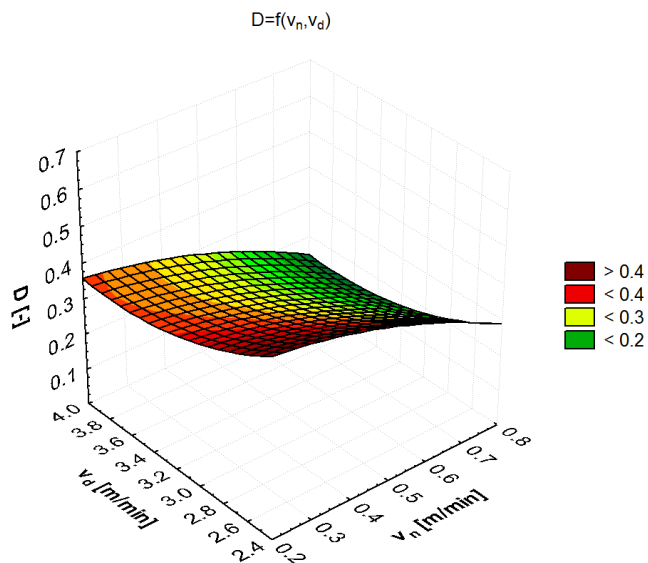


Rys. 2. Przekrój poprzeczny napoiny napawanej próbki

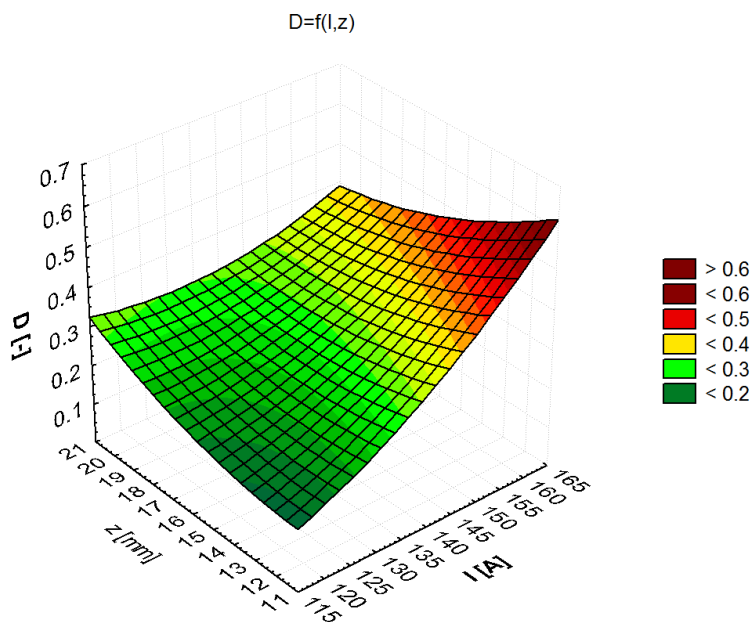
Najwyższą wartość współczynnika wymieszania zaobserwowano natomiast w przypadku próbek, które napawano przy zastosowaniu następujących parametrów:  $I = 160$  A,  $U = 35$  V,  $v_n = 0,25$  m/min,  $v_d = 2,5$  m/min,  $z = 12$  mm. Na wykresach (rys. 3–5) przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika wymieszania  $D$  w funkcji zmiennych wartości przyjętych parametrów napawania.



Rys. 3. Wpływ natężenia i napięcia łuku plazmowego na wartość współczynnika wymieszania



**Rys. 4.** Wpływ prędkości napawania i prędkości podawania materiału dodatkowego na wartość współczynnika wymieszania



**Rys. 5.** Wpływ natężenia prądu i odległości palnika od napawanej na wartość współczynnika wymieszania

Uzyskane wyniki analizy wariancji (tab. 4) pozwalają zauważyć, że wszystkie przyjęte parametry procesu napawania mają statystycznie istotny wpływ na wartość zmiennej zależnej.

