

	Organizatorzy:	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

## Wpływ wybranych parametrów procesu przecinania strugą wodno-ścierną na dokładność geometryczną i jakość powierzchni otworów cylindrycznych

Influence of selected process parameters of the abrasive water-jet cutting for geometric accuracy and quality of cylindrical holes

SŁAWOMIR SPADŁO  
DANIEL KRAJCARZ  
DOMINIK DUDEK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.391

W artykule przedstawiano wyniki badań dotyczących możliwości kształtowania dokładności geometrycznej oraz jakości powierzchni stopu aluminium EN AW-2007 wycinanych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną w zależności od warunków obróbki. Przeprowadzono badania wpływu prędkości posuwu, odległości końcówki dyszy mieszającej od powierzchni przecinanego materiału i wydatku dozowanego ścierniwa na błędy kształtu otworów cylindrycznych wycinanych metodą AWJ. Dokonano pomiaru i oceny odchyłki walcowości oraz prostoliniowości tworzącej wycinanych otworów. Uzyskane wyniki badań stanowią podstawę do doboru warunków procesu wycinania strugą wodno-ścierną w celu uzyskania założonej dokładności geometrycznej oraz kształtowej otworów. Badanie przeprowadzono na obrabiarce APW 2010 BB.

**SŁOWA KLUCZOWE:** cięcie stopu aluminium, struga wodno-ścierna, parametry przecinania, odchyłka walcowości otworów, odchyłka prostoliniowości tworzącej otworów

*The article presents the results of studies on the possibilities of shaping of geometric accuracy and surface quality aluminum alloy EN AW-2007 by using a high pressure stream of abrasive water-jet (AWJ). The experiments were conducted with different water-jet traverse speeds, standoff distances and mass flow rates. The effects of these parameters on cylindrical and rectilinearity profiles cutting holes have been studied based on the experimental results. The obtained results contribute to optimization of AWJ cutting process. The study was carried out on the machine APW 2010 BB.*

**KEYWORDS:** cutting of aluminum alloy, abrasive water-jet,

*cutting parameters, cylindricity deviation, rectilinearity deviation*

Coraz częściej alternatywę dla konwencjonalnych technologii rozdzielania materiałów stanowi obróbka wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną (AWJ). Metoda ta charakteryzuje się dużą uniwersalnością cięcia pozwalającą przecinać materiały o różnych właściwościach fizycznych [6, 7]. Podstawą procesu jest tu zjawisko zużycia ściernego w wyniku erozji mechanicznej materiału [3]. Proces erozji kształtowanego materiału pod wpływem oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodno-ściernej zależy od energii hydraulicznej strugi wody oraz energii kinetycznej użytych ziaren ściernych [10]. W wyniku przekroczenia wytrzymałości doraźnej w obrabianym materiale tworzą się mikroszczeliny i ulega on erozji mechanicznej [16].

Do najważniejszych zalet technologii AWJ zalicza się praktyczny brak oddziaływań cieplnych na przecinany materiał [15], a także występowanie bardzo małych wartości sił nacisku w trakcie procesu obróbczego [11]. Siły te są na tyle małe, że obróbka strugą wodno-ścierną nie wymaga rozbudowanego oprzyrządowania technologicznego w postaci elementów mocujących, uchwytów itp. W procesie cięcia występuje jedynie niebezpieczeństwo poderwania przez wodę elementów o małych gabarytach i niskiej masie, w takich przypadkach konieczne jest zastosowanie oprzyrządowania technologicznego do mocowania przedmiotów obrabianych. Inną bardzo ważną cechą technologii water-jet jest znikome oddziaływanie procesu na środowisko naturalne, które przejawia się brakiem powstawania w czasie procesu cięcia szkodliwych oparów [9]. Większość materiałów ściernych wykorzystywanych, jako medium intensyfikujące proces obróbczy, jest całkowicie obojętne dla środowiska i może zostać zutilizowane, albo też wykorzystane ponownie w procesie cięcia.

\* dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. PŚK (sspadlo@tu.kielce.pl), mgr inż. Daniel Krajcarz (d.krajcarz@wp.pl), mgr inż. Dominik Dudek (dominik\_dudek@op.pl).

