

# Wpływ głównych parametrów wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej na jakość powierzchni przeciętej stali HARDOX 500

ANDRZEJ PEREC\*

Przedstawiono wyniki badań wpływu najważniejszych parametrów procesu przecinania wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną stali Hardox na chropowatość powstałej powierzchni. W celu określenia najkorzystniejszych parametrów kontrolnych procesu skrawania stworzono matematyczno-statystyczny model procesu cięcia wykorzystując metodę powierzchni odpowiedzi (RSM). Wybrano równanie wielomianowe drugiego stopnia i na jego podstawie stworzono model obróbki, umożliwiający znalezienie optymalnych parametrów kontrolnych oraz predykcję wartości chropowatości powierzchni przeciętej.

## WSTĘP

Tradycyjne metody obróbki w przypadku przecinania materiałów trudnoobrabialnych nie zapewniają wystarczającej wydajności i dokładności. Obróbka wodno-ścierna jest pozbawiona takich wad [10]. Dodatkową zaletą technologii *waterjet* jest jej przyjazność dla środowiska [9, 12], jednakże z powodu dużej liczby parametrów kontrolnych wpływających na proces przecinania osiągnięcie zamierzonych efektów obróbki jest w tym przypadku trudniejsze. Z tego powodu w przypadku obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną stosuje się różne metody optymalizacji, stosowane także w optymalizacji innych procesów produkcyjnych [1, 3, 9]. Na przykład, w pracy [20] jej Autorzy zaprezentowali zastosowanie metody tablic ortogonalnych Taguchi do określenia własności powierzchni stopu aluminium po obróbce AWJ. Na podstawie wyników eksperymentów rozpoznano parametry cięcia o najlepszej jakości rzazu.

Wyniki optymalizacji różnych parametrów procesowych AWJM stali nierdzewnej w celu uzyskania najlepszych efektów obróbki za pomocą metody odpowiedzi powierzchni przedstawiono także w [15]. W testach wzięto pod uwagę parametry procesu takie jak: posuw, koncentracja ścierniwa w strudze i średnica dyszy roboczej. Parametry wyjściowe to głębokość cięcia. Na podstawie badań stworzono model

obróbki w formie równania kwadratowego, przeprowadzono jego optymalizację i empiryczną weryfikację uzyskanych parametrów kontrolnych.

W pracy [4] jej Autorzy metodą Taguchi badali właściwości przeciętego rowka po obróbce marmuru. Wpływ ciśnienia, wydatku ścierniwa i posuwu zbadano zgodnie ze stosowaną tablicą ortogonalną. Wyniki pokazały, że prędkość posuwu jest głównym parametrem wpływającym na wymiary szczeliny i jej kształt.

Badania nad cięciem kompozytu węglowego (CFRP) w celu uzyskania najlepszej charakterystyki szczeliny cięcia w warunkach wysokiej wydajności przy użyciu procesu wieloprzebiegowego przedstawiono w pracy [22]. Na podstawie wyników badań ustalono, że przy małym posuwie w pierwszym przejściu osiągnięto lepsze efekty obróbki niż przy małym posuwie w przejściu drugim.

W pracy [2] opublikowano rezultaty eksperymentalnych badań wpływu: posuwu, ciśnienia, odległości dysza-materiał i wydatku ścierniwa na chropowatość przeciętej powierzchni i kąt jej nachylenia. Testy dla stali AISI1018. Testy zostały przeprowadzone na bazie tablicy ortogonalnej. Najlepszy zestaw parametrów, który znacząco wpłynął na zmniejszenie chropowatości i kąta pochylenia bocznej powierzchni przeciętego rowka, uzyskano metodą powierzchni odpowiedzi (RSM).

\* Dr inż. A. Perec, aperec@ajp.edu.pl, Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wlkp., ul. Teatralna 25, 66-400 Gorzów Wlkp.

Zastosowanie metody powierzchni odpowiedzi w badaniach nad modelowaniem głębokości cięcia skał wapiennych za pomocą strumienia wodno-ściernego przedstawiono w [11] zaś stopu aluminium w [17].

