

**Marzena SUTOWSKA**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT NIEKONWENCJONALNYCH TECHNOLOGII HYDROSTRUMIENIOWYCH,  
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin**Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną**

Dr inż. Marzena SUTOWSKA

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W latach 2002-2006 doktorantka w Katedrze Inżynierii Mechanicznej. Po ukończeniu studiów doktoranckich rozpoczęła pracę w Instytucie Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych, gdzie pracuje do dnia dzisiejszego na stanowisku specjalisty naukowo-technicznego. W swojej działalności naukowej zajmuje się m. in. zastosowaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierną do cięcia różnego rodzaju materiałów.



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

**Streszczenie**

W niniejszym artykule scharakteryzowano proces przecinania materiałów strugą wodno-ścierną oraz opisano metody oceny jakości jego rezultatów. W pierwszej części artykułu omówiono m.in. sposób kreowania strugi wodno-ścierną, zaprezentowano przykładową powierzchnię stanowiącą wynik obróbki, określono główne parametry procesu oraz szczegółowo omówiono zakres zastosowań rozpatrywanej metody kształtowania materiałów. W kolejnej części artykułu przedstawiono trzy grupy wskaźników, którymi można się posłużyć dokonując oceny jakości technologicznej przedmiotów wyciętych strugą wodno-ścierną. Jako pierwsze scharakteryzowano wskaźniki kształtu szczeliny powstałej w wyniku rozdzielenia materiału strugą wodno-ścierną. Następnie opisano wskaźniki jakości topografii przeciętej powierzchni. Ostatnią część niniejszego artykułu poświęcono omówieniu wskaźników jakości mikrogeometrii powierzchni przecięcia.

**Słowa kluczowe:** struga wodno-ścierna, cięcie materiałów, jakość procesu, wskaźniki jakości.

**Quality indicators of abrasive water-jet cutting process****Abstract**

The scientific achievements of recent decades have created a foundation for rapid development of new technologies. The specific case is hydro jet technology. It uses concentrated streams of energy in the form of high-pressure jet of water, often containing granular admixture. In recent years there has been a rapid growth in development of methods for machining materials, mainly high-pressure abrasive water jet. A wide range of applications of this machining method makes it indispensable to know the right way of quality result evaluation. The initial part of this paper is focused on characterising the cutting process of materials with use of abrasive water jet. There is also discussed the jet creation process and presentation of the sample surface as a result of machining. Next, there are determined the main parameters of the cutting process and application of this method to material shaping is discussed in detail. In the next part of the paper there are described three groups of indicators which can be used for assessing the technological quality of workpieces cut by abrasive water jet. First, the indicators of abrasive water-jet kerf created by separation of material by abrasive water jet are characterized. Next, there is described the quality of the cut surface topography. The last part of this paper is focused on discussion of microstructure quality of the cut surface.

**Keywords:** abrasive water-jet, material cutting, process quality, quality indicators.

**1. Wstęp**

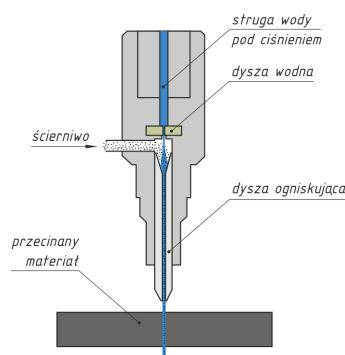
W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój metod cięcia skoncentrowanym strumieniem energii w postaci wysokociśnieniowej strugi wodnej zawierającej ziarniste domieszki. Wynika on niewątpliwie z postępu technicznego, który pozwala na stosowanie znacznie wyższych ciśnień wody [10], a także licznych zalet tej metody obróbki, do których zalicza się m.in. brak termicznych odkształceń obrabianego materiału oraz małe naciski występujące

w trakcie procesu cięcia [5]. Dzięki temu wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna, stanowiąca uniwersalne narzędzie technologiczne zapewnia sobie coraz to szerszy zakres zastosowań obróbkowych m.in. w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, produkcji tworzyw sztucznych, a nawet w medycynie [4]. W oparciu o powyższe nieodzownym staje się poznanie metod oceny jakości procesu. W niniejszym artykule zaprezentowano wskaźniki, którymi można się posłużyć dokonując oceny jakości technologicznej przedmiotu wyciętego wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną.