Tabela 4

**Wyniki analizy wariancji wpływu zmiennych niezależnych (parametrów napawania) na wartość współczynnika mieszania  $D$**

Zmienna niezależna	Suma kwadratów (SS)	$F$	$p$
$I$ [A]	508	46,96	<0,01
$U$ [V]	52	4,78	0,013
$v_n$ [m/min]	448	41,43	<0,01
$v_d$ [m/min]	257	23,78	<0,01
$z$ [mm]	38	3,54	0,04
Rest	233	-	-
gdzie: $F$ – wynik testu Fishera–Snedecora, $p$ – obliczony współczynnik istotności dla wartości $F$ ; $p < 0,05$ świadczy o istnieniu istotności statystycznej.			

Potwierdzają to wartości obliczonego poziomu istotności  $p$ , które przyjmowały wartości mniejsze od założonego  $p = 0,05$ . Analizując dalsze wyniki, największy wpływ na wartość współczynnika wymieszania, czyli udziału materiału podłoża w napoinie, ma natężenie prądu stosowanego podczas napawania. Prawie 30% zmienności wariancji zmiennej zależnej jest wyjaśnione przez różne wartości natężenia prądu łuku plazmowego. Duży wpływ na wartość współczynnika mieszania ma również prędkość osadzania (SS = 448). Odległość pomiędzy dyszą a przedmiotem obrabianym ma najmniejszy wpływ na udział materiału rodzimego w złożu.

Tylko 15% (Rest, SS = 233) wariancji zmiennej zależnej nie jest wyjaśnione przez przyjęte zmienne niezależne. W celu dokładniejszej oceny czynników wpływających na wartość współczynnika wtopienia napoin twardych wykonanych z drutu na stali C45 należałoby uwzględnić następujące parametry procesu:

- natężenie prądu łuku wewnętrznego,
- średnicę drutu spawalniczego,
- średnicę dyszy plazmowej,
- przepływ gazu plazmowego,
- rodzaj drutu spawalniczego.

Uzyskane wyniki indeksu wtopienia poddano również analizie regresji wielokrotnej, której wyniki przedstawiono w tab. 5.

**Tabela 5**

**Wyniki liniowej regresji wielokrotnej dla estymacji wpływu zmiennych niezależnych**

$R = 0,97; R^2 = 0,91; F(5,12) = 36,05; p < 0,01; \text{Błąd standardowy: } 0,034$				
N=18	BETA	B	t	p
W. wolny		0,14	0,96	0,35
I [A]	0,68	0,005	9,42	0,000001
E [V]	-0,05	-0,002	-0,65	0,53
$v_n$ [m/min]	-0,57	-0,35	-7,85	0,000005
$v_d$ [m/min]	-0,38	-0,08	-5,29	0,0002
z [mm]	-0,09	-0,003	-1,21	0,25

gdzie:  $R$  – współczynnik korelacji wielokrotnej,  $R^2$  – współczynnik determinacji,  $N$  – liczba pomiarów, BETA – standaryzowany współczynnik regresji wielokrotnej,  $B$  – współczynnik regresji wielorakiej,  $t$  – wynik testu t-Studenta służący do oceny istotności współczynnika regresji wielorakiej,  $p$  – obliczony poziom istotności dla wyniku testu t-Studenta.

Ilościową ocenę wpływu poszczególnych zmiennych parametrów procesu napawania plazmowego przeprowadzono na podstawie znormalizowanych współczynników regresji wielokrotnej (BETA) oraz obliczonego poziomu istotności dla wyniku testu t-Studenta.

