

TOMASZ GÓRAL
STANISŁAW KRAWCZYK
JAN PAWLIK

Możliwości wytwarzania elementów przestrzennych metodą napawania 135

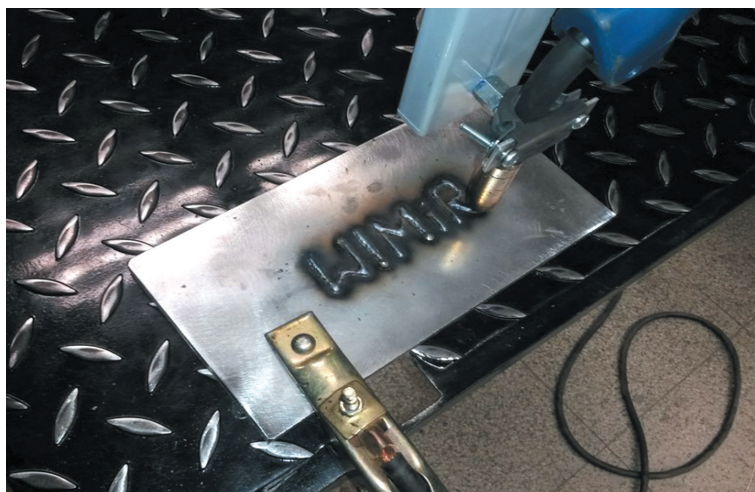
Druk 3D z materiałów termoplastycznych powoli staje się powszechny, ponieważ przez ostatnie lata tematyka wytwarzania przyrostowego zyskała zwolenników, zaś ceny samych urządzeń znacząco spadły. Jednak w kwestii materiałowej popularnością cieszą się głównie tworzywa sztuczne. Choć metale można uznać za materiały termoplastyczne, ich przestrzenne nakładanie wymaga zaawansowanych technologii, co generuje duże koszty i utrudnia kontrolę procesu. Niniejszy artykuł omawia zagadnienie możliwości wytwarzania przyrostowego elementów metalowych za pomocą trójosiowego plotera sterowanego numerycznie połączonego z półautomatem spawalniczym z wykorzystaniem metody 135. Autorzy dodatkowo sprawdzili wpływ nagłych zmian wektorów prędkości na odchylenia geometryczne.

Słowa kluczowe: metoda 135, druk 3D, WAAM, napawanie, wytwarzanie przyrostowe

1. WSTĘP

Wytwarzanie przyrostowe jest obecnie jedną z najszybciej rozwijających się metod wytwarzania elementów o skomplikowanych kształtach w produkcji małoseryjnej lub prototypów jednostkowych. Metody wytwarzania przyrostowego polegają na budowaniu części przez nakładanie kolejnych warstw, które przylegają do siebie w wyniku nadtopienia podłoża. W technologii FDM (*fused deposition modeling*) wytwarza się części z wielu tworzyw sztucznych o właściwościach termoplastycznych, m.in. ABS lub biodegradowalnego PLA [1]. Rozwiązanie to charakteryzuje się niskimi kosztami

wykonania prototypu, ponieważ nie są wymagane wysokie właściwości wytrzymałościowe z uwagi na silną anizotropowość wydruku [2]. W procesie DMLS (*direct metal laser sintering*) następuje selektywne przetapianie proszku metalowego. Jest to obecnie jedna z najdroższych metod wytwarzania elementów [3], których wytrzymałość oraz odporność na zużycie potrafi osiągnąć poziom zbliżony do prezentowanego przez elementy kute lub odlewane [4]. Zarówno technologia druku 3D, jak i DMLS są już przemysłowo stosowane. W ramach działalności Koła Naukowego Mechaników Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie zaprojektowano i wykonano ploter – napawarkę, która umożliwiła napawanie liternictwa, co uwidacznia rysunek 1.



Rys. 1. Napawane litery Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH (WIMiR)

Urządzenie to działa na zasadzie zbliżonej do drukarek 3D korzystających z materiałów termoplastycznych w formie filamentu z tą różnicą, że materiał w postaci stalowego drutu spawalniczego jest rozgrzewany powyżej temperatury topnienia nie za pomocą grzałek, a łuku elektrycznego.

