

Tadeusz Bobko, Piotr Całusiński

MODELOWANIE RACJONALNYCH POWIĄZAŃ POMIĘDZY PARAMETRAMI INŻYNIERII PROCESOWEJ W PRODUKCJI ENERGOOSZCZĘDNYCH ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

Wprowadzenie

Wybór racjonalnych wariantów produkcji energooszczędnych elementów budowlanych polega na określeniu kształtu funkcji celu, w której należy uwzględnić np.: minimalne nakłady finansowe i minimalne wartości zużywanej energii w procesie produkcyjnym, planowaniu eksperymentu, ustaleniu i ukształtowaniu wartości potencjału energetycznego. Bilans energii w procesach fizykomechanicznych opiera się na *prawie zachowania energii*. Energią nazywamy pracę nagromadzoną w dowolnym elemencie budowlanym podczas realizacji procesów wydobywczych, prefabrykacyjnych i budowlano - montażowych. Energią nazywamy pracę, która może być wykonana w wyniku transportu materiału i elementu budynku.

Projektowanie w inżynierii procesowej budowlanej związanej z energooszczędną technologią mechanicznych procesów bazuje na prawidłowościach przekształcenia energii fizykomechanicznej, zużywanej podczas prefabrykacji elementów konstrukcyjnych metalowych, niezbędnych przy wznoszeniu obiektów budowlanych, ich montażu, eksploatacji i likwidacji w czasie trwania „wieku technicznego”.

W tabeli 1.[1] zamieszczono wartości energii pierwotnej wybranych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych budowlanych, gdzie odnotowano wysoki poziom od 561 kWh/szt. w słupach o wysokości $h = 3$ m i nośności 20 kN z dwuteowników stalowych, do 8419 kWh/t energii pierwotnej wyrobów ze stali budowlanej zbrojeniowej. Energochłonność podstawowych rozwiązań materiałowo -konstrukcyjnych ściennych wynosi od 444 do 3149 kWh/m³.

Projektowanie organizacyjno-technologiczne wymaga również opracowania stosownych modeli matematycznych, obejmujących całokształt współzależności pomiędzy wskaźnikami, za pomocą których staje się możliwe adekwatne opisanie stanu i prawidłowości przebiegu procesu. Istotne jest określenie i dotrzymanie, podczas obliczeń wartości funkcji celu za pomocą programów komputerowych,

warunków brzegowych i przedziałów istnienia wartości czynników, stosowanych do odwzorowania modelu matematycznego.

Optymalizacja wzajemnych powiązań pomiędzy decydującymi czynnikami natury fizykomechanicznej, ciepłno-fizycznej i ekonomicznej, za pomocą zależności pomiędzy wartościami liczbowymi ich parametrów, przy uwzględnieniu wielorakości ruchów elementarnych i roboczych, procesów prostych i złożonych, występujących przy wznoszeniu budowli, prowadzi do wyznaczenia funkcji celu oraz określenia warunków granicznych [1]. Funkcją celu jest energia (potencjał energetyczny procesu), niezbędna, wystarczająca i optymalna w projektowanych warunkach ilość energii mechanicznej. Na wartość całkową energii składa się wartość energii pierwotnej oraz wartość energii akumulowanej, nagromadzonej w procesie produkcji i montażu elementu konstrukcyjnego. Celem modelowania jest opracowanie adekwatnych modeli matematycznych, stanowiących podstawę do optymalizacji powiązań wzajemnych między parametrami procesów produkcyjnych oraz tworzenie możliwości do projektowania energooszczędnych procesów produkcyjnych.

1. Teoretyczne podstawy projektowania parametrów energooszczędnych procesów fizykomechanicznych stosowanych w produkcji elementów stalowych

Równanie bilansu energetycznego dla procesów fizykomechanicznych można określić jako

$$\varepsilon P = k N t \quad (1)$$

przy wartości jednostkowej energochłonności ε , określanej za pomocą wzoru

$$\varepsilon = \frac{W\delta}{P} \quad (2)$$

gdzie:

N - moc zainstalowana [kW];

ε - energochłonność jednostkowa [kWh/m³];

P - ilość produkcji lub materiału przerabianego [m³, m², m.b., kg];

W - całkowita siła oporu materiału ciała [N];

t - czas trwania procesu produkcyjnego [h];

k - współczynnik sprawności maszyny lub współczynnik sprawności procesu;

εP - energochłonność materiału (procesu prostego) [kWh/kg lub kWh/m³];

kN - moc efektywna [kW].

