

**Grzegorz CHOMKA, Marzena SUTOWSKA**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY  
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin**Wpływ warunków obróbki strugą wodno-ścierną na strukturę geometryczną powierzchni****Dr inż. Grzegorz CHOMKA**

Jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2013 roku zatrudniony jako starszy wykładowca w Zakładzie Teorii Mechanizmów i Podstaw Konstrukcji Maszyn. Przedmiotem jego zainteresowań jest wytwarzanie i stosowanie wysokociśnieniowej strugi wodno-łodowej do obróbki różnorodnych materiałów.



e-mail: grzegorz.chomka@tu.koszalin.pl

**Dr inż. Marzena SUTOWSKA**

Jest absolwentką Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W roku 2009 uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Centrum Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się m.in. zastosowaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierną do cięcia różnego rodzaju materiałów.



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

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań oddziaływania warunków obróbki na ukształtowanie geometryczne powierzchni stopu aluminium gat. PA4 przecinanego wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Uzyskane rezultaty prac badawczych umożliwiły wyznaczenie przedziałów zmienności wybranych wskaźników chropowatości i falistości powierzchni w zależności od zmiany parametrów procesu. Zaprezentowano również wyniki badań mikrotopografii powierzchni stopu aluminium gat. PA2 po usunięciu z niego farby podkładowej wysokociśnieniową strugą wodną z dodatkiem cząstek suchego lodu CO<sub>2</sub>.

**Słowa kluczowe:** struktura geometryczna powierzchni, struga wodno-ścierna, suchy lód CO<sub>2</sub>.

**The influence of abrasive water-jet machining conditions on the surface geometric structure****Abstract**

On the basis of research results, obtained from testing the impact of high-pressure abrasive water jet cutting process conditions on the surface geometric shape of aluminum alloy PA4, the ranges of variations of surface roughness and waviness indicators as a function of changes of process parameters were determined (Table 1). The results of experiments showed that a feed rate, which decides on the time of processing the workpiece by an abrasive water jet, has the strongest influence on the geometric structure of the cut aluminum alloy (out of three considered cutting process parameters:  $p$ ,  $v_f$ ,  $r$ ). In contrast, the trajectory radius of the cutting head is a parameter with the slightest effect on the values of the roughness and waviness indicators. The geometric structure of the aluminum alloy PA2 substrate surface, before applying a lacquer, is presented in Figure 5a. Figure 5b shows the substrate structure after removal of two prime layers by the ice-water jet with the pressure of 35 MPa and using 208 kg of dry ice per hour. It was found, that the removal of the lacquer with the use of the high-pressure ice-water jet, regardless of the pressure value or dry ice flow rate, did not cause any changes in the surface of the substrate material layer.

**Keywords:** surface geometric structure, abrasive water-jet, dry ice CO<sub>2</sub>.

**1. Wstęp**

W ostatnich latach obserwuje się zwiększone wykorzystanie technologii hydrostrumieniowych, zarówno do cięcia materiałów [1, 2] jak i do oczyszczania powierzchni [3]. Strugę wody domieszkuje się różnymi dodatkami w celu zwiększenia jej erozyjności. Do przecinania stosuje się m.in. ziarna granatu [4], jeśli zaś chodzi o czyszczenie powierzchni to zastosowanie określonych domieszek jest uzależnione od rodzaju usuwanej warstwy wierzchniej oraz struktury geometrycznej powierzchni podłoża jaką chcemy uzyskać po przeprowadzonej operacji. Istotne znaczenie ma także przeznaczenie i dalsze wykorzystanie oczyszczonych powierzchni.

