

Dr hab. inż. Sławomir SPADŁO, prof. PŚk;
mgr inż. Daniel KRAJCARZ (Politechnika Świętokrzyska):

OCENA JAKOŚCI POWIERZCHNI PRZECIĘCIA STALI HARDOX 400 PO CIĘCIU WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

Streszczenie

Artykuł przedstawia możliwości kształtowania jakości powierzchni stali hardox 400 wysokociśnieniową strugą wodno- ścierną. Zobrazowano tutaj wpływ prędkości posuwu na jakość powierzchni przecinanych. Badania obejmowały ocenę struktury powierzchni za pomocą wskaźników klas jakości oraz pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

Słowa kluczowe: struga wodno-ścierna, cięcie metali, struktura geometryczna powierzchni

ANALYSIS OF THE SURFACE QUALITY FOR HARDOX 400 STEEL IN ABRASIVE WATER-JET CUTTING

Abstract

This article presents the description of forming abrasive water-jet. It was discussed variables process, which affecting to the quality of the cut surface and it was defined the advantages of high-pressure abrasive water jet cutting materials. In this study, the effect of different traverse speed of abrasive water jet (AWJ) on hardox 400 steel was experimentally investigated. The experimental study was focused on measurements of surface topography and surface geometrical structure roughness for different sections of the machined surface. It was specified a smoother and rougher edge quality zone.

Keywords: abrasive water-jet, metal cutting, surface geometrical structure.

OCENA JAKOŚCI POWIERZCHNI PRZECIĘCIA STALI HARDOX 400 PO CIĘCIU WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

Sławomir SPADŁO, Daniel KRAJCARZ¹

1. WPROWADZENIE

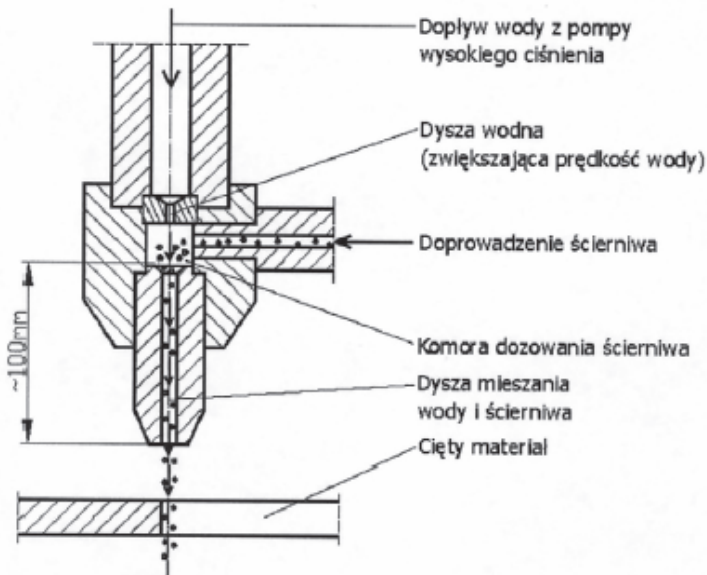
Cięcie wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną (AWJ) określa się jako niekonwencjonalną technologię rozdzielania materiałów, alternatywę w stosunku do tradycyjnych metod cięcia termicznego. Dużą zaletą obróbki hydro-ściernej jest jej uniwersalność, która przejawia się tym, że jej działaniu może być poddany bardzo duży asortyment materiałów o różnych właściwościach fizycznych, takich jak drewno, marmur, ceramika, metale i ich stopy czy materiały kompozytowe [6, 8, 16].

