

Tadeusz BOBKO
Politechnika Częstochowska

Piotr CAŁUSIŃSKI
Częstochowa

WYBÓR RACJONALNYCH WARIANTÓW PRODUKCJI ENERGOOSZCZĘDNYCH ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

W artykule przedstawiono propozycję metody wyboru racjonalnych wariantów produkcji elementów konstrukcji stalowych w oparciu o kryterium minimalnego zużycia energii całkowitej i kosztu energii zużywanej. Za kryterium optymalizacji funkcji celu przyjęto minimalną wartość energii całkowitej zużywanej w ciągu zmiany roboczej oraz koszt nakładów energii.

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

WPROWADZENIE

Wybór racjonalnych wariantów produkcji energooszczędnych elementów budowlanych polega na wyznaczeniu funkcji celu, w której należy uwzględnić np.: minimalne nakłady finansowe i minimalne wartości zużywanej energii w procesie produkcyjnym, planowanie eksperymentu, ustalenie oraz ukształtowanie wartości potencjału energetycznego. Bilansowanie 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.

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

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 powiązań wzajemnych pomiędzy decydującymi czynnikami natury fizykomechanicznej, cieplno-fizycznej i ekonomicznej, za pomocą powiązań wzajemnych pomiędzy wartościami liczbowymi ich parametrów, przy uwzględnieniu wielorakości ruchów elementarnych i roboczych oraz procesów prostych i złożonych, występujących przy wznoszeniu budowli, przewiduje wyznaczenie funkcji celu oraz określenie warunków granicznych [1]. Funkcją celu jest energia, potencjał energetyczny procesu - tzn. niezbędna, wystarczająca i optymalna w projektowanych warunkach ilość energii mechanicznej. Na wartość całkowitą 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 określanej za pomocą wzoru

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

gdzie:

N - moc zainstalowana, kW;

ε - energochłonność jednostkowa, kWh/m³, lub (kWh/m², kWh/m.b., kWh/kg);

P - ilość produkcji lub materiału obrabianego, 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;

$k N$ - moc efektywna, kW.

Współczynnik sprawności maszyny lub procesu obróbki można określić jako

$$k = k_0 \alpha \eta \quad (3)$$

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 organu maszyny;

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

Wtedy gdy przekazana moc efektywna αN tworzy (powoduje) wysiłek T i prędkość V , to narzędzie oddziałuje na ciało z mocą

$$\alpha N = T V \quad (5)$$

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

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

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 wykonania 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, ob/min.

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

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

Na wartość całkowitej mocy czynnej w przypadku wykonywania procesów produkcyjnych 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 narzędzi) i odprowadzanej, zbędnej w procesie technologicznym, określana jako $\sum(N_e + Q_e) \cdot t$ (kJ). Zakładając, iż 1 kWh = 3600 kJ, ujednolicenie jednostek pomiaru nie sprawia trudności.

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

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

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 organiza-

cyjnej, ekonomicznych i energetycznych, opisywanych za pomocą wartości, które mają istotny wpływ na kształt funkcji celu, oraz na ustalenie granicznych warunków zmian tejsze 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;
- C_{W1} - koszt zużywanej energii, (taryfa C-11 TAURON), w ciągu jednej zmiany, zł/kWh.

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, $V = 150$ m/min;
2. $E_{W1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1$ mm, $V = 200$ m/min;
3. $C_{W1} = F(P, f, V, E_{W1})$ przy $a_p = 1$ mm. Warunki graniczne przy tym: $a_p = 1$ mm; $f = 0,1 \div 0,5$ mm/obr.; $V = 150$ m/min; $P = 48 \div 248$ kg/zm; $E_{W1} = 2,4 \div 22$ zł/zm.