Do podstawowych parametrów procesu technologicznego cięcia strugą wodno-ścierną zalicza się: ciśnienie strugi wodnej, prędkość posuwu, odległość dyszy wodno-ścierniej od powierzchni ciętego materiału, wydatek dozowanego ścierniwa, rodzaj i wielkość ziaren ściernych oraz średnicy dyszy wodnej i wodno-ścierniej [2, 8].

Dokładne poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu na jakość otrzymywanych powierzchni przecięcia pozwala opracować model procesu przecinania materiałów [4], w którym nie będą występowały niepotrzebne (głównie ze względów ekonomicznych) nadwyżki technologiczne procesu w postaci zbyt małej wartości prędkości posuwu czy wydatku dozowanego ścierniwa. Powierzchnia przecięcia będzie się natomiast charakteryzować z góry zakładanymi parametrami jakości [5, 6]. Ważne jest, aby jakość powierzchni nie była zbyt niska lub za wysoka w miejscach gdzie nie jest to wymagane.

### Metodyka, przedmiot badań, warunki badań

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu wybranych parametrów procesu technologicznego cięcia strugą wodno-ścierną takich jak prędkość posuwu, odległość dyszy wodno-ścierniej od powierzchni przecinanego materiału i wydatek masowy dozowanego ścierniwa na błędy kształtu otworów cylindrycznych [14] wycinanych metodą AWJ. Zakres badań obejmował ocenę zarysu prostoliniowości oraz walcowości wycinanych otworów cylindrycznych.

Badania zostały przeprowadzone na obrabiarkę APW 2010 BB, którą przedstawiono na rysunku 1. Urządzenie to posiada pompę o mocy 18,5 kW, która umożliwi wytworzenie strugi wodnej o maksymalnym ciśnieniu roboczym 300 MPa. Obrabiarka wyposażona jest w stół roboczy o wymiarach 2000x1000 mm. W badaniach wykorzystano materiał ścierny garnet # 80 E. W procesie cięcia użyto zestawu dyszy wodnej o średnicy 0,30 mm i dyszy mieszającej o średnicy 1,02 mm i długości 75 mm. Badania eksperymentalne przeprowadzono przy wartości ciśnienia 280 MPa. Czas pracy zestawu dysz wodnej i mieszającej w chwili rozpoczęcia badań wynosił 30 roboczogodzin. Badania zostały przeprowadzone w Zakładzie Materiałoznawstwa i Technologii Amunicji Politechniki Świętokrzyskiej.



Rys. 1. Obrabiarka APW 2010 BB

Materiałem użytym do badań była płyta o grubości 15 mm wykonana ze stopu aluminium EN AW-2007. Charakteryzuje się on dobrymi własnościami wytrzymałościowymi oraz bardzo dobrą skrawalnością. Materiał ten posiada ponadto wysoką wytrzymałość zmęczeniową i nie

nadaje się do spawania. W tabeli 1 podano normatywny skład chemiczny badanego materiału.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-2007 [12]

Skład chemiczny aluminium EN AW-2007 %						
Cu	Pb	Mg	Mn	Fe	Si	Zn
3,3-4,6	0,8-1,5	0,4-1,8	0,5-1,0	max 0,8	max 0,8	max 0,8

Podczas eksperymentu planowanego w płycie ze stopu aluminium wycięto zgodnie z planem badań (tabela 2) otwory cylindryczne o nominalnej średnicy 30 mm. Pomiary odchyłek walcowości i prostoliniowości tworzącej otworów wykonano z wykorzystaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo Navigator firmy Zeiss. Podczas pomiarów wykorzystano kulkę stykową o średnicy 2 mm, która przemieszczała się z prędkością 5 mm/s. Odchyłkę prostoliniowości ustalono względem linii odniesienia wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów. Długość fali granicznej  $\lambda_c$  zastosowanego filtru Gaussa wyniosła 0,8 mm. Zarys walcowości uzyskano w wyniku zastosowania strategii pomiarów zarysów okrągłości. Wałek odniesienia, względem którego była określona odchyłka walcowości określono za pomocą okręgu średniego wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów [1]. Do pomiarów odchyłki walcowości użyto filtru Gaussa F/0 pozwalającego wykryć błędy falistości i kształtu mierzonych elementów.