**2. Charakterystyka procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną**

Obróbka wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną polega na kształtowaniu materiałów silnie skoncentrowaną strugą wodną domieszkowaną ziarnami ściernymi. Doprowadzana miejscowo olbrzymia ilość skumulowanej mocy (w postaci rozprężonych ziaren ściernych) wywołuje skuteczną erozję materiału spowodowaną odrywaniem jego mikrocząstek od podstawowej masy. W procesie tym energia kinetyczna ziaren ściernych zamieniana jest na energię odkształcenia materiału w strefie obróbki.

Sposób kreacji strugi wodno-ścierną zaprezentowano na rys. 1. Z pompy woda zostaje przesłana za pomocą wysokociśnieniowego przewodu do dyszy wodnej (rubinowej, szafirowej lub diamentowej). Wymiar średnicy tej dyszy zawiera się w przedziale 0,15–0,4 mm. W ten sposób energia potencjalna wody znajdującej się pod wysokim ciśnieniem zostaje zamieniona na energię kinetyczną uformowanej strugi. Struga wypływając z dyszy, wytwarza wewnątrz komory mieszania podciśnienie umożliwiające zasanie materiału ściernego. Zjawisko to jest ściśle związane z efektem Ventouriego.



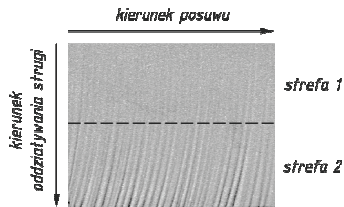
Rys. 1. Sposób kreowania strugi wodno-ścierną  
Fig. 1. Abrasive water-jet creation process

Jako ścierniwo w procesie kreowania strugi wodno-ścierną, powszechnie używane są naturalne materiały ściernie jak granat, czy piasek kwarcowy. Ostateczne uformowanie strugi odbywa się w dyszy ogniskującej, po czym struga zostaje skierowana na obrabiany materiał. Tak wytworzona struga wodno-ścierna składa się z trzech faz: powietrza (95%), wody (około 4%) i cząstek ściernych (1%).

Usuwanie materiału wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest wynikiem interakcji cząstek ściernych z materiałem obrabianym. Ziarna ściernie domieszkowane do strugi wodnej, osiągnącej prędkość rzędu do 1000 m/s, otrzymują od niej sumaryczny moment pędu, pozwalający im uzyskać dostateczną energię do aktywacji procesów erozyjnych materiału [6, 16].

Oddziaływanie wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierną na materiał jest zróżnicowane i zależy od momentu pędu cząstek

ściennych. Różnice te są widoczne na powierzchniach przeciętych przedmiotów (rys. 2). W strefie pierwszej struktura powierzchni przedmiotu jest kształtowana w procesie mikroskrawania ziaren ściennych. Mikrogeometria tego obszaru powierzchni w dużym stopniu zależy od wielkości zastosowanych cząstek ściennych. Struktura geometryczna powierzchni w strefie drugiej kształtowana jest w procesie zużycia ściennego (erozji mechanicznej) i związanego z tym ubytku materiału. Na rozpiętość występowania wymienionych stref wpływa dobór wartości parametrów obróbki [7]. Podstawowymi parametrami procesu technologicznego, charakteryzującymi proces cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścienną są: ciśnienie wody  $p$ , prędkość posuwu  $v_f$ , wydatek ścierniwa  $m_s$ , średnica dyszy wodnej  $d_w$ , średnica dyszy ogniskującej  $d_o$ , odległość dyszy ogniskującej od materiału  $l$ , promień trajektorii głowicy tnącej  $r$ .



Rys. 2. Obraz powierzchni przeciętej strugą wodno-ścienną z zaznaczonymi strefami jakości (0H18N9,  $v_f = 0,16$  mm/s,  $p = 175$  MPa,  $g = 35$  mm)

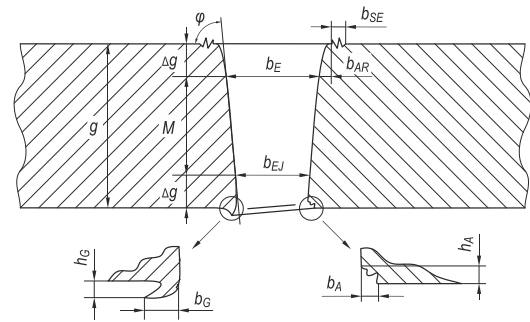
Fig. 2. The surface cut by abrasive water jet with marked quality zones (0H18N9,  $v_f = 0,16$  mm/s,  $p = 175$  MPa,  $g = 35$  mm)