Współczynnik sprawności maszyny lub procesu obróbki można określić jako:

$$k = k_o \cdot \alpha \cdot \eta \quad (3)$$

przy

$$k_0 = t_p/t_0 \quad (4)$$

gdzie:

k_0 - współczynnik czasu pracy efektywnej;

t_0 - czas pracy efektywnej [min];

t_p - czas pracy ogółem [min];

α - współczynnik przekazu energii od źródła energetycznego do roboczego elementu maszyny,

η - współczynnik przekazu energii od roboczego elementu maszyny na ciało obrabiane.

Wtedy gdy przekazana moc efektywna αN wywołuje siłę T i prędkość V , to narzędzie oddziałuje na ciało z mocą

$$\alpha N = TV \quad (5)$$

a współczynnik przekazu energii od źródła energetycznego do roboczego elementu maszyny określamy za pomocą wzoru

$$\alpha = \frac{TV}{N} \quad (6)$$

Współczynnik przekazu energii w strefie wzajemnego oddziaływania elementu roboczego i materiału przerabianego, gdzie siła T działa na drodze S pod kątem α , a siła skuteczna oporu $W \cdot \cos \alpha$ działa w kierunku ruchu na odcinku δ , określamy jako

$$\eta = (W \times \cos \alpha \times \delta) / T \times S \quad (7)$$

Wydajność procesu odzwierciedla zmiany ilości produkcji w dP w czasie dt i jest pierwszą pochodną P' równania (1)

$$P' = \frac{dP}{dt} = \frac{kN}{\varepsilon} \quad (8)$$

W przypadkach produkcji za pomocą maszyn obrotowych wydajność procesu określa się za pomocą wzoru

$$P' = \frac{kN}{\varepsilon} = \frac{\pi d n}{1000} \quad (9)$$

gdzie:

d - średnica powierzchni cylindrycznych obrabianych za pomocą maszyn obrotowych [mm];

n - prędkość obrotowa [obr/min].

Druga pochodna $d^2 P/d t^2$ równania (1) określa *poziom techniczny maszyny*

$$P'' = \frac{k}{\varepsilon} \quad (10)$$

Na wartość całkowitej mocy czynnej w przypadku procesów produkcyjnych realizowanych za pomocą maszyn do skrawania składa się moc skrawania i moc posuwu [3]

$$N_e = N_c + N_f \quad (11)$$

które można określić ze wzorów

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60000} \quad (12)$$

$$N_f = F_f \cdot V_f \quad (13)$$

gdzie:

N_e - moc czynna [kW];

N_c - moc skrawania [kW];

N_f - moc posuwu [kW];

F_c - siła skrawania [N];

V_c - prędkość skrawania [m/min];

F_f - siła posuwu [N];

V_f - prędkość posuwu [m/min].

Całkowita wartość energii w procesach produkcyjnych natury fizykomechanicznej, przenikającej do materiału (obrabiany przedmiot i narzędzia) i odprowadzanej, zbędnej w procesie technologicznym, określana jako $\sum(N_e + Q_e) \cdot t$ (kJ). Zakładając, iż 1 kWh = 3600 kJ, ujednoczenie jednostek pomiaru nie sprawia trudności.

