

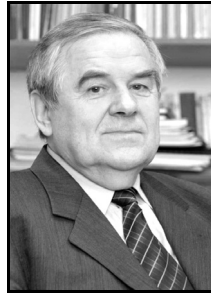
## Józef A. BORKOWSKI<sup>1</sup>, Marzena SUTOWSKA

<sup>1</sup> POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT NIEKONWENCJONALNYCH TECHNOLOGII HYDROSTRUMIENIOWYCH, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

# Oddziaływanie warunków procesu cięcia AWJ na wybrane wskaźniki SGP

Prof. dr hab. inż. Józef A. BORKOWSKI

Wyróżniony absolwent Politechniki Wrocławskiej, profesor zwyczajny Politechniki Koszalińskiej. Specjalista z obróbki ścierniej i erozyjnej, zwłaszcza obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną a także proekologicznych i niekonwencjonalnych technologii hydrostrumieniowych. Autor około 330 publikacji (w tym 15 książek), około 200 prac zastosowanych w praktyce, z których 27 uzyskało patenty. Opracował około 120 różnych opinii i ekspertyz oraz 80 raportów naukowo-technicznych.



e-mail: jozef.borkowski@tu.koszalin.pl

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-ścierniej do cięcia różnego rodzaju materiałów.



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

### Streszczenie

Ukształtowanie geometryczne powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną, będące efektem interakcji strugi z materiałem obrabianym, stanowi ważny aspekt jakości procesu cięcia. W artykule opisano wpływ ciśnienia wody  $p_w$ , prędkości posuwu  $v_f$  i promienia trajektorii głowicy tnącej  $r$  na wartość wskaźników amplitudowych chropowatości powierzchni. Na podstawie wyników prac eksperymentalnych ustalono zależności występujące między rozpatrywanymi parametrami procesu cięcia i wskaźnikami jakościowymi. Dzięki temu określono wskaźniki SGP, charakterystyczne dla omawianego rodzaju obróbki, których wartości w znacznym stopniu zależą od zmiany zasadniczych parametrów procesu cięcia.

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

## The influence of AWJ cutting process conditions on chosen SGP indicators

### Abstract

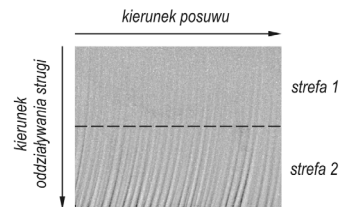
Essential development of concentrated energy flux methods of cutting have been noticed recently, that mainly concerns high-pressure water jet including abrasive admixtures. Geometrical shaping of surface cut with high-pressure abrasive-water jet is an effect of interaction of the jet with the target material and is an important aspect of cut quality. Because of the limited literature information concerning purposeful steering of respective SGP parameters during high-pressure AWJ, it is indispensable to isolate such parameters experimentally. Their values strongly depend on water pressure change  $p_w$ , feed rate  $v_f$ , and on radius of the cutting head trajectory  $r$ . The paper describes the influence of cutting conditions change on the values of surface roughness amplitude parameters. Basing on experimental results one can determine dependences occurring between considered cutting parameters and quality indicators. Moreover it is possible to define SGP parameters that are characteristic for discussed AWJ cutting and their values are strongly dependent on the change of basic cutting parameters.

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

## 1. Wstęp

Osiągnięcia naukowe ostatnich dziesięcioleci stworzyły podstawę dla dynamicznego rozwoju nowych technologii. Szczególny przypadek w tym zakresie, stanowi technologia hydrostrumieniowa, wykorzystująca skoncentrowane strumienie energii w postaci wysokociśnieniowej strugi wodnej, zawierającej ziarniste domieszki [1]. W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój tego sposobu obróbki materiałów, głównie metod cięcia strugą wodno-ścierną (AWJ). Przecinanie strugą wodno-ścierną jest metodą kształtowania materiałów, powszechnie stosowaną w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, a nawet w medycynie [2, 3]. Charakterystyczną cechą powierzchni przeciętych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest ich podział na dwie strefy o zróżnicowanym ukształtowaniu geometrycznym [4, 5]. Strefa 1, pozbawiona śladów obróbkowych oraz strefa 2, na obszarze której wcześniej wspomniane ślady występują, tworząc zakrzywione rowki (rys. 1).