Największą wartość współczynnika BETA równą 0,68 uzyskano dla zmiennej niezależnej natężenie prądu głównego łuku plazmowego. Świadczy to o największym wpływie tego parametru na uzyskaną wartość współczynnika wtopienia. Zależność pomiędzy  $D$  i  $I$  jest proporcjonalna. Szybkość napawania (BETA = -0,57) i szybkość podawania drutu (BETA = -0,38) mają mniejszy wpływ na udział metalu rodzimego w napoinie. Należy zauważyć, że zależność pomiędzy wyznaczoną wartością  $D$  a zmiennymi niezależnymi  $v_n$  i  $v_d$  jest odwrotnie proporcjonalna. Napięcie prądu łuku (BETA = -0,05) oraz odległość palnika od powierzchni napawanej (BETA = -0,09) mają najmniejszy wpływ na udział materiału rodzimego w napawaniu. Analizując obliczone poziomy istotności ( $p$ ) dla uzyskanych wartości testu t-Studenta, można zauważyć, że przyjmowały one wartości większe od przyjętego poziomu istotności ( $p = 0,05$ ). Z prawdopodobieństwem 95% można przyjąć, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej stwierdzającej, że oba te parametry napawania nie mają wpływu na wartość współczynnika  $D$ . Można zatem przyjąć, że wpływ zmiennych niezależnych  $U$  i  $z$  na wartość zmiennej zależnej jest nieistotny statystycznie.

Obliczony poziom istotności  $p < 0,01$  dla analizy wariancji, test  $F = 36,06$ , pozwala odrzucić hipotezę zerową, która mówi o braku statystycznego znaczenia przyjętych parametrów twardości na wartość współczynnika zmieszania. Istnieje prawie pełna korelacja  $R = 0,97$  pomiędzy zmiennymi niezależnymi a współczynnikiem  $D$  dla napoin uzyskanych metodą napawania plazmowego. Z kolei wartość współczynnika determinacji (dopasowania)  $R^2 = 0,91$  wskazuje, że 91% procent uzyskanych wartości zmiennej zależnej

$D$  jest opisanych modelem liniowym, w którym współczynniki regresji  $B$  przyjmują wartości przedstawione w tabelicy 2.

Z rys. 3, 4, 5 wynika, że istnieje nieliniowa zależność pomiędzy zmiennymi niezależnymi a badaną zmienną zależną. W związku z tym do predykcji zmiennej zależnej postanowiono zastosować wielomian drugiego stopnia uwzględniający interakcję pomiędzy zmiennymi niezależnymi. Zastosowany ogólny model matematyczny można przedstawić jako wzór (2):

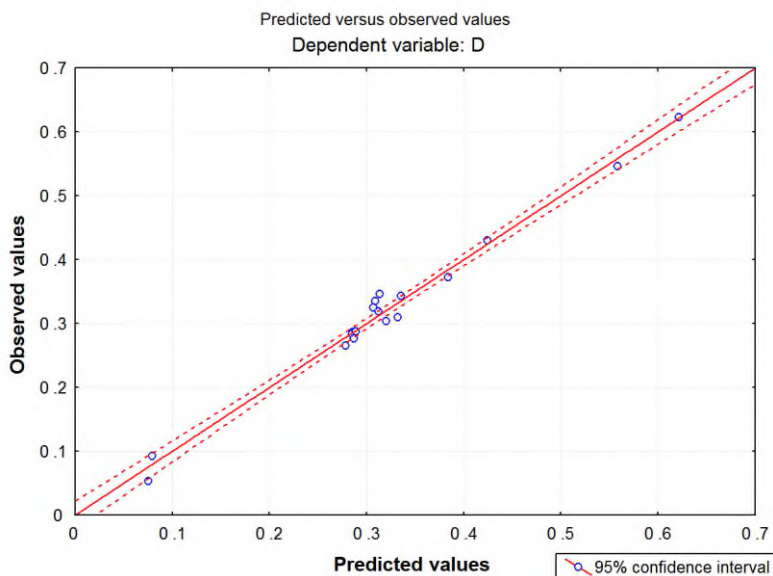
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (2)$$

Zgodnie z przyjętym modelem, gdyby wziąć pod uwagę wszystkie zmienne, powstałaby macierz  $18 \times 20$ . Aby obliczyć współczynnik regresji wielokrotnej, liczba kolumn musi być mniejsza od liczby wierszy macierzy. Dlatego do analizy modelu nieliniowego, zamiast oddzielnie analizowanych parametrów natężenia  $I$  i napięcia  $U$  łuku plazmowego, przyjęto jego energię ( $IU$ ) określoną w kJ. W celu wyznaczenia modelu matematycznego do predykcji współczynnika mieszania zastosowano analizę krokową regresji wielokrotnej. Analiza ta pozwala na wprowadzenie do modelu tylko tych zmiennych, predyktorów, które w sposób istotny przewidują zmienną zależną.