Wytworzona w głowicy roboczej wysokociśnieniowa struga wodno-ścienna sterowana jest przeważnie w układzie stołu 2D do wykonywania przedmiotów płaskich. Z rzeczywistych potrzeb rynkowych wynika, że blisko 100% zadań, dotyczących typowych operacji cięcia i wycinania, wymaga sterowania tylko w układzie kartezjańskim XY. Wysoką efektywność tej technologii zapewniają układy wspomaganie projektowania przedmiotów (typu CAD/CAM) oraz niejawnie modele doboru warunków obróbki z uwzględnieniem rodzaju obrabianego materiału. Ze względu na efektywne działanie erozyjne wysokociśnieniowej strugi wodno-ścienniej wykorzystuje się ją do cięcia głównie płaskich materiałów z tytanu [4], żaroodpornych, antymagnetycznych, stali austenitycznych, stopów aluminium [7], tworzyw sztucznych wzmacnianych różnymi rodzajami włókien, szkła i ceramiki, materiałów skalnych [9], budowlanych, itp.

### 3. Wskaźniki jakości kształtu szczeliny przecięcia

Dokonując oceny jakości technologicznej przedmiotu wyciętego wysokociśnieniową strugą wodno-ścienną, można posłużyć się wskaźnikami jakości kształtu szczeliny przecięcia [2, 15]. Do najważniejszych z nich należą: szerokość szczeliny przecięcia  $b_E$ , lokalna szerokość szczeliny przecięcia  $b_{EJ}$ , szerokość strefy uszkodzeń wtórnych  $b_{SE}$ , szerokość zaokrąglenia w strefie wejścia strugi  $b_{AR}$ , wysokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi  $h_G$ , szerokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi  $b_G$ , wysokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi  $h_A$ , szerokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi  $b_A$ , pochylenie płaszczyzny przecięcia  $u$  oraz kąt zukosowania powierzchni przecięcia  $\varphi$ . Postać graficzną wymienionych cech jakościowych szczeliny przecięcia zaprezentowano na rys. 3.

Skala wskaźników jakości szczeliny przecięcia zależy w znacznej mierze od warunków procesu cięcia. Każda z wymienionych cech może być minimalizowana lub eliminowana poprzez właściwy dobór parametrów obróbki. Kształtowanie geometrii szczeliny przecięcia jest procesem ściśle związanym z ciśnieniem wody, prędkością posuwu głowicy tnącej, oraz rodzajem i grubością materiału obrabianego.

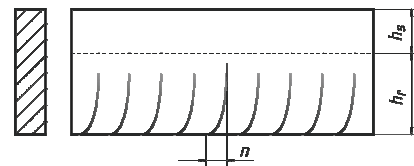


Rys. 3. Wskaźniki jakości kształtu szczeliny przecięcia ( $\Delta g = 0,1 \times g$  dla  $g < 2$  mm lub  $\Delta g = 0,2 \times g$  dla  $g \geq 2$  mm)

Fig. 3. The quality indicators of abrasive water-jet kerf ( $\Delta g = 0,1 \times g$  if  $g < 2$  mm or  $\Delta g = 0,2 \times g$  if  $g \geq 2$  mm)

### 4. Wskaźniki jakości topografii powierzchni przecięcia

Oceny ukształtowania geometrycznego powierzchni przeciętych wysokociśnieniową strugą wodno-ścienną można dokonać na podstawie wskaźników jakości topografii określonych w wytycznikach niemieckiego stowarzyszenia AWT (*Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie*) oraz w niemieckiej normie VDI 2906 [2, 15]. Należą do nich: wysokość obszaru podwyższonej jakości cięcia pozbawionego rowków na powierzchni obrabianej  $h_s$ , wysokość obszaru obniżonej jakości cięcia z makroskopowymi śladami obróbkowymi na powierzchni obrabianej  $h_r$  oraz zakrzywienie toru wybiegu strugi  $n$  – rys. 4.