Obserwowana zmienność ukształtowania przeciętych powierzchni jest związana z nierównomiernym rozkładem energii kinetycznej ziaren ściernych, używanych do kreowania wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej. Podczas przecinania materiału przeważająca liczba cząstek ściernych, posiada energię wystarczającą do wykonania gładkiego przecięcia w strefie 1. Wraz ze wzrostem głębokości wnikania strugi w materiał ich liczba maleje, a nierówny rozkład energii kinetycznej poszczególnych ziaren ściernych powoduje w strefie 2 coraz to wyraźniejsze zakrzywienie się śladów obróbkowych [6].



Rys. 1. Obraz powierzchni przeciętej strugą wodno-ścierną z zaznaczonymi strefami jakości (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 with marked quality zones (0H18N9,  $v_f = 0,16$  mm/s,  $p_w = 175$  MPa,  $g = 35$  mm)

Struktura geometryczna powierzchni przecięcia materiału obrabianego wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną zależy od parametrów obróbki. Sterowanie wskaźnikami SGP w procesie cięcia materiałów strugą wodno-ścierną jest możliwe na podstawie analitycznych lub graficznych zależności konkretnego wskaźnika SGP od parametrów procesu obróbkowego. Ze względu na ograniczone informacje zawarte w literaturze na temat celowego sterowania wartościami poszczególnych wskaźników SGP w procesie przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, nieodzowne staje się eksperymentalne wyodrębnienie grupy parametrów, charakterystycznych dla omawianego typu obróbki, których wartości zależą w znacznym stopniu od zmiany zasadniczych parametrów obróbki [7].

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań oddziaływania warunków obróbki na wskaźniki amplitudowe chropowatości powierzchni. Należą do nich: średnie arytmetyczne ( $S_a$ ) i kwadratowe ( $S_q$ ) odchylenie chropowatości, wysokość nierówności ( $S_r$ ), wysokość nierówności według 10. punktów ( $S_z$ ), maksymalna głębokość wgłębień ( $S_v$ ), maksymalna wysokość wzniesień ( $S_p$ ) [8, 9]. Dodatkowo do oceny geometrii powierzchni stosuje się współczynnik skośności ( $S_{sk}$ ) i skupienia ( $S_{ku}$ ).

## 2. Metodyka badań

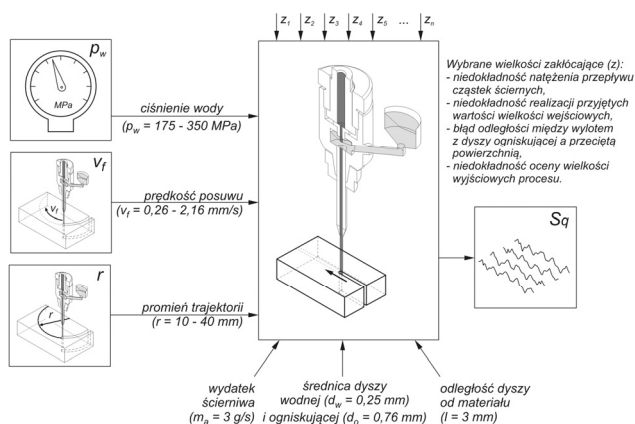
Prace eksperymentalne wykonywano przy użyciu maszyny RCT 32 (rys. 2) przeznaczonej do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną firmy Resato. Do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej stosowano wzmocniacz ciśnienia

nia Power Jet PJE-4-4000, wyposażony w silnik elektryczny o mocy 37 kW ( $p_{max} = 380$  MPa,  $Q_{max} = 3,8$  dm<sup>3</sup>/min).



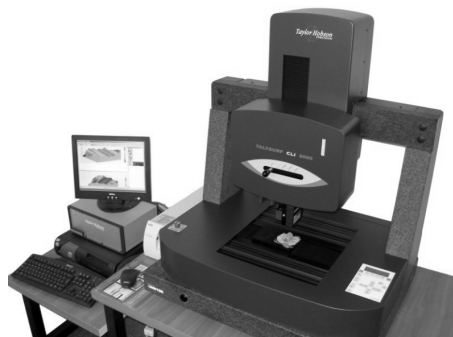
Rys. 2. Centrum obróbkowe AWJ typ RCT 32  
Fig. 2. Abrasive-water jet cutting machine type RCT 32

Do badań używano głowicę tnącą typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato, wyposażoną w dwie dysze: wodną o średnicy 0,25 mm oraz ogniskującą  $\varnothing 0,76$  mm. Do przecinania materiałów stosowano strugę wodno-ścierną, do której wytwarzania używano garnet amaldynowy #80 o stałym wydatku 3 g/s. Eksperymenty wykonywano na dwóch rodzajach materiałów konstrukcyjnych: stali nierdzewnej gat. 0H18N9 i stopie aluminium gat. PA4. Schemat modelu badań ukazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat modelu badań  
Fig. 3. The schematic diagram of the research model

Po zakończeniu eksperymentów, ukształtowanie uzyskanych powierzchni odwzorowywano przy użyciu profilografometru przestrzennego Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson rys. 4.