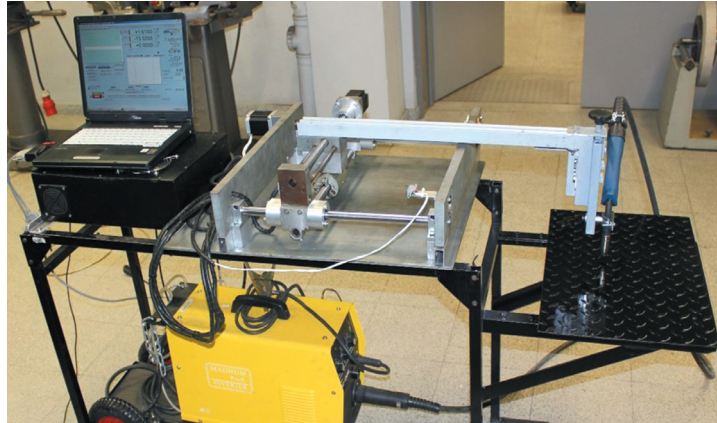
2. MATERIAŁY I METODY

Od pewnego czasu proces napawania metodą 135 jest coraz częściej wykorzystywany do produkcji przyrostowej [5, 6]. Jest to jednak na razie obszar nadal pozostawiający przestrzeń do badań. Główne problemy tej metody to trudności związane z kontrolowaniem łuku spawalniczego i jeziorka płynnego metalu, co z kolei powoduje małą dokładność kształtowo-wymiarową wyrobu gotowego. Dodatkową trudnością jest system sterowania w trzech osiach. Najprostsze systemy przetwarzają jednorazowo tylko jeden blok kodu CNC odpowiadający za jedną współrzędną, nie analizując danych dotyczących wektora, który ma być wykonany w następnej kolejności. Po każdym wektorze praca jest zatrzymywana i następuje pobieranie kolejnego bloku. Ze względu na inercje maszyna osiąga zadaną prędkość posuwu dopiero po pewnym czasie. W wyniku zastosowania takiego systemu sterowania do napawarki CNC może powstawać napoina o nie-

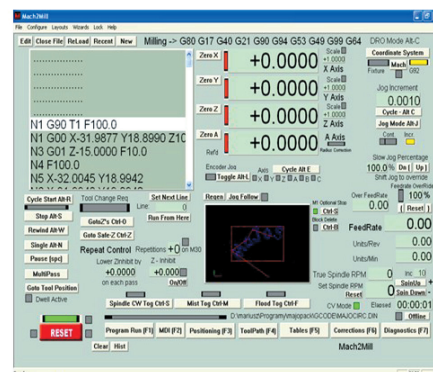
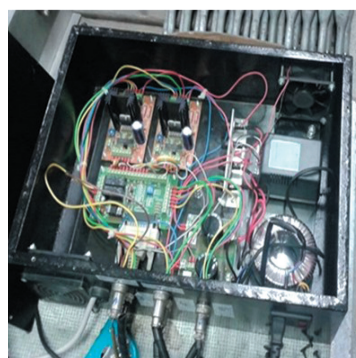
równej szerokości z miejscowymi zgrubieniami, a przy napawaniu na podłożu o małej grubości nawet jego przypalenia [7]. Problemy spadku prędkości w urządzeniach CNC zostały w dużej mierze wyeliminowane po wprowadzeniu systemu analizy kolejnych wektorów. Metodę nazwano dynamiczną analizą wektorów, która podnosi prędkość w fazach ruchu o zmiennych kierunkach (węzły oraz początek i koniec wektora) [8]. Ma to szczególne znaczenie przy napawaniu przestrzennym elementów o skomplikowanych kształtach. Zmiana kierunku napawania przy stałej prędkości podawania drutu elektrodowego powoduje w tych miejscach zgrubienia lub nawet wypływ ciekłego metalu z otwartego jeziorka spawalniczego.

W niniejszym artykule autorzy przeprowadzają badania za pomocą zmodernizowanego stanowiska do napawania 3D, przedstawionego na rysunku 2.