Wykorzystanie wysokociśnieniowej strugi wody z dodatkiem ziaren ściernych, do oczyszczania powierzchni powoduje występowanie zapylenia w pobliżu miejsca prowadzonej obróbki, zaś w materiale podłoża pozostają drobiny ścierniwa, które niekiedy nie pozwalają zastosować tej metody czyszczenia. Dlatego też jako dodatki stosuje się m.in. cząstki suchego lodu CO<sub>2</sub>, sodę lub ziarna zbóż. Oprócz strugi wodno-łodowej [5, 6] wykorzystuje się także strugę gazowo-łodową [7, 8]. Jednak zastosowanie strugi wody jako medium napędowego dla np. cząstek suchego lodu zapewnia większą efektywność procesu czyszczenia [9].

Do oceny struktury geometrycznej powierzchni poddanych oddziaływaniu strugi wody domieszkowanej ziarnami ściernymi lub suchym lodem można zastosować parametry chropowatości powierzchni rozpatrywane w układzie 3D [10, 11, 12]. Parametry te zostały podzielone na sześć grup: parametry amplitudowe, parametry powierzchniowe i objętościowe, parametry przestrzenne, parametry hybrydowe oraz parametry funkcjonalne.

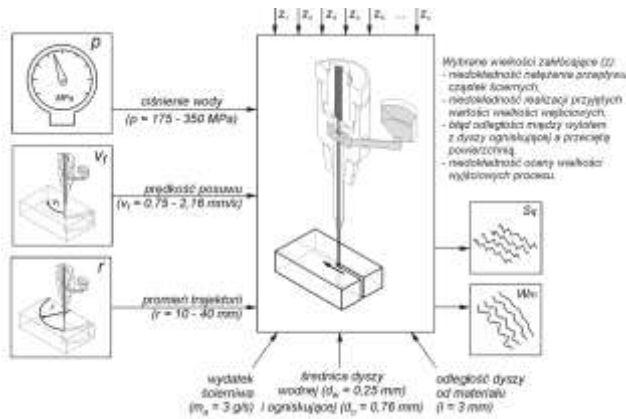
Ukształtowanie mikrogeometrii powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną wskazuje na występowanie na nich falistości, której intensywność wzrasta wraz z oddalaniem się od strefy wejścia strugi w materiał. W celu dokonania ilościowej oceny tego zjawiska, można posłużyć się parametrami określonymi przez polską normę [13]. Definiuje ona sześć parametrów wysokościowych oraz jeden wzdłużny falistości powierzchni.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu warunków obróbki dwóch gatunków stopu aluminium strugą wody, domieszkowanej ziarnami granatu oraz suchego lodu CO<sub>2</sub>, na ukształtowanie geometryczne otrzymanych powierzchni.

**2. Metodyka**

Prace eksperymentalne prowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności badano wpływ warunków procesu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wody, domieszkowanej ziarnami granatu, na ukształtowanie geometryczne przeciętych powierzchni stopu aluminium gat. PA4. Badania wykonywano przy użyciu maszyny RCT 32 przeznaczonej do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodną firmy Resato. Do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej stosowano wzmocniacz ciśnienia Power Jet PJE-4-4000, wyposażony w silnik elektryczny o mocy 37 kW. Maksymalne ciśnienie wody, jakie można uzyskać przy użyciu tego wzmocniacza wynosi  $p_{max} = 380$  MPa, a jej wydatek jest równy  $Q_{max} = 3,8$  dm<sup>3</sup>/min. 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 granat #80 o stałym wydatku 3 g/s. Graficzną postać modelu badań ukazano na rys. 1.

Do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni używano stanowiska pomiarowego, wyposażonego w zaawansowany technologicznie profilografometr przestrzenny *Talysurf CLI 2000* firmy *Taylor Hobson* (rys. 2), wyposażony w bezstykowy czujnik laserowy, umożliwiając pomiar w zakresie nierówności nawet do 30 mm. Pomiary mikrotopografii powierzchni przeciętych wysokociśnieniową strugą wodno-śnieżną odbywały się w 401 przejściach z krokiem co 5  $\mu\text{m}$ . W jednym przejściu rejestrowanych było 4001 punktów co 0,5  $\mu\text{m}$  z prędkością stolika  $v = 750 \mu\text{m/s}$ . Każdy pomiar był realizowany w trybie jedno przebiegowym. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano obróbce przy użyciu specjalistycznego oprogramowania *TalyMap Universal*.



