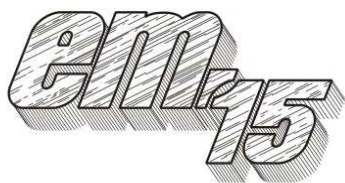


## XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji  
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7  
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,  
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

## Efektywność obróbki wodno-ściernej – wybrane zagadnienia

### Abrasive water-jet cutting efficiency – selected problems

MACIEJ MATUSZEWSKI<sup>1</sup>  
IVAN L. OBORSKI<sup>2</sup>  
MICHAŁ STYP-REKOWSKI<sup>3</sup>

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące efektywności przecinania metodą wodno-ścierną (AWJC). Efektywność obróbki badano na próbkach stalowych i mineralnych (sjenit). Zmiennymi były ponadto: odległość dyszy od czola przecinanego elementu oraz ciśnienie strugi. Jako miarę efektywności przyjęto szerokość przecięcia. Stwierdzono, że zarówno odległość dyszy jak również rodzaj przecinanego materiału w istotny sposób wpływa na szerokość przecięcia, natomiast ciśnienie, w przyjętym przedziale zmienności – nie.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka wodno ścierna, przecinanie, efektywność obróbki.

*In the paper some problems concerning effectiveness of abrasive-water jet cutting were presented. Effectiveness of this kind of machining were tested using steel and syenite samples. Variable factors were also: distance from the nozzle to front of machined surface and jet pressure. As a measure of effectiveness one accepted width of cut. It seems that both, distance of the nozzle as well as kind of machined material essential influenced width of slot, however jet pressure (in assumed range) – no.*

**KEYWORDS:** abrasive-water jet machining, cutting, effectiveness.

#### Wstęp

Różnorodność tworzyw konstrukcyjnych wykorzystywanych w procesach wytwórczych generuje konieczność stosowania zróżnicowanych technik, metod i sposobów ich

obróbki. Kryteria oceny rezultatów obróbki także mogą być różne. Jedną z częściej wykonywanych operacji technologicznych jest cięcie. Operacji tej poddaje się bardzo szerokie spektrum materiałów: od technicznych (metale, tworzywa sztuczne), przez surowce mineralne i materiały pochodne (skały, beton), aż po materiały biologiczne (roślinne: drewno, warzywa, owoce, tkanka organiczna: kości, mięśnie). Z wyżej wymienionych powodów w niniejszej pracy przedstawiono rezultaty badań cięcia.

Obrabianymi tworzywami były stal oraz tworzywo mineralne (sjenit). Jako kryterium efektywności obróbki w badaniach przyjęto szerokość przecięcia, a więc pośrednio – ilość traconego materiału. W prezentowanych badaniach zastosowano cięcie skoncentrowanym strumieniem mieszanki ścierniwa i wody (AWJC – *Abrasive Water Jet Cutting*), czyli technikę, która dzięki swoim zaletom rozwija się dynamicznie [1, 2, 3, 5, 6]. Pomimo tego, jest ona zaliczana jeszcze do obróbek niekonwencjonalnych (nietradycyjnych) [7, 9], dlatego też wymaga jeszcze lepszego poznania, zwłaszcza w odniesieniu do nietypowych tworzyw konstrukcyjnych.

Podstawowym celem badań było stwierdzenie na ile wybrane parametry procesu AWJC wpływają na efektywność przecinania, której miarą była ilość materiału usuniętego podczas przecinania.

#### Operacja technologiczna przecinania

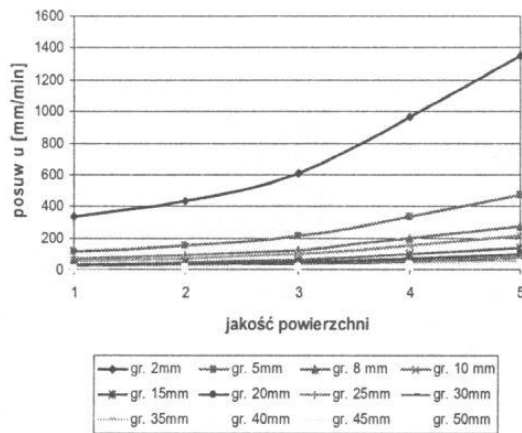
Przecinanie to najczęściej jedna z pierwszych operacji w procesie technologicznym elementów maszyn. Oddziela się w ten sposób fragment materiału z większej całości. Efektywność tej operacji można mierzyć różnymi miarami, np. energia niezbędna do jej realizacji, ilość materiału traconego, topografia powierzchni. Wielkości te są ze sobą powiązane i różna jest ich waga w zależności, m.in. od materiału obrabianego i usytuowania operacji w całym procesie wytwórczym. Przecinając drogi materiał, wartość części traconej może stanowić istotny element kosztów.

