

# **PODSTAWY PRZECINANIA WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ**

dr inż. Ryszard SOBCZAK <sup>(1)</sup>

dr inż. Jarosław PRAŻMO <sup>(2)</sup>

## *Streszczenie*

*W artykule opisano podstawowe zagadnienia dotyczące procesu przecinania z wykorzystaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ściernej. Przybliżono teoretyczne podstawy przecinania strugą, parametry hydrauliczne i technologiczne oraz obszar stosowania i zalety takiego sposobu kształtowania materiałów.*

## **1. Wstęp**

Przecinanie wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną obejmuje swą tematyką wiele interdyscyplinarnych zagadnień. Najważniejszymi z nich są: problematyka naddźwiękowych przepływów cieczy, zagadnienia mieszania strugi wodnej z domieszkowanym luźnym ścierniwem, teoria przepływu strugi wielofazowej w powietrzu, kinematyka i dynamika ruchu ziaren ściernych w strudze i po uderzeniu w materiał oraz przebieg procesu erozji w strefie obróbki, a także zagadnienia optymalizacji parametrów technologicznych i konstrukcyjnych.

## **2. Teoretyczne podstawy przecinania**

Do opisu podstawowych własności strugi wodnej można posłużyć się równaniem Bernoulliego, które odnosi się do cieczy nieściśliwych i nielepkich, lecz można je stosować z pewnym przybliżeniem do opisu własności cieczy rzeczywistych [9]. Według tego prawa sumaryczna energia każdego punktu cieczy w przepływie ustalonym jest wartością stałą. Równanie to ma postać:

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

gdzie:

$g$ - przyspieszenie ziemskie,

$p$ - ciśnienie przed otworem,

$p_0$ - ciśnienie otoczenia,

$v$ - prędkość wypływu płynu przez otwór,

$v_0$ - prędkość przepływu po stronie wlotowej,

$z$ - wysokość położenia otworu dyszy,

<sup>(1)</sup> RS WATERJET

<sup>(2)</sup> PRO WATERJET

$z_0$ - wysokość ciśnienia,  
 $\gamma$ - gęstość płynu,  
 $\zeta$  - współczynnik straty lokalnej przy wlocie do otworu.

Po przekształceniu równania i uwzględnieniu, że  $z_0 - z = H$  i  $p_0 = p$ , prędkość wypływu strugi z otworu określona jest wzorem:

$$v = \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}} \sqrt{2g \left( H + \frac{v_0^2}{2g} \right)}. \quad (2)$$

Wydatek można obliczyć ze wzoru:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) f \sqrt{2g \left( H + \frac{v_0^2}{2g} \right)}. \quad (3)$$

gdzie:

$d$ - średnica dyszy,  
 $D$ - średnica przewodu przed dyszą,  
 $f$ - pole powierzchni otworu dyszy.

Powyższy opis dotyczący własności strugi wodnej można również wykorzystać do przybliżonego opisu własności strugi wodno-ścierniej po uwzględnieniu zasady zachowania pędu. Uwzględniając to, że ziarna ściernie umieszczone w strudze wodnej bardzo szybko uzyskują prędkość zbliżoną do prędkości wody można napisać następujące równanie zachowania pędu:

$$\dot{m}_w v_w = \dot{m}_w v_j + \dot{m}_a v_j, \quad (4)$$

gdzie:

$\dot{m}_w$  - natężenie przepływu (wydatek) wody,  
 $\dot{m}_a$  - natężenie przepływu (wydatek) ścierniwa,  
 $v_w$  - prędkość strugi wodnej,  
 $v_j$  - prędkość wypadkowa strugi wodno-ścierniej.