Rys. 1. Schemat modelu badań  
Fig. 1. Schematic diagram of the tested model

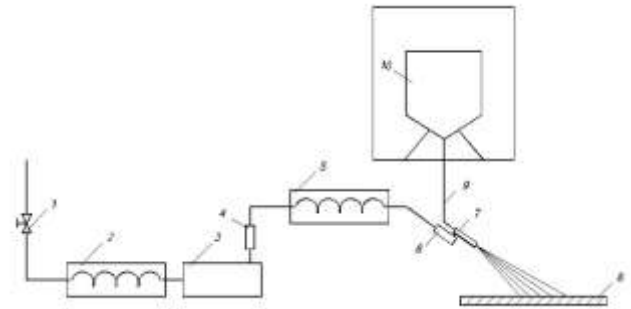
W drugim etapie prac eksperymentalnych skupiono uwagę na badaniu przydatności wysokociśnieniowej strugi wodnej domieszkowanej suchym lodem CO<sub>2</sub> do usuwania powłoki lakierniczej, gdyż czysta struga wody nie posiada takiej zdolności w analizowanym zakresie ciśnienia roboczego. Realizację badań zaplanowano pod kątem oceny wpływu zmian wielkości wejściowych parametrów obróbki (rodzaj użytej dyszy koncentrycznej  $TS$ ,  $n_w \times d_w$ , długość kierownicy tryskacza  $L_k$ , odległość między wylotem z kierownicy tryskacza a obrabianą powierzchnią  $l_2$ , kąt natrysku  $\kappa$ , wydatek suchego lodu CO<sub>2</sub>  $\dot{m}_L$ , ciśnienie strugi wodnej  $p$  oraz czas oddziaływania strugi wodno-łodowej  $t$ ) na jakość powierzchni podłoża powstałego po usunięciu powłok lakierniczych.



Rys. 2. Talysurf CLI 2000  
Fig. 2. Talysurf CLI 2000

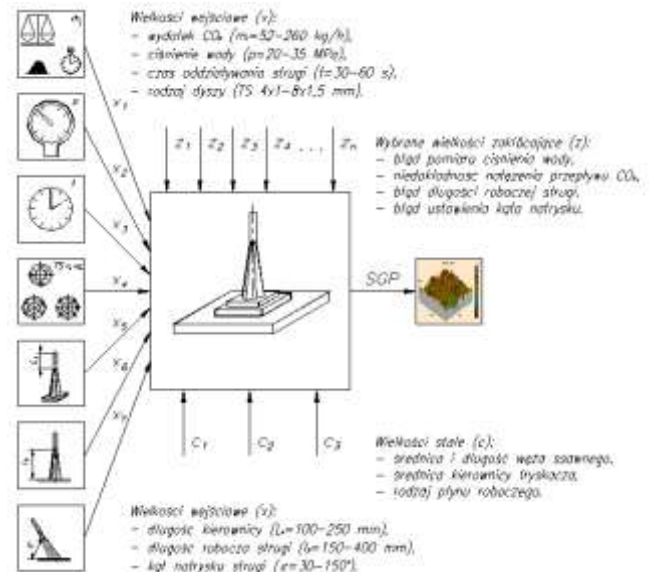
W celu wytworzenia wysokociśnieniowej strugi wodno-łodowej zastosowano instalację eksperymentalną [5], której przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 3. Badania wykonano przy zastosowaniu hydromonitora zapewniającego maksymalne ciśnienie wody  $p=57 \text{ MPa}$  przy zestawie numików P 30, a jej wydatek określono na poziomie do 80  $\text{dm}^3/\text{min}$ . Elementem roboczym, wytwarzającym i kształtującym strugę wodno-łodową, był tryskacz składający się z korpusu, wewnątrz którego umieszczano

dyszę koncentryczną. Do jego wylotu wkręcano kierownicę tryskacza, o długości określonej planem badań, przeznaczoną do formowania wynikowej strugi wodno-łodowej. Stół roboczy posiadał możliwość regulacji odległości roboczej oraz kąta padania strugi wodno-łodowej na powierzchnię próbki, z której usuwano powłoki lakiernicze.



