

Porównanie wpływu właściwości ścierniwa na jakość powierzchni cięcia strugą wodno-ścierną (AWJ)

dr hab. inż. S. Spadło, mgr inż. D. Krajcarz, mgr inż. E. Skowron

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu właściwości ścierniwa takich jak wymiary i kształt ziaren ściernych oraz wydatku masowego ścierniwa na dokładność geometryczną oraz strukturę geometryczną powierzchni cięcia. Badania przeprowadzono dla naturalnego ścierniwa almandynu należącego do grupy granatów. Analiza wyników badań eksperymentalnych umożliwiła określenie wpływu wymiarów charakterystycznych ziaren ściernych na odchyłki wymiarowo kształtowe wycinanych otworów o zarysie kołowym oraz chropowatość powierzchni powstałej w wyniku procesu przecinania. Istotnym elementem przeprowadzonych prac było określenie kształtu śladu powierzchni przecięcia oraz jej jakości dla różnych granulacji ścierniwa. Przeprowadzono badania porównawcze ścierniwa nowego oraz użytego w procesie cięcia. Badania potwierdziły fakt rozkruszania większości ziaren ściernych. Szczegółowa analiza składu frakcyjnego oraz kształtu ziaren ściernych po procesie przecinania pozwala wnioskować, że możliwe jest powtórne wykorzystanie badanego materiału ściernego w procesie cięcia.

Wstęp

Jedną z podstawowych kategorii parametrów procesu cięcia wpływających na jakość powierzchni przecięcia są właściwości ścierniwa. Do powyższej kategorii zalicza się [3]:

- rodzaj ścierniwa,
- wymiary ziaren ściernych,
- kształt ziaren ściernych.

Istotnym parametrem procesu przecinania strugą wodno-ścierną (AWJ) jest wydatek masowy ścierniwa.

Poznanie wpływu poszczególnych właściwości ścierniwa na jakość otrzymywanych powierzchni przecięcia pozwoli na opracowanie warunków procesu przecinania z uwagi na kryteria efektywności procesu przecinania (głównie związanego z wydajnością procesu, ale także z jego kosztami) oraz jakości przecinanej powierzchni badanego materiału ocenianej na podstawie parametrów struktury geometrycznej powierzchni jak i dokładności kształtowo wymiarowej [1]. Z uwagi na powyżej przedstawione kryteria poszukuje się parametrów cięcia takich by jakość powierzchni była zadowalająca. Dążenie do uzyskania dobrej lub bardzo dobrej jakości powierzchni po cięciu AWJ związane jest ze wzrostem kosztów procesu cięcia,

które zazwyczaj należy ograniczać. Ze względu na duży udział kosztów ścierniwa w ujęciu całkowitych kosztów cięcia, istotnym elementem jest dobranie odpowiednich wymiarów ziaren ściernych jak również wydatku masowego dozowanego ścierniwa dla konkretnej operacji technologicznej. Ważnym zagadnieniem w procesie przecinania wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest zminimalizowanie nadwyżek technologicznych wynikających między innymi z wartości ciśnienia zasilającego układ dyszowy, prędkości posuwu jak również wydatku masowego podawanego ścierniwa.

W obróbce wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną proces dekohezji materiału zależy w dużym stopniu od energii kinetycznej cząstek ściernych zawartych w strumieniu tnącym [13]. Właściwy dobór warunków przecinania może w znaczący sposób poprawić efektywność ekonomiczną procesu przecinania przy założonych efektach technologicznych [11]. Jednym ze sposobów wpływających na poprawę struktury geometrycznej powierzchni [4, 7] otrzymanej w wyniku procesu przecinania jest zastosowanie ścierniwa o odpowiednim kształcie ziaren ściernych [5].

