Prof. dr hab. inż. Eugene Feldshtein
dr hab. inż. Justyna Patalas-Maliszewska, prof. UZ
dr hab. inż Sławomir Kłos, prof. UZ
mgr inż. Anatol Kałasznikow
inż. Krzysztof Andrzejewski

Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Prof. Z.Szafrana 4
65-516 Zielona Góra
E-mail: j.patalas@iizp.uz.zgora.pl

Wykorzystanie planów Placketta-Burmana i analizy opinii ekspertów w celu oceny istotności parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego

Słowa kluczowe: *cięcie plazmowe, parametry cięcia, metoda Placketta-Burmana, metoda analizy opinii ekspertów*

Streszczenie: W artykule dokonano oceny istotności parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego za pomocą metody Placketta-Burmana i analizy opinii ekspertów. Badania procesu cięcia plazmowego przeprowadzono przy użyciu przecinarki plazmowej WPA-6000 Compakt na stali niestopowej konstrukcyjnej gatunku S235JR EN 10025-2:2007 z ekwiwalentem węglowym wynoszącym 0.35 %. Analizowano wpływ grubości blachy, natężenia prądu, prędkości cięcia, ciśnienia gazów podczas cięcia, odstępu palnika od blachy podczas cięcia, czasu dziurkowania oraz wysokości startu. Badania ujawniły wpływ badanych parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego na wybrane parametry wyjściowe, w szczególności na skok śladów cięcia, na szerokość szczeliny na wejściu i wyjściu oraz na wartość prostopadłości szczeliny do powierzchni bazowej. Największe wpływy zarejestrowano dla natężenia prądu, prędkości cięcia oraz ciśnienia gazu podczas cięcia. Otrzymane wyniki badań zostały potwierdzone wynikami analizy opinii ekspertów.

1. Wprowadzenie

Mikro, małe i średnie przedsiębiorstwa produkcyjne, chcąc utrzymać przewagę konkurencyjną, wprowadzają innowacje zarówno produktowe, jak i procesowe. Innowacje procesowe obejmują wprowadzane zmian w realizowanych w przedsiębiorstwie procesach. Jednym z kluczowych procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwach branży konstrukcji stalowych jest proces cięcia. Jedną z najbardziej popularnych technologii cięcia jest cięcie plazmowe [16].

Cięcie plazmowe może być stosowane w jednostkowej lub seryjnej produkcji konstrukcji stalowych, a także w różnego rodzaju pracach remontowych i naprawczych [10], w materiałach zarówno przewodzących, jak i nie przewodzących prąd elektryczny[16]. Proces cięcia plazmowego polega na topieniu i wyrzucaniu metalu ze szczeliny cięcia skoncentrowanym plazmowym łukiem elektrycznym, jarzącym się między elektrodą nietopliwą, a ciętym przedmiotem. Na temperaturę strumienia plazmy wpływa wiele czynników, m.in.: elektryczne, kinematyczne oraz technologiczne.

Podstawowymi parametrami cięcia plazmowego są natężenie prądu, napięcie łuku plazmowego, prędkość cięcia, rodzaj i ciśnienie oraz natężenie przepływu gazu plazmowego, rodzaj i konstrukcja elektrody, średnica dyszy zwężającej, położenie palnika względem ciętego przedmiotu [19].

Niewłaściwy wybór warunków cięcia plazmowego zwiększa szerokość szczeliny, powoduje pojawienie zaokrąglenia górnych krawędzi i odchylenie od prostopadłości.

W innych warunkach powstają nawisy metalu przy dolnej krawędzi, a także może występować brak przecięcia. Wzdłuż dolnej krawędzi cięcia tworzy się żużel w postaci małych, liniowo ułożonych kulek stopionego materiału, które przytwierdzają się do powierzchni, powstają smugi które trudno usunąć. Także wzdłuż górnej krawędzi cięcia powstają pieniste lub kuliste nagromadzenia stopionego materiału, które jednak łatwo usunąć. Dodatkowo u góry krawędzi cięcia zbierają się bezładnie rozłożone drobne odpryski stopionego materiału [12,19].

Wpływ parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego na defekty powstałe podczas procesu obróbki przedstawiono w wielu publikacjach. W [25] pokazano wpływ prędkości posuwu przy cięciu plazmowym na zmiany krytycznych cech powierzchni i właściwości mikrostruktury w bliskim sąsiedztwie krawędzi. Analiza przeprowadzona w [3] wykazała, że prędkość cięcia i napięcie łuku wpływają na warunki powstawania szczeliny, a ich wzajemne oddziaływanie wpływa na szczegóły kształtowania szczeliny po cięciu. Pomimo tego, ślady cięcia mogą mieć różne profile, w zależności od rozpatrywanej strony. Ten efekt musi być brany pod uwagę przy projektowaniu elementów przeznaczonych do cięcia plazmowego. Podkreślono też, że wysokiej jakości części (klasa nierówności 2, zgodnie z ISO 9013) można uzyskać w wyniku eksperymentalnych badań, których celem jest wybranie właściwych wartości parametrów procesu.