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

Budowanie adekwatnych modeli matematycznych (1,2,3), 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 zapewniającego racjonalne straty energii cieplnej przy $a_p = 1$ mm i $V = 150$ 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 1. Fizykomechaniczne, ciepłno-fizyczne i ekonomiczne charakterystyki procesu obróbki elementów budowlanych konstrukcji stalowych przy głębokości $a_p = 1$ mm

Lp.	Prędkość posuwu f mm/obr	Prędkość V m/min	Ciężar usuwanej stali P kg/zm	Energochłonność procesu W1 (narzędzie CNMG 120408 GN 8150 Iscar), kJ/zm	Energochłonność procesu W1 (narzędzie CNMG 120408 GN 8150 Iscar), kWh/zm	Koszt zużywanej energii (taryfa C-11 TAURON) zł/kWh	Energochłonność procesu W2 (narzędzie CNMG 120412 SM 4215 Sandvik), kJ/zm	Energochłonność procesu W2 (narzędzie CNMG 120412 SM 4215 Sandvik), kWh/zm	Energochłonność procesu W3 (narzędzie CNMG 120408 PM 4225 Sandvik), kJ/zm	Energochłonność procesu W3 (narzędzie CNMG 120408 PM 4225 Sandvik), kWh/zm
1	0,1	150	49,77	20160	5,6	2,3716	20160	5,6	20160	5,6
2	0,2	150	99,54	37800	10,5	4,44675	35280	9,8	37800	10,5
3	0,3	150	149,3	50400	14	5,929	47880	13,3	45360	12,6
4	0,4	150	199,1	60480	16,8	7,1148	60480	16,8	57960	16,1
5	0,5	150	248,9	73080	20,3	8,59705	73080	20,3	70560	19,6
6	0,1	200	66,36	27720	7,7	3,26095	30240	8,4	27720	7,7
7	0,2	200	132,7	42840	11,9	5,03965	42840	11,9	42840	11,9
8	0,3	200	199,1	65520	18,2	7,7077	55440	15,4	55440	15,4
9	0,4	200	265,4	83160	23,1	9,78285	80640	22,4	73080	20,3
10	0,5	200	331,8	93240	25,9	10,96865	98280	27,3	105840	29,4
11	0,1	250	82,95	37800	10,5	4,44	32760	9,1	37800	10,5
12	0,2	250	165,9	55440	15,4	6,5219	57960	16,1	50400	14
13	0,3	250	248,9	78120	21,7	9,18995	70560	19,6	78120	21,7
14	0,4	250	331,8	98280	27,3	11,56155	93240	25,9	93240	25,9
15	0,5	250	414,8	118440	32,9	13,93315	120960	33,6	108360	30,1
16	0,1	300	99,54	40320	11,2	4,7432	37800	10,5	37800	10,5
17	0,2	300	199,1	70560	19,6	8,3006	60480	16,8	65520	18,2
18	0,3	300	298,6	85680	23,8	10,0793	85680	23,8	83160	23,1
19	0,4	300	398,2	115920	32,2	13,6367	105840	29,4	103320	28,7
20	0,5	300	497,7	136080	37,8	16,0083	143640	39,9	131040	36,4
21	0,1	350	116,1	45360	12,6	5,3361	42840	11,9	42840	11,9
22	0,2	350	232,3	83160	23,1	9,78285	70560	19,6	80640	22,4
23	0,3	350	348,4	100800	28	11,858	103320	28,7	115920	32,2
24	0,4	350	464,5	120960	33,6	14,2296	126000	35	141120	39,2
25	0,5	350	580,7	156240	43,4	18,3799	146160	40,6	153720	42,7
26	0,1	400	132,7	52920	14,7	6,22545	47880	13,3	45360	12,6
27	0,2	400	265,4	93240	25,9	10,9687	85680	23,8	98280	27,3
28	0,3	400	398,2	115920	32,2	13,6367	115920	32,2	136080	37,8
30	0,4	400	530,9	136080	37,8	16,0083	141120	39,2	163800	45,5
31	0,5	400	664	186480	51,8	21,97965	163800	45,5	173880	48,3

Tabela 2. Kodowanie i poziomy zmienności czynników zależności $E_{W1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1$ mm i $V = 150$ 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	8,6	49,8	149,35	248,9	289,83	99,55