### Eksperyment planowany

Badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z planem Boxa Behnkena – plan trójpoziomowy, trzyczynnikowy. Plan ten zakłada wzajemne badanie wpływu trzech czynników wejściowych dla trzech różnych wartości parametrów wejściowych, którymi w eksperymencie były: prędkość posuwu  $v$ , odległość dyszy wodno-ścierniej od powierzchni ciętego materiału  $s$  oraz wydatek masowy ścierniwa  $m_a$ . Dla powyżej opisanych warunków i przyjętych przedziałów zmienności parametrów wejściowych, z wykorzystaniem modułu DOE (design of experiment) programu Statistica 10, został wygenerowany plan badań eksperymentalnych. Zakresy parametrów wejściowych w doświadczeniu określono na podstawie analizy literatury oraz badań własnych. Tabela 2 zawiera zestawienie wartości kodowych oraz rzeczywistych parametrów wejściowych.

Tab. 2. Plan badań wraz z wartościami kodowymi

Nr eksp	Wartości kodowe			Wartości rzeczywiste		
	$v$ , mm/min	$s$ , mm	$m_a$ , g/min	$v$ , mm/min	$s$ , mm	$m_a$ , g/min
1	-1	-1	0	20	2	340
2	1	-1	0	100	2	340
3	-1	1	0	20	6	340
4	1	1	0	100	6	340
5	-1	0	-1	20	4	230
6	1	0	-1	100	4	230
7	-1	0	1	20	4	450
8	1	0	1	100	4	450
9	0	-1	-1	60	2	230
10	0	1	-1	60	6	230
11	0	-1	1	60	2	450
12	0	1	1	60	6	450
13	0	0	0	60	4	340
14	0	0	0	60	4	340
15	0	0	0	60	4	340

## Wyniki badań i ich analiza

Do obróbki otrzymanych wyników eksperymentalnych wykorzystano program Statistica 10 w wersji 64 bitowej. Program ten zawiera zintegrowany zestaw narzędzi służących do analizy i wizualizacji wyników. Na podstawie otrzymanych wyników, stosując metodę najmniejszych kwadratów, uzyskano równania regresji. Optymalne dla opisywanego przypadku dopasowanie powierzchni odpowiedzi uzyskano dla funkcji w postaci wielomianu kwadratowego zawierającego wzajemne interakcje poszczególnych parametrów wejściowych obróbki. Wykorzystując uzyskane równania regresji wykonano opracowanie graficzne wyników badań w postaci wykresów przedstawionych na rysunkach 2, 3. Dodatkowym elementem obrazującym zależność parametrów wyjściowych w funkcji parametrów wejściowych było zestawienie współczynników korelacji cząstkowych (tabela 3). Wartość współczynnika korelacji jest zmienna w przedziale  $\langle -1, 1 \rangle$ . Dla wartości większych od 0 obserwuje się korelację dodatnią, tzn. wraz ze wzrostem wartości parametru wejściowego rośnie wartość parametru wyjściowego. W przypadku korelacji ujemnej wzrost wartości parametru wejściowego powoduje spadek wartości parametru wyjściowego.

Tab. 3. Współczynniki korelacji cząstkowych poszczególnych wielkości wyjściowych w odniesieniu do wielkości wejściowych

Parametry wejściowe	Odchyłka prostoliniowości	Odchyłka walcowości
$v(L)$	0,30	0,84
$v(Q)$	0,02	0,08
$s(L)$	0,81	0,43
$s(Q)$	-0,08	-0,08
$m_a(L)$	0,07	-0,12
$m_a(Q)$	-0,08	-0,11

Efekty liniowe (L) mogą być interpretowane jako różnica średniej wartości wielkości wyjściowej przy niskich i wysokich ustawieniach odpowiedniej wielkości wejściowej. Ocenę dla efektu kwadratowego, nieliniowego (Q) można zinterpretować, jako różnicę pomiędzy średnimi wartościami wielkości wyjściowej przy średniej wartości odpowiedniej wielkości wejściowej oraz kombinacji typu wysoka i niska [13].