Stanowisko składa się z plotera o wydłużonym ramieniu do mocowania uchwytu spawalniczego, sterownika silnikami krokowymi NEMA 23, dwuosowego napędu śrubowego oraz półautomatu spawalniczego MIG 200 MMA i komputera Fujitsu-Simens AMILO Pro V2010. Sterowanie napędami oraz uchwytem spawalniczym odbywało się za pomocą sterowników L289N oraz oprogramowania Mach 3 Mill, co widoczne jest na rysunku 3. Ponadto stół spawalniczy wyposażono w system wstępnego nagrzewania oporowego.



Rys. 2. Stanowisko do napawania przestrzennego wykonane przez Koło Naukowe Mechaników przy Katedrze Systemów Wytwarzania AGH w Krakowie



Rys. 3. Widok sterownika silnikami krokowymi i programu sterującego Mach2Mill

W celu realizacji przestrzennego napawania konieczne było odpowiednie dobranie parametrów prądu, napięcia, prędkości spawania oraz podawania drutu, aby poszczególne warstwy miały właściwy przetop, a jeziorko płynnego metalu utrzymywało się w ściegu spawalniczym. Niespełnienie tego warunku powodowało spływanie płynnego metalu z budowanej struktury. Wstępne próby, przeprowadzone przy stałej prędkości spawania wynoszącej $V = 7$ m/min oraz zmiennej prędko-

ści podawania elektrody, umożliwiły dobranie takich parametrów, by napoiny miały jednolity kształt i były ciągłe, co przedstawiono na rysunkach 4–6. W tabelach 1–3 zawarto parametry nastawione (gdzie zmiennymi niezależnymi było natężenie prądu I_n oraz prędkość podawania drutu V_{el}) oraz wielkości zmierzone, czyli napięcie, natężenie rzeczywiste I_s , a także wymiary geometryczne powstałych napoin w postaci wysokości h i szerokości b ściegu.

Tabela 1
Parametry napoin przy zadanym natężeniu prądu $I_n = 100$ A.
Wyniki widoczne są na rysunku 4

Nr spoiny	Parametry nastawione		Parametry mierzone		I_s [A]	Wymiary geometryczne	
	I_n [A]	V_{el} [m/min]	U_s [mV]	U_s [V]'		b	h
1	100	4,0	3,31	19,38	33,1	x	X
2	100	6,5	4,85	19,88	48,5	3,91	1,57
3	100	9,0	6,45	19,78	64,5	4,13	2,07
4	100	11,5	8,02	19,91	80,2	4,63	2,49
5	100	14,0	9,42	19,15	94,2	4,76	2,72

Tabela 2
Parametry napoin przy zadanym natężeniu prądu $I_n = 150$ A.
Wyniki widoczne są na rysunku 5

Nr spoiny	Parametry nastawione		Parametry mierzone		I_s [A]	Wymiary geometryczne	
	I_n [A]	V_{el} [m/min]	U_s [mV]	U_s [V]'		b	h
1	150	4,0	4,20	23,57	42,0	x	X
2	150	6,5	5,44	23,38	54,4	4,69	1,26
3	150	9,0	7,23	23,45	72,3	5,26	1,53
4	150	11,5	8,73	23,86	87,3	5,87	1,77
5	150	14,0	9,74	23,41	97,4	6,27	2,33



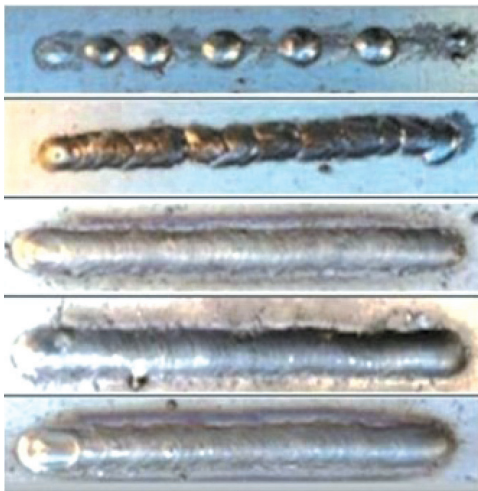
Rys. 4. Próby napawania przy natężeniu 100 A.
Najlepsze lico uzyskano przy prędkości podawania elektrody wynoszącej 11,5 m/min



Rys. 5. Napawanie przy natężeniu prądu 150 A

Tabela 3
Parametry napoin przy zadanym natężeniu prądu $I_n = 200$ A.
Wyniki widoczne są na rysunku 6