Tabela 3. Planowanie i realizacja procesu określonego zależnością $E_{W1} = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1$ mm i $V = 150$ m/min

Lp.	Macierze				Wartości zużywanej energii			
	Planowana		Robocza		1		2	
			f	V	E_{W1} , kWh			
	x_1	x_2	mm/obr	m/min	Y_p		Y_1	Y_2
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	0,5	248,9	20,3		20,1	20,5
2	-	+	0,1	248,9	13		14	12
3	+	-	0,5	49,8	10		9	11
4	-	-	0,1	49,8	5,6		5,4	5,8
5	-1.414	+	0,08	248,9	20,3		20,2	20,4
6	+1.414	+	0,58	248,9	18		17	19
7	0	-1.414	0,3	8,6	4		5	3
8	0	+1.414	0,3	289,3	23,8		23,6	24
9	0	0	0,3	149,35	14		13,1	14,9
10	0	0	0,3	149,35	14		14,8	13,2
11	0	0	0,3	149,35	14		14,7	13,3
12	0	0	0,3	149,35	14		13,2	14,8
13	0	0	0,3	149,35	14		13,3	17,7

Charaktrystyki modelu matematycznego (1)

1. Dane wyjściowe:

1.1. Graniczne warunki: $a_p = 1$ mm; $V = 150$ m/min; $f = 0,1 \div 0,5$ mm/obr

1.2. $E_{W1} = F(f, P)$

$x_{[i]}$ - f;

$Y_{p[i]}$ - E_{W1} ;

$t_0 = 0.30$; $m_0 = 149.350$; $w_1 = 0.200$; $w_2 = 99.000$.

2. Analiza pomyłek pomiarów i jednorodności dyspersji:

Dyspersja jednego doświadczenia $\max c^2 = 2.000$;

Średnia kwadratowa pomyłka jednego doświadczenia $\max c = 1.414$;

Kontrola jednorodności dyspersji jednego doświadczenia:

współczynnik Kochrena [$g_0 \leq 0.68$] $g_0 = 0.369$.

Stopień swobody mniejszej dyspersji $f_1 = 4.00$.

Dyspersja eksperymentu $z_2 = 0.067$.

Średnia kwadratowa pomyłka eksperymentu $z_0 = 0.259$.

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

Y_p	Y_o	$(Y_p - Y_o)^2$
22.0000	22.1348	0.0182
18.0000	17.9708	0.0009
9.0000	9.2288	0.0524
8.0000	8.0648	0.0042
15.0000	14.9648	0.0012
19.0000	18.7317	0.0720
4.0000	3.7873	0.0453
20.0000	19.9153	0.0072
14.0000	14.2835	0.0804
14.1000	14.2835	0.0337
14.5000	14.2835	0.0469
14.2000	14.2835	0.0070
14.6000	14.2835	0.1002
186.4000	186.2160	0.4693

Stopień swobody większej dyspersji $f_2 = 3.0000$.

Wartość funkcji (F) $F = 1.0014$.

Współczynnik korelacji $R = 0.998557$.

Dokładność wzoru $d = 0.288$.

Średnie resztkowe pozostałości $sost = 0.259$.

3. Obliczanie gładkości funkcji

3.1. Średnia krzywizna w punkcie:

-0.0808 -0.0808 0.0802 0.0802 0.0367 0.0367 0.0857 -0.1441 0.0367 0.0367
0.0367 0.0367 0.0367
0.4233 0.4233 0.1662 0.1662 0.2435 0.2435 0.1466 0.5230 0.2435 0.2435
0.2435 0.2435 0.2435
-0.0808 -0.0808 0.0802 0.0802 0.0367 0.0367 0.0857 -0.1441 0.0367 0.0367
0.0367 0.0367 0.0367

0.4233 0.4233 0.1662 0.1662 0.2435 0.2435 0.1466 0.5230 0.2435 0.2435
0.2435 0.2435 0.2435
0.2516 0.2516 0.1476 0.1476 0.1996 0.1996 0.1324 0.1489 0.1996 0.1996
0.1996 0.1996 0.1996
-0.0900 -0.0900 0.0552 0.0552 0.0061 0.0061 0.0646 -0.1337 0.0061 0.0061
0.0061 0.0061 0.0061
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618
0.0531 0.0531 0.1460 0.1460 0.1618 0.1618 0.1352 -0.1077 0.1618 0.1618
0.1618 0.1618 0.1618

Krzywizna minimalna o wartości -0.144067.