Równanie bilansu energetycznego procesów fizykomechanicznych (1) przy zastosowaniu maszyn obrotowych przyjmuje postać

$$\int_0^p \varepsilon dP = \int_0^t k(N + Q_e) dt \quad (14)$$

2. Opracowanie modeli matematycznych do wyboru racjonalnych wariantów procesu produkcji elementów metalowych

2.1. Założenia i modelowanie procesu produkcyjnego

Budowa drzewa celów [2] polega na określeniu odpowiednich ilości czynników i zmiennych - grup wskaźników fizykochemicznych, inżynierii procesowej i organizacyjnej, ekonomicznych i energetycznych, opisywanych za pomocą wartości, które mają istotny wpływ na kształt i wartość funkcji celu oraz na ustalenie gra-

nicznych warunków zmian tej że funkcji. Funkcje celu w omawianych układach występują jako: skrócenie czasu produkcji, optymalne zapotrzebowanie na energię; optymalne wartości kosztów własnych, zysk.

Rozpatrzono energochłonność procesu produkcji łączników stalowych przy zadanym parametrze, którym jest głębokość skrawania równa 1,0 mm. W tabeli 1 przedstawiono dane z badań analitycznych procesu produkcji elementów stalowych za pomocą narzędzi W_1 , W_2 , W_3 , takie jak:

- czas trwania zmiany 7 h;
- a_p - głębokość obróbki metalu [mm];
- f - prędkość posuwu [mm/obr];
- V - prędkość obróbki [m/min];
- P - ciężar materiału usuwanego w jednostce czasu [kg/zm];
- E_{w1} - energochłonność procesu W_1 [kWh/zm].

Celem opracowania modeli matematycznych jest ustalenie typu, kształtu i prawidłowości zmian wartości funkcji:

1. $E_{w1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1$ mm, $V = 250$ m/min;
2. $E_{w1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1$ mm, $V = 300$ m/min;
3. Warunki graniczne przy tym: $a_p = 1$ mm; $f = 0,1 \dots 0,5$ mm/obr; $V = 250 \dots 300$ m/min; $P = 83 \dots 497,7$ kg/zm; $E_{w1} = 10,5 \dots 37,8$ kWh/zm.

Określenie prawidłowości zmian energochłonności i kosztu energii procesu produkcyjnego pod wpływem zmian wartości wskaźników fizykomechanicznych i organizacyjno-technologicznych wykonano za pomocą rotatabilnego planowania eksperymentu i autorskich programów komputerowych PR_10_2. PR_11_2.

Budowanie adekwatnych modeli matematycznych (2,3), wyprowadzonych w oparciu o znane funkcje matematyczne, stosowane w procesie aproksymacji, $Y_{po} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ i $Y_{po} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4$, umożliwi nie tylko racjonalne rozwiązanie procesu produkcji, lecz także pozyskiwanie optymalnych wartości parametrów rozpatrywanych procesów.

2.2. Opracowanie modelu zależności ilości zużywanej energii $y = f(x_1, x_2)$ podczas produkcji elementu konstrukcyjnego zapewniającej racjonalne straty energii cieplnej przy $a_p = 1$ mm, i $V = 250$ m/min

W celu aproksymacji doświadczalnych i obliczanych danych stosowano wielomian drugiego stopnia w postaci $Y_{po} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$. Model matematyczny opracowano za pomocą programu PR_10_2 [1].

TABELA 2

**Kodowanie i poziomy zmienności czynników zależności $E_{w1} = F(f, P)$
przy warunkach granicznych $a_p = 1\text{mm}$, $i V = 250\text{ m/min}$**

Lp	Czynniki	Poziomy zmienności					Wariancja
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
0	1	2	3	4	5	6	7
1	f – prędkość posuwu [mm/obr], x_1	0,08	0,1	0,3	0,5	0,58	0,2
2	P- ciężar usuwanej stali, [kg/zm] x_2	2,9	83	290,4	414,8	468	207,4

TABELA 3

**Planowanie i realizacja doświadczeń zależności $E_{w1} = F(f, P)$
przy warunkach granicznych $a_p = 1\text{mm}$, $i V = 250\text{ m/min}$**