Nr spoiny	Parametry nastawione		Parametry mierzone		I_s [A]	Wymiary geometryczne	
	I_n [A]	V_{el} [m/min]	U_s [mV]	U_s [V]'		b	h
1	200	4,0	4,45	26,22	44,5	x	X
2	200	6,5	6,22	26,53	62,2	4,95	1,22
3	200	9,0	7,22	26,23	72,2	5,84	1,54
4	200	11,5	8,56	26,10	85,6	6,67	1,80
5	200	14,0	9,96	26,07	99,2	7,03	2,23



Rys. 6. Napawanie przy natężeniu prądu 200 A

3. NAPAWANIE PRZYROSTOWE (3D)

Po wykonaniu napoin płaskich napawarkę opisaną w rozdziale 2 zastosowano do wykonania brył przestrzennych. Podczas wykonywania próby technologicznej w postaci napisu WIMIR (przedstawionego na rysunku 7) zaobserwowano opisywane we wstępie nagromadzenia materiału dodatkowego w miejscach zmiany kierunku wektora prędkości uchwytu spawalniczego.



Rys. 7. Przybliżone zdjęcie napawanego literactwa

Napoiny wykonywano według poniższej procedury:

1. Urządzenia elektryczne podłączono do źródła zasilania i sprawdzono poprawność działania.
2. Włączono podgrzewacz stołu roboczego i umieszczono na nim blachę o grubości 5 mm i wymiarach 300 mm × 50 mm.
3. Po osiągnięciu przez blachę temperatury 120°C podjęto kolejne czynności.
4. Podłączono butle z gazem do spawarki, odkręcono zawór odcinający dopływ gazu i ustawiono żądany przepływ gazu osłonowego.
5. Uruchomiono komputer.
6. Na panelu urządzenia spawalniczego nastawiono wcześniej dobrane parametry: natężenie prądu oraz prędkość podawania drutu elektrodowego.
7. Uruchomiono program Mach 2.
8. Włączono sterowniki napawarki CNC.
9. Wyzerowano położenie głowicy plotera CNC.
10. Załadowano odpowiedni G-kod do pamięci programu.
11. Uruchomiono proces napawania elementu.
12. Po skończonych próbach za każdym razem wyłączano wszystkie urządzenia i w celu zapewnienia bezpieczeństwa zakręcano butle z gazem.

Według podanej procedury wykonano:

A. Walec o średnicy podstawy 40 mm

- zastosowano mieszankę gazu osłonowego 80% argon, 20% CO₂ – mieszanka M21,
- przepływ gazu osłonowego 10 l/min,
- drut SG2 o średnicy 0,6 mm,
- odległość rurki prądowej od napawanej powierzchni 18 mm,
- prędkość spawania 360 mm/min,
- natężenie prądu 100 A,
- prędkość podawania drutu 9 m/min.

B. Graniastosłup o podstawie kwadratu o boku 40 mm

- zastosowano mieszankę gazu osłonowego 80% argonu, 20% CO₂,
- przepływ gazu osłonowego 10 l/min,
- drut SG2 o średnicy 0,6 mm,
- odległość rurki prądowej od powierzchni napawanej 18 mm,

- prędkość spawania 420 mm/min,
- natężenie prądu 100 A,
- prędkość podawania drutu 9 m/min.

C. Graniastosłup o podstawie trójkąta równobocznego o boku 40 mm

- zastosowano mieszankę gazu osłonowego 80% argonu, 20% CO₂,
- przepływ gazu osłonowego 10 l/min,
- drut SG2 o średnicy 0,6 mm,
- odległość rurki prądowej od powierzchni napawanej 18 mm,
- prędkość spawania 500 mm/min,
- natężenie prądu 100 A,
- prędkość podawania drutu 9 m/min.

Rysunek 8 przedstawia wielościgowo napawane bryły trójwymiarowe. Temperatura międzyścigowa nie była mierzona.