## WARUNKI I METODYKA BADAŃ

### Przecinany materiał

Jako materiał przecinany użyto stali Hardox® 500. Jest to stal odporna na ścieranie, którą można zginać i spawać. Charakteryzuje się nominalną twardością 500 HBW. Stal Hardox® jest produkowana w sześciu gatunkach. Oprócz dużej odporności na ścieranie, charakteryzuje się dobrą spawalnością, dobrymi właściwościami mechanicznymi i udarnością. Stale z grupy Hardox® charakteryzuje wytrzymałość na rozciąganie od 1250 MPa (Hardox 400) do 2000 MPa (Hardox 600). Obróbkę cieplną prowadzi się ze stanu znormalizowanego poprzez hartowanie w wodzie i odpuszczanie w temperaturze 200÷700°C. Te wyjątkowe właściwości osiągnęte w wyniku obróbki cieplnej mogą zostać utracone, jeśli stal będzie skra-

wana w wysokiej temperaturze. Dlatego zaleca się obróbkę strumieniem wodno-ściernym, ponieważ nie powoduje to wzrostu temperatury w strefie skrawania powyżej 65°C, nawet przy ekstremalnych ciśnieniach roboczych [16, 21].

### Materiał ścierny

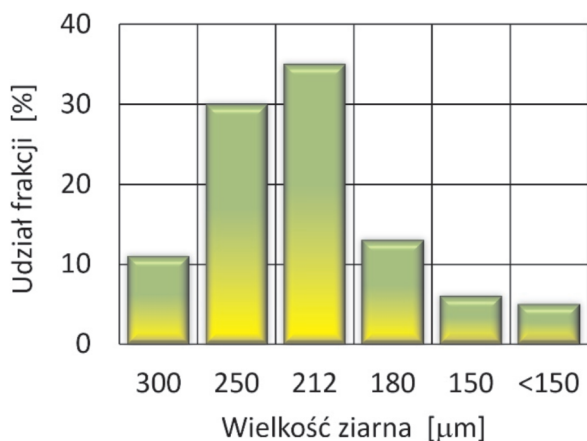
Najczęściej stosowanym ścierniwem w technologii AWJ jest granat. Grupa granatów zawiera ściśle powiązane minerały izomorficzne. Ich ciekawą cechą jest izotypia, co oznacza, że charakteryzują się one taką samą strukturą kryształów. Prowadzi to do podobieństwa zarówno w kształtach, jak i właściwościach kryształów. W badaniach jako materiał ścierny zastosowano granat almandynowy  $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$  typu J80A z depozytu Jinhong Mining w Chinach. Przykładowy rozkład wymiarów ziaren tego ścierniwa przedstawiono na rys. 1a. Dominujący udział ziaren należy do frakcji 212  $\mu m$  i 250  $\mu m$ . Ziarna charakteryzują się ostrymi narożami i krawędziami (Rys 1b).

Najważniejsze własności granatu J80A zaprezentowano w Tabeli 1.

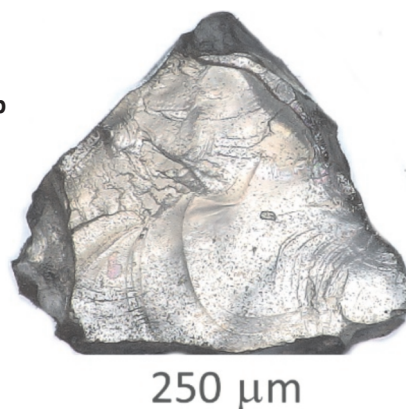
Tabela 1. Właściwości granatu almandynowego J80A