<sup>1</sup>dr inż. Maciej Matuszewski (matus@utp.edu.pl)

<sup>2</sup>dr hab. inż. Ivan L. Oborski (ivan.oborskiy@mail.ru)

<sup>3</sup>prof. dr hab. inż. Michał Styp-Rekowski (m.styprekowski@wp.pl)

Przecinanie w końcowej fazie procesu wytwórczego determinuje końcowy stan powierzchni, dlatego też należy tak dobrać parametry przecinania, żeby powierzchnia miała oczekiwane cechy topograficzne. Zależność jakości powierzchni przecinanej metodą AWJC od posuwu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wpływ posuwu w obróbce AWJC na jakość przecinanej powierzchni dla różnych grubości przecinanych materiałów; 1÷5 klasy jakości powierzchni [10]

W badaniach tych poziomy jakości oznaczono od 1 (najlepsza) do 5 (najgorsza), a kryteriami oceny były głównie cechy topograficzne analizowanych powierzchni.

W większości procesów wytwórczych cięcie to jednak jedna z początkowych operacji technologicznych dlatego też cechy struktury geometrycznej powierzchni (SGP) przecinanej nie są tak istotne – po cięciu następują kolejne operacje wprowadzające do struktury zmiany.

W prezentowanej pracy jako miarę efektywności przyjęto szerokość strefy przecinanej. Jest to wielkość, która z kilku powodów wpływa na ekonomiczną stronę procesu przecinania. Większa szerokość strefy to więcej energii niezbędnej do rozdrobnienia i usunięcia materiału. To również więcej utraconego materiału, a także gorsza chropowatość (większa wartość parametrów amplitudowych). Należy jednak zauważyć, że to ostatnie stwierdzenie nie zawsze stanowi cechą ujemną, co wykazano m.in. w pracy [4].

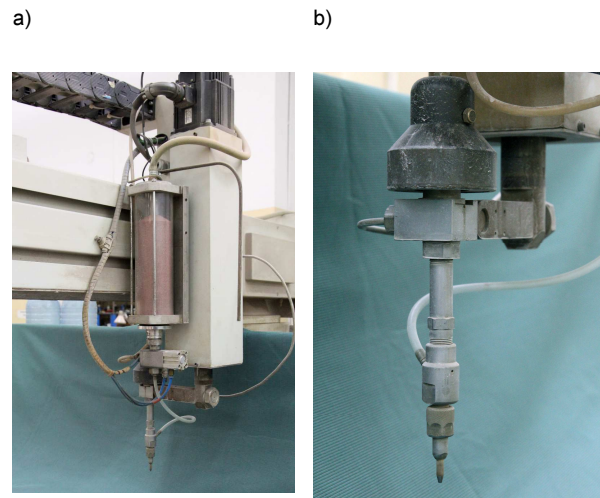
### Obiekt, warunki i zakres badań

Badania dotyczyły cięcia próbek wykonanych z dwóch tworzyw konstrukcyjnych. Pierwsze z nich to stal stopowa wg PN-EN oznaczona numerem 1.2080 i symbolem X210Cr12 (wg starych oznaczeń była to stal NC11). Jest to bardzo często stosowana stal narzędziowa, z której wykonuje się m.in. narzędzia do obróbki plastycznej (ciągadła, wykrojniki, matryce i stemple do wyciskania, szczęki do walcowania gwintu na zimno) oraz obróbki skrawaniem (gwintowniki, noże, zestawy narzędziowe do wykrawania i cięcia). Prezentowane badania dotyczą przecinania stali zahartowanej do  $60 \pm 2$  HRC.

Drugim tworzywem konstrukcyjnym przyjętym w badaniach był sjenit - jawnokrystaliczna skała głębinowa barwy ciemnoszarej lub czarnej. W przeciwieństwie do granitu, nie zawiera wcale, albo zawiera bardzo mało kwarcu.

Przecinane próbki miały przekrój prostokątny o wymiarach  $30 \times 10$  mm, a przecinano je co 5 mm.

Przecinanie metodą AWJC realizowano na wycinarce wodnej DWJFB 1313, której podstawowe zespoły i elementy funkcyjne przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zespoły i elementy funkcyjne wycinarki DWJFB 1313: a) zespół mieszania ścierniwa z wodą, b) dysza wylotowa mieszalniny

Wyprodukowano ją w Chinach i charakteryzuje się poniższymi parametrami konstrukcyjnymi i technologicznymi:

- wymiar stołu roboczego (X x Y):  $1300 \times 1300$  mm,
- przesuw w osi Z: 160 mm,
- dokładność pozycjonowania:  $\Delta = \pm 0,1$  mm,
- powtarzalność:  $\pm 25$   $\mu$ m,
- zakres parametrów pracy:
  - maksymalna prędkość posuwu  $f_{max} = 15\,000$  mm/min,
  - maksymalne ciśnienie strugi:  $p_{max} = 300$  MPa.

