

Badania wskaźników zdolności skrawnej wysokociśnieniowego strumienia wodno-ściernego przy cięciu krzywoliniowym stali

Study of high-pressure abrasive water jet capacity indices for steep cutting of steels

RAFAŁ KUDELSKI *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.161>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Zagadnienie jakości technologicznej części jest jednym z naczelnych problemów współczesnego wytwarzania maszyn. W wielu przypadkach komponenty produkowane są z nowych materiałów konstrukcyjnych o specyficznych właściwościach, które traktuje się jako trudno obrabialne tradycyjnymi technologiami. Stąd konieczność rozpoznania możliwości nowych technologii, w tym technologii cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym, w kontekście wykonywania elementów ze stali S355J2H, z zachowaniem wymagań jakościowych obróbki. Zaprezentowano wyniki badań dokładności wykonania elementów o złożonym kształcie ze stali S355J2H w zależności od ciśnienia strumienia wody, posuwu cięcia oraz ilości dozowanego ścierniwa, przy niezmienniej grubości elementu. Miarą dokładności wykonania – niezależnie od dokładności wymiarowej – była wielkość zukosowania powierzchni bocznej wycinanej części wynikająca ze specyficznego mechanizmu dekohezji materiału w technologii *water jet*.

SŁOWA KLUCZOWE: jakość technologiczna, stal S355J2H, przecinanie materiałów, strumień wodno-ścierny

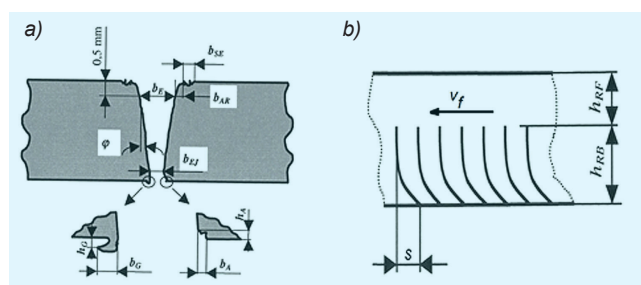
Quality of the technological part is one of the major problems of modern machine manufacturing. In many cases, components are manufactured from new construction materials with specific properties that are considered difficult to machining applying conventional technologies. Hence, to search for new technologies, including high-pressure abrasive water jet cutting in the context of the S355J2H steel elements manufacture, while maintaining the quality requirements of the machining, is the need. The results of tests on the accuracy of components made of S355J2H steel are presented as dependent on the water jet pressure, cutting feedrate and the amount of abrasive dozed, with constant element thickness. The accuracy of the design measure – regardless of dimensional accuracy – was the magnitude of the lateral sagging of the cut workpiece resulting from the specific mechanism of water jet removal mechanism.

KEYWORDS: technological quality, steel S355J2H, workpiece cutting, abrasive jet

Szczelina cięcia, której powstawanie jest fenomenem procesu usuwania materiału przy cięciu strumieniem wodno-ściernym, nie znajduje odpowiedników w znanych sposobach obróbki mechanicznej. Odmienność procesu usuwania materiału obrabianego narzędziem mechanicznym

z wysoką energią postaciową ostrza nie pozwala na wykorzystanie znanych modeli interpretacyjnych skrawania w zagadnieniach destrukcji materiału podczas obróbki metodą *water jet*. Stąd niepełna wiedza z zakresu sterowania przebiegiem procesu cięcia wodno-ściernego w wielu szczegółowych kwestiach i konieczność eksperymentalnej weryfikacji zakładanych wskaźników jakości technologicznej obrabianych elementów.

Parametry energetyczne strumienia wody [6, 8] są uzależnione od warunków początkowych, czyli ciśnienia wody oraz drogi, jaką strumień pokonuje w powietrzu od momentu opuszczenia dyszy wodnej do zetknięcia się ziarnami ściernymi w komorze mieszania. Na tej drodze strumień ulega rozprężeniu w wyniku kawitacyjnego uwolnienia do otoczenia pary wodnej oraz powietrza zawartego w wodzie [6], a także znaczącej aeracji w powietrzu, przyczyniającej się do wielofazowości strumienia wodno-ściernego [2, 4]. To prowadzi do wytworzenia się typowej szczeliny cięcia charakteryzowanej za pomocą parametrów wskazanych na rys. 1.