Średnia wartość krzywizny 0.123017.

3.2. Krzywizna zupełna Gaussa w punkcie:

-0.001991 -0.001991 -0.000370 -0.000370 -0.000895 -0.000895 -0.000262
-0.002491 -0.000895 -0.000895 -0.000895 -0.000895 -0.000895
-0.052010 -0.052010 -0.000845 -0.000845 -0.004088 -0.004088 -0.000508
-0.271670 -0.004088 -0.004088 -0.004088 -0.004088 -0.004088
-0.001991 -0.001991 -0.000370 -0.000370 -0.000895 -0.000895 -0.000262
-0.002491 -0.000895 -0.000895 -0.000895 -0.000895 -0.000895
-0.052010 -0.052010 -0.000845 -0.000845 -0.004088 -0.004088 -0.000508
-0.271670 -0.004088 -0.004088 -0.004088 -0.004088 -0.004088
-0.043732 -0.043732 -0.000822 -0.000822 -0.003865 -0.003865 -0.000497
-0.189708 -0.003865 -0.003865 -0.003865 -0.003865 -0.003865
-0.001092 -0.001092 -0.000280 -0.000280 -0.000588 -0.000588 -0.000207
-0.001283 -0.000588 -0.000588 -0.000588 -0.000588 -0.000588
-0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
-0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401
-0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
-0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401
-0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
-0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401

-0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
 -0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401
 -0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
 -0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401
 -0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
 -0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401
 -0.011646 -0.011646 -0.000656 -0.000656 -0.002401 -0.002401 -0.000417
 -0.021327 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401 -0.002401

Krzywizna minimalna o wartości -0.271670

Średnia wartość krzywizny -0.009451

4. Równanie regresji wg kodowanych zmiennych

$$Y_{p0} = b + b_1 \cdot (t_4 - t_0) / w_1 + b_2 \cdot (m - m_0) / w_2 + b_{12} \cdot (t_4 - t_0) \cdot (m - m_0) / (w_1 \cdot w_2) + b_{11} \cdot ((t_4 - t_0) / w_1)^2 + b_{22} \cdot ((m - m_0) / w_2)^2$$

Współczynniki regresji o wartościach kodowanych:

$$b = 14.284$$

$$b_1 = 1.332$$

$$b_2 = 5.703$$

$$b_{12} = 0.750$$

$$b_{11} = 1.283$$

$$b_{22} = -1.21647$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

4.1. Równanie regresji wg zmiennych autentycznych

$$Y_{p01} = b_{01} + b_{101} \cdot X_1 + b_{201} \cdot X_2 + b_{1201} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{1101} \cdot X_1^2 + b_{2201} \cdot X_2^2$$

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

Współczynniki regresji o wartościach rzeczywistych:

$$b_{01} = 5.497;$$

$$b_{101} = -18.239;$$

$$b_{201} = 0.083;$$

$$b_{1201} = 0.038;$$

$$b_{1101} = 32.069;$$

$$b_{2201} = -0.00012.$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

Równanie regresji dla rzeczywistych współrzędnych przedstawiono w postaci wielomianu drugiego stopnia

$$E = 5,974 - 18,239 f + 0,083 P + 0,038 f P + 32,069 f^2 - 0,00012 P^2 \quad (1)$$

2.3. Opracowanie modelu zależności ilości zużywanej energii $y = f(x_1, x_2)$ podczas produkcji elementu konstrukcyjnego

zapewniającego racjonalne straty energii cieplnej przy $a_p = 1 \text{ mm}$ i $V = 200 \text{ m/min}$