Lp	Macierze				Wartości zużywanej energii			
	Planowana		Robocza		1		2	
			f	P	E_{w1} [kWh]		E_{w1} [kWh]	
	X_1	X_2	[mm/obr]	[kg/zm]	Y_p		Y_1	Y_2
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	0.5	414.8	40,3		40,4	40,2
2	-	+	0.1	414.8	21,6		21,7	21,5
3	+	-	0.5	83.0	9,7		9,6	9,8
4	-	-	0.1	83.0	11,4		11,5	11,3
5	-1.414	+	0.08	414.8	20,8		20,7	20,9
6	+1.414	+	0.58	414.8	32,9		33	32,8
7	0	-1.414	0.3	2,9	0,2		0,1	0,3
8	0	+1.414	0.3	468	29,1		29	29,2
9	0	0	0.3	290,4	24,7		24,8	24,6
10	0	0	0.3	290,4	24,7		24,82	24,63
11	0	0	0.3	290,4	24,7		24,61	24,82
12	0	0	0.3	290,4	24,7		24,6	24,8
13	0	0	0.3	290,4	24,7		24,84	24,62

Charakterystyki modelu matematycznego (2)

Opracowanie modelu zależności wpływu wielkości posuwu f i ciężaru usuwanej stali P elementu konstrukcyjnego, zapewniającego racjonalne straty energii, oparte zostało na metodzie rotabilnego planowania eksperymentu i aproksymacji eksperymentalnych danych wielomianem drugiego stopnia

$$Y_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

1. Dane wyjściowe do określenia wartości współczynników równania regresji:

1.1 $E_{w1} = F(f,P)$, gdzie wartości zużywanej energii E_{w1} określono doświadczalnie za pomocą planowania eksperymentu (patrz tab. 3, kolumna 7 i 8).

1.2 $Y_p = F(x_1, x_2)$

X[i]: $x_1 = f$, mm/obr; $x_2 = P$, kg/zm; $Y_p[i]$ - E_{w1} , kWh;

$t_0 = 0,30$; $m_0 = 290,40$; $w_1 = 0,20$; $w_2 = 207,40$.

2. Analiza pomyłek pomiarów i jednorodności dyspersji

Dyspersja jednego doświadczenia: $\max c_2 = 0.022$.

Średnia kw. pomyłka jednego doświadczenia, $\max c = 0.148$.

Kontrola jednorodności dyspersji jednego doświadczenia:

współczynnik Kochrena [$g_0 = < 0.68$] $g_0 = 0.092$;

Stopień swobody mniejszej dyspersji $f_1 = 4.00$;

Dyspersja eksperymentu $z_2 = 0.003$;

Średnia kwadratowa pomyłka eksperymentu $z_0 = 0.055$.

2.1 Średnie wartości danych doświadczalnych (Y_p) i dane obliczane (Y_o):

Y_p	Y_o	$(Y_p - Y_o)^2$
40.3000	40.2854	0.0002
21.6000	21.5581	0.0018
9.7000	9.6693	0.0009
11.4000	11.3419	0.0034
20.8000	20.7824	0.0003
32.9000	32.8400	0.0036
0.2000	0.1844	0.0002
29.1000	29.0528	0.0022
24.7000	24.7390	0.0015
24.7250	24.7390	0.0002
24.7150	24.7390	0.0006
24.7000	24.7390	0.0015
24.8300	24.7390	0.0083
289.6700	289.4093	0.0248

Stopień swobody większej dyspersji, $f_2 = 3.0000$.

Wartość funkcji Fiszera (F), $F = 1.4249$.

Współczynnik korelacji, $R = 0.999982$.

Dokładność wzoru, $d = 0.004$.

Średnie resztkowe pozostałości sost. = 0.059.

