

**Marzena SUTOWSKA**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,  
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin**Jakościowy model procesu cięcia AWJ wybranych materiałów konstrukcyjnych**

Dr inż. Marzena SUTOWSKA

Jest absolwentką Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W roku 2009 uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Centrum Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się m.in. zastosowaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej do cięcia różnego rodzaju materiałów.



e-mail: marzena.sutowska@tu.koszalin.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań zależności występujących między maksymalną wysokością profilu falistości  $W_m$ , a zasadniczymi parametrami procesu cięcia AWJ. Znajomość oddziaływania warunków obróbki na strukturę geometryczną przeciętych powierzchni umożliwiła opracowanie uniwersalnego modelu procesu cięcia czterech różnych materiałów konstrukcyjnych, określającego jakość otrzymywanej powierzchni, ocenianą według parametru  $W_m$ . Wyznaczona empirycznie zależność może zostać zaimplementowana w sterownikach już gotowych obrabiarek, przeznaczonych do cięcia materiałów strugą wodno-ścierną.

**Słowa kluczowe:** struga wodno-ścierna, cięcie materiałów, model.

**The qualitative model of the AWJ cutting process of selected construction materials****Abstract**

This paper presents the research results for relations between the maximum waviness profile  $W_m$ , and the essential parameters of the AWJ cutting process (water pressure  $p$ , feed rate  $v_f$  and radius of curvature of the shape cut with high-pressure water jet  $r$ ). The knowledge of the impact of processing conditions on the geometric structure of a cut surface allowed developing the universal model of the cutting process for four different construction materials. The model determines the quality of the obtained surface as measured by the parameter  $W_m$ . The developed relationship can be used to predict the quality of processed surfaces for construction materials such as stainless steel 0H18N9, aluminum alloy PA4, carbon steel St41K and brass MO59. Processed materials have different mechanical properties that determine their susceptibility to water jet as an abrasive erosion tool. Considering the qualitative aspects, the developed universal model of the cutting process for each analyzed material, contains a different value of the coefficient  $\beta$ . The designated model can be implemented with low cost in the drivers of already existing machines designed for cutting with high-pressure abrasive-water jet.

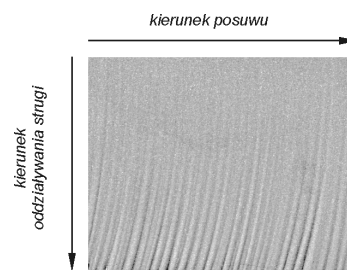
**Keywords:** abrasive water-jet, materials cutting, model.

**1. Wstęp**

W okresie ostatnich kilkunastu lat niezawodność obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uległa istotnej poprawie, zwłaszcza metod cięcia [1]. Wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna stanowiąca uniwersalne i łatwo zmienne narzędzie technologiczne zapewnia sobie coraz to szerszy zakres zastosowań obróbkowych m. in. w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, produkcji tworzyw sztucznych, medycynie [2, 3].

Usuwanie materiału wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest wynikiem interakcji cząstek ściernych z materiałem obrabianym. Ziarna ściernie domieszkowane do strugi wodnej, osiągającej prędkość rzędu do 1000 m/s, otrzymują od niej sumaryczny moment pędu, pozwalający im uzyskać dostateczną energię do aktywacji procesów erozyjnych materiału [4]. Najogólniej rzecz biorąc, cząstki ściernie rozprężone wysokociśnieniową strugą wodną,

osiągają tak dużą energię kinetyczną, że uderzając w materiał obrabiany powodują jego lokalną deformację [5] i efektywny ubytek masy kształtowanego materiału. Oddziaływanie wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej na materiał jest zróżnicowane i zależy od momentu pędu cząstek ściernych. Różnice te są widoczne na powierzchniach przeciętych przedmiotów (rys.1).



