

Badania wpływu wielkości ziaren ściernych na jakość technologiczną w procesie przecinania AWJ stali S235JR

Studies upon the effect of abrasive grain size on technological quality during the AWJ cutting of S235JR steel

SŁAWOMIR SPADŁO
TADEUSZ GAJEWSKI
DANIEL KRAJCARZ
ZBIGNIEW DRABIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.160>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wpływ wielkości ziaren ściernych na jakość technologiczną powierzchni przecięcia stali niestopowej konstrukcyjnej S235JR. Eksperyment przeprowadzono na obrabiarce do cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną APW 2010BB, z wykorzystaniem ścierniwa garnet #80 i #120. Badania obejmowały ocenę makrostruktury powierzchni przecięcia: szerokości szczeliny cięcia, błędów kształtu i chropowatości powierzchni. Doświadczenie potwierdziło, że wielkość ziaren ściernych w istotny sposób wpływa na makrostrukturę powierzchni przecięcia. Za pomocą ziaren ściernych o mniejszej granulacji można wykonać gładziej cięcia, jednak drobniejsze cząstki ściernie mają mniejszą energię kinetyczną, co prowadzi do osłabienia zdolności erozyjnej strugi wodno-ściernej. Badania zrealizowano ze zmienną prędkością posuwu, dlatego możliwe było określenie wpływu prędkości posuwu na średnie kwadratowe odchylenie powierzchni. Zwiększenie prędkości posuwu skutkowało zmniejszeniem całej szerokości szczeliny cięcia – było to widoczne zwłaszcza w dolnej strefie cięcia obrabianego przedmiotu.

SŁOWA KLUCZOWE: cięcie stali, cięcie strugą wodno-ścierną, jakość technologiczna cięcia

The influence of the abrasive grain size on the technological quality of the intersection of non-alloy structural steel S235JR, is presented. The experiment was carried out on a high-pressure water-jet APW 2010BB abrasive cutting machine using the abrasive garnet #80 and #120. Studies included the assessment of intersection surface macrostructure: slit width, shape defects and surface roughness. Experiment has confirmed that the size of abrasive grains significantly influences the macrostructure of the intersection surface. Smoother cuts can be made with finer grains, but finer abrasive particles have less kinetic energy, leading to reduction in the erosion capacity of the water-jet. The study was carried out at variable feedrate, therefore it was possible to determine the influence of the feedrate on the average square surface deviation. Increasing the feedrate resulted in a decrease in the entire width of the cut slit, which was especially noticeable in the lower cut zone of the workpiece.

KEYWORDS: steel cutting, abrasive water-jet cutting, technological quality of cutting

* Dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. PŚk (sspadlo@tu.kielce.pl); mgr inż. Daniel Krajcarz (d.krajcarz@wp.pl) – Zakład Materiałoznawstwa i Technologii Amunicji, Politechnika Świętokrzyska; mgr inż. Tadeusz Gajewski (t.gajewski@mesko.com.pl) – Centrum Innowacji i Wdrożeń Grupy Amunicyjno-Rakietowej PGZ, Mesko S.A.; mgr inż. Zbigniew Drabik (z.drabik@mesko.com.pl) – Mesko S.A.

Technologia cięcia wysokociśnieniową strugą wodną jest niezwykle wszechstronna i może być wykorzystywana zarówno do cięcia materiałów twardych, jak i tych o niskiej twardości [1].

W przypadku gdy obróbka przedmiotu wymaga dużej energii kinetycznej strumienia, stosuje się dodatek ścierny, który ma za zadanie zintensyfikować zjawisko erozji materiału [2–3]. Jako intensyfikator procesu erozyjnego najczęściej wykorzystuje się ścierniwo w postaci ziaren granatu almandynowego, korundu i węgla korzemu.

Do ważniejszych zalet cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną (AWJ) zalicza się [4–5]:

- brak oddziaływań termicznych podczas procesu cięcia,
- niewielkie siły nacisku,
- relatywnie wysoką dokładność obróbki,
- występowanie wąskiej szczeliny cięcia.