3. Obliczanie gładkości funkcji

3.1. Średnia krzywizna w punkcie:

-0.4706 -0.4706 0.0301 0.0301 -0.1004 -0.1004 0.0396 -0.3960 -0.1004 -0.1004
-0.1004 -0.1004 -0.1004

-0.0857 -0.0857 0.1118 0.1118 -0.3240 -0.3240 0.0934 0.0339 -0.3240 -0.3240
-0.3240 -0.3240 -0.3240
-0.4706 -0.4706 0.0301 0.0301 -0.1004 -0.1004 0.0396 -0.3960 -0.1004 -0.1004
-0.1004 -0.1004 -0.1004
-0.0857 -0.0857 0.1118 0.1118 -0.3240 -0.3240 0.0934 0.0339 -0.3240 -0.3240
-0.3240 -0.3240 -0.3240
0.0811 0.0811 0.1383 0.1383 -0.5973 -0.5973 0.1060 0.0879 -0.5973 -0.5973 -
0.5973 -0.5973 -0.5973
-0.3980 -0.3980 0.0221 0.0221 -0.0879 -0.0879 0.0326 -0.3949 -0.0879 -0.0879
-0.0879 -0.0879 -0.0879
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532
-0.5410 -0.5410 0.0600 0.0600 -0.1532 -0.1532 0.0625 -0.2257 -0.1532 -0.1532
-0.1532 -0.1532 -0.1532

Krzywizna minimalna o wartości -0.597300

Średnia wartość krzywizny -0.169942

3.2. Krzywizna zupełna Gaussa w punkcie:

-0.001435 -0.001435 -0.000086 -0.000086 -0.000476 -0.000476 -0.000047
-0.001050 -0.000476 -0.000476 -0.000476 -0.000476 -0.000476
-0.005744 -0.005744 -0.000620 -0.000620 -0.035525 -0.035525 -0.000222
-0.001191 -0.035525 -0.035525 -0.035525 -0.035525 -0.035525
-0.001435 -0.001435 -0.000086 -0.000086 -0.000476 -0.000476 -0.000047
-0.001050 -0.000476 -0.000476 -0.000476 -0.000476 -0.000476
-0.005744 -0.005744 -0.000620 -0.000620 -0.035525 -0.035525 -0.000222
-0.001191 -0.035525 -0.035525 -0.035525 -0.035525 -0.035525
-0.004162 -0.004162 -0.001030 -0.001030 -0.261442 -0.261442 -0.000322
-0.000885 -0.261442 -0.261442 -0.261442 -0.261442 -0.261442
-0.000857 -0.000857 -0.000062 -0.000062 -0.000285 -0.000285 -0.000036
-0.000759 -0.000285 -0.000285 -0.000285 -0.000285 -0.000285
-0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
-0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374
-0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
-0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374

-0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
 -0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374
 -0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
 -0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374
 -0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
 -0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374
 -0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
 -0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374
 -0.004594 -0.004594 -0.000210 -0.000210 -0.002374 -0.002374 -0.000097
 -0.001616 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374 -0.002374

Krzywizna minimalna o wartości -0.261442

Średnia wartość krzywizny -0.015281.

4. Równanie regresji wg kodowanych zmiennych

$$Y_p0 = b + b1 * (t4 - t0) / w1 + b2 * (m - m0) / w2 + b12 * (t4 - t0) * (m - m0) / (w1 * w2) + b11 * ((t4 - t0) / w1)^2 + b22 * ((m - m0) / w2)^2$$

Współczynniki regresji o wartościach kodowanych:

b = 24.739

b1 = 4.264

b2 = 10.208

b12 = 5.100

b11 = 1.036

b22 = -5.06175

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

4.1. Równanie regresji wg zmiennych rzeczywistych

$$Y_{p01} = b01 + b101 * X_1 + b201 * X_2 + b1201 * X_1 * X_2 + b1101 * X_1^2 + b2201 * X_2^2$$

gdzie: $X_1 = f$; $X_2 = P$; $Y_{p01} = E_{w1}$;

Współczynniki regresji o wartościach rzeczywistych:

b01 = 7.170

b101 = -29.933

b201 = 0.081

b1201 = 0.123

b1101 = 25.910

b2201 = -0.00012

Równanie regresji dla rzeczywistych współrzędnych przedstawiono w postaci wielomianu drugiego stopnia

$$E_{w1} = 7,17 - 29,933 f + 0,081 P + 0,123 f P + 25,91 f^2 - 0,00012 P^2 \quad (2)$$

2.3. Opracowanie modelu zależności ilości $y = f(x_1, x_2)$ zużywanej energii podczas produkcji elementu konstrukcyjnego zapewniającej racjonalne straty energii przy $a_p = 1$ mm, i $V=300$ m/min