Rys. 1. Obraz powierzchni przeciętej strugą wodno-ścierną (0H18N9,  $v_f=0,16$  mm/s,  $p_w=175$  MPa,  $g=35$  mm)

Fig. 1. The picture of the surface cut by abrasive-water jet (0H18N9,  $v_f=0,16$  mm/s,  $p_w=175$  MPa,  $g=35$  mm)

Do ilościowej oceny mikrogeometrii powierzchni przecięcia można zastosować parametry chropowatości powierzchni rozpatrywane w układzie 3D [6, 7]. Ukształtowanie geometryczne powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną wskazuje również na występowanie na nich falistości, której intensywność wzrasta wraz z oddalaniem się od strefy wejścia strugi w materiał. W celu dokonania ilościowej oceny tego zjawiska, można posłużyć się parametrami określonymi przez polską normę [8].

W niniejszym artykule podjęto próbę określenia uniwersalnego modelu procesu cięcia czterech materiałów konstrukcyjnych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prognozującego jakość otrzymywanych przecięć, wyrażoną maksymalną wysokością profilu falistości  $W_m$ .

**2. Metodyka badań**

Prace badawcze przeprowadzono w aspekcie określenia zależności występujących między maksymalną wysokością profilu falistości  $W_m$ , a zasadniczymi parametrami procesu cięcia AWJ (ciśnieniem wody  $p$ , prędkością posuwu  $v_f$  i promieniem krzywizny kształtu wycinanego wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną  $r$ ). Zaplanowane prace eksperymentalne realizowano na centrum obróbkowym typu RCT 32 przeznaczonym do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną (rys. 2).

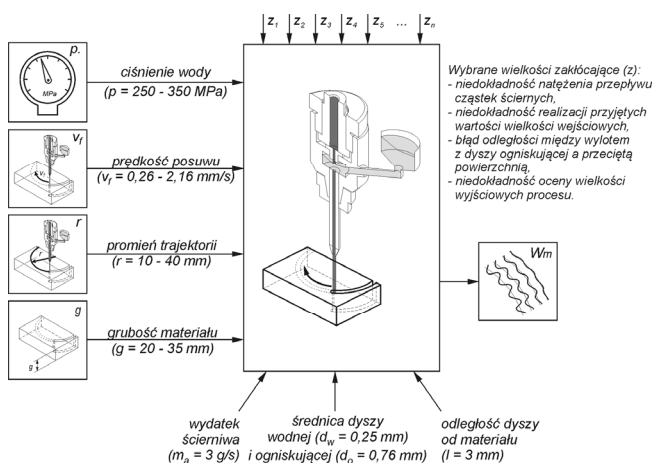


Rys. 2. Centrum obróbkowe AWJ typ RCT 32

Fig. 2. Abrasive-water jet cutting center type RCT 32

Zasadniczym zespołem centrum jest stacjonarny wzmacniacz ciśnienia PowerJet PJE-4-4000, wyposażony w silnik elektryczny o mocy 37 kW, który napędza pompę hydrauliczną. Wzmacniacz zapewnia wytwarzanie strugi wodnej o następujących parametrach roboczych:  $p_{max} = 380$  MPa,  $Q_{max} = 3,8$  dm<sup>3</sup>/min. Z wzmacniacza woda pod ciśnieniem dostarczana jest do głowicy tnącej typu VJW1-2R-C60-ABR. Głowica składa się z korpusu, wewnątrz którego umieszczona jest dysza wodna (ø0,25 mm) oraz dysza ogniskująca (ø0,76 mm). W trakcie badań ustalanie prędkości posuwu następowało automatycznie, zgodnie z wartościami przypisywanymi domyślnie przez program Cadcraft GEMS R4.