Rys. 8. Pierwsze próby napawania przestrzennego metodą MIG/MAG przy wykorzystaniu napawarki

4. BADANIA GEOMETRII STALOWYCH WYDRUKÓW PRZESTRZENNYCH

Do weryfikacji poprawności wykonania napoin autorzy przeprowadzili pomiary metrologiczne geometrycznych wymiarów napoiny. Wartości wymiarowe podane uprzednio dotyczyły środka ścieżki, więc do wymiaru zewnętrznego należy dodać połowę szerokości napoiny nr 4 z tabeli 1 ($b = 4,63$, $1/2 \cdot b = 2,31$).

Wartości oczekiwane wymiarów zewnętrznych dla poszczególnych wydruków przestrzennych zostały w związku z powyższym ustalone na 42,3 mm. Autorzy zmierzili próbki w 20 losowych punktach, odrzucając miejsca z błędnie wykonanymi napoinami (uwidocz-

nione w dolnej części rysunku 9), następnie zostały wyliczone odchylenia standardowe od wartości oczekiwanej (σ). Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawia tabela 4.

Błędy geometrii najbardziej uwypuklone były w przypadku prostopadłościanu o podstawie kwadratu. Autorzy wnioskują, że wynika to z aż 8 odcinków przy naróżnikach, przy których występowało nagromadzenie materiału. W przypadku walca oraz graniastosłupa o podstawie trójkąta zauważono niższe odchylenia standardowe od wymiarów nominalnych, choć w przypadku walca, gdzie końcówka robocza miała zadane stałe wartości wektora, zmiany kierunku odchylenia były zauważalnie najniższe.

Tabela 4
Dane pochodzące z weryfikacji metrologicznej napawanych przestrzennie brył

Numer pomiaru	Walec o średnicy 42,3 mm	Graniastosłup o podstawie kwadratu o boku 42,3 mm	Graniastosłup o podstawie trójkąta o boku 42,3 mm
1.	44,31	43,59	42,80
2.	43,94	44,31	43,30
3.	44,39	44,35	44,68
4.	43,66	44,87	44,62
5.	42,88	45,21	43,76
6.	43,93	45,27	43,78
7.	43,91	44,51	43,07
8.	42,71	44,48	44,19
9.	44,06	44,45	44,45
10.	43,79	43,57	44,26
11.	45,91	45,18	43,50
12.	42,84	45,52	45,66
13.	43,76	45,82	43,71
14.	44,37	45,19	44,09
15.	43,23	45,68	42,02
16.	42,90	45,37	43,30
17.	42,66	46,48	45,48
18.	44,06	45,75	45,44
19.	43,02	44,93	43,94
20.	43,86	44,63	44,57
Średnia	43,7095	44,958	44,031
σ	1,59942	2,753614	1,950162



Rys. 9. Poprawnie wykonane modele napawane przestrzennie (a) oraz widoczne braki wynikające ze zbyt wysokiej temperatury międzyścięgowej (b). Fragmenty z brakami nie były brane pod uwagę przy weryfikacji metrologicznej

Autorzy postanowili dodatkowo zastosować prosty test statystyczny, korzystając z metody *t*-Studenta w celu sprawdzenia jak blisko wymiarów nominalnych była wynikowa geometria. Zastosowany poziom istotności to $\alpha = 0,05$, a liczba stopni swobody to $k = n - 1$, czyli $k = 19$. Odczytując wartość z tablicy rozkładu *t*-Studenta, otrzymujemy $t_{0,05;19} = 2,093$. Generalny wzór, z którego korzystano, to:

$$P\left(\bar{x} - \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{n}} < \bar{m} < \bar{x} + \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{n}}\right) = 0,95 \quad (1)$$

Dla walca obliczenia przedstawiają się następująco:

$$P\left(43,7095 - \frac{1,59942 \cdot 2,093}{\sqrt{20}} < m_w < 43,7095 + \frac{1,59942 \cdot 2,093}{\sqrt{20}}\right) = 0,95$$

$$P(43,7095 - 0,7485 < m_w < 43,7095 + 0,7485) = 0,95 \quad (2)$$

$$P(42,961 < m_w < 44,458) = 0,95$$

Oznacza to, że można założyć z 95-procentowym prawdopodobieństwem, że średnica rzeczywistego, napawanego przestrzennie walca będzie mieścić się w przedziale:

$$m_w \in \langle 42,961, 44,458 \rangle \quad (3)$$

Analogicznie przedstawiają się obliczenia dla graniastosłupa o podstawie czworokąta:

$$P\left(44,958 - \frac{2,753614 \cdot 2,093}{\sqrt{20}} < m_k < 44,958 + \frac{2,753614 \cdot 2,093}{\sqrt{20}}\right) = 0,95$$

$$P(44,958 - 1,2887 < m_k < 44,958 + 1,2887) = 0,95 \quad (4)$$

$$P(43,6693 < m_k < 46,2467) = 0,95$$

$$m_k \in \langle 43,6693, 46,2467 \rangle$$

Również analogicznie zostały przeprowadzone obliczenia dla graniastosłupa o podstawie trójkąta:

$$P\left(44,031 - \frac{1,950162 \cdot 2,093}{\sqrt{20}} < m_t < 44,031 + \frac{1,950162 \cdot 2,093}{\sqrt{20}}\right) = 0,95$$

$$P(44,031 - 0,9126 < m_t < 44,031 + 0,9126) = 0,95 \quad (5)$$

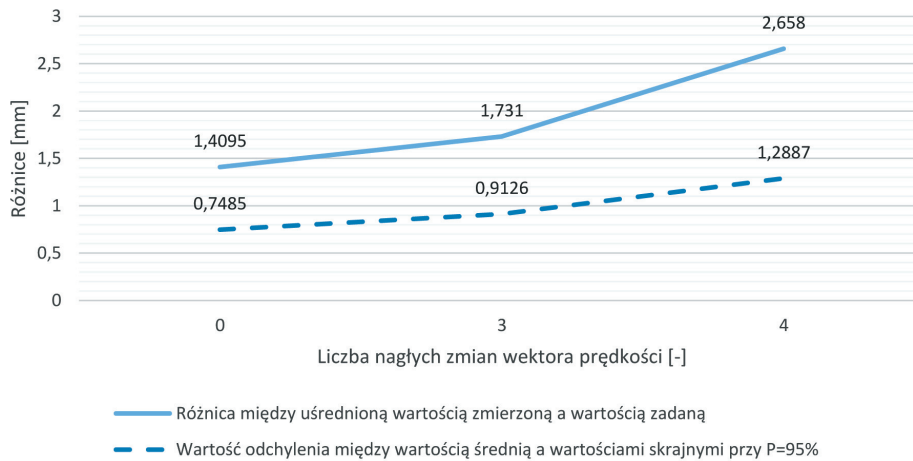
$$P(43,1184 < m_t < 44,9436) = 0,95$$

$$m_t \in \langle 43,1184, 44,9436 \rangle$$

Wyniki przedstawiono zbiorczo w tabeli 5, gdzie symbol *W* oznacza liczbę nagłych zmian kierunku, *Z* oznacza wartość zadaną, *X* oznacza wartość średnią, *R* oznacza różnicę między uśrednioną wartością zmierzoną a wartością zadaną, *M* przedział wartości zmierzonej o prawdopodobieństwie 95%, a *D* wartość odchylenia między średnią a wartościami skrajnymi przedziału *M*.

Tabela 5
Dane dotyczące odchyłeń geometrycznych

Typ geometrii	W [-]	Z [mm]	X [mm]	R [mm]	M [mm]	D [mm]
Walec	0	42,300	43,710	1,4095	42,961–44,458	0,7485
Graniastosłup o podstawie trójkąta	3	42,300	44,031	1,7310	43,669–46,270	0,9126
Graniastosłup o podstawie kwadratu	4	42,300	44,958	2,6580	43,118–44,944	1,2887



Rys. 10. Wykres zależności odchylenia geometrycznych od liczby nagłych zmian kierunku wektora prędkości

Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 10, z którego wynika, że wraz ze wzrostem liczby nagłych zmian kierunku wektora prędkości uchwytu spawalniczego niezgodności wymiarowe rosną. Aby tego dowiedzieć, zastosowano dodatkowo jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA. Niech hipoteza zerowa H_0 ma brzmienie:

„Liczba nagłych zmian kierunku wektora prędkości ruchu głowicy roboczej w bieżącym układzie stanowiska na 99% nie ma wpływu na niedokładność wymiarową”.

Hipoteza alternatywna H_a będzie w takim razie brzmiała:

„Liczba nagłych zmian kierunku wektora prędkości ruchu głowicy roboczej w bieżącym układzie stanowiska na 99% ma wpływ na niedokładność wymiarową”.