Do przewidywania ilości materiału podstawowego (składników stali C45) w napoinie otrzymanej z drutu spawalniczego CastoMag 45554S można zastosować następujące równanie regresji wielokrotnej, przedstawionej we wzorze (3):

$$D = 1,63 - 0,05v_n v_d - 0,17IU - 0,01IUz - 0,47v_d - 0,21v_n^2 + 0,06v_d^2 + 0,06(IU)^2 + 0,04z \pm 0,02 \quad (3)$$

Powyższe równanie jest adekwatne, a potwierdza to wynik testu F (test Fishera-Snedecora) równy 76,78. Obliczony poziom istotności dla tego testu F wyniósł  $p < 0,01$ . Zatem z prawdopodobieństwem 99% można stwierdzić, że równanie regresji wielokrotnej (3) jest poprawne. Z kolei wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,97$  informuje, że 97% uzyskanych wyników pomiarów współczynnika  $D$  jest opisanych równaniem (3). Na rys. 6 przedstawiono zależność pomiędzy obserwowanymi wartościami współczynnika mieszania a wartościami przewidywanymi.



**Rys. 6.** Zależność pomiędzy wartościami obserwowanymi współczynnika  $D$  a jego wartościami obliczonymi z równania

Optymalizację parametrów napawania przeprowadzono w oparciu o metodę Taguchi, polegającą na zmniejszeniu zmienności zmiennej zależnej w odpowiedzi na czynniki zakłócające, przy jednoczesnej jej maksymalizacji w odpowiedzi na zmianę wartości zmiennych niezależnych. Miarą zaproponowaną przez Taguchi jest stosunek  $S/N$ , który jest odwrotnie proporcjonalny do funkcji straty. Maksymalizacja tego współczynnika oznacza minimalizację strat przy jednoczesnej poprawie jakości. Ma to znaczący wpływ na określenie stopnia zużycia elementów części maszyn. W niniejszej pracy, jako kryterium optymalizacji, zastosowano jak najmniejszy udział materiału podstawowego (stal C45) w złożu wykonanym drutem CastoMag 45554S.

Współczynnik  $S/N$  obliczono ze wzoru (4):

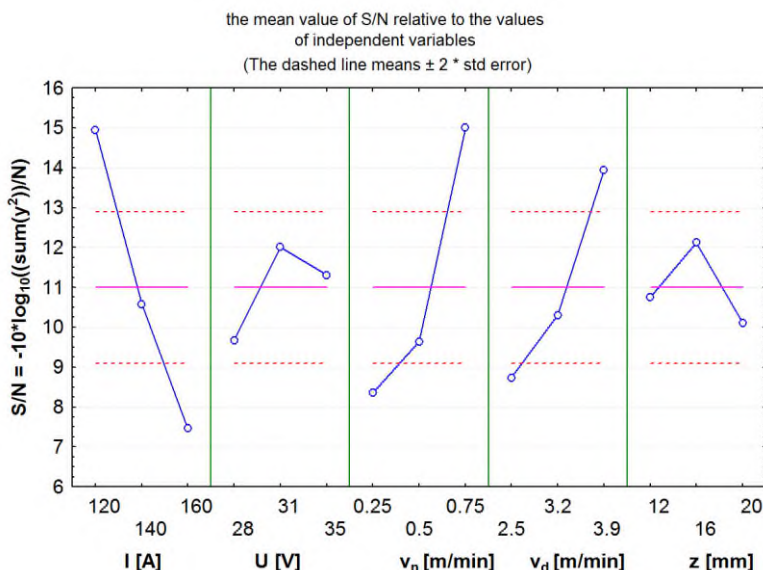
$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right] \quad (4)$$

gdzie:

$y$  – wartość mierzonej cechy,

$n$  – liczba pomiarów.