Rys. 4. Zakrzywienie toru wybiegu strugi

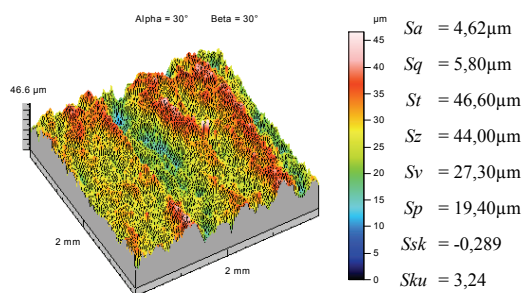
Fig. 4. The jet track curvature

Proces kształtowania topografii powierzchni charakteryzuje się większą złożonością występujących w nim zjawisk w porównaniu z procesem formowania szczeliny przecięcia. Kształtowanie przedmiotu obrabianego wysokociśnieniową strugą wodno-ścienną, jako rezultat procesu erozji materiału, charakteryzuje się dużą przypadkowością, będącą wynikiem mikroskrawania cząstkami ściennymi oraz oddziaływania strugi wodnej. Właściwy dobór technologicznych parametrów procesu cięcia wpływa na wysokość obszarów  $h_s$  i  $h_r$  oraz intensywność zakrzywienia toru wybiegu strugi  $n$ . W określonych warunkach obszar podwyższonej jakości cięcia może występować na całej powierzchni przecięcia.

### 5. Wskaźniki jakości mikrogeometrii powierzchni przecięcia

Do ilościowej oceny mikrogeometrii powierzchni przecięcia można zastosować parametry chropowatości powierzchni (SGP) rozpatrywane w układzie 3D [1, 12,]. Parametry te zostały podzielone na pięć grup: parametry amplitudowe, parametry powierzchniowe i objętościowe, parametry przestrzenne, parametry hybrydowe oraz parametry funkcjonalne [11]. Spośród wymienionych grup wskaźników SGP wyraźny wpływ parametrów procesu cięcia (ciśnienia wody, prędkości posuwu) odnotowano w przypadku parametrów amplitudowych [14]. Wskaźniki te opisują cechy wysokościowe analizowanej nierówności powierzchni charakteryzując zmiany w kierunku normalnym do niej [3]. Należą do nich: średnie arytmetyczne ( $S_a$ ) i kwadratowe ( $S_q$ )

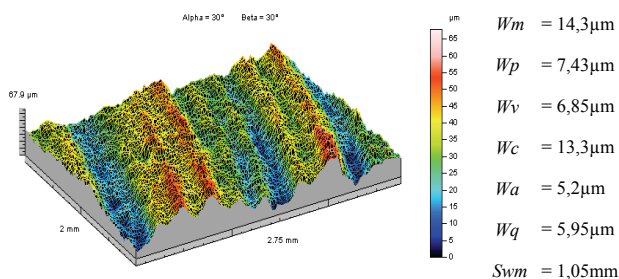
odchylenie chropowatości, wysokość nierówności ( $St$ ), wysokość nierówności wg 10. punktów ( $Sz$ ), maksymalna głębokość wgłębień ( $Sv$ ), maksymalna wysokość wzniesień ( $Sp$ ). Dodatkowo do oceny geometrii powierzchni wykorzystuje się współczynnik skośności ( $Ssk$ ) i skupienia ( $Sku$ ). Przykład struktury geometrycznej powierzchni przeciętej strugą wodno-ścierną wraz z określonymi wartościami parametrów amplitudowych ukazano na rys. 5.



Rys. 5. Struktura geometryczna nierówności umiejscowionej w górnej części strefy cięcia (szkło wapienno-sodowe,  $v_f = 9,7$  mm/s,  $p = 360$  MPa,  $g = 8$  mm)

Fig. 5. Geometrical structure of the inequality in the cutting area upper part (calcium-sodium glass,  $v_f = 9,7$  mm/s,  $p = 360$  MPa,  $g = 8$  mm)

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 (rys. 6). W celu dokonania ilościowej oceny tego zjawiska, można posłużyć się parametrami określonymi przez polską normę [13]. Definiuje ona sześć parametrów wysokościowych oraz jeden wzdłużny falistości powierzchni. Parametry wysokościowe są to wskaźniki charakteryzujące nierówności występujące w kierunku prostopadłym do linii średniej profilu falistości [8].