Równania regresji dla odchyłki prostoliniowości:

$$\Delta S_{v,m_a} = 21,3665 + 0,086 \cdot v - 0,0418 \cdot m_a - 8,774 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 5,1136 \cdot 10^{-5} \cdot v \cdot m_a + 7,3109 \cdot 10^{-5} \cdot m_a^2$$

$$\Delta S_{s,m_a} = 40,2281 - 4,4366 \cdot s - 0,1156 \cdot m_a + 0,2409 \cdot s^2 + 0,0166 \cdot s \cdot m_a + 7,9625 \cdot 10^{-5} \cdot m_a^2$$

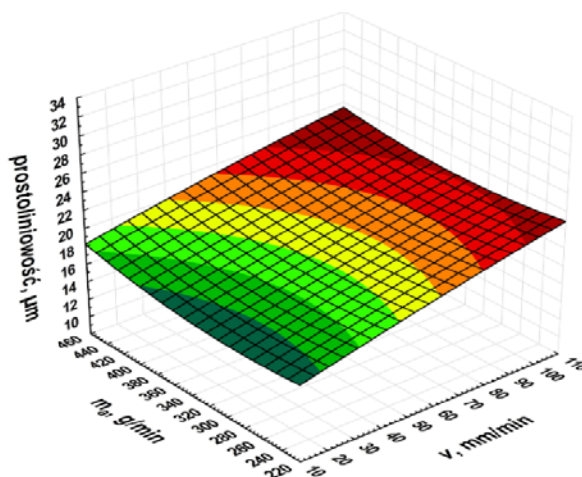
$$\Delta S_{v,s} = 4,9082 + 0,974 \cdot v + 1,7933 \cdot s - 8,774 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 0,0072 \cdot v \cdot s + 0,2212 \cdot s^2$$

Wpływ badanych parametrów wejściowych na odchyłki prostoliniowości tworzącej otworów wycinanych otworów zilustrowano na wykresach przedstawionych na rys. 2.

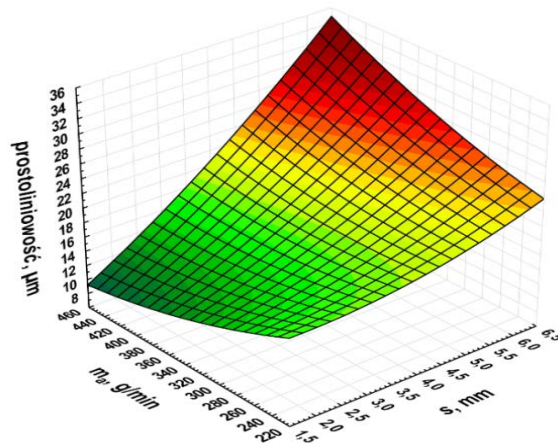
Na wykresie (rys. 2.a) przedstawiono zależność odchyłki prostoliniowości tworzącej wycinanych otworów w funkcji wydatku masowego ścierniwa oraz prędkości posuwu (przy ustalonej wartości  $s = 4$  mm). Analiza wykresu wskazuje, że ze wzrostem prędkości posuwu cięcia  $v$ , w rozpatrywanym zakresie zmienności parametrów, wzrasta wartość błędu prostoliniowości tworzącej otworów. Zmiana wydatku ma-

sowego dozowanego ścierniwa  $m_a$ , powoduje niewielki wpływ na wartość analizowanego parametru.

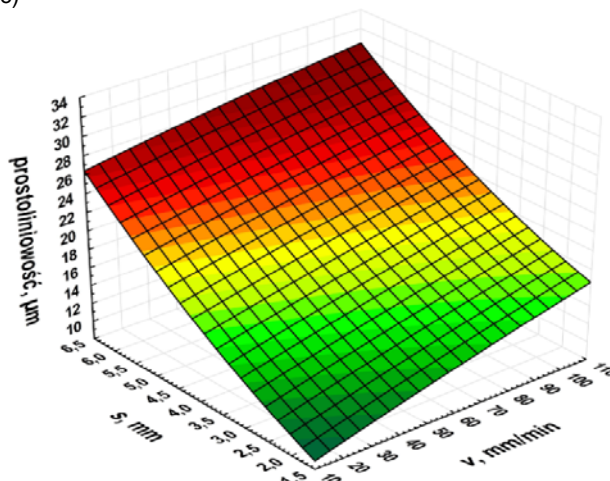
a)



b)



c)