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że największą efektywność przecinania uzyskuje się przy około 23% udziale masowym ścierniwa w strudze wodno-ścierną [12]. Przekro-



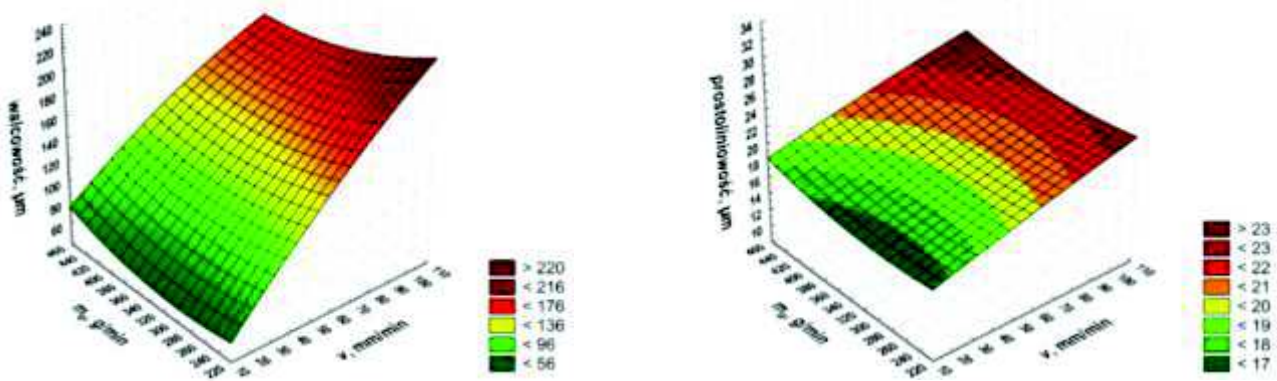
czenie tej proporcji powoduje, że wzrasta prawdopodobieństwo wzajemnego blokowania ziaren ściernych i zmniejszenie zdolności erozyjnej strumienia tnącego [6].

Charakterystyka ścierniwa

Jednym z częściej stosowanych materiałów ściernych w obróbce AWJ, którego zadaniem jest zintensyfikowanie procesu obróbczego jest granat almandynowy. Jest to minerał pochodzenia naturalnego, zaliczany do gromady krzemianów. Jego wzór chemiczny jest następujący $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$. Ścierniwo to charakteryzuje się różnorodną barwą ziaren od kremowej po czarną. Almandyny są zbudowane z kryształów 12 ściennych lub rzadziej 24-ściennych krystalizujących w układzie regularnym.

Autorzy przeprowadzili badania mające na celu określenie wpływu wydatku masowego ścierniwa na dokładność geometryczną wycinanych otworów – odchyłkę walcowości i prostoliniowości otworów cylindrycznych wycinanych technologią AWJ [10]. Przeprowadzono eksperyment planowany, wyniki badań poddano standardowemu opracowaniu statystycznemu. Przykładowe zależności odchyłki walcowości w funkcji prędkości posuwu i wydatku masowego dozowanego ścierniwa, oraz odchyłki prostoliniowości w funkcji prędkości posuwu i wydatku masowego dozowanego ścierniwa wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Analiza wyników przeprowadzonych badań wskazuje, że poprzez właściwy dobór wartości parametrów cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, możliwe jest sterowanie podstawowymi parametrami wyjściowymi procesu –



Rys. 1. Przykładowe zależności: a) odchyłki walcowości, b) odchyłki prostoliniowości, w funkcji prędkości posuwu i wydatku masowego dozowanego ścierniwa [10]

Pomimo, że jest to bardzo twarde ścierniwo (7,5 w skali Mohsa) to poszczególne ziarna ściernie, w procesie przecinania, ulegają intensywnej fragmentacji rozkruszają się już podczas formowania strugi oraz w trakcie samej operacji przecinania [2]. W efekcie, ziarna o obłych kształtach przybierają formę ziaren o ostrych przełamach o charakterze muszlowym.