Średnie wartości współczynnika  $S/N$  dla poszczególnych parametrów napawania przedstawiono na rys. 7.



**Rys. 7.** Średnie wartości współczynnika  $S/N$  dla poszczególnych parametrów napawania

Wykładnikiem przeprowadzonej optymalizacji jest uzyskanie największej wartości stosunku  $S/N$ . Przy przyjętym kryterium optymalizacji proces napawania plazmowego stali C45 materiałem CastoMag 45554S z wykorzystaniem palnika Castolin Eutectic E52 i źródła prądu stałego Castolin Eutectic GAP 2501 należy przeprowadzić, stosując następujące parametry:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0,75$  m/min,  $v_d = 3,9$  m/min oraz  $z = 12$  mm.

## 4. Wnioski

Wyniki analizy wariancji wskazują, że wszystkie przyjęte parametry procesu napawania mają statystycznie istotny wpływ na wartość zmiennej zależnej, o czym świadczą wartości poziomu istotności  $p$ , które przyjmowały wartości mniejsze od założonych ( $p = 0,05$ ). Natężenie prądu ma największy wpływ na współczynnik mieszania oraz na udział materiału podłoża w złożu UMP.

Kryterium stosunku  $S/N$  – im mniejszy tym lepszy, pozwala na zminimalizowanie uszkodzeń elementów, co ma istotny wpływ na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji maszyn wyposażenia okrętowego.

Wyniki znormalizowanych współczynników regresji wielorakiej wykazały, że napięcie prądu łuku oraz odległość palnika od napawanej powierzchni mają najmniejszy wpływ na udział materiału podstawowego w napoinie. Można więc przyjąć, że ich wpływ jest statystycznie nieistotny.



Najmniejszy wpływ na UMP ma odległość dyszy od przedmiotu obrabianego. Jako kryterium optymalizacji przyjęto najmniejszą wartość współczynnika mieszania. Metodą Taguchi wykazano, że uzyskanie największej wartości stosunku  $S/N$  przy założonym kryterium optymalizacji jest możliwe przy zastosowaniu następujących parametrów:  $I = 120$  A,  $U = 31$  V,  $v_n = 0,75$  m/min,  $v_d = 3,9$  m/min oraz  $z = 12$  mm.

## 5. Literatura

1. Bober M., Tobota K.: Study significance of the impact of the basic parameters of plasma surfacing on the geometry of the weld overlays. *Welding Technology Review*, Vol.87, No. 9, 2015, DOI 10.26628/wtr.v87i9.446.
2. Henzler W., Sawa M., Trębicki P., Szala M., Winiarski G.: Influence of austenitic interlayer on the properties of stellite padding welds after impact-hardening. *Welding Technology Review*, Vol. 93, No. 2, 2021, DOI 10.26628/wtr.v93i2.1134.
3. Kik T., Górka J., Czupryński A., Martyniszyn A.: Napawanie krawędzi przedmiotów metodami TIG i PTA. *Przegląd Spawalnictwa*, No. 9, 2011.
4. Klimpel A.: *Technologie laserowe*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
5. Klimpel A.: *Technologie laserowe w spawalnictwie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
6. Klimpel A.: *Hardfacing and thermal spraying. Technologies*. Publishing WNT, Warsaw 2000.
7. Legutko S.: *Eksploatacja maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
8. Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
9. Madej E., Wrotkowski J.: *Regeneracja części spawaniem i napawaniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
10. Nowak B., Kostrzewa S.: *Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
11. Szymura M., Czupryński A., Różański M.: Research on the properties of high chromium cast iron overlay welds deposited by tubular electrodes. *Welding Technology Review*, Vol. 90, No. 10, 2018, DOI 10.26628/wtr.v90i10.963.