Ze względu na szeroki zakres zastosowań obróbkowych technologia strumieniowo-ścierna stanowi konkurencyjną alternatywę dla powszechnie wykorzystywanych metod cięcia materiałów [6].

Uzyskiwana w procesie przecinania jakość technologiczna [7–8] jest wypadkową kilku niezależnych zmiennych, będących parametrami procesu przecinania [9–11]. Parametry te można podzielić na następujące grupy:

- hydrauliczne (ciśnienie zasilające, średnica strugi, moc strugi),
- właściwości ścierniwa (rodzaj stosowanego ścierniwa, wielkość ziaren, kształt ziaren, wydatek ścierniwa),
- parametry technologiczne (prędkość posuwu, odległość głowicy tnącej od ciętego materiału, geometria dyszy wodnej i formującej).

Poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu obróbki na jakość technologiczną otrzymywanej powierzchni przecięcia umożliwi opracowanie modelu procesu przecinania badanego materiału.

Metodyka badań

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu wielkości ziaren ściernych i prędkości posuwu na jakość technologiczną powierzchni przecięcia – na przykładzie stali niestopowej konstrukcyjnej S235JR o grubości 3 mm. Gatunek ten jest powszechnie stosowanym materiałem konstrukcyjnym.

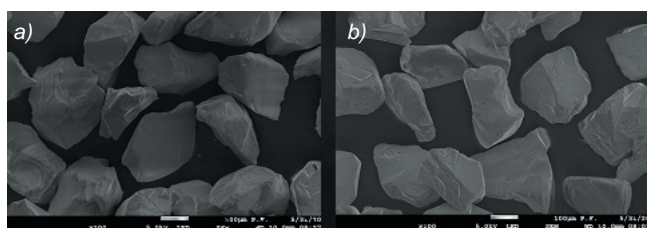
W tabl. I podano normatywny skład chemiczny badanego materiału.

TABLICA I. Skład chemiczny stali S235JR [12]

Pierwiastek	Zawartość, %
C	0,20
Mn	1,40
P	0,035
S	0,035
N	0,012
Fe	reszta

Badania zrealizowano ze zmienną prędkością posuwu w zakresie od 50 do 300 mm/min. Materiałem ściernym, wykorzystanym w procesie cięcia, był garnet o wielkości ziarna #80 i #120. Jest to minerał pochodzenia naturalnego, zaliczany do rodziny krzemianów. Jego twardość dochodzi do 8 w skali Mohsa, masa właściwa wynosi 4,2 Mg/m³, a ciężar nasypowy – 2,34 Mg/m³ [13]. Na rys. 1 przedstawiono widok ziaren ściernych garnetu #80 i #120. Fotografie wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego z emisją polową JEOL JSM-7610F.

W tabl. II zaprezentowano stałe parametry procesu cięcia przyjęte na potrzeby eksperymentu. Badania przeprowadzono na obrabiarce APW 2010BB.



Rys. 1. Mikrofotografia ziaren ściernych: a) #80; b) #120

TABLICA II. Parametry procesu cięcia

Ciśnienie wody, MPa	280
Ilość dozowanego ścierniwa, g/s	4,0
Odległość dyszy od ciętego materiału, mm	2,0
Średnica dyszy wodnej, mm	0,30
Średnica dyszy formującej, mm	1,02
Długość dyszy formującej, mm	75

Badania szerokości szczeliny cięcia oraz błędów kształtu przeprowadzono z wykorzystaniem wielosensorowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej O-Inspect oraz teletencyjnego obiektu o 12-krotnym przybliżeniu. Do pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni zastosowano profilometr optyczny Talysurf CCI Lite. Urządzenie to służy do wykonywania optycznych, bezstykowych pomiarów oraz analiz struktury geometrycznej powierzchni. Profilometr ma możliwość sklejania wyników pomiaru. Analizę wyników przeprowadzono w oprogramowaniu TalyMap Platinum.