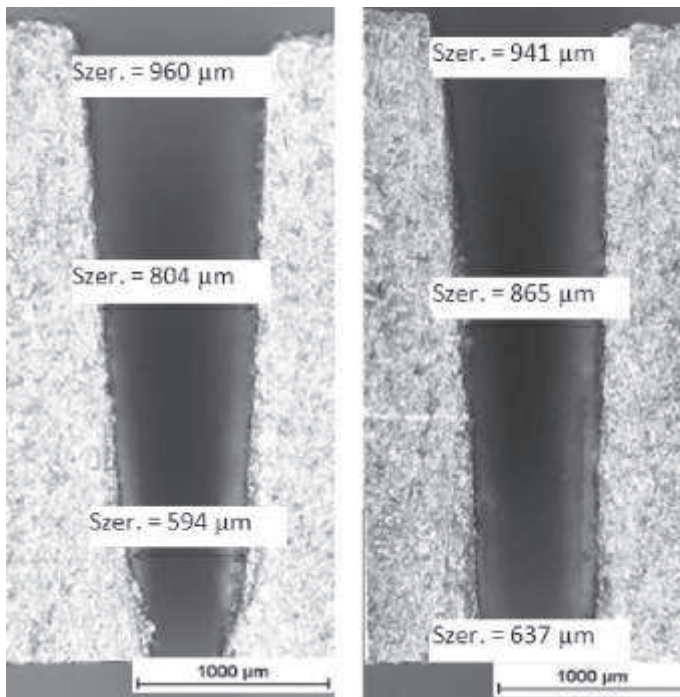
Badania wpływu wydatku ścierniwa na efekty obróbki

W procesie formowania strugi wodno-ścierniej bardzo ważny jest dobór właściwego wydatku masowego dozowanego ścierniwa. Wprowadzanie zbyt małej ilości cząstek ściernych do wysokociśnieniowego strumienia wody powoduje zmniejszenie wydajności i pogorszenie jakości przecinanej powierzchni. Opiswane charakterystyki procesu związane są ze zmniejszeniem potencjału energetycznego takiej strugi wodno-ścierniej. Również na zmniejszenie wydajności i jakość procesu cięcia może wpływać wprowadzenie do wysokociśnieniowego strumienia wody zbyt dużej ilości ziaren ściernych. Nadmierna ilość ścierniwa ogranicza przepustowość dyszy, uniemożliwiając strudze wody nadanie odpowiedniej prędkości ziarnom ściernym. W efekcie wzajemnego blokowania się ziaren ściernych przy wejściu do dyszy formującej oraz licznych wzajemnych kolizji ziarna ściernie ulegają nadmiernemu rozkruszaniu. Rozwiązanie polegające na zastosowaniu zbyt dużego wydatku masowego ścierniwa związane jest ze zwiększeniem kosztów obróbki.

zarówno efektywności obróbki (rozumianej głównie jako wydajność) jak i odchyłkami kształtu wycinanych otworów o zarysach cylindrycznych (prostoliniowość i walcowość). Poza właściwym doбором wydatku masowego ścierniwa istotnym parametrem procesu cięcia jest prędkość posuwu (v_f). W zakresie zmienności wydatku masowego przewidzianego planem eksperymentalnym uzyskane wyniki wskazują na małą korelację wydatku masowego ścierniwa (m_a) na parametry błędów kształtu wycinanych otworów cylindrycznych. Wzrost wydatku masowego ścierniwa powoduje nieznaczne obniżenie zarówno odchyłki walcowości jak i prostoliniowości otworów w całym analizowanym zakresie zmienności badanego parametru. Badania przeprowadzone dla małych wartości wydatku ścierniwa wskazują, że wraz ze zmniejszaniem wartości tego parametru zwiększeniu ulegają odchyłki kształtu wycinanych otworów cylindrycznych.