Zawartość minerałów [%]							
Almandyn	Ilmenit	Omfacyt	Rutyl	Kwarc	Hornblenda	Wolna krzemionka	
90-96	1,0	1,5	0,6	< 0,1	< 0,5	< 0,5%	
Skład chemiczny [%]							
$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	FeO	CaO	MgO	MnO
17	39	0,05	21	8	9,5	5	0,4
Właściwości fizyczne							
Gęstość [kg/dm <sup>3</sup> ]	Gęstość nasypowa [kg/dm <sup>3</sup> ]	Twardość Mohsa	Kolor	Przewodność	Roztworzalność w kwasach (HCl)		
3,8-4,1	2,3-2,4	7,5-8,0	Ciemnoczerwony	< 25 S/m	< 1,0%		

a



b



250  $\mu m$

Rys. 1. Skład granulometryczny ścierniwa Granat J80A (a) oraz widok pojedynczego ziarna (b)

**Stanowisko i metody badawcze**

Badania cięcia przeprowadzono na maszynie OMAX 60120 wyposażonej w dyszę wodną o średnicy 0,3 mm. Cięcie zrealizowano przez prostopadłe skierowanie strugi wodno-ścierniej na przedmiot obrabiany i liniowe przemieszczanie z określoną prędkością liniową (posuwem). Grubość próbek została dobrana tak, aby zapobiec całkowitemu przecięciu materiału i precyzyjnie określić głębokość cięcia.

W celu zmniejszenia kosztów i skrócenia czasu badań użyto metodyki planowania eksperymentu (DOE). Zastosowano metodę powierzchni odpowiedzi (RSM) i centralny plan kompozycyjny w celu wyeliminowania nieistotnych czynników. RSM wykorzystuje metody matematyczne i statystyczne do modelowania, oraz przewidywanie i optymalizowanie zmiennej zależnej od zmiennych niezależnych. Metoda ta zapewnia również powiązanie między obserwowanymi reakcjami a zmiennymi rozważanego procesu.

Model dla określenia wartości regresji został przedstawiany za pomocą wielomianu rzędu drugiego:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \pm \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

$y$  jest odpowiedzią,

$x_i$  wskazuje wartości  $i$ -tego parametru obróbki,

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  są współczynnikami regresji,

$\varepsilon$  jest odchyłką uzyskaną podczas cięcia.

**WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA**

Badania przeprowadzono zgodnie z tabelicą ortogonalną L27. Jako parametry kontrolne zmienne przyjęto: ciśnienie, posuw i masowe natężenie przepływu granatu (Tab. 2). Wartości tych parametrów dobrano na podstawie wcześniejszych prac badawczych [5, 6, 12, 18, 19]. Pozostałe parametry kontrolne procesu były utrzymywane na stałym poziomie a ich wartości wynosiły:

- średnica dyszy wodnej: 0,3 mm,
- średnica dyszy wodno-ścierniej: 0,76 mm,
- odległość dysza-materiał: 4 mm.

Tabela 2. Parametry procesu przecinania

Lp.	Masowe natężenie przepływu ścierniwa g/min	Ciśnienie MPa	Posuw mm/min	Chropowatość powierzchni Sa $\mu\text{m}$
1	250	350	100	3,777
2	250	350	200	6,018
3	250	350	300	6,983
4	250	375	100	3,843
5	250	375	200	6,004
6	250	375	300	7,019
7	250	400	100	3,471
8	250	400	200	5,370
9	250	400	300	6,369
10	350	350	100	3,335
11	350	350	200	5,021
12	350	350	300	6,011
13	350	375	100	3,384
14	350	375	200	4,349
15	350	375	300	5,016
16	350	400	100	2,988
17	350	400	200	4,257
18	350	400	300	5,015
19	450	350	100	2,975
20	450	350	200	4,490
21	450	350	300	4,415
22	450	375	100	3,018
23	450	375	200	3,858
24	450	375	300	4,037
25	450	400	100	3,002
26	450	400	200	3,718
27	450	400	300	4,034

Jako parametry wyjściowe przyjęto chropowatość powierzchni bocznej przeciętego rowka.

Testowanie wpływu zmiennych niezależnych (parametrów obróbkowych) na proces przeprowadzono za pomocą analizy wariancji – ANOVA.