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 4. Kodowanie i poziomy zmienności czynników zależności $E = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1 \text{ mm}$ i $V = 200 \text{ m/min}$

Lp.	Czynniki	Poziomy zmienności					Wariancja
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	w
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	11,5	66,4	199	331,6	386,5	132,6

Tabela 5. Planowanie i realizacja procesu określonego zależnością $E = F(f, P)$ przy warunku granicznym $a_p = 1 \text{ mm}$ i $V = 200 \text{ m/min}$

Lp.	Macierze				Wartości zużywanej energii			
	Planowana		Robocza		1		2	
			f	P	E_{w1} , kWh		E , 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	331,6	26		28	27
2	-	+	0,1	331,6	20		20,2	20,3
3	+	-	0,5	66,4	11		9	12
4	-	-	0,1	66,4	9		10	8
5	-1,41	+	0,08	331,6	18		17	19
6	1,41	+	0,58	331,6	25		23	24
7	0	-1,41	0,3	11,5	6		5	7
8	0	1,41	0,3	386,5	23		24	22
9	0	0	0,3	199	18		17	19
10	0	0	0,3	199	18		19	17,2
11	0	0	0,3	199	18		18	19
12	0	0	0,3	199	18		19	17,4
13	0	0	0,3	199	18		18,7	18,5

Charakterystyki modelu matematycznego (2)

1. Dane wyjściowe:

1.1. $y = f(x_1, x_2)$;

1.2. $E_{w1} = F(f, P)$;

$x_{[ij]} - f, P$

$Y_{p[ij]} - E_{w1}$

$t_0 = 0.30$; $m_0 = 199.000$; $w_1 = 0.200$; $w_2 = 132.600$.

2. Analiza pomyłek pomiarów i jednorodności dyspersji:

Dyspersja jednego doświadczenia $\max c_2 = 4.500$ Średnia kwadratowa pomyłka jednego doświadczenia $\max c = 2.121$

Kontrola jednorodności dyspersji jednego doświadczenia:

współczynnik Kochrena [$g_0 \leq 0.68$] $g_0 = 0.238$;Stopień swobody mniejszej dyspersji $f_1 = 4.00$;Dyspersja eksperymentu $z_2 = 0.067$;Średnia kwadratowa pomyłka eksperymentu $z_0 = 0.259$.2.1. Średnie wartości danych doświadczalnych (Y_p) i dane obliczane (Y_o):

Y_p	Y_o	$(Y_p - Y_o)^2$
27.5000	27.2279	0.0740
20.2500	20.2212	0.0008
10.5000	11.2809	0.6098
9.0000	10.0242	1.0489
18.0000	17.3908	0.3711
23.5000	23.2331	0.0712
6.0000	4.8239	1.3833
23.0000	23.3077	0.0947
18.0000	18.2843	0.0808
18.1000	18.2843	0.0340
18.5000	18.2843	0.0465
18.2000	18.2843	0.0071
18.6000	18.2843	0.0997
229.1500	228.9309	3.9220

Stopień swobody większej dyspersji $f_2 = 3.0000$;Wartość funkcji (F) $F = 1.1789$;Współczynnik korelacji $R = 0.991508$;Dokładność wzoru $d = 1.691$;Średnie resztkowe pozostałości $sost = 0.749$.