Technologię cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną potocznie nazywa się „zimną”, związane jest to przede wszystkim z brakiem występowania strefy wpływu ciepła na obrabiany materiał [15]. Jest to szczególnie istotne zagadnienie, które często stanowi problem przy kształtowaniu elementów alternatywnymi do technologii AWJ metodami cięcia (wiązką laserową, łukiem plazmowym czy palnikiem acetylenowo-tlenowym) [2, 14]. Dlatego też proces cięcia abrazyjnego jest w szczególności wykorzystywany do kształtowania elementów, gdzie niedopuszczalne jest nagrzanie materiału, ponieważ obniżyłoby to jego właściwości. Przykładem takiego materiału może być stal trudnościeralna hardox 400. Jest to materiał powszechnie stosowany do wykonywania elementów takich jak zabudowy skrzyń ładunkowych wywrotek, naczep, do wykonywania rynien spustowych żwiru, sit itp. Niekonwencjonalna technologia cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną to jeden z najlepszych sposobów obróbki blach tego typu, ponieważ twardość materiału w pobliżu ciętych krawędzi nie ulega zmianie, co jest typowym zjawiskiem przy metodach termicznych.

¹ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn; 25-314 Kielce; al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, sspadlo@tu.kielce.pl, d.krajcarz@wp.pl.

1.1. CHARAKTERYSTYKA CIĘCIA STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

Wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna kształtuje obrabiany materiał za pomocą cienkiego strumienia wodnego z dodatkiem ścierniwa będącego pod dużym ciśnieniem. Średnica strugi u wylotu z głowicy tnącej wynosi zazwyczaj około 1 mm i jest ściśle związana ze średnicą dyszy mieszającej. Jednakże na szerokość przecięcia w metodzie AWJ bezpośredni wpływ ma też odległość końcówki dyszy mieszającej od czoła przecinanej powierzchni oraz rodzaj kształtowanego tworzywa (jego twardość i struktura) [11]. W przypadku cięcia miękkich materiałów typu guma, tapicerka samochodowa, skóra, tektura czy artykuły spożywcze stosuje się jedynie strumień czystej wody, który sprężony do 300–400 MPa posiada wystarczającą energię, aby rozdzielić kształtowany materiał. Natomiast, gdy proces obróbczy wymaga znacznej energii kinetycznej strumienia, stosuje się dodatek ścierny w postaci drobnoziarnistego ścierniwa. Podstawowym zadaniem tego intensyfikatora jest przede wszystkim zwiększenie erozji materiału [3], będącego podstawą procesu rozdziałania materiałów [13]. Strugę wodno-ścierną można stosować do przecinania przeróżnych, a zwłaszcza trudnoobrabialnych materiałów takich jak stal trudnościeralna, stopy tytanu, stopy aluminium i magnezu. Schemat powstawania strugi wody ze ścierniwem przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat budowy głowicy do cięcia AWJ [7].

Woda pod wysokim ciśnieniem przechodzi przez dyszę wodną, w wyniku przepływu przez dyszę formowana jest struga w postaci cienkiego strumienia, którego średnica zależy od średnicy oczka dyszy. W komorze mieszającej zgodnie z efektem Venturiego powstaje strefa podciśnienia, która umożliwia zasysanie ścierniwa.

Następnie zassane cząstki ścierniwa (ziarna) są przechwytywane przez medium nośne i trafiają do dyszy mieszającej. Zadaniem tego elementu głowicy tnącej jest ustabilizowanie strumienia wodno-ściernego [18]. Cząstki ścierniwa osiągają tu znaczną prędkość, po czym opuszczają dyszę mieszającą jako spójny i wąski strumień wodno-ścierny o średnicy nieco większej niż średnica dyszy ogniskującej [3].

Jako materiał ścierny w technologii AWJ można stosować korund, piasek kwarcowy, a nawet cząsteczki suchego lodu CO_2 [4] ale najczęściej używa się granatu almandynowego (garnetu). Jest to krzemian żelaza i glinu ($\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$). Jest to chemicznie obojętny niemetaliczny minerał o twardości dochodzącej do 8 w skali Mohsa oraz masie właściwej około 4 Mg/m^3 . Najczęściej spotykanymi kolorami tego minerału są odcienie od barwy pomarańczowo-czerwonej do fioletowo-czerwonej. Minerał ten nie jest toksyczny, przy czym dłuższa ekspozycja na jego działanie może skutkować wystąpieniem u niektórych osób podrażnień górnych dróg oddechowych i oczu. Granat almandynowy charakteryzuje się ziarnami o nieregularnych kształtach, gdzie zarówno występują krawędzie ostre, jak i zaokrąglone, których wielkość jest szczegółowo określana przez producenta. Granulacja ziaren ma istotny wpływ przy doborze wielkości dyszy mieszającej.