Na podstawie wyników badań obliczono wpływ parametrów obróbki takich jak: średnica dyszy, posuw, koncentracja ścierniwa oraz rodzaj materiału ściernego, na chropowatość przeciętej powierzchni. Określono model wpływu parametrów obróbki na chropowatość przeciętej powierzchni.

$$Sa = 4,38 - 0,0048 m_a - 0,0196 p + 0,0036 v_p + 0,000002 m_a^2 - 0,000005 v_p^2 - 0,000001 m_a v_p \quad (2)$$

gdzie:

$Sa$  – chropowatość powierzchni,  $\mu\text{m}$ ,

$m_a$  – masowe natężenie przepływu ścierniwa, g/min,

$p$  – ciśnienie, MPa,

$v_p$  – posuw, mm/min.

Analizę przeprowadzono dla poziomu ufności 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Wartość  $P < 0,05$  wskazuje, że model jest statystycznie istotny (Tab. 3). Czynniki, dla których wartość  $P > 0,05$  są statystycznie nieistotne i zostały pominięte.



Tabela 3. Wyniki analizy wariacji

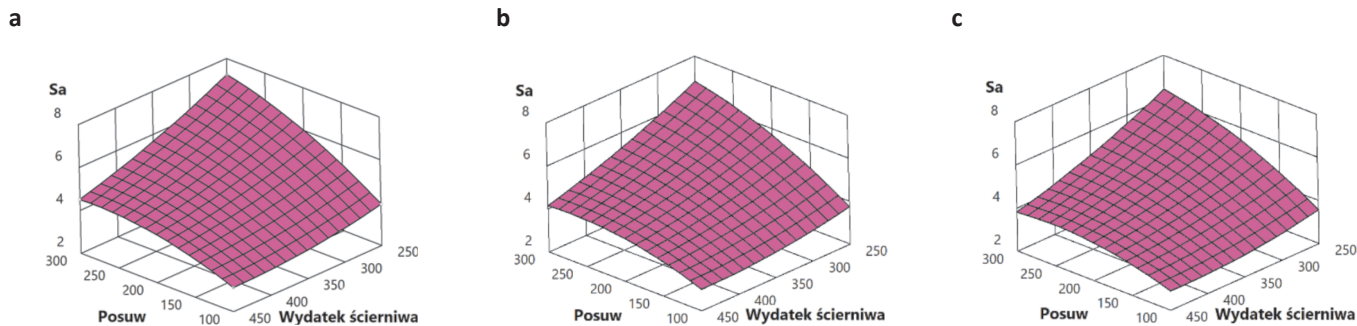
Źródło	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Model</b>	9	38.6806	4.2978	95.72	0.000
<b>Liniowy</b>	3	34.4131	11.4710	255.47	0.000
Wydatek ścierniwa	1	13.0152	13.0152	289.86	0.000
Ciśnienie	1	1.2811	1.2811	28.53	0.000
Posuw	1	20.1168	20.1168	448.02	0.000
<b>Kwadratowy</b>	3	1.2861	0.4287	9.55	0.001
Wydatek ścierniwa * Wydatek ścierniwa	1	0.2494	0.2494	5.55	0.031
Ciśnienie * Ciśnienie	1	0.0003	0.0003	0.01	0.934
Posuw * Posuw	1	1.0364	1.0364	23.08	0.000
<b>Interakcje dwustronne</b>	3	2.9814	0.9938	22.13	0.000
Wydatek ścierniwa * Ciśnienie	1	0.0125	0.0125	0.28	0.604
Wydatek ścierniwa * Posuw	1	2.8053	2.8053	62.48	0.000
Ciśnienie * Posuw	1	0.1636	0.1636	3.64	0.073
<b>Błąd</b>	17	0.7633	0.0449		
<b>Total</b>	26	39.4439			

DF – stopień swobody, SS – suma kwadratów, MS – średnia kwadratów, F – współczynnik Fishera (stosunek wariacji źródła do wariacji błędu), P – współczynnik Pearsona.