TABELA 4

Kodowanie i poziomy zmienności czynników zależności $E_{w1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p=1$ mm, i $V=300$ m/min

Lp	Czynniki	Poziomy zmienności					Wariancja
		-1.414	-1	0	+1	+1.414	
0	1	2	3	4	5	6	7
1	f – prędkość posuwu [mm/obr], x_1	0,08	0,1	0,3	0,5	0,58	0,2
2	P- ciężar usuwanej stali, [kg/zm] x_2	17,07	99,5	298,6	497,7	580,14	191,1

TABELA 4

Planowanie i realizacja procesu określonego zależnością $E_{w1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p=1$ mm, i $V=300$ m/min

Lp	Macierze				Wartości zużywanej energii			
	Planowana		Robocza		1		2	
			f	P	E_{w1} [kWh]		E_{w1} [kWh]	
	X_1	X_2	[mm/obr]	[kg/zm]	Y_p		Y_1	Y_2
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	0,5	497,7	45,8		45,9	45,7
2	-	+	0,1	497,7	25,5		25,4	25,6
3	+	-	0,5	99,5	10,1		10	10,2
4	-	-	0,1	99,5	12,3		12,4	12,2
5	-1.414	+	0,08	497,7	22,4		22,3	22,5
6	+1.414	+	0,58	497,7	35,2		35,1	35,3
7	0	-1.414	0,3	17,07	0,8		0,9	0,7
8	0	+1.414	0,3	580,14	35,4		35,3	35,5
9	0	0	0,3	298,6	23,8		23,7	23,9
10	0	0	0,3	298,6	23,8		23,7	23,9
11	0	0	0,3	298,6	23,8		23,9	23,7
12	0	0	0,3	298,6	23,8		23,9	23,7
13	0	0	0,3	298,6	23,8		23,9	23,7

Charakterystyki modelu matematycznego (3)

Opracowanie modelu zależności wpływu wielkości prędkości posuwu f i ciężaru usuwanej stali P elementu konstrukcyjnego, zapewniającego racjonalne straty

energii, oparte zostało na metodzie rotatabilnego planowania eksperymentu i aproksymacji eksperymentalnych danych wielomianem drugiego stopnia

$$Y_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

1. Dane wyjściowe do określenia wartości współczynników regresji równania :

1.1 $E_{w1} = F(f,P)$, gdzie wartości energii zużywanej E_{w1} określono doświadczalnie za pomocą planowania eksperymentu (patrz tab. 5, kolumny 7 i 8).

1.2 $Y_p = F(x_1,x_2)$

X[i]: $x_1 = f$, mm/obr; $x_2 = P$, kg/zm.; $Y_p[i]$ - E_{w1} , kWh;

$t_0 = 0,30$; $m_0 = 298.6$; $w_1 = 0.2$; $w_2 = 191.1$ (patrz tab. 4).

2. Analiza pomyłek pomiarów i jednorodności dyspersji:

Dyspersja jednego doświadczenia, $\max c^2 = 0.022$;

Średnia kwadratowa pomyłka jednego doświadczenia, $\max c = 0.148$

Kontrola jednorodności dyspersji jednego doświadczenia:

Współczynnik Kochrena, [$g_0 \leq 0.68$], $g_0 = 0.085$;

Stopień swobody mniejszej dyspersji, $f_1 = 4.00$;

Dyspersja eksperymentu, $z^2y = 0.0001$;

Średnia kwadratowa pomyłka eksperymentu $z_0 = 0.0111$.

2.1 Średnie wartości danych doświadczalnych (Y_p) i dane obliczane (Y_o):

Y_p	Y_o	$(Y_p - Y_o)^2$
45.8000	45.7744	0.0007
25.5000	25.4746	0.0006
10.1000	10.0683	0.0010
12.3000	12.2685	0.0010
22.4000	22.3451	0.0030
35.2000	35.1416	0.0034
0.8000	0.7594	0.0017
35.4000	35.3403	0.0036
23.8000	23.8167	0.0003
23.8150	23.8167	0.0000
23.8150	23.8167	0.0000
23.8250	23.8167	0.0001
23.8000	23.8167	0.0003
306.5550	306.2555	0.0156

Stopień swobody większej dyspersji $f_2 = 3,0$.