W [7] przedstawiono wyniki badań szerokości szczeliny w strefie górnej i dolnej oraz kąta zbieżności rzazu w zależności od prędkości cięcia, grubości obrabianego przedmiotu i prądu łuku. Do badań zastosowano pełny eksperyment czynnikowy z trzema niezależnymi zmiennymi na dwóch poziomach, jeden z najbardziej rozpowszechnionych metod DoE (*ang. Design of Experiments*). Podobną metodę zastosowano w [4] przy badaniach wpływu prędkości cięcia, przepływu gazy plazmowego oraz napięcia łuku na jakość powierzchni cięcia za stali Hardox-400 o grubości 12 mm. W [20] analizowano wpływ czterech parametrów, a mianowicie prędkości cięcia, natężenia prądu, ciśnienia gazu oraz odległości czoła dyszy plazmowej od powierzchni przedmiotu, na chropowatość powierzchni, głębokość strefy wpływów termicznych oraz odchylenie cięcia od prostopadłości przy cięciu stali S235 o grubości 15 mm. Analizę przeprowadzono wykorzystując metodę Taguchi, którą wykorzystano także w [5], dokonując analizy wpływów średnicy dyszy, prędkości, natężenia prądu oraz napięcia łuku na ciśnienie powietrza oraz na szybkość przebicia otworu w płycie. Pokazano, że wykorzystując plany 3^4 wymaga się realizacji 81 kombinacji, wówczas gdy plany Taguchi typu L9 wymagały znacznie mniejszej liczby kombinacji. W [25] opracowano model matematyczny do optymalizacji wpływu natężenia prądu, napięcia, prędkości cięcia, wartości stosunku miedzy wysokością cięcia a wysokością startu, ciśnienia gazu osłonowego oraz naddatku do wymaganej szerokości cięcia na parametry wyjściowe procesu obróbki, a mianowicie: szerokości cięcia w górnej i dolnej części, odchyłki rozmiarów szczeliny na górze i na dole, kąt pochylenia śladów cięcia, chropowatość powierzchni, stopień usuwalności żużla, stosunek (%) między długością krawędzi pokrytych żużlem i wypływkami a całkowita długością cięcia. W [14] dokonano optymalizacji wycinania laserowego oraz plazmowego blach i płyt ze średnio- i wysoko wytrzymałościowych stali. Jako parametry niezależne zastosowano natężenie prądu, prędkość cięcia, odległość dyszy od przedmiotu oraz ciśnienie gazu. Optymalizowano odchylenia szczeliny od prostopadłości, chropowatość powierzchni po cięciu oraz wymiary żużlu. W [13] ustalono, że przy cięciu grubych płyt stalowych prawidłowy wybór natężenia prądu i prędkości cięcia ma wpływ na szerokość i prostoliniowość cięcia chropowatość powierzchni i głębokość strefy wpływów termicznych. Jakość cięcia stali konstrukcyjnej S355 zbadano w [24]. Ustalono, że przy sterowaniu prędkością cięcia topografia powierzchni cięcia i mikrostruktura strefy wpływów termicznych zależą od rodzaju stosowanych gazów. Badania strefy wpływów termicznych przy cięciu plazmowym austenitycznej stali nierdzewnej o grubości 10 – 30 mm i prędkościach cięcia

710 – 2030 mm/min dokonano w [15]. Ustalono że czynniki te oddziaływają znacząco na zmiany strukturalne i mikrotwardość analizowanej strefy.