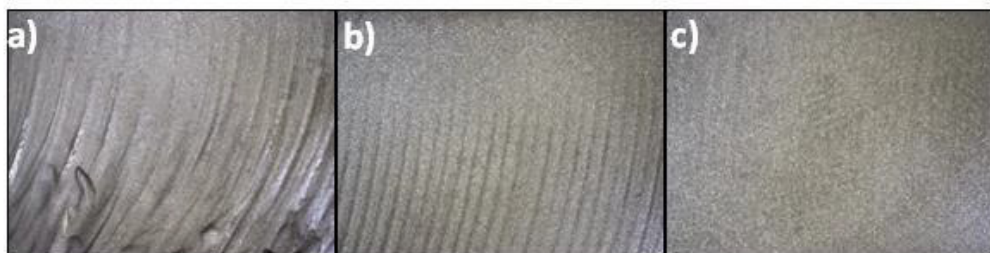
1.2. JAKOŚĆ POWIERZCHNI PRZECIĘCIA

Jakość powierzchni przecięcia w technologii AWJ można kształtować za pomocą następujących zmiennych procesu [12, 16, 19]:

- ciśnienia wody,
- prędkości posuwu głowicy tnącej,
- rodzaju oraz ilości dozowanego ścierniwa,
- odległości wylotu dyszy mieszającej od ciętego materiału,
- rodzaju i grubości obrabianego materiału.

Istotne znaczenie ma tu również zużycie części tnących głowicy: dyszy wodnej i mieszającej. Po przekroczeniu granicznych wartości jej zużycia następuje nagle i znaczne obniżenie właściwości użytkowych wspomnianych części, co przekłada się na jakość uzyskanej powierzchni przecięcia.

Uzyskaną strukturę powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną określa się zazwyczaj w sposób wizualny za pomocą wskaźników klas jakości, które wyrażają liczby od 1 do 5. Im niższa cyfra, tym przecięta powierzchnia posiada gorszą strukturę powierzchni, natomiast wyższe cyfry określają gładzsze powierzchnie. Zdefiniowane w ten sposób powierzchnie przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Powierzchnia przecięcia stali C45 po cięciu strumieniem wodno-ściernym dla następujących klas jakości: a) Q1, b) Q3, c) Q5 [17].

Uzyskanie lepszych klas powierzchni przecięcia wiąże się z wydłużeniem czasu obróbki. Z przeprowadzonych badań [17] wynika, że uzyskanie klasy Q3 o minimalnych śladach powstałych w wyniku obróbki strumieniowo-ściernej w kształcie zakrzywionych rowków [9] wymaga w przybliżeniu dwukrotnego zmniejszenia prędkości posuwu, w stosunku do jakości Q1, przy założeniu, że pozostałe parametry pozostaną niezmienione. Natomiast w celu uzyskania bardzo dobrej jakości powierzchni przecięcia, ocenianej jako klasa Q5 należy zmniejszyć prędkość posuwu cięcia od pięciu do siedmiu razy w stosunku do prędkości jakie pozwalają jedynie na rozdzielanie materiałów. Tak znaczne dysproporcje jakości w czasie obróbki powodują, że większość cięć wykonuje się na poziomie średniej klasy Q3, w przypadku której struktura powierzchni posiada akceptowalne parametry, a czas obróbki nie jest zbyt długi.