Rys. 4. Talysurf CLI 2000  
Fig. 4. Talysurf CLI 2000

Wyniki wstępnych pomiarów wykazały znaczne różnice występujące między wartościami wskaźników SGP zmierzonymi w obszarze wejścia i wypływu strugi wodno-ścierniej z materiału. Dowodzi to obniżonej skuteczności oddziaływania strugi wodno-

ścierniej, jako narzędzia erozyjnego, w kształtowaniu dolnej części strefy cięcia. Wobec powyższego została podjęta decyzja, że pomiary topografii będą wykonywane wyłącznie w dolnej części strefy cięcia, co znacznie skróci czas realizacji procesu pomiarowego oraz obniży jego koszt.

Do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni używano bezstykową głowicę laserową, umożliwiającą pomiar w zakresie nierówności nawet do 30 mm. Pomiary 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 jednorobiegowym. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano obróbce przy użyciu specjalistycznego oprogramowania TalyMap Universal. Dla każdej z otrzymanych mikrotopografii powierzchni wyznaczano wartości wybranych wskaźników SGP.

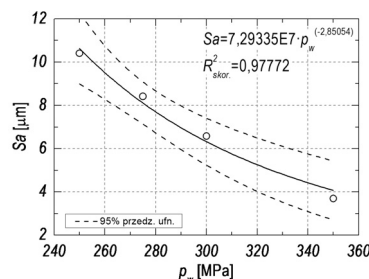
### 3. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono występowanie oddziaływania ciśnienia wody  $p_w$ , prędkości posuwu  $v_f$  oraz promienia trajektorii głowicy tnącej  $r$  na wskaźniki charakteryzujące ukształtowanie struktury geometrycznej powierzchni. Założono, że poszukiwane zależności opisujące związek między warunkami obróbki (W) i rozpatrywanymi wskaźnikami SGP (P) można opisać za pomocą ogólnego wzoru:

$$P = a \cdot W^b \quad (1)$$

Aby określić zależności występujące między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną, wykonano analizę statystyczną wyników oddziaływania warunków obróbki na ukształtowanie geometryczne przeciętych powierzchni. W rezultacie tych działań określono równania opisujące w jaki sposób zmiana zasadniczych parametrów procesu cięcia wpływa na wartości wskaźników amplitudowych chropowatości powierzchni.

Ponadto, dla każdej wyznaczonej zależności obliczono wartość skorygowanego współczynnika determinacji ( $R^2_{skor.}$ ) stanowiącego miarę korelacji zachodzących między parametrami procesu przecinania i jego wskaźnikami jakościowymi. Przykładem tego może być wykres zmienności średniego arytmetycznego odchylenia  $S_a$  w funkcji ciśnienia wody, zamieszczony na rys. 5.



Rys. 5. Współzależności występujące pomiędzy  $S_a$  i  $p_w$  ( $l = 3$  mm,  $d_w = 0,25$  mm,  $d_o = 0,76$  mm,  $\dot{m}_a = 3$  g/s,  $v_f = 0,26$  mm/s,  $r = 10$  mm, 0H18N9)  
Fig. 5. Dependences occurring between  $S_a$  and  $p_w$  ( $l = 3$  mm,  $d_w = 0,25$  mm,  $d_o = 0,76$  mm,  $\dot{m}_a = 3$  g/s,  $v_f = 0,26$  mm/s,  $r = 10$  mm, 0H18N9)

Bazując na otrzymanych wynikach badań, sporządzono tab. 1, która ukazuje kierunek obserwowanych zmian wskaźników SGP, spowodowany oddziaływaniem zasadniczych parametrów obróbki dla dwóch różnych materiałów konstrukcyjnych (0H18N9, PA4).

Wyniki zrealizowanych badań wykazały, że intensyfikacja oddziaływania strugi wodno-ścierniej, wywołana zwiększeniem ciśnienia wody lub ograniczeniem prędkości posuwu głowicy tnącej, powoduje ogólne zmniejszenie wartości sześciu parametrów chropowatości powierzchni spośród ośmiu analizowanych. Jednocześnie można zauważyć, że wartości wskaźników ukształtowania geometrycznego przeciętych powierzchni ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_t$ ,  $S_z$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ) maleją wraz ze zwiększeniem promienia  $r$ .