Z równania (4) można wyznaczyć wypadkową prędkość strugi wodno-ścierniej:

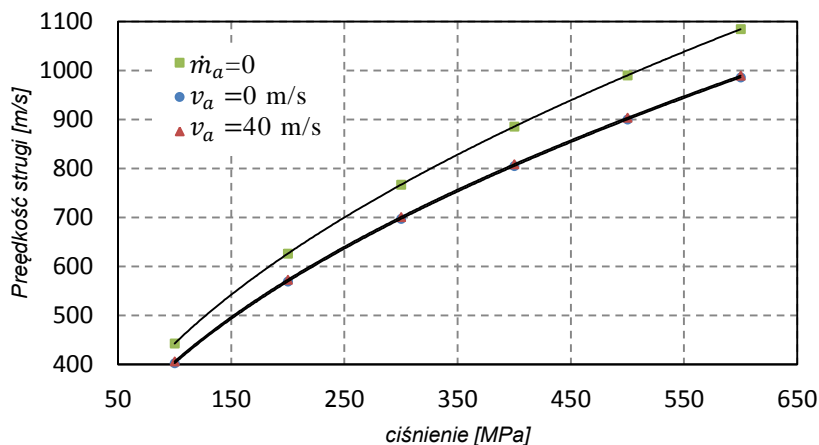
$$v_j = \frac{\dot{m}_w v_w}{\dot{m}_w + \dot{m}_a}. \quad (5)$$

Obliczona w ten sposób prędkość wypadkowa jest prawdziwa przy założeniu, że ścierniwo jest rozpędzane od prędkości zerowej. W przypadku natomiast gdyby ścierniwo podawane było np. w strumieniu powietrza z większą prędkością  $v_a$ , równanie (5) przybrałoby postać:

$$v_j = \frac{\dot{m}_w v_w + \dot{m}_a v_a}{\dot{m}_w + \dot{m}_a}. \quad (6)$$

Graficzną ilustrację tych zależności, w odniesieniu do prędkości strugi wodnej, stanowi wykres przedstawiony na rys. 1. Zamieszczone na tym rysunku przebiegi ukazują rzeczywiste różnice w wypadkowej prędkości wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej, uzyskane przy początkowej prędkości podawania ścierniwa

równej 0 i 40 m/s. Na podstawie analizy tego wykresu można stwierdzić, że wpływ początkowej prędkości podawania ścierniwa jest pomijalnie mały na wypadkową prędkość strugi wodno-ścierniej.



Rys. 1. Zależność prędkości strumienia wodno-ściernego od ciśnienia [1].

### 3. Parametry procesu przecinania

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi proces przecinania wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną [5] są: parametry hydrauliczne strugi, własności ścierniwa, parametry technologiczne przecinania.

Parametrami hydraulicznymi strugi są:

- ciśnienie strugi,
- średnica strugi,
- moc strugi.

Istotnymi własnościami ścierniwa są:

- rodzaj ścierniwa,
- wielkość ziaren ściernych,
- wydatek ścierniwa,
- sposób podawania ścierniwa (suchy lub mokry).

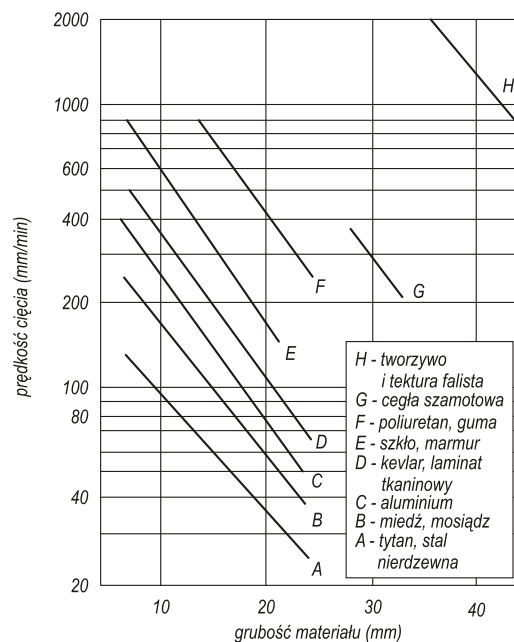
Parametry technologiczne procesu cięcia to:

- prędkość przecinania (posuw),
- odległość dyszy od materiału.

Właściwy dobór parametrów obróbki decyduje o wydajności i jakości przecinania.