2. PRZEBIEG BADAŃ

Do badań zastosowano stal trudnościeralną hardox 400 o grubości $g = 20$ mm, z której wycinano elementy w kształcie kwadratu o boku 30 mm, przy czym każdy z boków próbki został wycięty z inną prędkością posuwu. Badania przeprowadzono na obrabiarce APW2010BB zasilanej pompą o nominalnym ciśnieniu roboczym 300 MPa. Badania przeprowadzono w Zakładzie Materiałoznawstwa i Technologii Amunicji Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej.

2.1. PRZEDMIOT BADAŃ

Stale hardox cechuje przede wszystkim wysoka odporność na ścieranie i obciążenia udarowe [10]. Jedną z najczęściej wykorzystywanych odmian tej stali w przemyśle jest hardox 400 o twardość 370-430 HB. W tabeli 1 podano normatywny skład chemiczny badanego materiału. Wytrzymałość na rozciąganie stali hardox 400 dochodzi do 1250 MPa przy granicy plastyczności wynoszącej 1000 MPa.

Tab. 1. Skład chemiczny stali hardox 400 [5].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,13	0,49	1,42	0,009	0,001	0,04	0,05	0,012	0,002

2.2. PARAMETRY PROCESU I ZAKRES BADAŃ

Parametry procesu cięcia przedstawiono w tabeli 2. W chwili przeprowadzania eksperymentu czas pracy zestawu dysz wynosił 35 roboczogodzin. Do eksperymentu wykorzystano materiał ścierny garnet o wymiarach ziarna 80 mesh. Ciśnienie cieczy roboczej mieściło się w górnych przedziałach wartości, które można uzyskać na obrabiarce. Badania przeprowadzono dla zmiennych prędkości posuwu v_f , który wynosił kolejno: 20, 40, 60, 80 i 100 mm/min. Zróżnicowanie prędkości posuwu pozwoliło na otrzymanie powierzchni przecięć w różnych klasach jakości na wycinanym elemencie.

Tab. 2. Parametry procesu przecinania strugą wodno-ścierną.

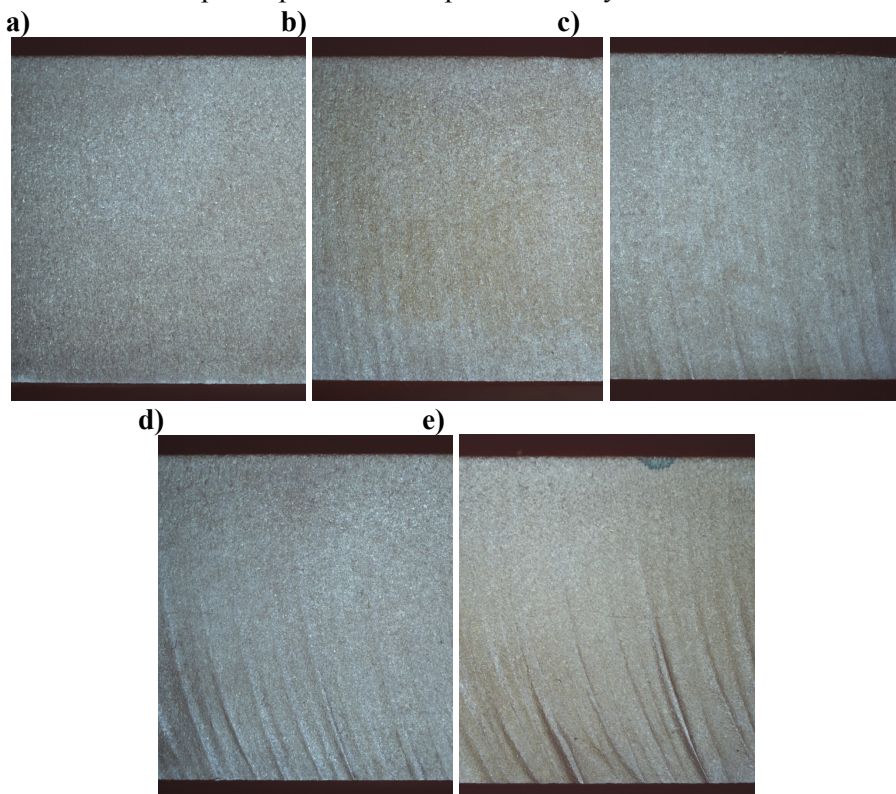
Parametr	Wartość	Jednostka
Ciśnienie wody	280	MPa
Wydatek masowy dozowanego ścierniwa	360	g/min
Wymiar ziaren ściernych	0,212	mm
Odległość dyszy od ciętego materiału	2,0	mm
Średnica dyszy wodnej	0,3	mm
Średnica dyszy mieszającej	1,02	mm
Długość dyszy mieszającej	76,0	mm