Rys. 2. Zależność odchyłki prostoliniowości tworzącej otworów od a) prędkości posuwu i wydatku masowego dozowanego ścierniwa (dla  $s = 4$  mm), b) odległości dyszy wodno-ścierniwej od powierzchni ciętego materiału i wydatku masowego dozowanego ścierniwa (dla  $v = 60$  mm/min), c) prędkości posuwu i odległości dyszy wodno-ścierniwej od powierzchni ciętego materiału (dla  $m_a = 340$  g/min)

Na wykresie (rys. 2.b) przedstawiono zależność odchyłki prostoliniowości tworzącej wycinanych otworów od odległości dyszy wodno-ścierniwej od ciętego materiału  $s$  i wydatku masowego dozowanego ścierniwa  $m_a$  (przy ustalonej wartości  $v = 60$  mm/min). Analiza wykresu wskazuje, że wraz ze



wzrostem odległości  $s$  wzrasta, w całym przedziale zmienności wydatku masowego ścierniwa, odchyłka prostoliniowości tworzącej wycinanego otworu. Dla małych wartości  $s$  – (odległości dyszy od powierzchni przecinanej) wzrost wydatku masowego ścierniwa powoduje obniżenie odchyłki prostoliniowości, natomiast dla dużych wartości, wzrost wydatku masowego ścierniwa powoduje wzrost odchyłki prostoliniowości spowodowany rozogniskowaniem strugi. Duży wartość współczynnika korelacji (tab. 2) odchyłki walcowości w odniesieniu do odległości od powierzchni ciętego materiału  $s$ , wskazuje na istnienie znaczącego wpływu tego parametru na jakość wycinanych otworów.

Wykres (rys. 2.c) przedstawia zależność wartości odchyłki prostoliniowości tworzącej wycinanych otworów w funkcji prędkości posuwu  $v$  i odległości dyszy wodno-ścierniej  $s$  od ciętego materiału (przy ustalonej wartości wydatku masowego ścierniwa  $m_a = 340$  g/min). Przebieg wykresu wskazuje na istotny wpływ prędkości posuwu  $v$  oraz odległości dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału  $s$  na odchyłkę prostoliniowości tworzącej wycinanego otworu. Uzyskane wartości współczynników korelacji cząstkowych, zestawionych w tabeli 2, potwierdzają istotny wpływ obu tych parametrów procesu cięcia ( $s$ ,  $v$ ) na błędy prostoliniowości tworzącej otworu. W badanym zakresie zmienności obu tych parametrów, przy ustalonej wartości wydatku masowego ścierniwa, wzrost prędkości ciecicia, jak i wzrost odległości dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału powodują pogorszenie jakości wycinanych otworów (wzrost odchyłek prostoliniowości tworzącej).

Równania regresji dla odchyłki walcowości:

$$\Delta C_{v,m_a} = 98,7068 + 2,7812 \cdot v - 0,4614 \cdot m_a - 0,0041 \cdot v^2 - 0,0028 \cdot v \cdot m_a + 0,0008 \cdot m_a^2$$

$$\Delta C_{s,m_a} = 239,3895 - 4,8009 \cdot s - 0,7136 \cdot m_a + 2,026 \cdot s^2 + 0,0068 \cdot s \cdot m_a + 0,0009 \cdot m_a^2$$

$$\Delta C_{v,s} = 52,8852 + 1,7852 \cdot v - 17,0368 \cdot s - 0,0011 \cdot v^2 - 0,0709 \cdot v \cdot s + 3,4883 \cdot s^2$$

Wpływ badanych parametrów wejściowych na odchyłkę walcowości otworów zilustrowano na wykresach przedstawionych na rys. 3.