Wartość funkcji Fiszera (F) $F = 42,8204$.

Współczynnik korelacji $R = 0,999991$.

Dokładność wzoru $d = 0,002$.

Średnie resztkowe pozostałości $sost = 0,047$.

3. Obliczanie gładkości funkcji

3.1. Średnia krzywizna w punkcie :

-0.1824 -0.1824 0.0599 0.0599 -0.0510 -0.0510 0.0813 -0.2005 -0.0510 -0.0510
-0.0510 -0.0510 -0.0510
-0.6535 -0.6535 0.2632 0.2632 0.4058 0.4058 0.2097 -0.1978 0.4058 0.4058
0.4058 0.4058 0.4058
-0.1824 -0.1824 0.0599 0.0599 -0.0510 -0.0510 0.0813 -0.2005 -0.0510 -0.0510
-0.0510 -0.0510 -0.0510
-0.6535 -0.6535 0.2632 0.2632 0.4058 0.4058 0.2097 -0.1978 0.4058 0.4058
0.4058 0.4058 0.4058
0.0539 0.0539 0.2392 0.2392 0.6792 0.6792 0.1859 0.2196 0.6792 0.6792
0.6792 0.6792 0.6792
-0.1532 -0.1532 0.0372 0.0372 -0.0543 -0.0543 0.0591 -0.1710 -0.0543 -0.0543
-0.0543 -0.0543 -0.0543
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010
-0.3203 -0.3203 0.1538 0.1538 -0.0010 -0.0010 0.1560 -0.3044 -0.0010 -0.0010
-0.0010 -0.0010 -0.0010

Krzywizna minimalna o wartości $-0,653491$;

Średnia wartość krzywizny $0,025462$.

3.2. Krzywizna zupełna Gaussa w punkcie :

-0.000267 -0.000267 -0.000114 -0.000114 -0.000224 -0.000224 -0.000081
-0.000236 -0.000224 -0.000224 -0.000224 -0.000224 -0.000224
-0.044597 -0.044597 -0.001032 -0.001032 -0.018670 -0.018670 -0.000449
-0.010246 -0.018670 -0.018670 -0.018670 -0.018670 -0.018670
-0.000267 -0.000267 -0.000114 -0.000114 -0.000224 -0.000224 -0.000081
-0.000236 -0.000224 -0.000224 -0.000224 -0.000224 -0.000224
-0.044597 -0.044597 -0.001032 -0.001032 -0.018670 -0.018670 -0.000449
-0.010246 -0.018670 -0.018670 -0.018670 -0.018670 -0.018670
-0.209760 -0.209760 -0.001342 -0.001342 -0.058719 -0.058719 -0.000538
-0.017349 -0.058719 -0.058719 -0.058719 -0.058719 -0.058719
-0.000149 -0.000149 -0.000074 -0.000074 -0.000128 -0.000128 -0.000056
-0.000136 -0.000128 -0.000128 -0.000128 -0.000128 -0.000128
-0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
-0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279

-0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
 -0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279
 -0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
 -0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279
 -0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
 -0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279
 -0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
 -0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279
 -0.001761 -0.001761 -0.000352 -0.000352 -0.001279 -0.001279 -0.000204
 -0.001246 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279 -0.001279

Krzywizna minimalna o wartości -0,209760

Średnia wartość krzywizny -0,008436

4. Równanie regresji wg kodowanych zmiennych

$$Y_{p0} = b + b1 \cdot (t4 - t0) / w1 + b2 \cdot (m - m0) / w2 + b12 \cdot (t4 - t0) \cdot (m - m0) / (w1 \cdot w2) + b11 \cdot ((t4 - t0) / w1)^2 + b22 \cdot ((m - m0) / w2)^2$$