Proces cięcia realizowano przy następujących wartościach parametrów:

- ciśnienie strumienia cieczy roboczej:  $p = 200$  oraz  $250$  MPa,
- posuw:  $f = 80$  mm/min.

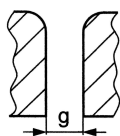
Cieczą roboczą w prezentowanych badaniach była mieszanina wody i ścierniwa Garnet o granulacji *mesh 80*, a dysza w głowicy tnącej miała średnicę 1,016 mm. Podczas badań jej odległość od powierzchni ciętego elementu zmierzano od 1 do 2,5 mm, co 0,5 mm.

Ciśnienie cieczy roboczej  $p$  mieściło się w górnych przedziałach wartości możliwych do uzyskania na obrabiarce, a prędkość posuwu  $f_{sr}$  maszyna dobierała sama na podstawie wprowadzonych danych materiałowych przecinanej próbki i jej cech geometrycznych.

### Rezultaty badań

Stwierdzona w badaniach szerokość przecięcia próbek nie była jednakowa wzdłuż całej grubości – była ona większa od strony wejścia strugi. Kąt pochylenia powierzchni przecięcia wynosił ok.  $18^\circ$ .

Zaobserwowano ponadto, że krawędź od strony dyszy była zaokrąglona. Kształt przekroju przecięcia przedstawiono na rysunku 3 (na rysunku nie są zachowane proporcje).



Rys. 3. Przekrój przez strefę przecinania;  $g$  – szerokość przecięcia

Zbieżny kształt przecięcia może być wynikiem tego, że strumień traci swoją energię wraz z drogą jego cząstek w głąb przecięcia.

Uzyskane w badaniach wyniki zestawiono w tabeli 1. Zamieszczone w niej wartości szerokości przecinania  $g$  stanowią średnią z 10 pomiarów: po 5 z każdej strony. Takie uśrednienie wydaje się dopuszczalne, zważywszy na fakt, że powierzchnie cięcia nie współpracują z innymi, a badania mają charakter rozpoznawczy.

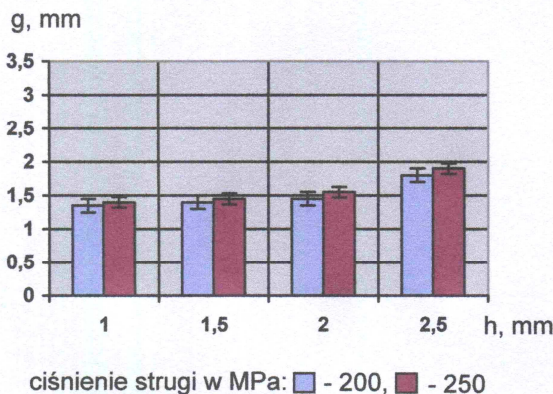
Analiza wyników zawartych w tabeli pozwala stwierdzić, że odległość  $h$  dyszy od powierzchni przecinanej ma wpływ na szerokość przecięcia  $g$  uzyskanego metodą AWJC. Gradient tych zmian jest różnie ze zwiększaniem się odległości dyszy od czoła powierzchni przecinanej. Taki obraz zaobserwowanego zjawiska można wytłumaczyć tym, że struga wodno-ścierna ma kształt stożkowy, rozszerzający się w kierunku od dyszy. Im większa odległość  $h$  tym kontakt z materiałem obrabianym ma więc strumień o większej średnicy.

Rezultaty badań przedstawiono także w formie graficznej. Na rysunku 4 przedstawiono je dla przecinanych próbek stalowych, natomiast na rysunku 5 – dla próbek z tworzywa mineralnego.

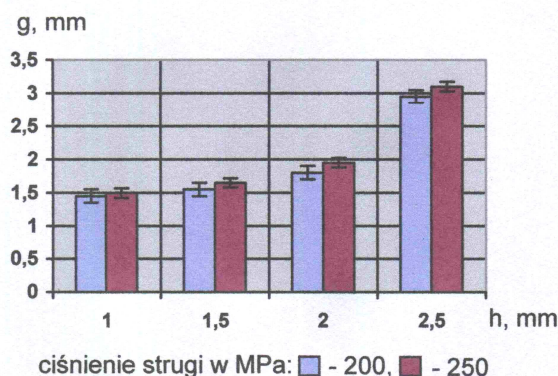
Tab.1. Szerokość cięcia metodą AWJC dla próbek ze stali i sjenitu przy różnych ciśnieniach strugi

Ciśnienie strugi MPa	Odległość dyszy od powierzchni $h$ , mm			
	1,0	1,5	2,0	2,5
szerokość przecięcia $g$ , mm (próbki stalowe)				
200	1,35	1,40	1,45	1,80
250	1,40	1,45	1,55	1,90
szerokość przecięcia $g$ , mm (próbki ze sjenitu)				
200	1,45	1,55	1,80	2,95
250	1,50	1,65	1,95	3,10

Porównując obydwa wykresy stwierdzić można, że rodzaj przecinanego tworzywa to także czynnik różnicujący uzyskane wyniki. Szerokość przecięcia jest większa dla bardziej miękkiego tworzywa jakim jest niewątpliwie sjenit i właśnie twardość można przyjąć jako podstawową przyczynę takiego obrazu zmian. Wpływ na to może mieć także różna struktura obydwóch tworzyw. Zahartowana stal ma bowiem znacznie bardziej rozdrobnioną i jednorodną strukturę.