Nie odnotowano natomiast żadnego wpływu zmiany parametrów obróbki na współczynnik skośności i współczynnik skupienia. Uzyskane rezultaty prac eksperymentalnych ujawniły również, że obserwowane zależności, zachodzące między wielkościami wejściowymi ( $p_w$ ,  $v_f$ ,  $r$ ) i wyjściowymi (wskaźniki SGP) procesu cięcia są niezależne od rodzaju obrabianego materiału.

Tab. 1. Kierunek zmian wskaźników SGP wywołany zmianą warunków obróbki  
Tab. 1. Direction of SGP indicators change caused by cutting conditions change

	$p_w$ [MPa] (250→350)	$v_f$ [mm/s] (0,26→0,74)	$r$ [mm] (10→40)
$Sa$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$Sq$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$St$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$Sz$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$Sp$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$Sv$ [ $\mu$ m]	↓	↑	↓
$Ssk$ [-]	-	-	-
$Sku$ [-]	-	-	-

W tab. 2 i 3 zamieszczono przedziały zmienności zarówno parametrów procesu cięcia, jak i wskaźników chropowatości powierzchni. Analizując przytoczone wartości, można stwierdzić, że najsilniejszy wpływ w kształtowaniu struktury geometrycznej przeciętych powierzchni stali nierdzewnej i stopu aluminium wywiera prędkość posuwu, która decyduje o czasie oddziaływania strugi wodno-ścierną na obrabiany materiał. Natomiast promień trajektorii głowicy tnącej jest parametrem, który w najmniejszym stopniu oddziałuje na wartość wskaźników SGP.

Tab. 2. Przedziały zmienności parametrów procesu oraz wybranych wskaźników SGP dla stali 0H18N9

Tab. 2. Interval of process parameters variation and of chosen SGP indicators for 0H18N9 steel

	$p_w$ [MPa] (250→350)	$v_f$ [mm/s] (0,26→0,74)	$r$ [mm] (10→40)
$Sa$ [ $\mu$ m]	(10,40→3,69)	(3,69→37,30)	(4,79→4,21)
$Sq$ [ $\mu$ m]	(12,80→4,75)	(4,75→46,10)	(5,95→5,25)
$St$ [ $\mu$ m]	(74,5→55,9)	(55,90→268)	(67,3→35,0)
$Sz$ [ $\mu$ m]	(63,2→46,2)	(45,20→230)	(56,6→29,5)
$Sp$ [ $\mu$ m]	-	(31,60→108)	-
$Sv$ [ $\mu$ m]	-	(24,30→160)	-

W oparciu o uzyskane wyniki badań wpływu zasadniczych parametrów procesu cięcia na wskaźniki ukształtowania geometrycznego przeciętych powierzchni stali nierdzewnej gat. 0H18N9 i stopu aluminium gat. PA4, została opracowana tab. 4, w której zaprezentowano intensywność oddziaływania ciśnienia wody ( $p$ ), prędkości posuwu ( $v_f$ ) i promienia trajektorii głowicy tnącej ( $r$ ) na parametry chropowatości powierzchni. Symbolem „+” oznaczono zaistnienie bardzo silnej współzależności ( $R^2_{skor.} > 0,9$ ), oznaczenie „•” symbolizuje w przybliżeniu 80% korelację, natomiast znak „-” informuje o stochastycznym oddziaływaniu.

Tab. 3. Przedziały zmienności parametrów procesu oraz wybranych wskaźników SGP dla stopu lekkiego PA4

Tab. 3. Interval of process parameters variation and of chosen SGP indicators for PA4 alloy

	$p_w$ [MPa] (175→350)	$v_f$ [mm/s] (2,16→0,75)	$r$ [mm] (10→40)
$Sa$ [ $\mu$ m]	(16,81→6,87)	(6,87→28,4)	(8,76→8,14)
$Sq$ [ $\mu$ m]	(20,90→8,69)	(8,69→33,6)	(11,2→10,3)
$St$ [ $\mu$ m]	(170,0→50,2)	(50,20→262)	(86,4→65,0)
$Sz$ [ $\mu$ m]	(143→44,20)	(49,50→173)	(74,1→53,9)
$Sp$ [ $\mu$ m]	-	(24,70→139)	-
$Sv$ [ $\mu$ m]	-	(25,50→123)	-