Ocenę parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) powierzchni przecięć [1] wykonanych w różnych klasach jakości przeprowadzono na profilometrze stykowym TOPO02 L120. Porównano następujące parametry chropowatości powierzchni w układzie 2D: wysokość najwyższego wzniesienia profilu – R_p , głębokość najniższego wgłębienia profilu – R_v , wysokość profilu chropowatości wg 10 punktów – R_z , średnią wysokość elementów profilu – R_c , średnią arytmetyczną rzędnych profilu – R_a , średnią kwadratową rzędnych profilu – R_q , średnią szerokość rowków elementów profilu – S_m , średni odstęp miejscowych wzniesień profilu – S [20].

Każda z próbek była badana w 3 różnych przekrojach, tj. 2 mm poniżej górnej krawędzi ciętego materiału (P1), w środku grubości obrabianego materiału (P2) oraz 2 mm powyżej wylotu strugi z miejsca przecięcia (P3).

3. WYNIKI BADAŃ

Strukturę geometryczną powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną, dla różnych prędkości posuwu, określono w sposób wizualny za pomocą wskaźników klas jakości. Zdefiniowane w ten sposób powierzchnie przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Powierzchnia przecięcia stali hardox 400 po cięciu strugą wodno-ścierną dla następujących klas jakości: a) Q5, $v=20$ mm/min, b) Q4, $v=40$ mm/min, c) Q3, $v=60$ mm/min, d) Q2, $v=80$ mm/min, e) Q1, $v=100$ mm/min

Cięcie z prędkością posuwu 20 mm/min pozwoliło uzyskać gładką i jednolitą strukturą na całej powierzchni rozdzielanego materiału, którą można zaliczyć do najwyższej klasy jakości przecięcia Q5 (rys. 3a). Zwiększenie prędkości posuwu do 40 mm/min spowodowało obniżenie jakości powierzchni w dolnej strefie cięcia (rys. 3b). Charakterystyczną strukturę po cięciu AWJ w średniej klasie Q3, gdzie występują zakrzywione rowki po obróbce przedstawia rysunek 3c. Jakość uzyskanej, dla tych warunków przecinania powierzchni, stanowi kompromis pomiędzy prędkością posuwu i czasem obróbki determinującymi jej koszt. Dalsze zwiększanie prędkości posuwu do 80 mm/min powoduje powstawanie dużych nierówności powierzchni w postaci

licznych nieregularnych rowków i wzniesień. Uzyskana w tych warunkach powierzchnia odpowiada klasie jakości Q2 (rys. 3d). Ze względu na całkowite rozdzielanie materiału przeprowadzono jeszcze jedną próbę cięcia z większą prędkością posuwu, która wyniosła 100 mm/min. Prędkość ta jest prędkością graniczną, która zapewnia przecięcie materiału. Powierzchnia przecięcia przy tej wartości posuwu (rys. 3e) jest nieregularna i charakteryzuje się zarówno występowaniem dużych wzniesień, jak i dolin, które wynikają z niedostatecznej energii kinetycznej cząstek ściernych w strudze wodno-ściernej. Ze względu na niską jakość uzyskanej powierzchni, pomiary SGP metodą stykową dla próbki ciętej z prędkością posuwu 100 mm/min nie był przeprowadzany.