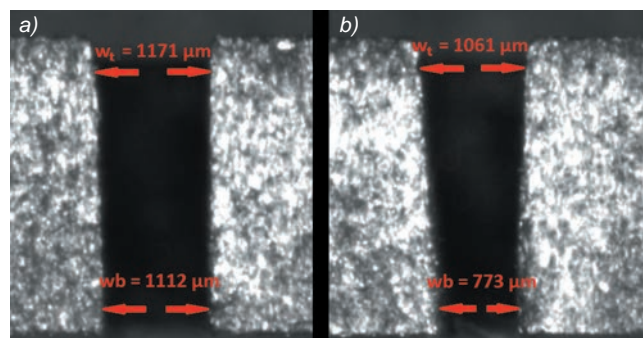
Wyniki badań

W celu przeprowadzenia oceny geometrii szczeliny przecięcia wykonano serię pomiarów szerokości szczelin w górnej (w_t) i dolnej strefie cięcia (w_b). Przykładowe kształty szczelin przecięcia z zaznaczonym miejscem pomiaru przedstawiono na rys. 2.

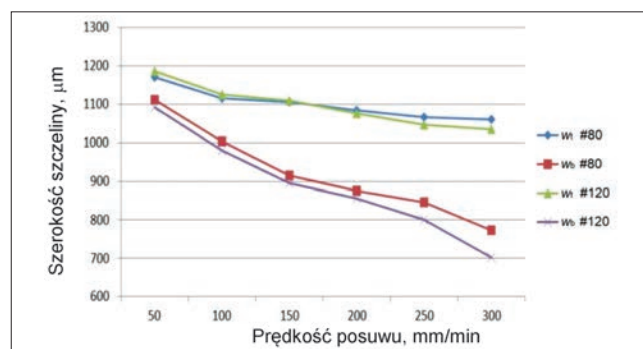
Pomiary szerokości szczelin przecięcia zostały wykonane w niewielkiej odległości od krawędzi ciętego materiału. Pomiar na samej krawędzi byłby obciążony błędem ze względu na:

- zaokrąglenia naroża na wejściu strugi w cięty materiał,
- powstawanie zadziórów przy wyjściu strugi z ciętego materiału.

W badaniach zmiennymi parametrami były wielkość ziaren ściernych oraz prędkość posuwu. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie (rys. 3).



Rys. 2. Wymiary szczeliny cięcia stali S235JR z użyciem ścierniwa garnet #80 dla prędkości posuwu: a) 50 mm/min, b) 300 mm/min

Rys. 3. Wpływ prędkości posuwu na szerokość górnej (w_t) i dolnej (w_b) szczeliny cięcia w zależności od wielkości zastosowanych ziaren ściernych

Po analizie wyników pomiarów w strefie górnej (w_t) w przebadanym zakresie nie stwierdzono istotnego wpływu wielkości ziaren ściernych na wielkość szczeliny po cięciu. Pomimo że szczelina uzyskana w przypadku użycia ścierniwa garnet #80 ma na ogół nieznacznie większą szerokość – rzędu kilku do kilkunastu mikrometrów (jest to widoczne przy prędkości posuwu 250 i 300 mm/min), to jednak ewentualne różnice są niewielkie. Zakłada się, że ze względu na większe rozmiary ziaren ścierniwa garnet #80 (i tym samym większą energię kinetyczną) szczelina cięcia może być nieznacznie szersza.

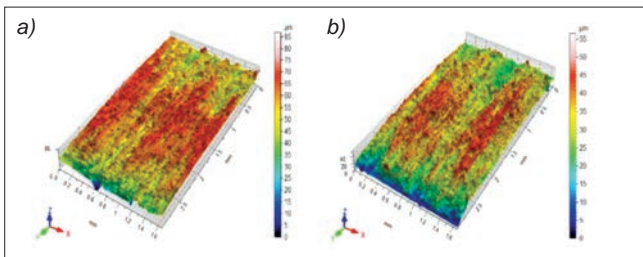
W przypadku pomiarów w strefie dolnej (w_b) zaobserwowano o wiele bardziej wyraźną tendencję do zwężania się szczeliny cięcia wraz ze wzrostem prędkości posuwu. W efekcie szczelina przecięcia przybiera kształt litery „V”. Jest to związane ze zjawiskiem spadku energii kinetycznej strugi wraz z wnikaniem strumienia tnącego w cięty materiał. Zastosowanie mniejszych ziaren ściernych obniża zdolność erozyjną strumienia wodno-ściernego, co uwidacznia się wraz ze wzrostem prędkości posuwu.