Eksperymenty wykonywano na czterech rodzajach materiałów konstrukcyjnych: stali nierdzewnej (gat. 0H18N9), stopie aluminium (gat. PA4), stali węglowej (gat. St41K) oraz mosiądzu (gat. MO59). Do badań przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną stosowano, powszechnie używany dla tego sposobu obróbki, materiał ścierny – garnet GMA 80. Schemat modelu badań zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat modelu badań

Fig. 3. Schematic diagram of the investigated model

Do pomiaru ukształtowania geometrycznego przeciętych powierzchni używano stanowisko pomiarowe, wyposażone w zaawansowany technologicznie profilografometr przestrzenny Talysurf CLI 2000 firmy Taylor Hobson (rys. 4). Do pomiarów używano bezstykowy czujnik laserowy, umożliwiający pomiar w zakresie nierówności nawet do 30 mm. Pomiaru mikrotopografii odbywały się w 401 przejściach z krokiem co 5  $\mu$ m. W jednym przejściu rejestrowanych było 4001 punktów co 0,5  $\mu$ m z prędkością stolika  $v = 750$   $\mu$ m/s. Każdy pomiar był realizowany w trybie jednorzebiegowym.



Rys. 4. Talysurf CLI 2000

Fig. 4. Talysurf CLI 2000

Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano obróbce przy użyciu oprogramowania TalyMap Universal. Dla każdej z otrzy-

manyh mikrotopografii wyznaczano wartość maksymalnej wysokości profilu falistości  $Wm$ .

Do opracowania jakościowego modelu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną został użyty moduł Estymacja Nieliniowa programu STATISTICA, dzięki któremu, możliwa jest aproksymacja danych doświadczalnych wskazaną przez użytkownika zależnością regresyjną oraz oszacowanie z maksymalną dokładnością wartości współczynników zaproponowanego równania regresji. Wspomniany moduł wykorzystuje domyślnie, jako funkcję kryterium (straty) metodę najmniejszej sumy kwadratów.

Założono, że poszukiwaną zależność opisującą związek zachodzący między wielkościami wejściowymi procesu cięcia i maksymalną wysokością profilu falistości można przedstawić za pomocą równania:

$$Wm = (\alpha \cdot \alpha_1 p^{\beta_1} \cdot \alpha_2 v_f^{\beta_2} \cdot \alpha_3 r^{\beta_3} \cdot \alpha_4 g^{\beta_4})^\beta \quad (1)$$

Do estymacji zależności nieliniowej została wykorzystana metoda Rosenbrocka i quasi-Newtona. Takie łączenie metod jest polecane w sytuacji, gdy nie ma pewności co do właściwych wartości początkowych estymacji [9]. W tym przypadku, pierwsza metoda (Rosenbrocka) pozwoliła na określenie wstępnych wartości współczynników, które następnie zostały wykorzystane w metodzie quasi-Newtona.

### 3. Jakościowy model procesu cięcia

W oparciu o uzyskane wyniki badań statystycznych opracowano uniwersalny model procesu cięcia czterech różnych materiałów konstrukcyjnych, określający jakość otrzymywanej powierzchni z użyciem parametru  $Wm$ . Dokonując analizy wartości wszystkich współczynników równań zestawionych w tab. 1, można stwierdzić, że występujące między nimi różnice odnoszą się jedynie do wykładnika potęgi  $\beta$ .