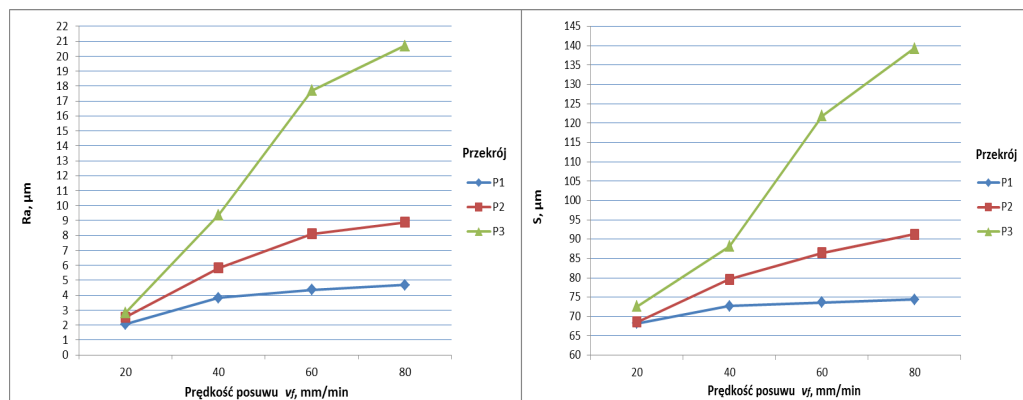
Wyniki badań SGP zestawiono w tabeli 3. Przedstawiają one wpływ prędkości posuwu i badanego profilu powierzchni przecięcia na jakość struktury geometrycznej uzyskanej powierzchni przecięcia.

Tab. 3. Parametry struktury geometrycznej powierzchni w zależności od prędkości posuwu i badanego profilu przecięcia. (P1_20 – profil P1, prędkość posuwu 20 mm/min, itd.)

Parametr, μm	Profil					
	P1_20	P2_20	P3_20	P1_40	P2_40	P3_40
Rp	5,63	7,83	8,56	11,07	16,40	23,08
Rv	7,56	9,31	10,09	14,38	19,79	28,85
Rz	13,19	17,14	18,65	25,45	36,19	51,93
Rc	5,45	6,31	6,68	8,01	12,41	26,75
Ra	2,06	2,54	2,84	3,82	5,82	9,37
Rq	2,53	3,14	3,53	4,92	7,37	11,77
Sm	168,24	197,23	212,93	209,30	376,24	605,00
S	68,23	68,60	72,62	72,75	79,59	88,14
Parametr, μm	Profil					
	P1_60	P2_60	P3_60	P1_80	P2_80	P3_80
Rp	12,55	23,82	38,20	13,59	30,44	41,90
Rv	15,29	21,48	42,93	15,74	20,64	46,32
Rz	27,83	45,30	81,14	29,33	51,07	88,22
Rc	8,95	17,80	56,95	9,70	18,06	62,65
Ra	4,37	8,11	17,70	4,68	8,89	20,70
Rq	5,63	9,96	20,95	5,91	11,27	23,74
Sm	213,13	494,66	960,54	209,65	459,11	1160,4
S	73,61	86,48	121,85	74,40	91,27	139,34

W celu umożliwienia analizy wyników badań przedstawiono je w postaci graficznej na rysunku 4. Wykres przedstawiony na rys. 4a przedstawia zależność parametru *Ra* – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości.

Wpływ prędkości posuwu na średni odstęp miejscowych wzniesień profilu i badanego profilu przecięcia P1, P2, P3 przedstawiono graficznie na rysunku 4b. Analiza uzyskanych zależności wskazuje, że dla niższych wartości prędkości posuwu przyrost parametru częstotliwościowego S był niewielki.



Rys. 4. Wpływ prędkości posuwu i badanego profilu przecięcia na:
a) parametr chropowatości R_a , b) średni odstęp miejscowych wzniesień profilu S .