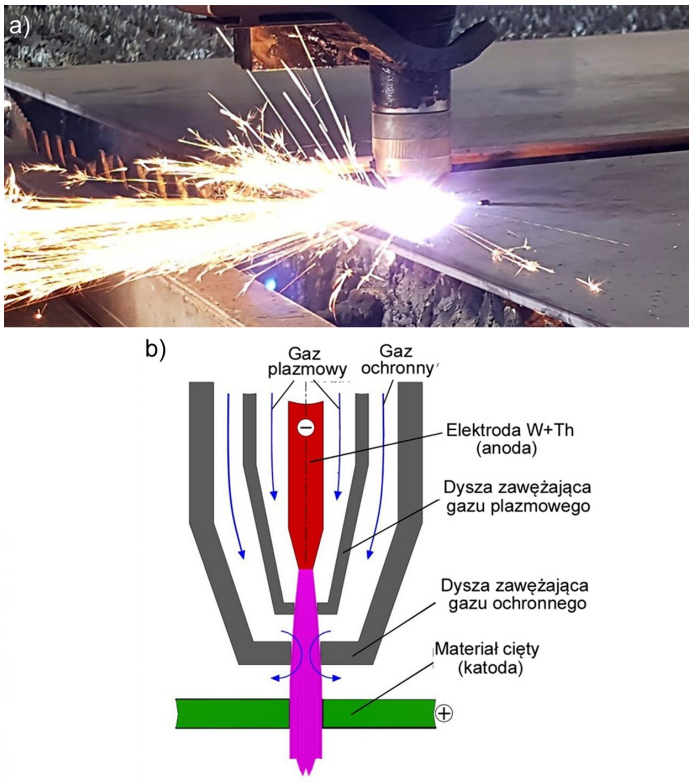
Tak więc, w procesie cięcia plazmowego ma znaczenie wiele czynników, co utrudnia jego regulację i zapewnienie wymagań ISO 9013. Nieliczne próby wykorzystania w tym celu metod DoE albo znacząco ograniczają liczbę czynników badanych albo wymagają bardzo dużej ilości badań. Zastosowanie metody Taguchi wymaga realizacji badań przy kilka poziomach zmiennych, co nie zawsze jest łatwe. Jako rozwiązanie problemu wykorzystuje się taki rodzaj DoE metod, jak plany Placketta-Burmana. Są to tak zwane plany nasycone, wymagające liczbę badań wynoszącą N=k+1, gdzie k – liczba zmiennych badanych, która powinna być krotna liczbie 4. Obecnie opracowano plany nasycone dla 4, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35, 39, 43, 47, 63 oraz 127 zmiennych [9]. Takie plany są szeroko stosowane w różnych obszarach badawczych, np. w produkcji nanocząstek [21], leków [8,11], polimerów [1], produkcji paliw [2]. Rozwój metody Placketta-Burmana przedstawiono w [18,22]. Ograniczeniem w/w planów jest konieczność zapewnienia realizacji badań w ściśle określonych punktach, co ogranicza zakres zmian analizowanych czynników. Z drugiej jednak strony metoda ta daje możliwość przeprowadzenia dokładnych obliczeń statystycznych, a w szczególności wykonania obliczenia współczynników wielowymiarowej regresji liniowej [9,23].

Celem poniższej pracy jest przeprowadzenie oceny istotności parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego za pomocą planów Placketta-Burmana oraz metody oceny ekspertów.

2. Warunki badań

Do badań wykorzystano jedną z najbardziej rozpowszechnionych stali stosowanych w konstrukcjach stalowych: stal niestopową konstrukcyjną gatunku S235JR EN 10025-2:2007 (dawniej stal St3S) z ekwiwalentem węglowym wynoszącym 0.35 %.

Badania procesu cięcia plazmowego przeprowadzono przy użyciu przecinarki plazmowej WPA-6000 Compakt z programem sterującym SMART CNC, wyposażonej w stół z CNC sterowaniem oraz źródło plazmowe ForCut 133WDM. Przecinarka wyposażona jest w dwa palniki: plazmowy do cięcia płyt o grubości do 30 mm oraz gazowy do cięcia płyt o grubości do 150 mm. Jako gaz plazmotwórczy a jednoczesnie ochronny zastosowano sprężone powietrze podawane do strefy cięcia przez filtry powietrza oraz osuszacz. Widok cięcia plazmowego oraz podstawowy schemat palnika przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Cięcie plazmowe (a) i schemat palnika (b)