Z informacji zgromadzonych w tab. 4 można wywnioskować, że w trakcie procesu przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną możliwe jest sterowanie tylko sześcioma wskaźnikami struktury geometrycznej powierzchni ( $Sa$ ,  $Sq$ ,  $St$ ,  $Sz$ ,  $Sp$ ,  $Sv$ ) spośród ośmiu rozpatrywanych. Wyraźny wpływ wszystkich trzech parametrów procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną ( $p_w$ ,  $v_f$ ,  $r$ ) na wskaźniki jakościowe SGP, odnotowano

w przypadku dwóch parametrów chropowatości powierzchni: średniego arytmetycznego odchylenia ( $Sa$ ) i średniego kwadratowego odchylenia ( $Sq$ ).

Tab. 4. Korelacje zachodzące między parametrami obróbki i wskaźnikami SGP  
Tab. 4. Correlations between jetting parameters and SGP indicators

	$p_w$ [MPa]	$v_f$ [mm/s]	$r$ [mm]
$Sa$ [ $\mu$ m]	+	+	+
$Sq$ [ $\mu$ m]	+	+	+
$St$ [ $\mu$ m]	•	+	•
$Sz$ [ $\mu$ m]	•	+	•
$Sp$ [ $\mu$ m]	-	•	-
$Sv$ [ $\mu$ m]	-	•	-
$Ssk$ [-]	-	-	-
$Sku$ [-]	-	-	-

Nie zauważono natomiast żadnych korelacji występujących pomiędzy wielkościami wejściowymi procesu cięcia, a wskaźnikami amplitudowymi  $Ssk$  i  $Sku$ .

#### 4. Podsumowanie

W przeprowadzanych badaniach strukturę geometryczną powierzchni określano według ośmiu wskaźników amplitudowych. Stwierdzono przy tym, że ich wartości zależą od zmiany parametrów procesu cięcia ( $p_w$ ,  $v_f$ ,  $r$ ) wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Analiza takich zależności wykazała, że warunki cięcia materiałów strugą wodno-ścierną jednoznacznie oddziałuje tylko na sześć analizowanych wskaźników SGP ( $Sa$ ,  $Sq$ ,  $St$ ,  $Sz$ ,  $Sp$  i  $Sv$ ). Jednakże wyraźny wpływ wszystkich trzech parametrów procesu cięcia strugą wodno-ścierną, odnotowano tylko dla średniego arytmetycznego odchylenia ( $Sa$ ) oraz średniego kwadratowego odchylenia ( $Sq$ ).

Uzyskane rezultaty badań wykazały, że na zmniejszenie wartości wskaźników amplitudowych, powodujące poprawę jakości powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną, wpływa wzrost ciśnienia wody i promienia trajektorii głowicy tnącej oraz redukcja prędkości posuwu. Najmniejszy wpływ w kształtowaniu wysokości nierówności przecięć, spośród wymienionych parametrów obróbki, wywiera promień krzywizny wycinanego kształtu.

#### 5. Literatura

- [1] Borkowski J., Benkowska M.: Wpływ głównych parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na jakość powierzchni przecięcia. ATMiA, Vol.26, Nr 2, 2006, s. 11-18.
- [2] Borkowski J., Borkowski P.: Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe. Monografia INTH nr 154, WUPK, Koszalin, 2008.
- [3] Borkowski P.: Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych. Monografia INTH nr 174, WUPK, Koszalin, 2010.
- [4] Borkowski J., Sutowska M.: The quality of surface cut after high-pressure abrasive-water cutting. Journal of Machine Engineering, Vol. 7, No. 3, 2007, pp.19-28.
- [5] Borkowski J., Sutowska M.: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na parametry SGP, ATMiA, Vol.27, Nr 2, 2007, s. 43-51.
- [6] Karpiński A., Louis H., Moon M., Peter D., Ravasio C., Scheer C., Sudmersen U.: Effects of pressure fluctuations and vibration phenomenon on striation formation in AWJ cutting. 17th international Conference on Water Jetting, 2004, Mainz, Germany, pp.219-229.
- [7] Oczóś K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych. OWPR, Rzeszów, 2003.
- [8] Białas S.: Metrologia techniczna z podstawami tolerowania wielkości geometrycznych dla mechaników. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [9] Humienny Z.: Specyfikacje geometrii wyrobów. GPS, WNT, 2004.