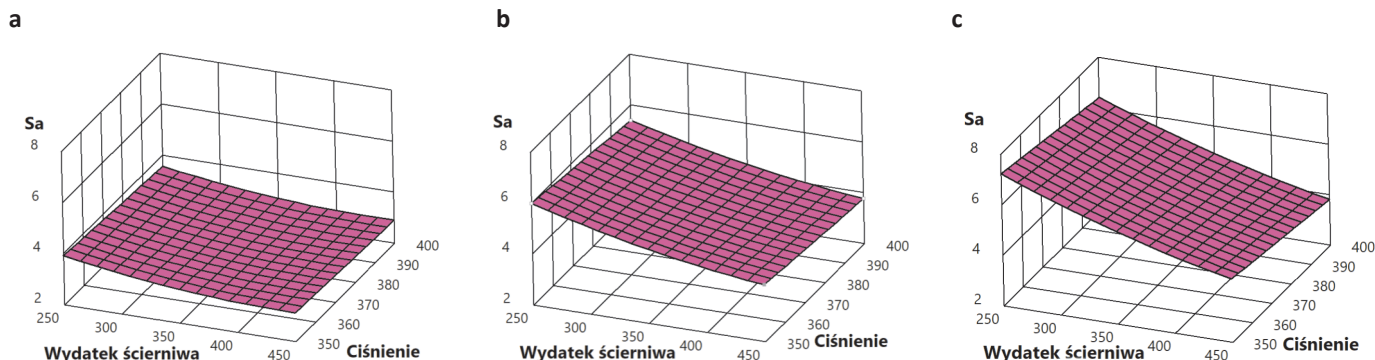
Ilustracją równania (2) są wykresy powierzchni odpowiedzi wpływu posuwu, średnicy dyszy i koncentracji ścierniwa na chropowatość ciętej powierzchni (Rys. 2–4). Zależność chropowatości przeciętej powierzchni od posuwu jest wprost proporcjonalna. Zwiększenie posuwu prowadzi do zwiększenia chropowatości w całym przebadanym zakresie.

Zależność chropowatości przeciętej powierzchni od ciśnienia jest natomiast odwrotnie proporcjonalna – dla największych ciśnień osiąga się najmniejsze wartości parametru Sa. Zwiększenie ciśnienia prowadzi do zmniejszenia chropowatości. Odwrotnie proporcjonalny jest również wpływ masowego natężenia przepływu ścierniwa na chropowatości przeciętej powierzchni. Zwiększenie jego wartości powoduje zmniejszenie chropowatości przeciętej powierzchni – rys. 3.

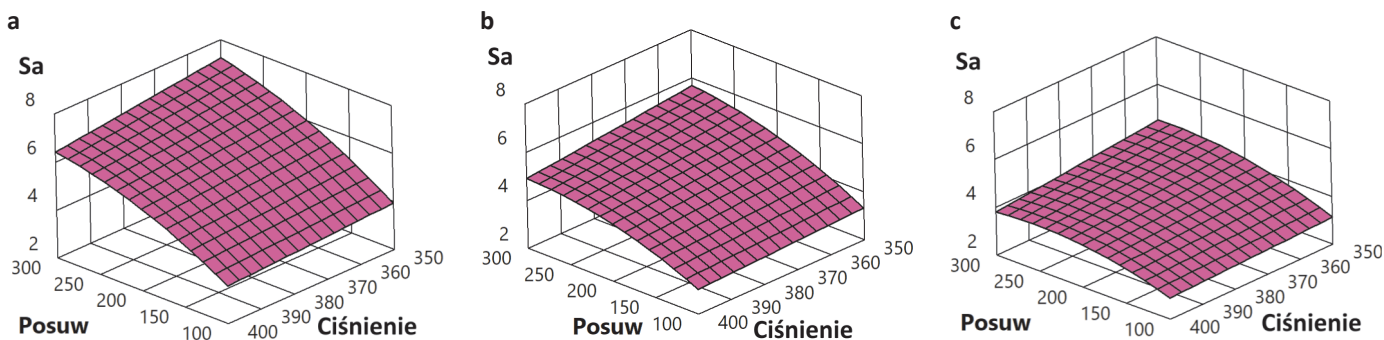
Najmniejszą chropowatość przeciętej powierzchni, równą 2,89 mm (Rys. 5), osiągnięto przy największym ciśnieniu, najmniejszym posuwie i wydatku