Badania wpływu wymiarów ziaren ściernych na efekty obróbki

W procesie cięcia AWJ możemy stosować ścierniwo o różnej granulacji. Maksymalne, możliwe do zastosowania, wymiary ziaren ściernych uzależnione są od średnicy dyszy formującej strugę wodno-ścierną. Przyjmuje się, że wymiary charakterystyczne największych ziaren ściernych powinny być przynajmniej 3-krotnie mniejsze niż średnica dyszy formującej. Zachowanie takich relacji wymiarowych ogranicza prawdopodobieństwo ich zakleszczania się w dyszy i umożliwia swo-



Rys. 2. Kształt oraz wymiary szczeliny cięcia stali S355 dla prędkości posuwu 140 mm/min przy zastosowaniu ziaren ściernych a) garnet #120, b) garnet #80 [11]

Tabela 1. Wartość kąta ukosowania powierzchni cięcia w zależności od prędkości posuwu i wymiarów ziaren ściernych [11]

Prędkość cięcia, mm/min	Kąt ukosowania powierzchni przecięcia	
	garnet #80	garnet #120
20	0,64°	1,08°
60	1,87°	2,96°
100	3,64°	4,22°
140	4,91°	5,64°
180	6,47°	7,18°

bodny przepływ cząstek ściernych przez dyszę. W przypadku typowych prac w procesie cięcia AWJ stosuje się ścierniwo garnet #80. W przypadku konieczności wykonywania zarysu powierzchni o podwyższonych wymogach chropowatości zaleca się stosowanie ścierniwa o mniejszej granulacji (#120, #240). Wyniki badań autorów dotyczące oceny kształtu szczeliny przecięcia [11] wskazują, że zastosowanie ścierniwa o mniejszej granulacji powoduje w efekcie większy kąt ukosowania. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań przedstawiono w Tabeli 1.

Porównując, w przedstawionym zestawieniu tabelarycznym, wartości kąta ukosowania można stwierdzić, że każdorazowo uzyskiwano większe nachylenie powierzchni przecinanej w przypadku zastosowania garnetu #120 w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy użyciu garnetu #80. Większy kąt ukosowania uzyskiwany w przypadku zastosowania garnetu #120 był

spowodowany tym, że ziarna o mniejszych rozmiarach (masie) relatywnie szybko wytracały energię kinetyczną.

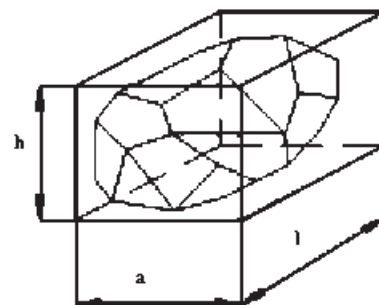
Autorzy przeprowadzili badania geometrii szczeliny przecinania stosując ścierniwo o różnych granulacjach [11] wykonali również pomiary jej kształtu. Przykładowe fotografie szczelin przecięcia przedstawiono na rysunku 2.

Badania procesu przecinania materiału przeprowadzono przy zachowaniu takich samych wartości prędkości posuwu. Uzyskane w wyniku badań szczeliny przecięcia różniły się kształtem oraz wymiarami. Opisywane efekty były szczególnie zauważalne dla dużych prędkości posuwu.

Analiza kształtu oraz wymiarów szczelin cięcia stali S355 przedstawionych na rys. 2 dla prędkości posuwu 140 mm/min przy zastosowaniu ziaren ściernych garnet #120 i garnet #80 wskazuje, że strumień wodno-ścierny zawierający ścierniwo o mniejszej ziarnistości szybko wytracał energię kinetyczną, w efekcie materiał w dolnej strefie cięcia nie mógł być w pełni wyerodowany.

Badania wpływu kształtu ziaren ściernych na efekty obróbki

Charakterystykę powszechnie stosowanych ziaren ściernych można poszerzyć o analizę ich kształtu. Najczęściej kształt ziaren ściernych określany jest w zależności od stosunku odpowiednich wymiarów ziarna, co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wymiary charakteryzujące ziarno ściernie: l – długość, a – szerokość, h – grubość [8]

Ze względu na proporcje poszczególnych wymiarów ziarna wyróżnia się następujące kształty ziaren ściernych (według stosunku wymiarów: długość, szerokość oraz grubość) [8, 9]:

- izometryczne (1:1:1),
- blaszkowate (1:1:0,33),
- płytkowate (1:1:0,66),
- słupkowate (1:0,66:0,33),
- mieczykowate (1:0,66:0,33),
- iglaste (1:0,33:0,33).