### 4. Własności materiału

Na wydajność przecinania prócz parametrów procesu mają wpływ również własności obrabianego materiału tj. rodzaj materiału i jego grubość. Przykładową zależność typowych prędkości przecinania od grubości i rodzaju obrabianego materiału pokazano na rys. 2. Z rysunku tego wynika, że prędkość przecinania zmniejsza się wraz ze wzrostem grubości obrabianego materiału. Zakres stosowanych

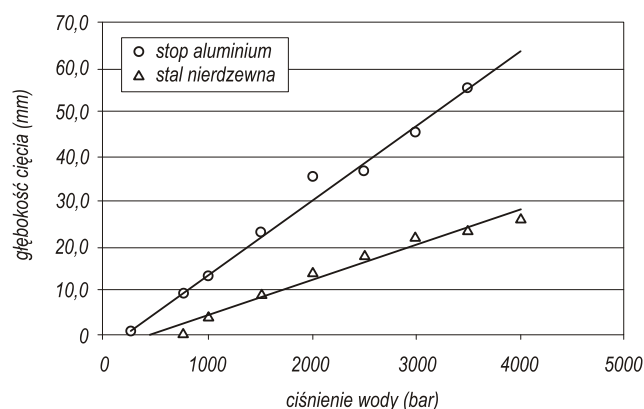


Rys. 2. Osiągalne średnie prędkości cięcia dla różnej grubości materiałów [7].

prędkości przecinania do obróbki różnego typu materiałów jest bardzo szeroki i zależy od ich odporności erozyjnej.

## 5. Ciśnienie strugi

Wpływ ciśnienia wody na wydajność i jakość procesu przecinania materiałów strugą wodno-ścierną jest zagadnieniem analizowanym między innymi w pracach badawczych [8, 11]. Przykładowe zależności występujące między ciśnieniem wody i głębokością przecinania ukazano na rys. 3. Z przedstawionego wykresu wynika liniowa zależność głębokości przecinania stopu aluminium i stali nierdzewnej od ciśnienia strugi wodno-ściernej. Wzrost ciśnienia strugi powoduje zwiększenie

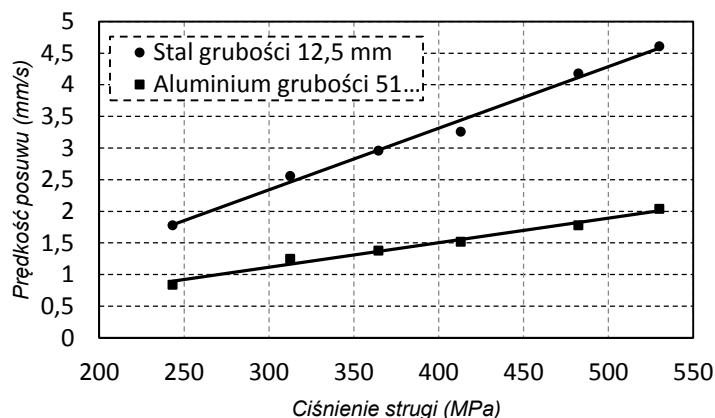


Rys. 3. Wpływ ciśnienia wody na głębokość przecinania [8].

głębokości przecinania obrabianych materiałów w całym zakresie pomiarowym. Korzystny wpływ ciśnienia na głębokość przecinania związany jest ze zwiększeniem energii kinetycznej strugi, a tym samym jej zdolności erozyjnej.

## 6. Prędkość przecinania

Zależność prędkości przecinania od ciśnienia strugi wodno-ściernej w zakresie 240÷530 MPa przedstawiono na rys. 4. Z zależności przedstawionych na tym rysunku wynika liniowy

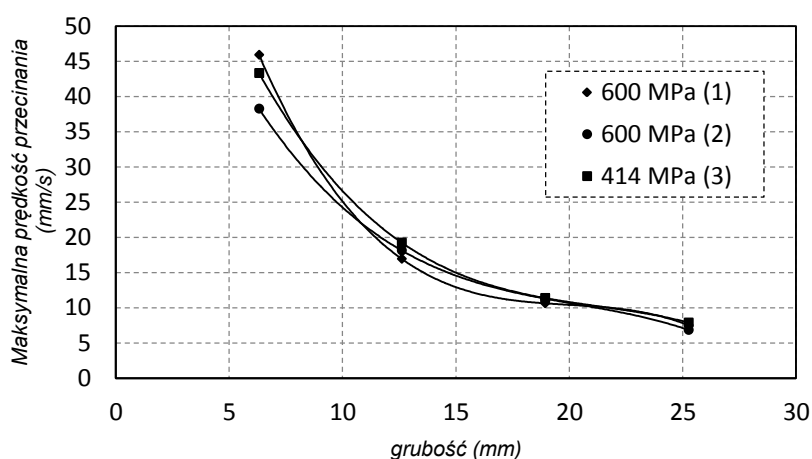


Rys. 4. Związek prędkości przecinania z ciśnieniem strugi wodno-ściernej ( $\theta_{dw}=0,23$  mm;  $\theta_{dj}=0,79$  mm;  $\dot{m}_a=3,8$  g/s) [6].