Rys. 1. Szczelina cięcia: a) przekrój poprzeczny według VDI 2906 z dodatknią zbieżnością, b) przekrój wzdłużny w kierunku ruchu posuwowego [10]

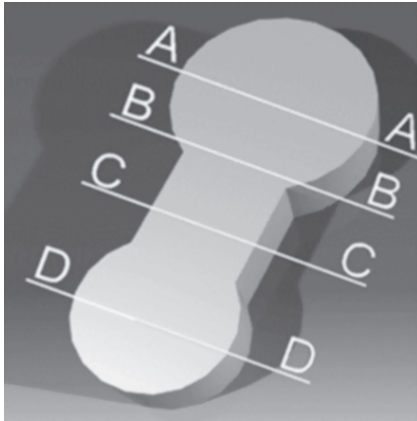
Jak widać na przedstawionych na rys. 1 obrazach szczeliny cięcia, usuwanie materiału wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym jest procesem skomplikowanym. Otrzymuje się złożony poprzeczny profil szczeliny cięcia, którego powstawanie można wyjaśnić efektami turbulencji ruchu wody w szczelinie oraz poprzeczną do kierunku posuwu ekspansją strumienia wody. Z obserwacji powierzchni cięcia wynika, że wraz ze wzrostem grubości przecinanego materiału [1, 2, 5, 7] tworzą się warunki sprzyjające większej turbulencji przepływu wielofazowej cieczy w szczelinie z powodu zakrzywienia dolnej strefy szczeliny (rys. 1b). W wyniku tego następuje odchylenie s toru ruchu strumienia wodno-ściernego o wielkości przeciwnej do zwrotu wektora ruchu posuwowego v_f – oznaczono to na rys. 1b [8, 9].

* Dr inż. Rafał Kudelski (kudelski@agh.edu.pl) – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wielkość odchylenia s określana w przekroju wzdłużnym szczeliny – przy ustalonej grubości przecinanego przedmiotu i określonym rodzaju materiału – jest uzależniona od zdolności skrawnej strumienia wodno-ściernego [4].

Maksymalna grubość przecinanego materiału dla całego dopuszczalnego zakresu zmienności wymienionych grup parametrów, odpowiadająca maksymalnej zdolności skrawnej strumienia, może być określona pojęciem potencjału skrawnego strumienia wodno-ściernego.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań wpływu zdolności skrawnej strumienia wodno-ściernego na wskaźniki jakości cięcia elementów o kształcie wskazanym na rys. 2.



Rys. 2. Element ze stali S355J2H z oznaczonymi strefami (A, B, C, D) do badania błędów nieprostokątności

Badanie wybranych wskaźników jakości miało na celu określenie możliwości dokładnej obróbki wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym oraz zidentyfikowanie błędów kształtu przedmiotu po obróbce. Ze względu na możliwe zastosowania tej technologii obróbki największe znaczenie ma ocena błędów okrągłości odpowiednich fragmentów przedmiotu – zarówno od strony wejścia strumienia wodno-ściernego, jak również jego wyjścia z przedmiotu – a także błędów nieprostokątności ścian obrabianego elementu w odniesieniu do płaszczyzny podstawy (rys. 2).

Badanie eksperymentalne

Badania eksperymentalne wskaźników jakości technologicznej cięcia stali S355J2H zrealizowano na maszynie do cięcia *water jet* firmy Ridder z przygotowicowym zasobnikiem ścierniwa [4].