Z uwagi na efektywność procesu wycinania AWJ najbardziej korzystne jest zastosowanie ścierniwa o izometrycznym kształcie oraz dużej liczbie ostrych krawędzi. Potwierdziły to badania [5], w wyniku których można stwierdzić, że ziarna ściernie pochodzące z recyklingu (po ich jednokrotnym wykorzystaniu w procesie cięcia) posiadają w większości przypadków kształt izometryczny, dodatkowo charakteryzują one się licznymi ostrymi krawędziami, przykładowe makrofotografie przedstawiono na rysunku 4.



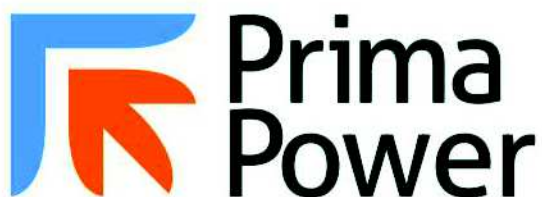
Zautomatyzuj swoją produkcję z Prima Power!

Laser Genius 6kW Fiber

wycinarka laserowa ze źródłem fiber
www.laserfiber.tech



Serdecznie zapraszamy do odwiedzenia naszego stoiska na **Targach ITM Polska: Innowacje, Technologie, Maszyny**. Targi odbędą się w dniach **6-9 czerwca 2017 r.** na terenie Międzynarodowych Targów Poznańskich. Znajdziecie nas: **hala 5, stoisko 47**



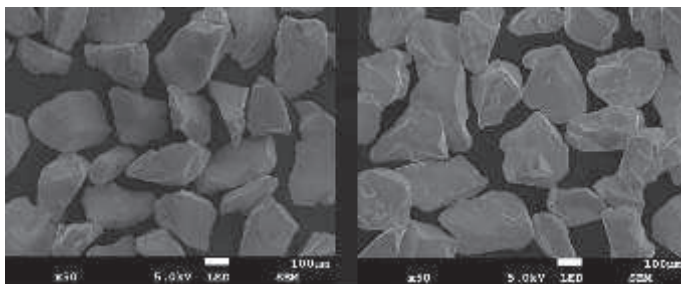
Punch Genius Compact Express

wykrawarka rewolwerowa nowej generacji z automatyką załadunku i rozładunku

Prima Power Central Europe

ul. Holenderska 6, 05-152 Czosnów
tel.: +48 22 2011346
tel.: +48 22 2011347

fax.: +48 22 2011344
e-mail: pl.info@primapower.com
www.primapower.com



Rys. 4. Makrofotografie ziaren ściernych a) ścierniwo nieużywane w procesie przecinania, b) ścierniwo pochodzące z recyklingu

Zastosowanie ścierniwa o takim kształcie ziaren ściernych zwiększa zdolności erozyjne strugi wodno-ściernej. Wykorzystanie ścierniwa pochodzącego z recyklingu umożliwia poprawienie skuteczności erozyjnej strugi. Przejawia się to między innymi mniejszymi wartościami parametrów chropowatości powierzchni zwłaszcza w strefie wylotu strugi z ciętego materiału. Uzyskane w wyniku prac eksperymentalnych wartości podstawowych parametrów chropowatości powierzchni w zależności od kształtu ziaren ściernych zestawiono w Tabeli 2.

Ścierniwo nieużywane w procesie przecinania zawiera ziarna ściernie w większości o obłych kształtach, które pozwalają na wykonanie gładszego cięcia jedynie w górnej strefie cięcia (profil P1). Wraz z wnikaniem strugi w cięty materiał pogarsza się jakość uzyskiwanej powierzchni i parametry struktury geometrycznej ulegają zwiększeniu. Ziarna ścierniwa z recyklingu, w dużej mierze dzięki licznym ostrym krawędziom, mają większy potencjał energetyczny w stosunku do ziaren o obłych kształtach, dlatego też powierzchnia przecięcia w dolnej strefie (profil P3) charakteryzuje się mniejszymi wartościami badanych parametrów SGP o około 20÷30%.