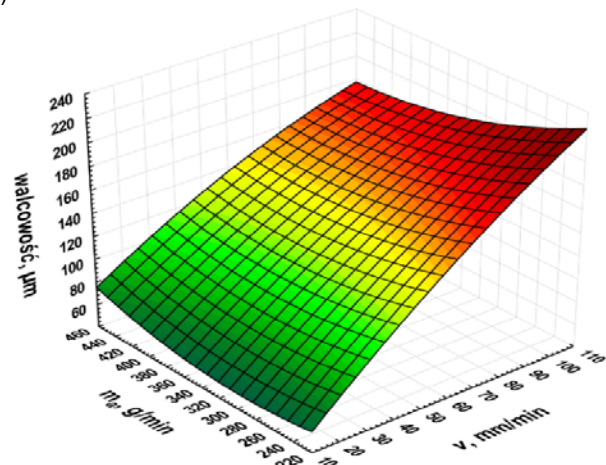
Analiza wykresu (rys. 3.a) wskazuje na istotny wpływ (przy ustalonej wartości odległości  $s = 4$  mm) na odchyłkę walcowości prędkość posuwu ciecicia  $v$ . Wraz ze wzrostem prędkości posuwu wzrasta wartość parametru odchyłki walcowości. Odchyłka walcowości jest silnie dodatnio skorelowana z prędkością posuwu, współczynnik korelacji (tab. 2) osiąga wartość 0,84. Analiza wpływu wydatku masowego dozowanego ścierniwa  $m_a$  wskazuje, w badanym zakresie jego zmienności, niewielki wpływ na wartość odchyłki walcowości wycinanych otworów.

Analiza wykresu (rys. 3.b) zależności odległości dyszy wodno-ścierniej  $s$  od ciętego materiału i wydatku masowego dozowanego ścierniwa  $m_a$  (przy ustalonej wartości  $v = 60$  mm/min) wskazuje, że wraz ze wzrostem parametru  $s$  wzrasta odchyłka walcowości. Analiza wpływu wydatku masowego ścierniwa wskazuje na istnienie lokalnego minimum wartości odchyłki walcowości wycinanych dla wartości wydatku masowego ścierniwa około  $m_a = 380$  g/min.

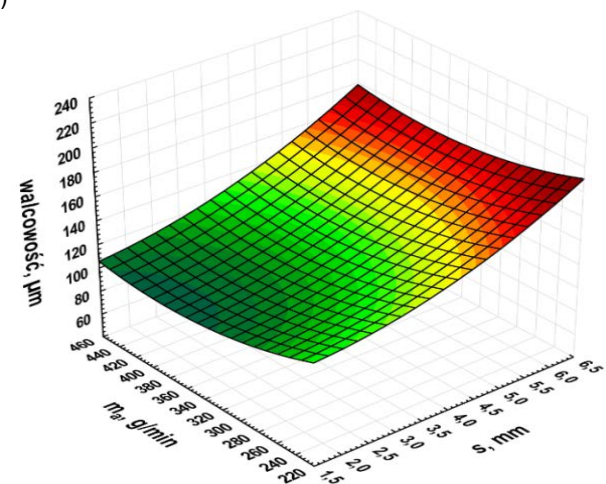
Wykres (rys. 3.c) przedstawia zależność wartości odchyłki walcowości wycinanych otworów w funkcji prędkości posuwu  $v$  i odległości dyszy wodno-ścierniej  $s$  od ciętego materiału (przy ustalonej wartości wydatku masowego

ścierniwa  $m_a = 340$  g/min). Analiza wykresu wskazuje na duży wpływ prędkości posuwu  $v$  oraz odległości dyszy wodno-ścierniej  $s$  na odchyłki walcowości wycinanych otworów. Wzrost wartości prędkości posuwu, w badanym przedziale jego zmienności, powoduje wzrost odchyłki walcowości. Wraz ze wzrostem odległości dyszy wodno-ścierniej od przecinanej powierzchni następuje wzrost odchyłki walcowości.

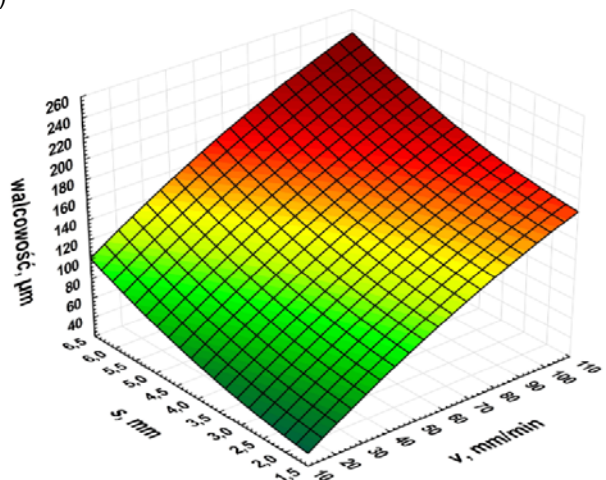
a)



b)



c)