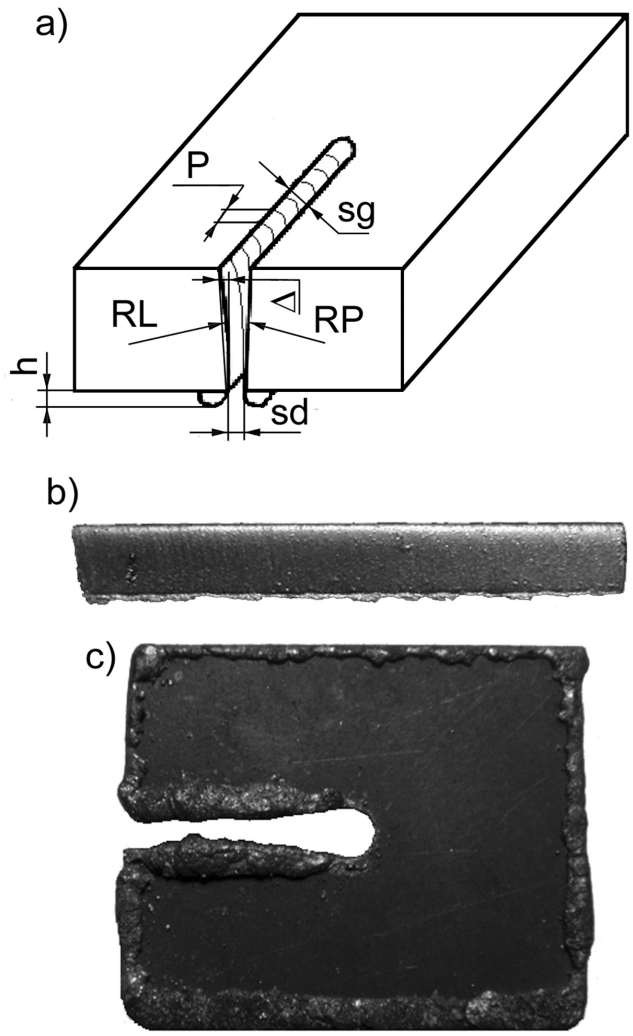
Wykonano analizę wpływu parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego na parametry wyjściowe cięcia 7 czynników technologicznych, a mianowicie grubości blachy, natężenia prądu, prędkości cięcia, ciśnienia gazów podczas cięcia, odstępu palnika od blachy podczas cięcia, czasu dziurkowania oraz wysokości startu. Plan analizy eliminacyjnej na podstawie metody Placketta-Burmana przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Plan i warunki badań

Nr punktu badań	Wartości i kody czynników badanych													
	Grubość blachy [mm]	X1	Natężenie prądu [A]	X2	Prędkość cięcia [mm/min]	X3	Ciśnienie gazów podczas cięcia [bar]	X4	Odstęp palnika podczas cięcia [mm]	X5	Czas dziurkowania [s]	X6	Wysokość startu [mm]	X7
1	4	–1	80	–1	2600	–1	6	1	3,5	1	0,4	1	4	–1
2	12	1	80	–1	2600	–1	5	–1	3	–1	0,4	1	7	1
3	4	–1	130	1	2600	–1	5	–1	3,5	1	0,1	–1	7	1
4	12	1	130	1	2600	–1	6	1	3	–1	0,1	–1	4	–1
5	4	–1	80	–1	6500	1	6	1	3	–1	0,1	–1	7	1
6	12	1	80	–1	6500	1	5	–1	3,5	1	0,1	–1	4	–1
7	4	–1	130	1	6500	1	5	–1	3	–1	0,4	1	4	–1
8	12	1	130	1	6500	1	6	1	3,5	1	0,4	1	7	1

Zakres zmian czynników badanych został dobrany w drodze doświadczalnej, tak, żeby wszystkie skojarzenia wartości mogły zostać zrealizowane. Na rys. 2 przedstawiono badane parametry cięcia oraz charakterystyczne widoki próbek. Badano następujące parametry cięcia: skok śladów cięcia (P), szerokości szczeliny na wejściu (sg) i na wyjściu (sd), wysokość

wypływek/żużlu (h), odchyłka prostopadłości boków szczeliny do powierzchni bazowej (Δ), wartości łuków powierzchni szczeliny z lewej (RL) i prawej (RP) strony.



Rys. 2. Próbka po wycinaniu plazmowym: a) schemat wymiarowania czynników badanych, b) boczna powierzchnia szczeliny, c) dolna powierzchnia próbki.

Obliczenia dokonano przy zastosowaniu oprogramowania Statistica 13.3, tj.: policzono współczynniki równań regresji liniowej na podstawie wartości współczynników Pareto oraz określono ważność wpływu czynników badanych na wybrane parametry wyjściowe procesu cięcia.

Analizy wyników badań ankietowych przeprowadzonych wśród ekspertów dokonano za pomocą metody porównana parami, tj. metody Kendall Tau Correlations oraz metody Spearman Rank Order Correlations, także przy zastosowaniu oprogramowania Statistica 13.3. Przyjęto wartość poziomu prawdopodobieństwa 95%.