W celu pełniejszej oceny makrostruktury powierzchni przecięcia dokonano pomiarów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. Jako wielkość badaną wybrano średnie kwadratowe odchylenie powierzchni (S_q), definiowane jako odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni. Taki sposób analizy wynika z faktu, że parametry oznaczone literą „S”, charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni w układzie 3D, pozwalają na bardziej miarodajną ocenę powierzchni w stosunku do punktowych ocen chropowatości. Szczegółowe topograficzne mapy struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem oprogramowania TalyMap dla zmiennych prędkości posuwu i różnych wielkości ziaren ściernych przedstawiono na rys. 4 i 5.

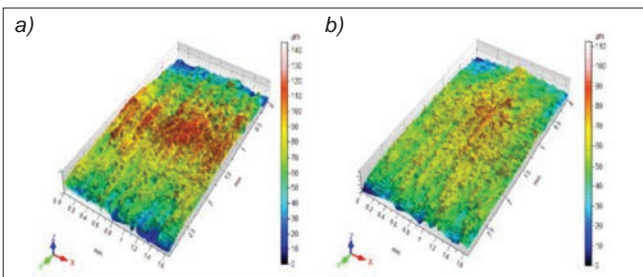
W obróbce wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną pogorszenie chropowatości wynika z występowania 2 odmiennych zjawisk kształtujących jakość powierzchni przecięcia. W strefie przypowierzchniowej dominuje zjawisko zużycia poślizgowego, przez co chropowatość jest w miarę stabilna i osiąga niewielkie wartości. W strefie zużycia udarowego następuje już znaczne pogorszenie jakości powierzchni, a w konsekwencji – wzrost wartości chropowatości. Różnice w oddziaływaniu strumienia wodno-ściernego z materiałem obrabianym w zależności od głębokości cięcia są widoczne na obrazach prezentujących topografię powierzchni. W obszarach wejścia strugi nie widać kierunkowości śladów obróbkowych. W strefie wyjścia strumienia z przedmiotu można zaobserwować charakterystyczne dla technologii AWJ rowki, będące pozostałością kierunku ruchu głównego ziaren ściernych, których tor wraz ze wzrostem prędkości posuwu ulega zakrzywieniu.

Na rys. 6 graficznie pokazano wpływ wielkości ziaren ściernych oraz prędkości posuwu na średnie kwadratowe odchylenie całej powierzchni przecięcia.

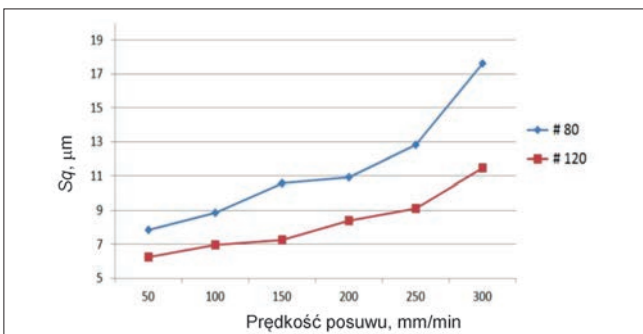
Na podstawie analizy wyników badań można wnioskować, że wielkość ziaren ściernych w istotny sposób wpływa na średnie kwadratowe odchylenie powierzchni. W całym przebadanym zakresie parametr S_q był za każdym razem większy w przypadku powierzchni otrzymanej z użyciem ścierniwa o większych ziarnach. Istotne różnice



Rys. 4. Obraz izometryczny powierzchni przecięcia stali S235JR, ciętej z prędkością posuwu 50 mm/min i z wykorzystaniem ścierniwa: a) garnet #80, b) garnet #120



Rys. 5. Obraz izometryczny powierzchni przecięcia stali S235JR, ciętej z prędkością posuwu 300 mm/min i z wykorzystaniem ścierniwa: a) garnet #80, b) garnet #120



Rys. 6. Wpływ prędkości posuwu na średnie kwadratowe odchylenie powierzchni (S_q) w zależności od wielkości zastosowanych ziaren ściernych

występują także dla większych prędkości posuwu – w tym przypadku podobny trend jest widoczny mimo znacznie większego spadku energii kinetycznej strugi wodno-ścierniej dla ścierniwa o mniejszej granulacji.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jakość technologiczna powierzchni przecięcia materiału obrabianego za pomocą wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej jest uzależniona od parametrów procesu przecinania.