Rys.3 Zależność odchyłki walcowości od a) prędkości posuwu i wydatku masowego dozowanego ścierniwa (dla  $s = 4$  mm), b) odległości dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału i ilości dozowanego ścierniwa (dla  $v = 60$  mm/min), c) prędkości posuwu i odległości dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału (dla  $m_a = 340$  g/min)

## Podsumowanie

Szczegółowa analiza otrzymanych wyników eksperymentu pozwoliła określić wpływ wybranych parametrów procesu technologicznego cięcia strugą wodno-ścierną (prędkości posuwu, odległości dyszy wodno-ścierniej od przecinanego materiału oraz wydatku masowego dozowanego ścierniwa) na błędy kształtu wycinanych otworów cylindrycznych oceniane w wyniku pomiaru odchyłki prostoliniowości tworzącej odchyłki walcowości.

Najistotniejszym, łatwo sterowalnym, parametrem procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest prędkość posuwu  $v$  i odległość dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału  $s$ .

Wzrost jakości wycinanych otworów można uzyskać poprzez zmniejszenie prędkości posuwu  $v$ , przy możliwie małej odległości dyszy wodno-ścierniej od przecinanego materiału. Jednak obniżanie prędkości posuwu powoduje spadek wydajności cięcia i wzrost kosztu procesu.

## LITERATURA

- Adamczak S., Janecki D., Makiela W., Stępień K., Quantitative comparison of cylindricity profiles measured with different methods using Legendre-Fourier coefficients. *Metrology and Measurement Systems*, 17(3), 397-404, 2010.
- Borkowski J., Sutowska M., Borkowski P., Jakościowy Model procesu cięcia wybranych materiałów metalowych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. *Mechanik*, 9, 84-87, 2014.
- Borkowski J., Sutowska M.: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na parametry SGP. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 27, 43-51, 2007.
- Chithirai Pon Selvan M., Mohana Sundara Raju N., Assessment of process parameters in abrasive waterjet cutting of stainless steel. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 1(3), 34-40, 2011.
- Hlavac L., Hlavacova I., Gembalova L., Kalicinsky J., Fabian S., Mestanek J., Kmec J., Madra V., Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 6190-6195, 2009.
- Hlavac L., Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4154-4161, 2009.
- Hloch S., Valicek J., Topographical anomaly on surfaces created by abrasive waterjet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, 593-604, 2012.
- Kovacevic R., Mohan R., Beardsley H., Monitoring of thermal energy distribution in abrasive waterjet cutting using infrared thermography. *ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118, 555-563, 1996.
- Krajcarz D., Młynarczyk P., Analiza technologii cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, *Współczesne uwarunkowania rozwoju społeczno-gospodarczego, Świat – Polska – Region świętokrzyski*, ISBN 978-83-63423-10-0, 617-626, 2014.
- Mazurkiewicz A., Czynniki wpływające na błąd kształtu i chropowatość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym. *Inżynieria materiałowa*, 6/166/, 686-689, 2008.
- Nowicki B., Pierzynowski R., Spadło S., Investigation of electro-discharge mechanical dressing (EDMD) of diamond abrasive wheels with conductive bonds using brush electrodes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 220, 421-428, 2006.
- PN-EN 573-1:2006 Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 1: System oznaczeń numerycznych.
- Rabiej M., *Statystyka z programem STATISTICA*, Helion, Gliwice 2012.
- Spadło S., Krajcarz D., Młynarczyk P., Badanie wpływu parametrów przecinania strugą wodno-ścierną stali S355 na strukturę geometryczną powierzchni. *Mechanik*, 9, 293-297, 2014.
- Sutowska M., Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną, *PAK*, 57, 535-537, 2011.
- Wantuch E., Wskaźniki technologiczne i koszty obróbki stali wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym. *Szkoła naukowa obróbek erozyjnych*, 83-95, Warszawa 2000.