Współczynniki regresji o wartościach kodowanych:

$$b = 23.817$$

$$b1 = 4.525$$

$$b2 = 12.228$$

$$b12 = 5.625$$

$$b11 = 2.464$$

$$b22 = -2.88429$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

4.1. Równanie regresji wg zmiennych rzeczywistych

$$Y_{p01} = b01 + b101 \cdot X1 + b201 \cdot X2 + b1201 \cdot X1 \cdot X2 + b1101 \cdot X1^2 + b2201 \cdot X2^2$$

gdzie: $X1 = f$; $X2 = P$; $Y_{p01} = E_{w1}$;

Współczynniki regresji o wartościach autentycznych:

$$b01 = 9.609$$

$$b101 = -58.283$$

$$b201 = 0.067$$

$$b1201 = 0.147$$

$$b1101 = 61.602$$

$$b2201 = -0.00008$$

Równanie regresji dla rzeczywistych współrzędnych przedstawiono w postaci wielomianu drugiego stopnia

$$E_{w1} = 9,609 - 58,283 f + 0,067 P + 0,147 f P + 61,602 f^2 - 0,00008 P^2 \quad (3)$$

Podsumowanie

1. Wyboru optymalnego rozwiązania należy dokonać na podstawie porównania energochłonności i kosztu produkcji z wariantu W_1 , dla którego określono energochłonność procesu produkcji elementów stalowych gatunku 325 (tab.1). Korzystano z narzędzi odpowiednio: CNMG 120408 GN 8150 Iscar przy w warunkach granicznych $a_p = 1$ mm, i $V = 250$ i 300 m/min ;
2. Opracowano adekwatne modele matematyczne (2,3), wyprowadzone w oparciu o znane funkcje matematyczne, stosowane w procesie aproksymacji,
 $Y_{po} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$
i $Y_{po} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4$. Umożliwi to nie tylko racjonalne rozwiązanie procesu produkcji, lecz także uzyskanie optymalnych wartości parametrów w rozpatrywanych procesach.
3. Za kryterium optymalizacji funkcji celu przyjęto minimalną wartość energii całkowitej zużywanej w ciągu zmiany roboczej oraz koszt nakładów energii.
4. Przedstawiono propozycję metody wyboru racjonalnych wariantów produkcji elementów konstrukcji stalowych w oparciu o kryterium minimalnego zużycia energii całkowitej i kosztu energii zużywanej.
5. Opracowane modele matematyczne (2,3) przydatne są do optymalizacji powiązań w procesie matematycznego modelowania rozwiązań projektowych i produkcyjnych.
6. Metodę optymalizacyjną autorzy przedstawiają w kolejnych publikacjach.

Literatura

- [1] Bobko T., Całusiński : Modelowanie energooszczędnej technologii produkcji elementów konstrukcji budowanych metalowych o zadanych parametrach,[w:] Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, praca zbiorowa pod redakcją T. Bobki i J. Rajczyka. Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa. 2011, 9-24.
- [2] Bobko T.: Optymalizacja potencjału energetycznego tężenia mieszanki betonowej w aspekcie zapewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i elementów konstrukcyjnych, Monografia nr 47 - Częstochowa 1997.
- [3] Jaroszew D.: Problemy mechanizacji kompleksowej i metoda energetyczna. Moskwa 1994.

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycje metody wyboru racjonalnych wariantów produkcji elementów konstrukcji stalowych w oparciu o kryterium minimalnego zużycia energii całkowitej i kosztu tej energii. Zaprezentowano modele matematyczne do wyboru racjonalnych wariantów procesu produkcji elementów metalowych.

Słowa kluczowe: energooszczędne procesy fizykomechaniczne, budowlane elementy stalowe, modelowanie procesu produkcyjnego.

A method of modeling parameters of energy-efficient production in metal constructions

Abstract

.This paper proposes a method of choice of rational variants of energy-efficient building components production based on the criterion of minimum total energy consumption and cost of energy used. There have been presented mathematical models for selection of rational variants of metal elements production process.

Keywords: method of modeling parameters, energy-efficient building components.