Tab. 1. Uniwersalne modele procesu cięcia

Tab. 1. Universal models of the cutting process

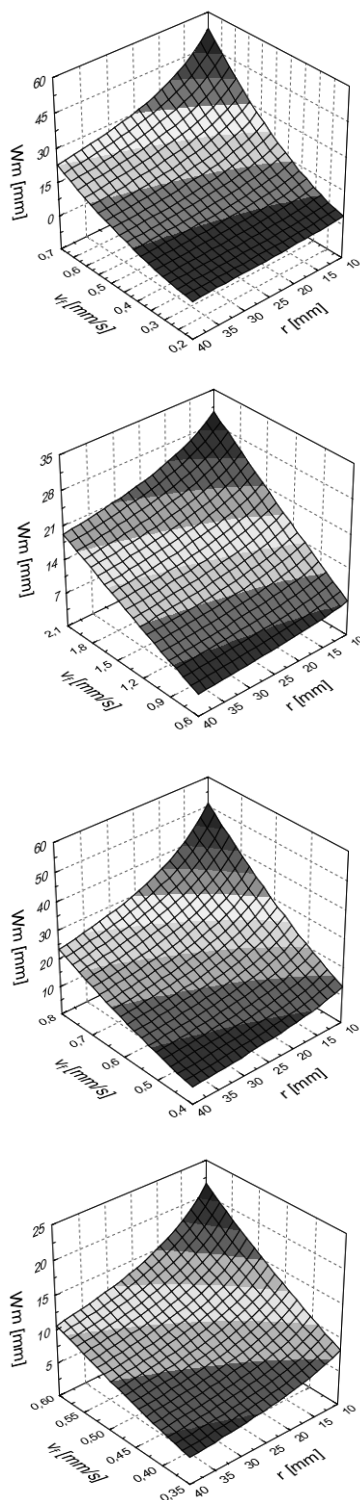
Lp.	Empiryczny model procesu cięcia
1	$Wm = (435 \cdot 1868 p^{-5,908} \cdot 362 v_f^{3,320} \cdot 21 r^{-0,962} \cdot 3803 g^{4,488})^{0,638}$
2	$Wm = (435 \cdot 1868 p^{-5,908} \cdot 362 v_f^{3,320} \cdot 21 r^{-0,962} \cdot 3803 g^{4,488})^{0,346}$
3	$Wm = (435 \cdot 1868 p^{-5,908} \cdot 362 v_f^{3,320} \cdot 21 r^{-0,962} \cdot 3803 g^{4,488})^{0,590}$
4	$Wm = (435 \cdot 1868 p^{-5,908} \cdot 362 v_f^{3,320} \cdot 21 r^{-0,962} \cdot 3803 g^{4,488})^{0,538}$

1-0H18N9,  $R^2=0,94$ ; 2-PA4,  $R^2=0,80$ ; 3-St41K,  $R^2=0,90$ ; 4-MO59,  $R^2=0,89$ .

Najniższą wartość wykładnik  $\beta$ , osiąga w przypadku zależności opisującej wpływ warunków obróbki na maksymalną wysokość profilu falistości ( $Wm$ ), przeciętych powierzchni stopu aluminium PA4 ( $\beta = 0,346$ ). Natomiast najwyższą wartość przyjmuje on w przypadku jakościowego modelu krzywoliniowego przecinania stali nierdzewnej 0H18N9 ( $\beta = 0,638$ ).

Podatność erozyjna rozpatrywanych materiałów konstrukcyjnych, wynikająca z ich twardości i wytrzymałości, jest główną przyczyną występowania różnic między wyznaczonymi równaniami. Te zróżnicowanie, związane bezpośrednio z indywidualnymi właściwościami mechanicznymi każdego z rozpatrywanych materiałów, znalazło swoje odzwierciedlenie w kształtowaniu się wartości wykładnika potęgowego  $\beta$  w opracowanych empirycznie modelach. Pozostałe składniki wyznaczonych zależności pozostają niezmiennie, przez co możliwe jest łatwe zaimplementowanie otrzymanych wyników do realizacji procesu sterowania. Należy przy tym pamiętać, że opracowany statystycznie uniwersalny model procesu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest adekwatny w zakresie zmienności warunków procesu cięcia określonych przez plan badań.

Na rys. 5 zaprezentowano trójwymiarowe wykresy, stanowiące graficzną postać opracowanego statystycznie modelu procesu cięcia. Na ich podstawie, dla każdego z analizowanych materiałów konstrukcyjnych, można zaplanować operację cięcia w taki sposób, aby wskaźnik jakości  $Wm$  powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną przyjął żadaną wartość.