Wielkość ziaren ściernych użytych w procesie cięcia istotnie wpływa na makrostrukturę powierzchni przecięcia. Za pomocą ziaren ściernych o mniejszej granulacji można wykonać gładziej cięcia, charakteryzujące się mniejszym średnim kwadratowym odchyleniem powierzchni.

Szczelina cięcia w przypadku zastosowania ścierniwa o mniejszej granulacji przybiera kształt litery „V”. Zjawisko to nasila się ze wzrostem prędkości posuwu i jest widoczne zwłaszcza w dolnej strefie cięcia. Jest to związane z szybszym spadkiem energii kinetycznej strugi.

Wraz ze wzrostem prędkości posuwu spadają zdolności skrawne strugi wodno-ścierniej. Mniejsza ilość ziaren ściernych oddziałuje na powierzchnię obrabianą, a dodatkowo wraz z wnikaniem strugi w cięty materiał proces mikroskrawania ziaren ściernych jest zastępowany przez inne mechanizmy destrukcji materiału, powodujące pogorszenie jakości technologicznej powierzchni przecięcia.

Należy pamiętać, że parametry odnoszące się do powierzchni uśredniają wyniki pomiarów dla całej powierzchni i pozwalają wyznaczyć ogólny trend. Dlatego też lokalne wartości parametru w przypadku średniego kwadratowego odchylenia wybranego profilu mogą się znacznie różnić. Parametr ten będzie przybierał większe wartości dla profili znajdujących się bliżej wylotu strugi ze szczeliny przecinanego materiału.

LITERATURA

- Borkowski J., Borkowski P. „Przecinanie zawieszoną strugą wodno-ścierną wytwarzaną metodą BORJET”. *Inżynieria Maszyn.* 13 (2008): s. 104–112.
- Sutowska M. „Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną”. *PAK.* 57 (2015): s. 535–537.
- Hlavac L. „Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf”. *Journal of Materials Processing Technology.* 209 (2009): s. 4154–4161.
- Kulecki M.K. „Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications”. *Journal of Materials Tools & Manufacture.* 42 (2002): s. 1297–1306.
- Wantuch E., Kudelski R., Nieciąg H. „Dependency of the technological quality of elements made from an aluminum alloy on their shape in the water jet machining”. *Journal of Machine Engineering.* 13, 4 (2013): s. 35–46.
- Mazurkiewicz A. „Czynniki wpływające na jakość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym”. *Inżynieria Materiałowa.* 5 (2008): s. 1–4.
- Kudelski R., Zagórski K., Wantuch E., Reben M. „Warstwa wierzchnia elementów wycinanych wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym”. *Mechanik.* 8–9 (2015): s. 221–226.
- Spadło S., Młynarczyk P., Łakomiec K. „Influence of the of electrical discharge alloying methods on the surface quality of carbon steel”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 89 (2017): s. 1529–1534.
- Hlavac L., Krajcarz D., Hlavacova I., Spadło S. „Precision comparison of analytical and statistical-regression models for AWJ cutting”. *Precision Engineering.* <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.002>.
- Matuszewski M., Oborski I.L., Styp-Rekowski M. „Efektywność obróbki wodno-ścierniej – wybrane zagadnienia”. *Mechanik.* 4 (2015): s. 52–55.
- Chithirai Pon Selvan M., Mohana Sundara Raju N. „Assessment of process parameters in abrasive waterjet cutting of stainless steel”. *International Journal of Advances in Engineering & Technology.* 1, 3 (2011): s. 33–40.
- PN-EN 10025-2:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
- Materiały informacyjno-techniczne firmy Garnet Polska, <http://garnet.com.pl> [dostęp: 28.05.2017].