Liczba stopni swobody między grupami to:

$$df_b = k - 1 = 3 - 1 = 2 \quad (6)$$

Liczba stopni swobody wewnątrz grup to:

$$df_w = n_t - k = 60 - 3 = 57 \quad (7)$$

gdzie:

- k – liczba grup,
- n – liczba wszystkich pomiarów.

Dla wyznaczonych stopni swobody układu dobrano współczynnik F_{kryt} z tabeli rozkładu Fishera. Jego wartość to $F_{2,57} = 4,998$.

Wykorzystując dane z tabeli 4, wyliczono średnią dla wszystkich pomiarów:

$$\bar{x}_C = \frac{\bar{x}_w + \bar{x}_t + \bar{x}_k}{n} \quad (8)$$

$$\bar{x}_C = \frac{43,7095 + 43,5310 + 44,9580}{3} = 44,06617$$

Wyliczono również sumę kwadratów odchylenia od średniej globalnej \bar{x}_C dla wszystkich wartości pomiaru oraz sumę kwadratów odchylenia od średniej dla poszczególnych brył $\bar{x}_w + \bar{x}_t$ oraz \bar{x}_k . Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 6. SS_T oznacza sumę wszystkich kwadratów, SS_W oznacza sumę kwadratów wewnątrz danej grupy, a SS_B oznacza sumę kwadratów pomiędzy grupami.

$$SS_T = SS_W + SS_B$$

$$SS_T = \sum_{i=0}^{n=20} (x_{wi} - \bar{x}_C)^2 + (x_{ti} - \bar{x}_C)^2 + (x_{ki} - \bar{x}_C)^2 = 67,11$$

$$SS_W = \sum_{i=0}^{n=20} (x_{wi} - \bar{x}_C)^2 + (x_{ti} - \bar{x}_C)^2 + (x_{ki} - \bar{x}_C)^2 = 42,93$$

$$SS_B = SS_T - SS_W = 24,17 \quad (9)$$

$$S_B^2 = \frac{SS_B}{df_b} = 12,09$$

$$S_W^2 = \frac{SS_W}{df_w} = 0,75$$

$$F_{wyliczone} = \frac{S_B^2}{S_W^2} = 16,05$$

$$F_{wyliczone} > F_{kryt}$$

Wobec powyższego należy odrzucić hipotezę zerową H_0 i przyjąć hipotezę alternatywną H_a . Analiza wariancji dała autorom 99-procentową pewność, że przy bieżącym układzie stanowiska liczba nagłych zmian kierunku wektora prędkości głowicy ma wpływ na niedokładności geometryczne.

Tabela 6
Tabela zbiorcza zawierająca dane do wyliczeń statystycznych

Pomiar	Walec, $\bar{x}_w = 43,71$			Graniastosłup o podstawie trójkąta, $\bar{x}_t = 43,53$			Graniastosłup o podstawie kwadratu, $\bar{x}_k = 44,96$		
	x_{wi}	$(x_{wi} - \bar{x}_w)^2$	$(x_{wi} - \bar{x}_w)^2$	x_{ti}	$(x_{ti} - \bar{x}_t)^2$	$(x_{ti} - \bar{x}_t)^2$	x_{ki}	$(x_{ki} - \bar{x}_k)^2$	$(x_{ki} - \bar{x}_k)^2$
1.	42,66	1,98	1,10	42,02	4,19	2,28	43,57	0,25	1,93
2.	42,71	1,84	1,00	42,09	3,91	2,08	43,59	0,23	1,87
3.	42,84	1,50	0,76	42,19	3,52	1,80	44,31	0,06	0,42
4.	42,88	1,41	0,69	42,26	3,26	1,62	44,35	0,08	0,37
5.	42,90	1,36	0,66	42,45	2,61	1,17	44,45	0,15	0,26
6.	43,02	1,09	0,48	42,80	1,60	0,53	44,48	0,17	0,23
7.	43,23	0,70	0,23	43,07	0,99	0,21	44,51	0,20	0,20
8.	43,66	0,16	0,00	43,30	0,59	0,05	44,63	0,32	0,11
9.	43,76	0,09	0,00	43,30	0,59	0,05	44,87	0,65	0,01
10.	43,79	0,08	0,01	43,50	0,32	0,00	44,93	0,75	0,00
11.	43,86	0,04	0,02	43,66	0,16	0,02	45,18	1,24	0,05
12.	43,91	0,02	0,04	43,71	0,13	0,03	45,19	1,26	0,05
13.	43,93	0,02	0,05	43,76	0,09	0,05	45,21	1,31	0,06
14.	43,94	0,02	0,05	43,78	0,08	0,06	45,27	1,45	0,10
15.	44,06	0,00	0,12	43,94	0,02	0,17	45,37	1,70	0,17
16.	44,06	0,00	0,12	44,57	0,25	1,08	45,52	2,11	0,32
17.	44,31	0,06	0,36	44,62	0,31	1,19	45,68	2,60	0,52
18.	44,37	0,09	0,44	44,68	0,38	1,32	45,75	2,84	0,63
19.	44,39	0,10	0,46	45,44	1,89	3,64	45,82	3,08	0,74
20.	45,91	3,40	4,84	45,48	2,00	3,80	46,48	5,83	2,32