Rys. 6. Struktura geometryczna nierówności umiejscowionej w dolnej części strefy cięcia (szkło wapienno-sodowe,  $v_f = 9,7$  mm/s,  $p = 360$  MPa,  $g = 8$  mm)

Fig. 6. Geometrical structure of the inequality in the cutting area lower part (calcium-sodium glass,  $v_f = 9,7$  mm/s,  $p = 360$  MPa,  $g = 8$  mm)

Można je podzielić na dwie zasadnicze grupy parametry opisujące wysokości wzniesień i głębokości wgłębień: maksymalna wysokość profilu falistości ( $Wm$ ), maksymalna wysokość wzniesienia profilu falistości ( $Wp$ ), maksymalna głębokość wgłębienia profilu falistości ( $Wv$ ), oraz parametry będące wartościami średnimi rzędnych: średnia wysokość falistości ( $Wc$ ), średnie arytmetyczne odchylenie profilu falistości ( $Wa$ ), średnie kwadratowe odchylenie profilu falistości ( $Wq$ ). W skład grupy parametrów wzdłużnych falistości powierzchni, wchodzi średni odstęp falistości ( $Swm$ ), określający wartość średnią długości odcinków linii średniej, zawierających wzniesienie i wgłębienie profilu [3].

## 6. Podsumowanie

Osiągnięcia naukowe ostatnich dziesięcioleci stworzyły fundament dla dynamicznego rozwoju nowych technologii. Szczególny przypadek w tym zakresie stanowi technologia hydrostrumieniowa, wykorzystująca skoncentrowane strumienie energii w postaci

wysokociśnieniowej strugi wodnej, domieszkowanej ziarnami ściernymi. W ostatnich latach nastąpiła gwałtowna dynamika rozwoju tego sposobu kształtowania materiałów, głównie metod cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Szeroki zakres zastosowań rozpatrywanej metody obróbki sprawia, że nieodzownym staje się poznanie sposobu jakościowej oceny jej wyników. Jakość powierzchni przeciętych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną ocenia się podobnie jak w przypadku innych sposobów obróbki materiałów. Przede wszystkim, określa się wskaźniki dokładności wymiarowej i kształtowej, jako odchyłki od zadanego nominalnego wymiaru. Ważną rolę w ocenie jakości technologicznej procesu cięcia odgrywają wskaźniki kształtu szczeliny powstałej w wyniku rozdzielania materiału wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Dodatkowo oceny ukształtowania geometrycznego powierzchni przeciętych strugą, można dokonywać na podstawie wskaźników jakości topografii (określające usytuowanie śladów obróbkowych) oraz mikrogeometrii (znormalizowane parametry chropowatości i falistości powierzchni).

## 7. Literatura

- [1] Adamczak S.: Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. *Mechanik*, nr 78 (2005), s. 492–495.
- [2] Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie: Begriffe, Bezeichnungen und Größen. Hannover, 1994.
- [3] Białas S.: Metrologia techniczna z podstawami tolerowania wielkości geometrycznych dla mechaników. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [4] Borkowski P.: Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych, Monografia INTH nr 174, WUPK, Koszalin, 2010.
- [5] Borkowski J., Borkowski P.: Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe, Monografia INTH nr 154, WUPK, Koszalin, 2008.
- [6] Chen F.L., Wang J., Lemma E., Siores E.: Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141, pp. 213–218.
- [7] Hashish M., Precision cutting of thick materials with AWJ, *Proceedings of 17th International Conference on Water Jetting, Germany, 2004*, s. 33–45.
- [8] Humienny Z.: Specyfikacje geometrii wyrobów. GPS, WNT, 2004.
- [9] Kulecki M.K., Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, 2002, s. 1297–1306.
- [10] Lefevre I., Lefevre R., Stinckens T.: Experiences of a job shop with 6 kbar abrasive water-jet cutting technology during day to day operation, *Proceedings of 17th International Conference on Water Jetting, Germany, 2004*, s. 449–462.
- [11] Oczóś K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych. OWPR, Rzeszów, 2003.
- [12] Pawlus P.: Topografia powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [13] PN-M-04255:1974: Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.
- [14] Sutowska M.: Problematyka krzywoliniowego przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uwzględniająca kryteria jakości powierzchni, *Rozprawa Doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2009*.
- [15] VDI-Richtlinien: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall. *Abrasive- Wasserstrahlschneiden, VDI 2906, 1994*.
- [16] Wantuch E., Kot R.: Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym. *Materiały XXVI NSOŚ, Łódź, 2003*, s. 329–337.