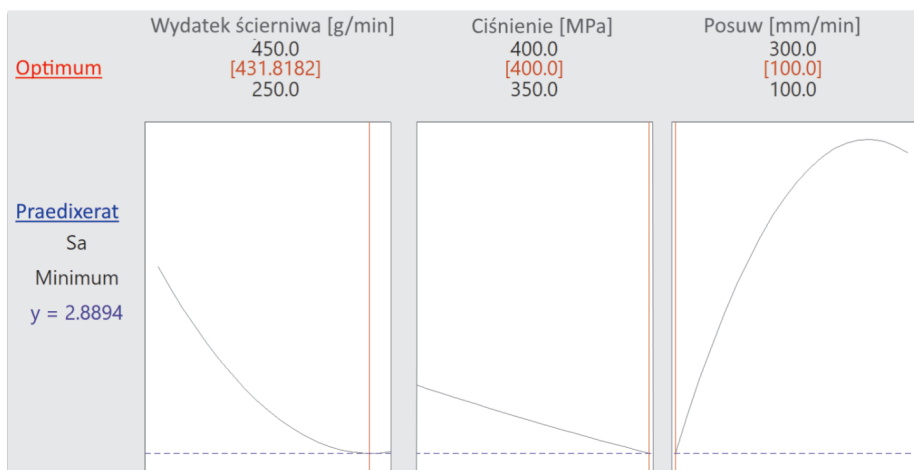
Rys. 2. Wpływ posuwu i wydatku ścierniwa na chropowatość powierzchni przecięcia. Ciśnienie: a) 350 MPa, b) 375 MPa, c) 400 MPa.



Rys. 3. Wpływ wydatku ścierniwa i ciśnienia na chropowatość powierzchni przecięcia. Posuw: a) 100 mm/min, b) 200 mm/min, c) 300 mm/min.



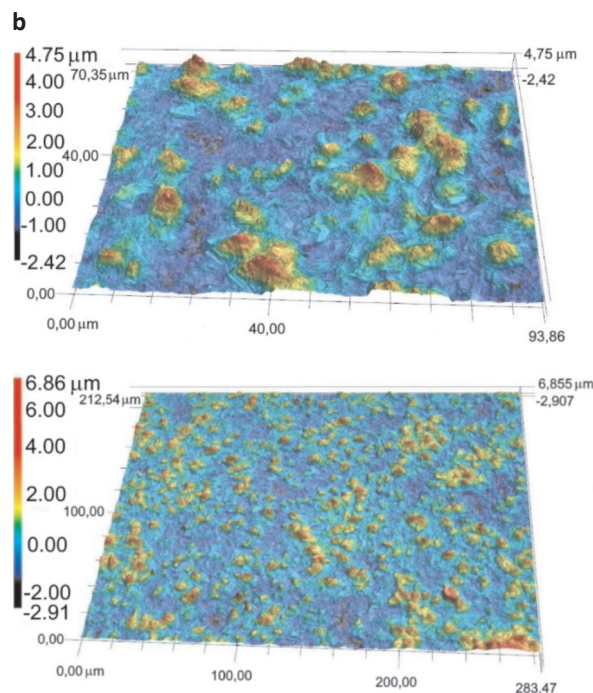
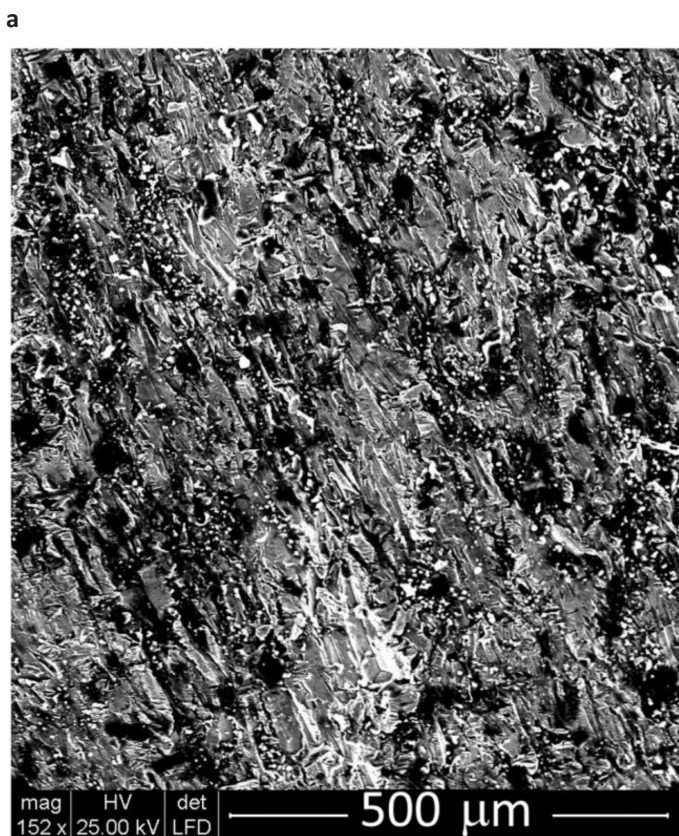
Rys. 4. Wpływ posuwu i ciśnienia na chropowatość powierzchni przecięcia. Wydatek ścierniwa: a) 250 g/min, b) 350 g/min, c) 450 g/min.