3. Wyniki badań

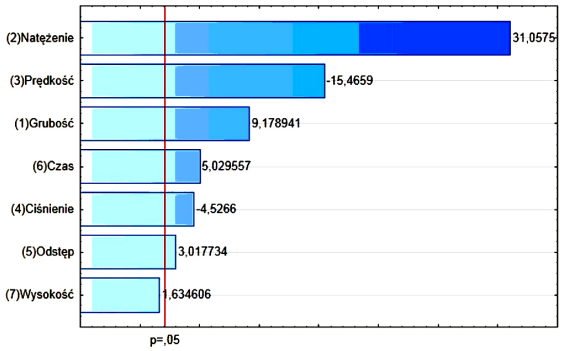
Przykład wyników obliczeń współczynników równań regresji i współczynników Pareto przedstawiono na Rys. 3. Wartości współczynników b_0, b_1,...b_i są odpowiednie do równania

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i \,, \tag{1}$$

i świadczą: b_0 – o poziomie wpływu wielkości badanej, b_i – o intensywności i kierunku wpływu czynników X_1 ... X_i na wielkość badaną.

Zgodnie z zasadami planowania badań (DoE) wartości X_1 ... X_i zastosowano jako względne, w zakresie od –1 (minimum) do +1 (maksimum).

Wejśc.	Efekt	Błąd std	t(16)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
Średn./Stała	2,168333	0,006627	327,1727	0,000000	2,154284	2,182383
(1)Grubość	0,121667	0,013255	9,1789	0,000000	0,093567	0,149766
(2)Natężenie	0,411667	0,013255	31,0575	0,000000	0,383567	0,439766
(3)Prędkość	-0,205000	0,013255	-15,4659	0,000000	-0,233099	-0,176901
(4)Ciśnienie	-0,060000	0,013255	-4,5266	0,000344	-0,088099	-0,031901
(5)Odstęp	0,040000	0,013255	3,0177	0,008171	0,011901	0,068099
(6)Czas	0,066667	0,013255	5,0296	0,000123	0,038567	0,094766
(7)Wysokość	0,021667	0,013255	1,6346	0,121650	-0,006433	0,049766



Rys. 3. Wpływ parametrów badanych na skok śladów cięcia (wyniki obliczeń i diagram Pareto).

Analizując wyniki obliczeń statystycznych ustalono, że wszystkie badane parametry mają wpływ na skok śladów cięcia. Na szerokość szczeliny na wejściu i wyjściu nie wpływa wysokość startu, zaś na odchyłkę prostopadłości boków szczeliny do powierzchni bazowej – wysokość startu i ciśnienie gazu. Wysokość wypływek/żużlu zależy tylko od ciśnienia gazu, grubości blachy oraz natężenia prądu. Natomiast promienia łuków szczeliny są zupełnie niesterowalne. Przedstawione wnioski potwierdzają obliczone współczynniki determinacji R^2 zależności regresyjnych przedstawione w tabeli 2.

Zależności regresyjne, ważne do obliczeń wielkości badanych z prawdopodobieństwem 0.95 przedstawione poniżej. Dane zależności mogą być zastosowany jak do obliczeń oczekiwanych wartości czynników badanych, tak i w celu opracowania programu optymalizacyjnego, np. metodą programowania liniowego.

Tabela 2. Współczynniki determinacji R^2 obliczeń czynników badanych

Współczynniki determinacji R^2 dla						
Skok śladów cięcia	Szerokości szczeliny na wejściu	Szerokości szczeliny na wyjściu	Wysokość wypływek/żużlu	Odchyłka prostopadłości	Łuk szczeliny z lewej strony	Łuk szczeliny z prawej strony
0.9607	0.9831	0.9820	0.7050	0.9606	0.1183	0.1239

Otrzymane zależności regresyjne dla badanego zakresu parametrów cięcia przedstawiono poniżej:

- skok śladów cięcia

$$P = 1.239+0.175X1+0.405X2–0.128X3+0.358X4–0.258X5+0.572X6–0.262X7; \quad (2)$$

- szerokość szczeliny na wejściu

$$sg = 2.168+0.122X1+0.412X2–0.205X3–0.06X4+0.04X5+0.067X6; \quad (3)$$

- szerokość szczeliny na wyjściu
  sd = 1.729−0.442X1+0.472X2−0.628X3−0,285X5+0.095X6+0.172X7; (4)
- wysokość wypływek/żużlu
  h = 0.856+0.209X1−0.187X2−0.384X4; (5)
- odchyłka prostopadłości boków szczeliny do powierzchni bazowej
  Δ = 0.800+0.220X1−0.243X2+0.258X3+0.110X5−0.207X6; (6)
- wartość łuków powierzchni szczeliny z lewej strony RL = 3.987 mm;
- wartości łuków powierzchni szczeliny z prawej strony RP = 5.532 mm,

gdzie X1...X7 – normalizowane wartości odpowiednio grubości blachy, natężenia prądu, prędkości cięcia, ciśnienia gazów podczas cięcia, odstępu palnika podczas cięcia, czasu dziurkowania oraz wysokości startu.