Na podstawie przebiegu zmienności potencjału skrawnego przy cięciu stali S355J2H, dla materiału obrabianego o grubości 25 mm, określono maksymalny posuw wynoszący $v_f = 1,7$ mm/s przy ciśnieniu nie mniejszym niż $p = 280$ MPa i natężeniu przepływu ścierniwa nie mniejszym niż $q = 6,5$ g/s. Wyznaczone parametry zapewniają minimalną zdolność skrawną wysokociśnieniowego strumienia umożliwiającą wykonanie elementu z takiego materiału. Jednak, aby uzyskać pełny obraz zależności, w drugiej części badań rozszerzono zakres zmienności posuwu w przedziale $v_f = 0,083 \div 1,7$ mm/s, zapewniając większą niż wymagana zdolność skrawną strumienia. Tak więc do kolejnego etapu badań, dotyczących wskaźników jakościowych obróbki przedmiotów o złożonych kształtach, wybrano zakres zmienności parametrów decyzyjnych w przedziałach $v_f = 0,083 \div 1,7$ mm/s, $p = 180 \div 380$ MPa, natężenie przepływu ścierniwa $q = 3 \div 10$ g/s.

W tej części badań eksperymentalnych, zrealizowanych według planu PS/DS.-P:L(L) [3], z płyty stalowej o gru-

bości 25 mm wycinano z zachowaniem zadanych parametrów, wynikających z planu eksperymentu, przedmiot o kształcie wskazanym na rys. 2, charakteryzujący się 2 fragmentami profilu kołowego, odpowiednio o promieniu $R15$ oraz $R20$, połączonymi odcinkiem prostoliniowym. Pomiary wybranych błędów wykonania przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Global Performance z oprogramowaniem PC DMIS. Uwzględniając złożony tor ruchu strumienia wodno-ściernego w materiale (rys. 1), wybrano charakterystyczne obszary przedmiotu (strefy: A, B, C, D na rys. 2), w których można oczekiwać największych błędów kształtu spowodowanych zakrzywieniem s strumienia wodno-ściernego przy wyjściu z przedmiotu.

Wielkość błędu Δ jako różnica promieni kołowych fragmentów przedmiotu określana przy wejściu oraz wyjściu wysokociśnieniowego strumienia z przedmiotu (u dołu przedmiotu) jest związana z interakcją wysokociśnieniowego strumienia z materiałem i pozostaje w bezpośredniej zależności od jego zdolności skrawnej. Natomiast odchyłki kształtu przedmiotu, określone nieprostokątnością jego powierzchni bocznej do podstawy, a zwłaszcza błędy profilu we fragmentach kołowych profilu, przy wyjściu strumienia z przedmiotu będą uwarunkowane od interakcji wysokociśnieniowego strumienia z przedmiotem w obszarze szczeliny roboczej.

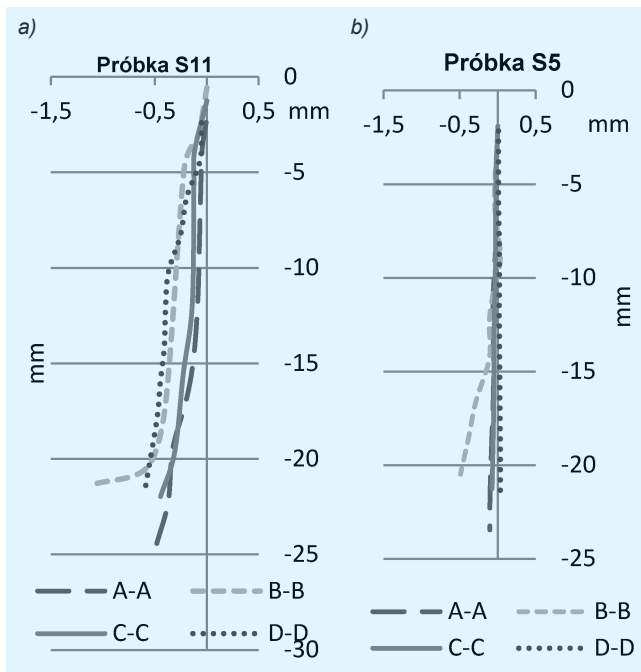
Przykładowe odchyłki okrągłości przedmiotu po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym, uzyskane w badaniach, zaprezentowano w tablicy.