ścierniwa bliskiemu największemu – równemu prawie 432 g/min.

Przykładowy widok przeciętej powierzchni obserwowanej na mikroskopie FEI Quanta 200 pracującym przy napięciu przyspieszającym 25 keV w warunkach niskiej próżni przedstawiono na rys. 6a, natomiast widok powierzchni przeciętej uzyskany na mikroskopie optycznym Sensofar Metrology – Model S neoX – Five Axis 3D przedstawiono na rys. 6b. Badania przeprowadzono w środku strefy skrawania w obszarze elementarnym 1,5 mm × 1,5 mm.

Rys. 5. Optymalny poziom parametrów kontrolnych z punktu widzenia osiągnięcia minimalnej chropowatości Sa powierzchni przeciętej



Rys. 6. Widok przeciętej powierzchni stali Hardox 500 uzyskany za pomocą: a) mikroskopu EDX, b) mikroskopu optycznego Sensofar

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność stosowania metody powierzchni odpowiedzi w optymalizacji cięcia stali Hardox strugą wodno-ścierną. Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że optymalna kombinacja parametrów cięcia dla osiągnięcia najmniejszej chropowatości jest następująca:

- wydatek ścierniwa: 432 g/min,
- ciśnienie: 400 MPa,
- posuw: 100 mm/min.

Chropowatość powierzchni przy takich parametrach procesu osiąga wartość  $S_a = 2,89 \mu\text{m}$ .