Rys. 4. Szerokość przecięcia  $g$  w funkcji odległości  $h$  dyszy od powierzchni próbki dla próbek stalowych



Rys. 5. Szerokość przecięcia  $g$  w funkcji odległości  $h$  dyszy od powierzchni próbki dla próbek ze sjenitu

Porównując obydwa wykresy stwierdzić można, że rodzaj przecinanego tworzywa to także czynnik różnicujący uzyskane wyniki. Szerokość przecięcia jest większa dla bardziej miękkiego tworzywa jakim jest niewątpliwie sjenit i właśnie twardość można przyjąć jako podstawową przyczynę takiego obrazu zmian. Wpływ na to może mieć także różna struktura obydwóch tworzyw. Zahartowana stal ma bowiem znacznie bardziej rozdrobnioną i jednorodną strukturę.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można uznać, że w badanym przedziale zmienności ciśnienie ma bardzo niewielki wpływ na badane relacje. Być może zbyt mała jest przyjęta w badaniach różnica ciśnień.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na doświadczalną weryfikację czynników istotnych w obróbce AWJC. Zaobserwowane relacje na pewno są ważne dla badanych tworzyw konstrukcyjnych, jednak ich istotność jest bardzo prawdopodobna także dla innych tworzyw.

Stwierdzono, że na szerokość przecięcia w metodzie AWJC bezpośredni wpływ mają: odległość dyszy od czoła powierzchni przecinanej oraz rodzaj tworzywa konstrukcyjnego, a pośredni – jego twardość i struktura.

Dla innych tworzyw konstrukcyjnych niezbędna jest jednak weryfikacja istotności czynników stwierdzonych w niniejszych badaniach.

## LITERATURA

1. Borkowski J., Borkowski P., Przecinanie zawieszinową strugą wodno-ścierną wytwarzaną metodą BORJET. *Inżynieria Maszyn*, vol. 13, z. 1-2, s. 104÷112, 2008.
2. Kosmol J., Rybarz M., Wala T., Niedbała M., Selected problems and FEM modeling of composites cutting using water jet and abrasive-water jet. *Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Water Jet*, Lyon (France), s. 246÷255, 2002.
3. Kosmol J., Wala T., Hassan A.I., Preliminary attempt to FEM modeling of AWJM of polymeric composites. *Materiały II Międzynarodowej Konferencji „Obróbka wysokociśnieniowym strumieniem wody – WJM 2001”*, Kraków, pp. 39÷48, 2001.
4. Matuszewski M., Styp-Rekowski M., Przecinanie strugą wodno-ścierną jako operacja poprzedzająca proces klejenia. *Technologia i Automatykacja Montażu* nr 3, s. 63÷66, 2014.
5. Mazurkiewicz A., Czynniki wpływające na jakość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym. *Inżynieria Materiałowa* nr 5, s. 1÷4, 2008.
6. Oczóś K.E., Efektywność innowacyjnych technologii na przykładzie wybranych sposobów obróbki strumieniowo-erozyjnej. *Mechanik* vol. 76, nr 8-9, s. 463÷468, 2003.
7. Oczóś K.E., Istota, znaczenie i rozwój hybrydowych procesów obróbki ubytkowej. *Zeszyty Naukowe ATR Bydgoszcz* nr 225, seria *Mechanika* z. 46, Bydgoszcz, s. 145÷164, 2000.
8. Perc A., Przecinanie materiałów konstrukcyjnych strugą hydro-ścierną o obniżonym ciśnieniu. *Materiały Konferencji „Mechanika'99. Nauka i praktyka”*, Gdańsk, s. 135÷136, 1999.
9. Styp-Rekowski M., Obróbki hybrydowe i nietradycyjne jako uzupełnienie zbioru technik wytwarzania skoncentrowanymi nośnikami energii. w: STYP-REKOWSKI M. (red.), *Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii*. Wydawn. Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Bydgoszcz, s. 213÷216, 2003.
10. Wala T., Ocena efektywności przecinania wybranych materiałów metodą strumienia wodno-ściernego. *Inżynieria Maszyn*, vol. 12, z.4, 2009.