związek pomiędzy ciśnieniem strugi wodno-ściernej i prędkością przecinania. Wzrost ciśnienia strugi tnącej umożliwia stosowanie zwiększonej prędkości przecinania przy zachowaniu tej samej głębokości przecinania.

## 7. Moc strugi

Porównanie własności technologicznych strugi wodno-ściernej o stałej mocy przy różnej konfiguracji ciśnienia wody i średnic dyszy wodnej i formującej, przy stałym współczynniku masowego wydatku ścierniwa (10% wydatku wody) pokazano na rys. 5. Z

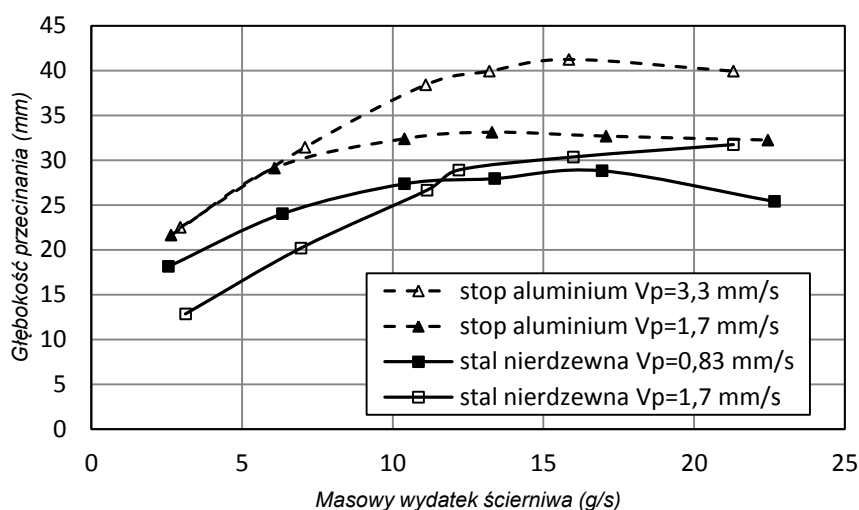


Rys. 5. Zależność maksymalnej prędkości przecinania aluminium od grubości materiału przy różnym ciśnieniu i konfiguracji dysz (1-  $p=600$  MPa,  $\theta_{dw}=0,254$  mm,  $\theta_{dj}=0,75$  mm o długości 75 mm; 2-  $p=600$  MPa,  $\theta_{dw}=0,254$  mm,  $\theta_{dj}=1$  mm o długości 100 mm; 3-  $p=414$  MPa,  $\theta_{dw}=0,33$  mm,  $\theta_{dj}=1$  mm o długości 100 mm [3].

przedstawionego rysunku wynika, że w zakresie ciśnień 400÷600 MPa struga wodno-ścierna o jednakowej mocy i stałym stosunku średnicy dyszy wodnej i formującej posiada bardzo podobne zdolności erozyjne. Zwiększenie stosunku średnicy dyszy formującej i wodnej z 3 do 4 przy ciśnieniu strugi rzędu 600 MPa powoduje zmniejszenie maksymalnej prędkości przecinania stopu aluminium o grubości poniżej 10 mm. Natomiast dla większych grubości obrabianego materiału różnice w maksymalnej prędkości przecinania są nieznaczne.