## LITERATURA

- Antil P., Kumar Antil S., Prakash C., Królczyk G., Pruncu C.: Multi-objective optimization of drilling parameters for orthopaedic implants. *Measurement and Control*, 2020; 53: 1902–1910.
- Babu M.N., Muthukrishnan N.: Exploration on Kerf-angle and Surface Roughness in Abrasive Waterjet Machining using Response Surface Method. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 2017; 1–12.
- Gupta M.K., Mia M., Pruncu C.I., Kapłonek W., Nadolny K., Patra K., Mikołajczyk T., Pimenov D.Yu., Sarikaya M., Sharma V.S.: Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based superalloy. *Int J Adv Manuf Technol*, 2019; 102: 3995–4009.
- Gupta V., Pandey P.M., Garg M.P., Khanna R., Batra N.K.: Minimization of Kerf Taper Angle and Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble. *Procedia Materials Science*, 2014; 6: 140–149.
- Hlavac L., Krajcarz D., Spadlo S., Hlavacova I.: Influence Traverse Speed on Surface Quality after Water-Jet Cutting for Hardox Steel. *Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials "METAL 2015"*. Ed.: TANGER, Ostrava, Czech Republic 2015, 723–728.
- Lehocka D., Klich J., Botko F., Simkulet V., Foldyna J., Krejci L., Storkan Z., Kepic J., Hatala M.: Comparison of ultrasonically enhanced pulsating water jet erosion efficiency on mechanical surface treatment on the surface of aluminum alloy and stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol*, 2019; 103: 1647–1656.
- Lianyungang Jinhong Mining Co. Ltd. [http://www.lygjhy.com/Hva\\_En/Catalog.pdf](http://www.lygjhy.com/Hva_En/Catalog.pdf).
- Michalska-Pozoga I., Wegrzyk S., Rydzkowski T.: Assessment of influence of extrusion method on selected properties of wood-polymer composites using Taguchi method of experiment planning. *Polimery*, 2017; 62: 686–692.
- Perec A.: Environmental Aspects of Abrasive Water Jet Cutting. *Annual Set the Environment Protection – Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2018; 20: 0258–0274.
- Perec A.: Experimental research into alternative abrasive material for the abrasive water jet cutting of titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018; 97: 1529–1540.
- Perec A.: Investigation of Limestone Cutting Efficiency by the Abrasive Water Suspension Jet. W: *Advances in Manufacturing Engineering and Materials*. red.: S. Hloch, D. Klichová, G.M. Krolczyk, S. Chattopadhyaya, L. Ruppenthalová. Springer International Publishing, Cham 2019, 124–134.
- Perec A.: Wybrane aspekty ochrony środowiska w obróbce wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. W: *Przemysł 4.0*. Gorzów Wlkp. 2019. red.: 2019, 271–286.
- Perec A., Musiał W., Prazmo J., Sobczak R., Radomska-Zalas A., Fajdek-Bieda A., Nagnajewicz S., Pude F.: Multi-criteria Optimization of the Abrasive Waterjet Cutting Process for the High-Strength and Wear-Resistant Steel Hardox®500. W: *Advances in Water Jetting*. red.: D. Klichová, L. Sitek, S. Hloch, J. Valentinè. Springer International Publishing, Cham 2021, 145–154.
- Perec A., Pude F., Grigoryev A., Kaufeld M., Wegener K.: A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019; 104: 2415–2427.
- Perec A., Radomska-Zalas A.: Abrasive Water Jet Cutting of Stainless-Steel Optimization by Orthogonal Array Approach. *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, 2019; 71: 55–61.
- Perec A., Trieb F., Pude F.: Some Investigations into 1,000 MPa Pure Waterjet Cutting. In: *Advances in Water Jetting*. red.: D. Klichová, L. Sitek, S. Hloch, J. Valentinè. Springer International Publishing, Cham 2021, 155–163.
- Radomska-Zalas A., Perec A.: Modeling of abrasive water suspension jet cutting process using response surface method. In: *AIP Conference Proceedings*. Ed.: AIP Publishing, Melville 2019, 0200511–0200518.
- Radomska-Zalas A., Perec A., Fajdek-Bieda A.: IT support for optimisation of abrasive water cutting process using the TOPSIS method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019; 710: 012008.
- Spadlo S., Krajcarz D.: Analysis of the surface quality for hardox 400 steel in abrasive water-jet cutting. *Mechanik*, 2015; 726/431-726/441.
- Tavodová M.: The surface quality of materials after cutting by abrasive water jet evaluated by selected methods. *Manufacturing Technology*, 2013; 13: 236–241.
- Wessels V., Grigoryev A., Dold C., Wyen C.F., Roth R., Weingaertner E., Pude F., Wegener K., Loeffler J.F.: Abrasive waterjet machining of three-dimensional structures from bulk metallic glasses and comparison with other techniques. *J. Mater. Res.*, 2012; 27: 1187–1192.
- Xiao S., Wang P., Gao H., Soulat D.: A study of abrasive waterjet multi-pass cutting on kerf quality of carbon fiber-reinforced plastics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019; 105: 4527–4537. ■