Rys. 5. Graficzna postać uniwersalnego modelu procesu cięcia  $p = 350$  MPa,  $g = 20$  mm: a) 0H18N9, b) PA4, c) St41K, d) MO59  
Fig. 5. Graphical form of the cutting process universal model  $p = 350$  MPa,  $g = 20$  mm: a) 0H18N9, b) PA4, c) St41K, d) MO59

Analizując wykresy zamieszczone na rys. 5, można odnotować, że na zwiększenie maksymalnej wysokości profilu falistości  $Wm$  wpływa wzrost prędkości posuwu oraz zmniejszenie promienia trajektorii głowicy tnącej. Przy czym oddziaływanie pierwszego z wymienionych parametrów procesu cięcia ( $v_f$ ) jest dominujące. Najwyższe wartości rozpatrywany wskaźnik ukształtowania geometrycznego powierzchni ( $Wm$ ) osiąga, dla stali nierdzewnej ( $Wm_{max} = 53,1 \mu m$ ) oraz węglowej ( $Wm_{max} = 51,2 \mu m$ ), niższe dla stopu aluminium ( $Wm_{max} = 30,5 \mu m$ ), a zdecydowanie najmniejsze w przypadku mosiądzu ( $Wm_{max} = 21,6 \mu m$ ).

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie zrealizowanych badań statystycznych wpływu ciśnienia wody, prędkości posuwu, krzywizny wycinanego kształtu oraz grubości przecinanego materiału na maksymalną wysokość profilu falistości  $Wm$  określono uniwersalny model procesu cięcia. Opracowana zależność może zostać użyta do prognozowania jakości powierzchni przeciętych takich materiałów konstrukcyjnych jak: stal nierdzewna gat. 0H18N9, stop aluminium gat. PA4, stal węglowa gat. St41K i mosiądz gat. MO59. Rozpatrywane materiały charakteryzują się różnymi właściwościami mechanicznymi, które przesądzają o ich podatności na oddziaływanie strugi wodno-ścierną jako narzędzia erozyjnego.

Biorąc pod uwagę aspekty jakościowe, opracowując uniwersalny model procesu cięcia, dla każdego z analizowanych materiałów określono różną wartość współczynnika  $\beta$ . Najniższą wartość wykładnik potęgi osiąga dla stopu aluminium ( $\beta = 0,346$ ), wyższą, zaś w przypadku mosiądzu ( $\beta = 0,538$ ). Natomiast najwyższe wartości zmienna zależna modelu przyjmuje dla stali nierdzewnej ( $\beta = 0,638$ ) i węglowej ( $\beta = 0,590$ ).

Dokonując analizy modelu oddziaływania parametrów procesu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na jakość powierzchni ocenianą według maksymalnej wysokości profilu falistości  $Wm$ , można uznać, że zwiększenie ciśnienia wody i promienia trajektorii głowicy tnącej oraz zmniejszenie prędkości posuwu i grubości przecinanego materiału powodują obniżenie wartości parametru falistości  $Wm$ .

#### 5. Literatura

- [1] Borkowski J., Borkowski P.: Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe. Monografia INTH nr 154, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
- [2] Borkowski P.: Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych, Monografia INTH nr 174, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2010.
- [3] Borkowski P.: Application of abrasive water jet technology for material sculpturing. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 34, No. 3-4, pp. 389-400, 2010.
- [4] Wantuch E., Kot R.: Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym. Materiały XXVI NSOŚ, Łódź, s. 329-337, 2003.
- [5] Chen F.L., Wang J., Lemma E., Siores E.: Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. Journal of Materials Processing Technology, 141, pp. 213-218, 2003.
- [6] Pawlus P.: Topografia powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [7] Sutowska M.: Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną. PAK, vol. 57, s. 535-537, 2011
- [8] PN-M-04255:1974: Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.
- [9] Gajek L., Kałużka M.: Wnioskowanie statystyczne. Modele i metody. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.

otrzymano / received: 15.04.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2014

artykuł recenzowany / revised paper