Analizy takiego rodzaju dają możliwość minimalizacji strat produkcyjnych, ponieważ pozwalają zadecydować, jakie czynniki technologiczne mogą być podstawą do skutecznego sterowania procesem i zapewnienia wymaganych jego skutków.

W dalszym ciągu badań dokonano porównania wyników otrzymanych metodą Placketta-Burmana z wynikami analizy opinii ekspertów. W celu określenia rang ważności parametrów cięcia plazmowego przeprowadzono badanie za pomocą opinii ekspertów wśród mikro i małych przedsiębiorstw produkujących konstrukcje stalowe. Jako eksperci, w badaniu brały udział osoby z 15 polskich firm o doświadczeniu min. 5-letnim w zakresie obróbki blach za pomocą cięcia. W badaniu eksperci dokonali oceny istotności parametrów mających wpływ na cięcie plazmowe. Wyszczególniano następujące parametry: ciśnienie gazu podczas przebijania, ciśnienie gazu podczas cięcia, wysokość palnika podczas cięcia, napięcie łuku, natężenie prądu, prędkość cięcia, wysokość startu, czas dziurkowania oraz odsunięcie palnika podczas przebijania, oznaczonych numerami od 1 do 9 wg rang (1 – najwyższa ranga parametru). Wyniki badań zaprezentowano poniżej (tabela 3).

Tabela 3. Wyniki badań oceny zgodności opinii ekspertów

Lp Ekspertów	Ciśnienie gazu podczas przebijania [bar]	Ciśnienie gazu podczas cięcia [bar]	Wysokość palnika podczas cięcia [mm]	Napięcie łuku [V]	Natężenie prądu [A]	Prędkość cięcia [mm/min]	Wysokość startu [mm]	Czas dziurkowania [s]	Odsunięcie palnika podczas przebijania [mm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7	3	4	8	1	2	5	6	9
2	8	2	9	4	1	3	5	6	7
3	7	3	4	1	2	5	6	8	9
4	6	4	5	2	1	3	7	9	8
5	6	3	2	1	5	4	7	8	9
6	7	5	3	9	2	1	4	6	8
7	6	5	4	7	2	1	3	9	8
8	3	7	1	6	2	4	5	8	9
9	10	9	8	3	1	2	6	5	7
10	7	4	3	9	1	2	6	5	8
11	8	3	7	6	1	2	4	5	9
12	6	2	4	5	1	3	8	9	7
13	7	4	5	6	2	1	3	8	9
14	6	5	7	2	3	1	4	8	9
15	6	4	5	3	1	2	8	9	7

Analiza danych obejmowała weryfikację zgodności opinii ekspertów w kwestii ważności poszczególnych parametrów mających wpływ na cięcie plazmowe. W tym celu zastosowano współczynnik konkordancji Kendalla-Smitha [6]. Dla ocen 9 parametrów dokonanych przez 15 ekspertów otrzymano wartość wskaźnika Kendalla-Smitha na poziomie: 0.608. Oceny istotności współczynnika konkordancji dokonano za pomocą statystyki chi-kwadrat o (k–1) stopniach swobody, gdzie k: ilość ocenianych parametrów. Z tabel rozkładu chi-kwadrat [8] wynika, że dla df = 8 i poziomu istotności 0.95 są podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej, a zatem oznacza to, że zbieżność opinii ekspertów nie jest przypadkowa oraz istnieje zgodność ich stanowisk.

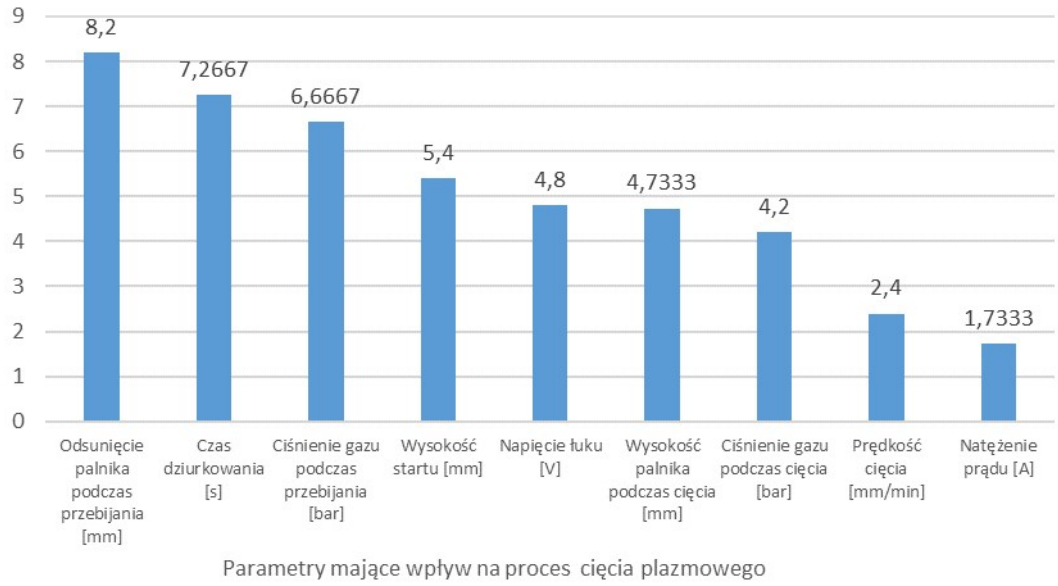
Dla rozpatrywanej grupy badawczej przeprowadzono również analizę za pomocą metody porównana parami, tj. metody Kendall Tau Correlations (tabela 4):