TABLICA. Przykładowe odchyłki okrągłości przedmiotu po cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym

Próbka	S3	S5	S11
Ciśnienie, MPa	220	220	280
Posuw, mm/min	52,8	17,2	5
Wydatek ścierniwa, g/s	4,42	8,3	6,5
Odchyłka, mm	$\Delta R15 = 1,04$ $\Delta R20 = 0,68$	$\Delta R15 = 0,03$ $\Delta R20 = 0,13$	$\Delta R15 = -0,59$ $\Delta R20 = -0,49$

Z badań wynika, że podobnie jak ciśnienie wody, silny wpływ na błędy kołowych fragmentów profilu przedmiotu ma posuw cięcia, co ilustrują przytoczone w tablicy wybrane wyniki pomiarów dla kołowych fragmentów przedmiotu o promieniu odpowiednio 15 mm ($R15$) oraz 20 mm ($R20$).

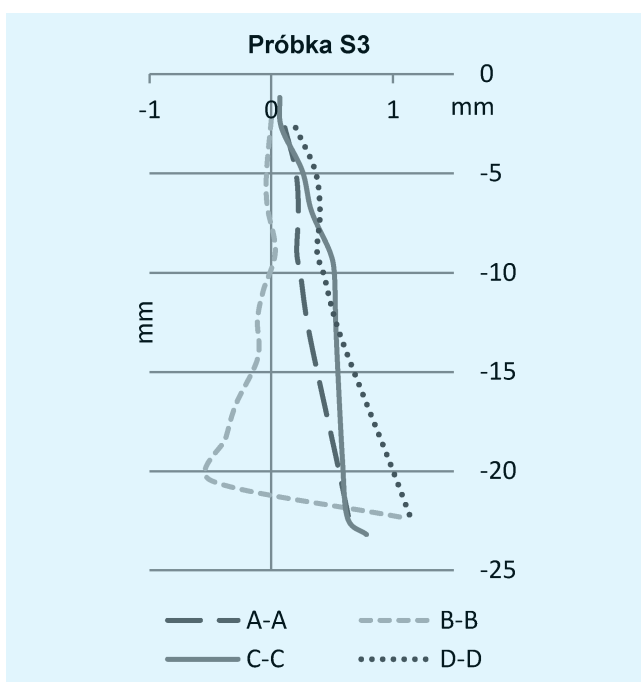
Wyniki wskazują, że w niektórych zakresach parametrów cięcia średnica kołowego fragmentu przedmiotu u jego podstawy jest większa od średnicy przedmiotu w części górnej (przy wejściu strumienia) i różnica ta jest rzędu 1 mm. W takich przypadkach można wnioskować, że podczas przecinania stali S355J2H w pewnych warunkach, zwłaszcza przy wyższych prędkościach cięcia, tworzy się klasyczna szczelina cięcia o zbieżności dodatniej – jak na rys. 1. Jednakże analiza pełnego zakresu zmienności czynników badanych (tablica, próbka S11) wskazuje na możliwość powstawania szczeliny cięcia o zbieżności ujemnej, a w tym przypadku odpowiednie średnice kołowych fragmentów przedmiotu u podstawy stają się mniejsze od średnicy przy wejściu strumienia w materiał. Szczelina o zbieżności ujemnej się może tworzyć w warunkach wysokiej zdolności skrawnej strumienia związanej z małym posuwem, dużą ilością dozowanego ścierniwa przy wysokim ciśnieniu wody bądź na skutek niewłaściwego doboru wszystkich 3 parametrów. Odnosząc otrzymane wyniki do obróbki stali, można wnioskować, że tego rodzaju przypadki zdarzają się, gdy wysokociśnieniowy strumień wodno-ścierny ma nadmiarową



Rys. 3. Błędy kształtu powierzchni bocznej próbek: a) S11 oraz b) S5 w oznaczonych strefach A, B, C, D

w stosunku do wymaganej zdolności skrawną. Natomiast w przypadku cięcia stali z parametrami odpowiadającymi potencjałowi skrawnemu (tablica, próbka S3) otrzymuje się klasyczną szczelinę o zbieżności dodatniej.

Tego rodzaju zależności znalazły potwierdzenie w wynikach badań nieprostokątności do podstawy bocznych powierzchni wykonanego przedmiotu, co przedstawiono na rys. 3 i 4. Wskazują one, że niedokładność przedmiotu o złożonym kształcie określona nieprostokątnością powierzchni bocznej jest uzależniona nie tylko od samej krzywizny obrabianego profilu, ale także od rodzaju przejść pomiędzy krzywiznami. Największe błędy tego rodzaju powstają w części dolnej przedmiotu przy przejściu toru krzywoliniowego w prostoliniowy tor cięcia (strefa B-B rys. 3 i 4).