Zarejestrowane zmiany wartości badanych parametrów SGP potwierdzają widoczne różnice, które występują na powierzchniach przeciętych przedmiotów. W strefie podwyższonej jakości cięcia, którą można utożsamiać z profilem P1 struktura geometryczna powierzchni przedmiotu jest kształtowana w głównie w wyniku procesów mikroskrawania ziaren ściernych. Dlatego też mikrogeometria tego obszaru powierzchni w dużym stopniu determinowana jest wielkością zastosowanych ziaren ściernych. Małe różnice wartości poszczególnych parametrów SGP dla przypadku cięcia z prędkością posuwu 20 mm/min świadczą o osiągnięciu granicznych wartości dla obróbki strugą wodno-ścierna przy zastosowanym rodzaju intensyfikatora cięcia. Dla użytego w badaniach garnetu o wymiarach ziarna 80 mesh osiągnięta wartością graniczną dla parametru R_a jest wartość około 2 μm , natomiast dla parametru R_z odpowiednio około 13 μm . Dalszą poprawę parametrów SGP można uzyskać poprzez zastosowanie w obróbce ścierniwa o mniejszej granulacji.

Struktura geometryczna powierzchni w strefie drugiej tzw. obniżonej jakości cięcia kształtuje się zasadniczo w wyniku procesów erozji mechanicznej. Dla typowych warunków ciecienia do tej strefy można zakwalifikować profil P3.

Na wielkość obszaru poszczególnych stref jakości cięcia wpływa dobór wartości parametrów obróbki, dlatego też trudno jednoznacznie wyznaczyć granicę pomiędzy obiema strefami, która ma zazwyczaj charakter umowny. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że profil P2 dla dwóch najwyższych badanych prę-

kości posuwu posiadał już na tyle wysokie parametry SGP, że obszar ten można zaliczyć do strefy o obniżonej jakości cięcia. W przypadku prowadzenia procesu z małymi wartościami posuwu cały obszar powierzchni przecięcia charakteryzuje się niskimi wartościami parametrów SGP, które odpowiadają podwyższonej jakości cięcia.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej do cięcia stali typu hardox pozwala wyeliminować negatywne skutki oddziaływań cieplnych, które występują podczas obróbki materiału konwencjonalnymi metodami cięcia.

Na podstawie analizy wizualnej przeciętych powierzchni próbek stwierdzono, że otrzymanie jakości powierzchni przecięcia klasy Q3, o minimalnych śladach powstających po obróbce strumieniowo-ścierniej, dla użytych w badaniach parametrów procesu cięcia wymaga zastosowania prędkości posuwu około 60 mm/min.

Dla prędkości posuwu wynoszącej 100 mm/min następuje całkowite rozdzielanie materiału wzdłuż linii cięcia, ale uzyskana jakość powierzchni przecięcia jest niska i odpowiada klasie jakości Q1.

W czasie eksperymentu zaobserwowano, że powierzchnia przecięcia stali hardox 400 przy prędkości posuwu wynoszącej 20 mm/min cechuje jednorodną strukturą geometryczną na całej powierzchni rozdzielanego materiału, odpowiadającą najwyższej klasie jakości przecięcia Q5.

Analizując wyniki badań parametrów SGP stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości posuwu przecinana powierzchnia ulegała pogorszeniu. Wszystkie badane parametry SGP osiągały coraz większe wartości. W szczególności efekt ten był widoczny dla profilu P3, gdzie przy większych wartościach prędkości posuwu energia kinetyczna ziaren ściernych w strudze wodnej była niewystarczająca, aby formować jednorodną strukturę geometryczną powierzchni.