Tabela 4. Wyniki badań oceny zgodności opinii ekspertów

Badane parametry	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	– 0.203	0.418	0.113	–0.37	–0.134	–0.186	–0.691	–0.119
2	–0.202	1	–0.065	0.139	0.246	–0.379	–0.219	–0.034	–0.012
3	0.417	–0.065	1	–0.229	–0.340	–0.178	–0.074	–0.113	–0.267
4	0.113	0.139	–0.229	1	–0.172	–0.405	–0.335	–0.266	–0.059
5	–0.371	0.246	–0.340	–0.172	1	–0.092	–0.316	0.201	0.547
6	–0.134	–0.379	–0.178	–0.405	-0.092	1	0.517	0.083	0.025
7	–0.186	–0.219	–0.074	–0.335	–0.316	0.517	1	0.204	–0.354
8	–0,691	–0,034	-0.113	–0.266	0.201	0.083	0.204	1	–0.103
9	–0.119	–0.012	–0.269	-0.059	0.547	0.025	–0.354	–0.103	1

Wyniki analizy pokazują istotną zależność dodatnią pomiędzy parametrami 1 i 3, 6 i 7 oraz najbardziej znaczącą dodatnią pomiędzy parametrami 5 i 9. Zarejestrowano również zależności ujemne pomiędzy parametrami 2 i 6, 4 i 6 oraz 1 i 8. Związki te zaznaczono na czerwoni w tabeli 3. Występowanie tych zależności potwierdzono za pomocą metody Spearman Rank Order Correlations. Dla par parametrów chrakteryzujących się zależnością dodatnią otrzymano następujące wyniki: dla 1 i 3: R = 0.519, t(N–2) = 2.192, p = 0.047, dla 6 i 7: R = 0.648, t(N–2) = 3.066, p = 0.009, dla 5 i 9: R = 0.590, t(N–2) = 2.632, p = 0.021. Dla pary parametrów 1 i 8 uzyskano: R = –0.790, t(N–2) = –4.639, p = 0.000, dla parametrów: 4 i 6: R = –0.517, t(N–2) = –2.180, p =0.048, gdzie R: współczynnik korelacji Spearmana, t – test istotności. Nie potwierdzono występowania zależności ujemnej pomiędzy parametrami 2 i 6.

W konsekwencji ustalono ranking ważności dla badanych parametrów w procesie ciecia plazmowego na podstawie posortowania uśrednionych wartości ocen ekspertów. Na Rys. 4 posegregowano parametry badane zgodnie z zasadą: największą ważność odpowiada najniższej wartości średniej.



Rys. 4 . Ważność parametrów w procesie cięcia plazmowego wg metody opinii ekspertów

Na podstawie powyższej analizy stwierdzono, iż najważniejszymi parametrami w procesie ciecia plazmowego są: natężenie prądu, prędkość cięcia oraz ciśnienie gazu podczas cięcia. Jest to potwierdzenie efektywności wykorzystania metod DoE, m.in. planów Placketta-Burmana, do oceny istotności parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego.

4. Wnioski

W wyniku badań ustalono wpływ podstawowych czynników cięcia plazmowego na cechy charakterystyczne cięcia blach ze stali węglowej o grubości 4 – 12 mm. W celu określenia ważności wpływu czynników badanych wykorzystano tzw. plany nasycone Placketta-Burmana, co zapewniło z jednej strony minimalizację liczby badań w porównaniu z innymi metodami, z drugiej zaś –szczegółową analizę statystyczną wyników pomiarów. Otrzymane równania wielowymiarowej regresji liniowej zostały potwierdzone opinią ekspertów-praktyków. Określono zależności występujące pomiędzy parametrami oraz wskazano trzy najważniejsze parametry w procesie cięcia plazmowego: natężenie prądu, prędkość cięcia oraz ciśnienie gazu podczas cięcia.
Zastosowanie występujących zależności w przedsiębiorstwie produkcyjnym daje możliwość minimalizacji strat produkcyjnych podczas opracowania procesu cięcia plazmowego na podstawie oceny istotności parametrów sterowalnych procesu cięcia plazmowego.