Rys. 4. Błędy kształtu powierzchni bocznej próbki S3 w oznaczonych strefach A, B, C, D

Pewnego rodzaju ewenementem jest szczelina cięcia przy obróbce stali, która może mieć zbieżność dodatnią bądź ujemną, co ma znaczący wpływ na błędy obrabianego przedmiotu. Istotnym wnioskiem z badań jest stwierdzenie możliwości uzyskania szczeliny cięcia o ścianach równoległych (z pominięciem podcinania elementu w strefie B-B), co skutkuje najbardziej dokładną obróbką elementu ze stali S355J2H (rys. 3, próbka S5).

Podsumowanie

Obróbka wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym stali w aspekcie złożoności kształtowej oraz dokładności wykonania przedmiotu cechuje się znaczącym zróżnicowaniem takich wskaźników dokładności, jak pochylenie ścian obrabianego przedmiotu, błędami nieokrągłości fragmentów łukowych (jeżeli takie występują), a także powstawaniem charakterystycznych błędów kształtu przedmiotu wywołanych torem ruchu wysokociśnieniowego strumienia w strefie wyjścia z przedmiotu. Błędy tego rodzaju są szczególnie duże w strefach nieciągłości konturu przedmiotu, np. w miejscach przejść fragmentów prostoliniowych w krzywoliniowe. Charakterystyczną cechą wycinania wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym elementów ze stali S355J2H jest możliwość powstawania szczeliny cięcia o zbieżności dodatniej bądź ujemnej – w zależności od doboru zdolności skrawnej strumienia.

Odpowiedni dobór parametrów (zdolność skrawna) umożliwia cięcie ze szczeliną o zbieżności zerowej. W tej sytuacji ocena jakości technologicznej przedmiotu po obróbce metodą *water jet* jest szczególnie złożona ze względu na jednoczesną zmienność oraz współzależność dokładności wykonania i chropowatości powierzchni. Przedstawione zależności dobitnie wskazują na zależność błędów kształtu przedmiotu od samego kształtu przedmiotu, warunków cięcia oraz rodzaju materiału. W przypadku materiałów typu stal S355J2H związek ten uwidoczni się w sposób szczególny.

Badania zrealizowano w ramach umowy 15.11.130.603.

LITERATURA

- Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Mehmedovic M., Djelmic A. „Experimental study on surface roughness in abrasive water jet cutting”. *Procedia Engineering*. 100 (2015): s. 394–399.
- Borkowski J., Sutowska M. „The quality of surface shaped by abrasive-waterjet”. *Unconventional and Hydrojetting Technologies*. ISSN 0239-7129. Koszalin 2009, s. 259–272.
- Górecka R. „Teoria i technika eksperymentu”. Kraków: Politechnika Krakowska, 1998.
- Kudelski R. „Badania wskaźników zdolności skrawnej wysokociśnieniowego strumienia wodno-ściernego w procesach cięcia”. Rozprawa doktorska. Kraków: AGH 2016.
- Loschner P., Jarosz K., Niesłony P. „Investigation of the effect of cutting speed on surface quality in abrasive water jet cutting of 316L stainless steel”. *Procedia Engineering*. 149 (2016): s. 276–282.
- Momber A., Kovacevic R. „Principles of Abrasive water jet Machining”. Berlin–Heilderberg–New York: Springer Verlag, 1997.
- Sutowska M. „Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na kształt śladów obróbkowych”. *ATMIA*. 4, 31 (2011).
- Wantuch E., Kot R. „Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym”. *XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej*. Łódź, 2003, s. 329–337.
- Wantuch E., Nieciąg H., Kudelski R. „Problematyka krzywoliniowego cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym elementów ze stopu Al”. *XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej NSOS*. Baranów Sandomierski, 18–20 września 2013.
- VDI-Richtlinien: VDI2906, Abrasiv – Wasserstrahl-schneiden, 1994. ■