3. Obliczanie gładkości funkcji

3.1. Średnia krzywizna w punkcie:

-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
-0.017992 -0.017992 -0.000456 -0.000456 -0.002714 -0.002714 -0.000253
-0.019033 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714 -0.002714
Krzywizna minimalna o wartości -2.837994
Średnia wartość krzywizny -0.051471

4. Równanie regresji wg kodowanych zmiennych:

$$Y_p0 = b + b_1 \cdot (t_4 - t_0) / w_1 + b_2 \cdot (m - m_0) / w_2 + b_{12} \cdot (t_4 - t_0) \cdot (m - m_0) / (w_1 \cdot w_2) + b_{11} \cdot ((t_4 - t_0) / w_1)^2 + b_{22} \cdot ((m - m_0) / w_2)^2$$

Współczynniki regresji o wartościach kodowanych:

$$b = 18.284$$

$$b_1 = 2.066$$

$$b_2 = 6.536$$

$$b_{12} = 1.438$$

$$b_{11} = 1.014$$

$$b_{22} = -2.10989$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

4.1. Równanie regresji wg zmiennych rzeczywistych:

$$Y_{p01} = b_{01} + b_{101} \cdot X_1 + b_{201} \cdot X_2 + b_{1201} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{1101} \cdot X_1^2 + b_{2201} \cdot X_2^2$$

$$Ew_1 = 6,142 - 15,67 f + 0,081 P + 0,054 f P + 25,354 f^2 - 0,00012 P^2 \quad (2)$$

gdzie: $X_1 = f$; $X_2 = P$; $Y_{p01} = Ew_1$;

Współczynniki regresji o wartościach rzeczywistych:

$$b_{01} = 6.142$$

$$b_{101} = -15.670$$

$$b_{201} = 0.081$$

$$b_{1201} = 0.054$$

$$b_{1101} = 25.354$$

$$b_{2201} = -0.00012$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

2.4. Opracowanie modelu zależności $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, która odpowiada $C_{w1} = F(P, f, V, E_{w1})$ i określenie kosztu zużywanej energii podczas produkcji elementu konstrukcyjnego od czynników produkcyjnych

W celu aproksymacji doświadczalnych i obliczanych danych stosowano wielomian drugiego stopnia w postaci $Y_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4$. Model matematyczny opracowano za pomocą programu PR_11_2 [1].

Tabela 6. Kodowanie i poziomy zmienności czynników zależności $C_{w1} = F(P, f, V, E_{w1})$ przy $a_p = 1 \text{ mm}$

Lp.	Czynniki	Poziomy zmienności			Wariancja
		-1	0	+1	w
0	1	2	3	4	5
1	P - ciężar usuwanej stali [kg/zm], x_1	49,8	356,9	664	307,1
2	f - prędkość posuwu [mm/obr.], x_2	0.1	0.3	0.5	0.2
3	V - prędkość obrotu [m/min], x_3	150	275	400	125
4	E - energochłonność obróbki [kWh/zm], x_4	5,6	28,7	51,8	23,1

Tabela 7. Planowanie i realizacja procesu określanego zależnością $C_{w1} = F(P, f, V, E_{w1})$

Lp.	Macierze								Wyniki doświadczeń		
	Planowana				Robocza				C_{w1}		
					P	f	V	E_{w1}	Y_p	Y_1	Y_2
	x_1	x_2	x_3	x_4	kg/zm	mm/obr	m/min	kg/h			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+	+	+	+	664	0,5	400	51,8	2,36	2,38	2,37
2	-	+	+	-	49,8	0,5	400	5,6	8,8	8,4	8,6
3	+	-	+	-	664	0,1	400	5,6	10,98	10,96	10,97
4	-	-	+	+	49,8	0,1	400	51,8	11,53	11,59	11,56
5	+	+	-	-	664	0,5	150	5,6	13,91	13,95	13,93
6	-	+	-	+	49,8	0,5	150	51,8	17	15	16
7	+	-	-	+	664	0,1	150	51,8	18,34	18,42	18,38
8	-	-	-	-	49,8	0,1	150	5,6	21	23	22

Charakterystyki modelu matematycznego (3)

Dane wejściowe:

 $x_1 = P$ kg/zm; $x_2 = f$ mm/obr; $x_3 = V$ m/min; $x_4 = E_{w1}$ kWh/zm; $Y = C_{w1}$ zł/zm.Warunki graniczne: $a_p = 1$ mm; $f = 0,1 \div 0,5$ mm/obr; $V = 150$ m/min; $P = 48 \div 248$ kg/zm; $E_{w1} = 2,4 \div 22$ zł/zm. $Q_0 = 356.90$; $w_1 = 307.100$; $m_0 = 0.30$; $w_2 = 0.200$; $t_0 = 275.00$; $w_3 = 125.000$; $p_0 = 28.70$; $w_4 = 23.100$.Średnia kwadratowa pomyłka jednego doświadczenia $c = 1.414$ Współczynnik Kochrena wynosi $g = 0.489$ Stopień swobody mniejszej wariancji wynosi $f_1 = 1.00$ Wariancja eksperymentu $z_2y = 0.5108$ Średnia kwadratowa pomyłka całego eksperymentu $z_0 = 0.7147$

Y_p	Y_o	$(Y_p - Y_o)^2$
2.3700	4.0600	2.8561
8.6000	7.1875	1.9952
10.9700	9.5625	1.9811
11.5600	12.6900	1.2769
13.9300	13.2625	0.4456
16.0000	16.3900	0.1521
18.3800	18.7650	0.1482
22.0000	21.8925	0.0116
103.8100	103.8100	8.8667

Stopień swobody większej dyspersji $f_2 = 3.0000$.Obliczana wartość funkcji $F = 48.3079$.Współczynnik korelacji $R = 0.953143$.Współczynnik determinacji $Det = 0.9085$.Dokładność wzoru $d = 9.15$.Resztkowa średniokwadratowa odchyłka $sost = 1.719$

Równanie regresji w/g autentycznych zmiennych:

$$Y_{p0} = b_0 + b_1 * (Q - q_0) / w_1 + b_2 * (M - m_0) / w_2 + b_3 * (t - t_0) / w_3 + b_4 * (p - p_0) / w_4$$

Współczynniki regresji równania o wartościach kodowanych:

 $b_0 = 12.9762$ $b_1 = -1.5637$ $b_2 = -2.7512$ $b_3 = -4.6013$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.
Współczynniki regresji równania o wartościach rzeczywistych:

$$Y_{po} = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4$$

$$a_0 = 29.0432$$

$$a_1 = -0.0051$$

$$a_2 = -13.7562$$

$$a_3 = -0.0368$$

Pozostałe współczynniki są wyeliminowane jako nieznaczące.

$$C_{W1} = 29,0432 - 0,0051 P - 13,7562 f - 0,0368 Vz \quad (3)$$

PODSUMOWANIE

1. Wyboru optymalnego rozwiązania należy dokonać na podstawie porównania energochłonności i kosztu produkcji z wariantu W1, dla którego określono energochłonność procesu produkcji elementów stalowych gatunku 325. Korzystano z narzędzi odpowiednio: CNMG 120408 GN 8150 Iscar.
2. Opracowano adekwatne modele matematyczne (1), (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 (1), (2), (3) są przydatne do optymalizacji powiązań w procesie matematycznego modelowania rozwiązań projektowych i produkcyjnych.
6. Metodę optymalizacyjną autor przedstawi w kolejnych publikacjach.

LITERATURA

- [1] Bobko T., Optymalizacja potencjału energetycznego tężenia mieszanki betonowej w aspekcie zapewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i elementów konstrukcyjnych. Wyniki badań. Podstawy modelowania i prognozowania, seria Monografie nr 47, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.
- [2] Bobko T., Całusiński P., Modelowanie energooszczędnej technologii produkcji elementów konstrukcji budowlanych metalowych o zadanych parametrach. [w:] Budownictwo o zoptymalizowa-

nym potencjale energetycznym, praca zbiorowa pod redakcją T. Bobki i J. Rajczyka, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, s. 9-24.

[3] Jaroszew D., Problemy mechanizacji kompleksowej i metoda energetyczna, Moskwa 1994.

THE CHOICE OF RATIONAL VARIANTS OF ENERGY-EFFICIENT BUILDING COMPONENTS PRODUCTION

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. Minimum value of total energy used during one working shift and energy expenditure cost were applied as the criterion of objective function optimisation.

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