Literatura

1. Abd El Aty A A, Wehaidy H R, Mostafa F A. Optimization of inulinase production from low cost substrates using Plackett–Burman and Taguchi methods. Carbohydrate Polymers 2014; 102: 261-268.

2. Azizi D, Gharabaghi M, Saeedi N. Optimization of the coal flotation procedure using the Plackett–Burman design methodology and kinetic analysis. Fuel Processing Technology 2014; 128: 111-118.

3. Bini R, Colosimo B M , Kutlu A E, Monno M. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plasma arc cutting system. Journal of Materials Processing Technology 2008; 196(1-3): 345-355.

4. Chamarthi S, Reddy N S, Elipey M K, Reddy D V R. Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on theUnevenness surface of Hardox-400 material. Procedia Engineering 2013; 64: 854-861.

5. Chen J C, Li Y, Cox R A. Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study. International Journal of Advance Manufacturing Technology 2009; 41: 760-769.1.

6. Cieslak M. (red.) Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania. Warszawa: PWN, 2001.

7. Dodun O, Bangu S I, Slătineanu L, Coteaţă M. Kerf Generation during the Plasma Cutting Process. AIP Conference Proceedings 2016; 1769(1): 1-6.

8. Elazazy M S, El-Hamshary M, Sakr M, Al-Easa H S. Plackett-Burman and Box-Behnken designs as chemometric tools for micro-determination of L-Ornithine, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 2018; 193: 397-406.

9. Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL. Krakow: StatSoft, 2006. WEB: http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html

10. Gawlik J, Plichta J, Świć A. Procesy produkcyjne. Zarządzanie i inżynieria produkcji. Warszawa: PWE, 2013.

11. Hassan M, Essama T, Yassina A S, Salam A. Optimization of rhamnolipid production by biodegrading bacterialisolates using Plackett–Burman design. International Journal of Biological Macromolecules 2016; 82: 573-579.

12. Jak poprawić jakość cięcia plazmą /www.hyperthermcom

13. Kim S-I, Kim M-H. Evaluation of Cutting Characterization in Plasma Cutting of Thick Steel Ship Plates. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2013; 14: 1571-1575.

14. Klimpel A,· Cholewa W, Bannister A, Luksa K,· Przystałka P, Rogala T, Skupnik D, Cicero S,· Martín-Meizoso A. Experimental investigations of the influence of laser beam and plasma arc cutting parameters on edge quality of high-strength low-alloy (HSLA) strips and plates, International Journal of Advance Manufacturing Technology (2017) 92:699–713.

15. Lazarevic A, Lazarevic D. Investigations of material hardness and structural changes in the heat-affected zone during plasma cutting. Weld World 2017; 61: 1069-1075.

16. Pilarczyk J. Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. T. 2. Warszawa: WNT, 2005.

17. Quinlan K R, Lin D K J. Run order considerations for Plackett and Burman designs. Journal of Statistical Planning and Inference 2015; 165: 56-62.

18. Raport: cięcie plazmą – przewodnik po technologii. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie 2007: 2, 16 – 21.

19. Salonitis K, Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process. Procedia CIRP 2012; 3: 287-292.

20. Shah S R, Parikh R H, Chavda J R, Sheth N R. Application of Plackett–Burman screening design for preparing glibenclamide nanoparticles for dissolution enhancement. Powder Technology 2013; 235: 405-411.

21. Shen L, Morris M D. Augmented Plackett–Burman designs with replication and improved bias properties. Journal of Statistical Planning and Inference 2016; 179: 15-21.

22. Taavitsainen V-M T. Experimental Optimization and Response Surfaces. In: Varmuza K (ed.) Chemometrics in Practical Applications. Rijeka: InTech, 2012 91-138.

23. Thomas D J. Optimizing Plasma Cut-edge Properties for Improving the Durability of Bridge Structures. International Journal of Steel Structures December 2011; 11(4): 481-493.

24. Thomas D J. The influence of the laser and plasma traverse cutting speed process parameter on the cut-edge characteristics and durability of Yellow Goods vehicle applications. Journal of Manufacturing Processes 2011; 13(2): 120-132.

25. Yang S Y S. An Expert System for Plasma Cutting Process Quality Prediction and Optimal Parameter Suggestion, in: Mo J P T et al. (eds.) Global Engineering, Manufacturing and Enterprise Networks. New York: Springer Science+Business Media, 2001 438-445.