## 8. Wydatek ścierniwa

Wydatek ścierniwa w strudze wodno-ścierniej ma istotny wpływ na głębokość przecinania [2, 8]. Przykładową zależność głębokości przecinania od wydatku ścierniwa podczas przecinania stopu aluminium i stali nierdzewnej przedstawiono na rys. 6. Największe głębokości przecinania tych materiałów uzyskiwane są przy



Rys. 6. Zależności występujące pomiędzy wydatkiem ścierniwa i głębokością cięcia ( $p=200$  MPa;  $\phi_{dw}=0,4$  mm;  $\phi_{df}=1,5$  mm) [10].

wydatku ścierniwa  $\dot{m}_a=10\div 12$  g/s. Wzrost wydatku ścierniwa powyżej 15 g/s powoduje nieznaczne zmniejszenie głębokości przecinania obrabianego materiału. Jest to spowodowane dławieniem się dyszy formującej nadmiarem ziaren ściernych przepływających w strudze, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia ich energii kinetycznej.

## 9. Podsumowanie

Obróbka wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną realizowana jest w wyniku ściskającego i skrawającego oddziaływania strugi na przecinany materiał. Wskutek koncentracji dużej energii kinetycznej na niewielkim obszarze powstaje zjawisko gwałtownej i ciągłej erozji obrabianego materiału, umożliwiające wydajną obróbkę. Przecinanie z wykorzystaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej posiada wiele zalet, do najważniejszych można zaliczyć:

- uniwersalność stosowania (możliwość przecinania szerokiej gamy materiałów takich jak: szkło, ceramika, kompozyty, węgliki spiekane),
- możliwość przecinania bardzo grubych materiałów (w przypadku stopów aluminium nawet do 300 mm),
- możliwość przecinania wielowarstwowego,
- możliwość przestrzennego operowania narzędziem (kształtowanie elementów trójwymiarowych),
- możliwość prowadzenia obróbki w strefie łatwopalnej i zagrożenia wybuchem,
- brak termicznego wpływu na przecinany materiał (obróbka na zimno),
- brak deformacji materiału w obszarze cięcia,
- wysoka jakość przeciętych powierzchni,
- możliwość rozpoczęcia obróbki w dowolnym miejscu (nie wymaga nawierceń),
- możliwość precyzyjnego wycinania skomplikowanych kształtów (mała średnica narzędzia),
- niewielka ilość odpadów związana z wąską szczeliną cięcia,
- łatwa adoptowalność do określonych zadań obróbkowych.

Tak wiele zalet tej obróbki sprawiło, że jest ona dynamicznie rozwijającą się technologią i coraz częściej spotykaną w polskich zakładach produkcyjnych i usługowych.

## 10. Literatura

- [1] Sobczak R.: *Konstrukcyjne i technologiczne zagadnienia wytwarzania zawieszinowej strugi wodno-ścierniej do precyzyjnego mikroprzecinania*. Rozprawa Doktorska. Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny. Koszalin, 2010.
- [2] Gałęcki G.: *Zachowanie się ścierniwa w konwencjonalnych (AWJ) i zawieszinowych (ASJ) systemach cięcia wodno-ściernego*. Materiały XXV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław-Duszniki Zdrój, 2002, str. 131–142.
- [3] Hashish M.: *Economics of abrasive waterjet cutting at 600 MPa pressure*. 2005 WJTA American Waterjet Conference. Houston, Texas, 2005, paper No 4A-3.
- [4] Hashish M.: *Inside AWJ nozzles*. 2003 American Waterjet Conference. Houston, Texas, 2003, paper No 1-D.
- [5] Hashish M.: *Steel cutting with abrasive waterjets*. Proceedings of 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Jet Cutting Technology. Surrey, 1982, pp. 465–487.
- [6] Hashish M.: *Waterjet cutting at-600 MPa*. 17th International Conference on Water Jetting – Advances and Future Needs. Mainz, Germany, 2004, pp. 47-60.
- [7] Hunziker-Jost U.W.: *Wasser schneidet scharf*. Werkstatt und Betrieb, Vol. 124 (1991), pp. 81–86.
- [8] Kulekci M.K.: *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications*. Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 42, 2002, pp. 1297–1306
- [9] Mazurkiewicz M.: *Niektóre aspekty intensyfikacji obróbki materiałów wysokociśnieniową strugą cieczy*. Prace Naukowe Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej, nr 19, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1977.
- [10] Ohman J.L.: *Abrasive:their characteristics and effect on waterjet cutting*. 7<sup>th</sup> American Waterjet Conference, USA, 1993, pp. 405-409.
- [11] Wang J., Wong W.C.K.: *A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 39 (1999), pp. 855–870.