Analiza wyników badań wskazuje, że występuje pewna graniczna wartość posuwu (przy pozostałych parametrach procesu stałych), po przekroczeniu której, dalsze obniżanie prędkości cięcia nie powoduje równoczesnego obniżania parametrów SGP. Jednym możliwych sposobów poprawy parametrów SGP jest obniżenie ziarnistości zastosowanego ścierniwa

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., MAKIEŁA W., STĘPIEŃ K., *Investigating advantages and disadvantages of the analysis of a geometrical surface structure with the use of Fourier and wavelet transform*, Metrology and Measurement System, 2010, nr 12/2, 233-244.
- [2] BORKOWSKI J., SOKOŁOWSKI A., *Termiczne aspekty obróbki wysokociśnieniową strugą wodną o różnej strukturze i zastosowaniu*, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, nr 36, 515-522.
- [3] BORKOWSKI J., BORKOWSKI P., *Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISBN 978-ISSN 0239-7129, 2008.
- [4] BORKOWSKI P., CHOMKA G., *Efektywność usuwania powłok lakierniczych wysokociśnieniową strugą wodno-lodową*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2007, nr 27, 53-62.
- [5] BUŁGACKI H., SMAJDOR M., *Mechanical properties of abrasion-resistant hardox 400 steel and their welded joints*, Advances in materials science, 2003, nr 2(4), 5-8.
- [6] CHITHIRAI PON SELVAN M., MOHANNA SUNDARU RAJU N., *Abrasive Waterjet Cutting Surfaces of Ceramics – An Experimental Investigation*, International Journal of Applied Science, Technology and Engineering Research, 2012, nr 1, 52-59.
- [7] FERENC K., *Cięcie strumieniem wody*, W: Przegląd spawalnictwa, 2006, nr 7, 10-15.
- [8] HLAVAC L.M., *Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf*, Journal of Materials Processing Technology, 2009, nr 209, 4154-4161.
- [9] HLAVÁČ L.M., STRNADEL B., KALIČINSKÝ J., GEMBALOVÁ L., *The model of product distortion in AWJ cutting*, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 2012, nr 62, 157-166.
- [10] Materiały informacyjno-techniczne firmy SSAB, dane z Internetu, <http://www.ssab.com>
- [11] MATUSZEWSKI M., OBORSKI I.L., STYP-REKOWSKI M., *Efektywność obróbki wodno-ściernej – wybrane zagadnienia*, Mechanik, 2015, nr 4, 52-55.
- [12] MAZURKIEWICZ A., *Czynniki wpływające na jakość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym*, Inżynieria materiałowa, 2008, nr 5.
- [13] NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S., *Investigation of electro-discharge mechanical dressing (EDMD) of diamond abrasive wheels with conductive bonds using brush electrodes*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2006, nr 220, 421-428.
- [14] OCZOŚ K. E., *Efektywność innowacyjnych technologii na przykładzie wybranych sposobów obróbki strumieniowo-erozyjnej*, Mechanik, 2003, nr 8-9, 463-468.
- [15] SPADŁO S., KRAJCARZ D., MŁYNARCZYK P., *A comparison of laser cutting and water-jet cutting*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2014, nr 66/2, 2014, 87-92.
- [16] SPADŁO S., KRAJCARZ D., MŁYNARCZYK P., *Badanie wpływu parametrów przecinania strugą wodno-ścierną stali S355 na strukturę geometryczną powierzchni*, Mechanik, nr 9/2014, 293-297.
- [17] SPADŁO S., KRAJCARZ D., MŁYNARCZYK P., *Kształtowanie jakości powierzchni przecięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną*, W: Logistyka, 2014, nr 6, 9876-9883.
- [18] SUTOWSKA M., *Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną*, PAK nr 57, 535-537, 2011.
- [19] WANTUCH E., *Wskaźniki technologiczne i koszty obróbki stali wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym*. Szkoła naukowa obróbek erozyjnych, Warszawa 2000, 83-95.
- [20] ZIELECKI W., PAWLUS P., PERŁOWSKI R., DZIERWA A., *Analiza wpływu struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3d na wytrzymałość połączeń klejowych*, Technologia i Automatykacja Montażu, 2011, nr 1, 33-37.