Podsumowanie

W wyniku analizy wpływu charakterystyk geometrycznych ziaren ściernych, zarówno nowych jak i pochodzących z recyklingu, sformułowano następujące wnioski poznawcze przydatne w opracowywaniu procesów technologicznych AWJ:

- możliwe jest powtórne wykorzystanie ziaren ściernych użytych w procesie przecinania strugą wodno-ścierną,
- analiza mikroskopowa kształtu ziaren nowych wskazuje na liczne występowanie ziaren o kształcie słupkowym,
- ścierniwo odzyskane po procesie przecinania, charakteryzuje się izometrycznym kształtem, przy czym niemal wszystkie ziarna posiadają liczne ostre krawędzie,
- racjonalnym sposobem zmniejszenia kosztów cięcia jest powtórne wykorzystanie ziaren ściernych, Autorzy zalecają domieszkowanie ziaren ściernych do ścierniwa nie używanego.

Literatura

1. 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*, 2011, No. 1(3), pp. 34-40.

2. Gałęcki G.: Zachowanie się ścierniwa w konwencjonalnych (AWJ) i zawieszinowych (ASJ) systemach cięcia wodno-ściernego.

Tabela 2. Zmiany wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni w zależności od kształtu ziaren ściernych i badanego profilu: P1 – profil przy górnej krawędzi ciętego materiału, P2 – profil w środku grubości obrabianego materiału, P3 – profil przy dolnej krawędzi ciętego materiału [5]

Parametr	Rodzaj ścierniwa					
	Profil, (ścierniwo nowe)			Profil, (ścierniwo z recyklingu)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
$R_a, \mu m$	3,97	6,03	8,54	4,01	5,19	6,54
$R_z, \mu m$	32,60	38,91	50,76	32,73	36,79	40,31
$R_v, \mu m$	41,02	48,02	69,30	45,01	44,02	46,80

nego. *Materiały XXV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Wrocław – Duszniki Zdrój, 2002.

3. Hashish M.: Optimization factory in abrasive waterjet machining. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*, 1991, vol. 113, No. 1, pp. 29-37.

4. Hlavac L. M., Spadło S., Krajcarz D., Hlavacova I. M.: Influence traverse speed on surface quality after water-jet cutting for Hardox steel. *Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials*, 2015, pp. 723-728.

5. Krajcarz D., Spadło S.: Ponowne wykorzystanie ziaren ściernych w obróbce wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. *Mechanik*, 2017, nr 1, s. 62-63.

6. Kulecki M.: Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 1297-1306.

7. Nowakowski Ł., Wijas M.: The evaluation of the process of surface regeneration after laser cladding and face milling. *Engineering Mechanics*, 2016, pp. 430-433.

8. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

9. PN-ISO 8486-1:1998: Wyroby ściernie spojone – wyznaczenie i oznaczanie składu ziarnowego.

10. Spadło S, Krajcarz D, Dudek D.: Wpływ wybranych parametrów procesu przecinania strugą wodno-ścierną na dokładność geometryczną i jakość powierzchni otworów cylindrycznych. *Mechanik*, 2015, nr 8-9, s. 308-312.

11. Spadło S., Krajcarz D., Młynarczyk P.: Badania wpływu parametrów przecinania strugą wodno-ścierną stali niestopowej S355 na strukturę geometryczną powierzchni. *Mechanik*, 2014, nr 9, s. 293-297.

12. Tazibt A., Parsy F., Abriak N.: Theoretical analysis of the particle acceleration process in abrasive water jet cutting. *Computational Materials Science* 5, 1996, No. 1-3, pp. 243-254.

13. Wantuch E., Kudelski R., Nieciąg H.: Dependency of the technological quality of elements made from an aluminum alloy on their shape in the water jet machining. *Journal of Machine Engineering*, vol. 13, No. 4, 2013, pp. 35-46. ■