5. WNIOSKI

Napawanie przyrostowe z wykorzystaniem napawarki skonstruowanej przez Koło Naukowe „Mechaników” AGH wymaga korekty zmiany prędkości napawania w punktach zmiany wektora prędkości. Zbyt długi czas zmiany kierunku napawania powoduje, że przy stałych parametrach prądowych powstają niezgodności kształtu w postaci przerywania jeziora płynnego metalu. Spowodowane to jest w tym przypadku problemami z utrzymaniem stałej prędkości napawania oraz luzami w układzie przeniesienia napędu i prostym systemem sterowania. W celu uzyskania większej dokładności kształtowo-wymiarowej wymagany jest zakup spawarki inwertorowej o większym zakresie regulacji i stabilności prądowej, a także dopracowanie programu sterującego pod względem zmiany prędkości napawania w miejscach krytycznych (głównie w narożnikach).

Dzięki zastosowaniu metod statystycznych udowodniono, że odchylenia geometryczne nie są przypadkowe i zależą od liczby nagłych zmian kierunku wektora prędkości uchwytu spawalniczego. Stosowanie robotów spawalniczych jako bardziej zaawansowanych kinematycznie i programowo maszyn może pomóc ograniczyć tę niedogodność.

Literatura

- [1] Qi X., Ren Y., Wang X.: *New advances in the biodegradation of Poly(lactic)acid*. International Biodeterioration & Biodegradation 2017, 117: 215–223.
- [2] Zhu Y., Tian X., Peng Li J., Wang H.: *The anisotropy of laser melting deposition additive manufacturing Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si titanium alloy*. Materials and Design 2015, 67: 538–542.
- [3] Di L., Yiran Y.: *Cost Modeling and Evaluation of Direct Metal Laser Sintering with Integrated Dynamic Process Planning*. Sustainability 2021, 13, 1: 319, <https://doi.org/10.3390/su13010319>.

- [4] Gratton A.: *Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Traditional Manufacturing Methods*. National Conference of Undergraduate Research 2012 [materiały pokonferencyjne].
- [5] Cegielski P.: *Nowe obszary zastosowania napawania łukowego MIG/MAG*. Przegląd Spawalnictwa 2016, 6: 48–49.
- [6] Cegielski P., Ostrowski M., Łacisz W., Panas M., Kowalski P.: *Nowe prace nad wykorzystaniem napawania łukowego MIG/MAG do drukowania 3D*. Przegląd Spawalnictwa 2018, 1: 43–47.
- [7] *Sterowanie numeryczne obrabiarek*. Portal wiedzy CNC, <http://cnc.pl/sterowanie-ksztaltowe.php> [15.06.2021].
- [8] *Modernizacja układu sterowania plotera frezującego*. Portal wiedzy CNC, <http://cnc.pl/przed-cnc.php> [15.06.2021].

dr inż. TOMASZ GÓRAL
dr inż. STANISŁAW KRAWCZYK
mgr inż. JAN PAWLIK

Katedra Inżynierii Wytwarzania
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków
{tgoral, stkrawcz, jan.pawlik}@agh.edu.pl