Rys. 3. Prototypowe stanowisko do wytwarzania strugi wodno-łodowej: 1-zawór, 2-chłodnica, 3-wysokociśnieniowa pompa, 4-system kontrolny, 5-chłodnica, 6-pistolet wysokociśnieniowy, 7-tryskacz, 8-powierzchnia obrobiona, 9-przewód, 10-zbiornik  
Fig. 3. The prototype stand for water-ice jet creation: 1- cut-out, 2- cooler, 3- high-pressure pump, 4- control system, 5- cooler, 6- high pressure gun, 7- sprinkler, 8- machined surface, 9- pipe, 10- container

Do usuwania powłok lakierniczych stosowano wysokociśnieniową strugę wodno-łodową, w której wykorzystano jako materiał ziarnisty zestalony dwutlenek węgla zwany suchym lodem o temperaturze 194,6 K (-78,5 °C). W wyniku dostarczenia mu energii przechodzi on z fazy stałej w stan gazowy z pominięciem fazy ciekłej. Efektem sublimacji cząstek suchego lodu podczas ich rozpędzania w strudze wodnej jest charakterystyczne zadymienie, które unosi się na wylocie z kierownicy tryskacza. Znacząca jednak intensywność sublimacji cząstek CO<sub>2</sub> występuje w strefie obróbki, gdzie cząstki suchego lodu uderzają o powierzchnię obrabianą. Strefa obróbki jest intensywnie zadymiona. Gęstość cząstek suchego lodu w stanie stałym wynosi 1564  $\text{kg/m}^3$ . Ich twardość ocenia się na 2÷3 w skali Mohsa, co stanowi równowartość pomiędzy solą kamienną a kalcytem. Do badań stosowano walcowe cząstki suchego lodu produkcji firmy Messer-Polska o średnicy 1,9 mm i długości około 5,5 mm.



Rys. 4. Schemat modelu badań  
Fig. 4. Schematic diagram of the investigated model

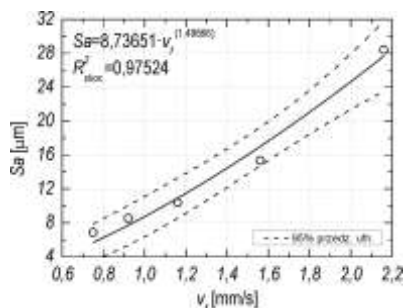
Eksperymenty przeprowadzono zgodnie z modelem badań przedstawionym schematycznie na rys. 4. Powierzchnie wszystkich próbek uzyskanych po usunięciu powłok lakierniczych wysokociśnieniową strugą wodno-lodową poddano ocenie mikrotopografii. Porównano je z wynikami uzyskanymi dla próbek nie poddanych obróbce. Pomiary struktury geometrycznej kształtowych powierzchni wykonywano na profilografometrze Talysurf CLI 2000 (rys. 2).

### 3. Wyniki badań

W oparciu o uzyskane wyniki badań stwierdzono występowanie oddziaływania ciśnienia wody  $p$ , prędkości posuwu  $v_f$  oraz promienia trajektorii głowicy tnącej  $r$  na parametry chropowatości i falistości 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 wysokociśnieniową strugą wody domieszkowaną ziarnami ściernymi, przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań 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 parametrów chropowatości i falistości. Dla każdej wyznaczonej zależności obliczono wartość skorygowanego współczynnika determinacji ( $R^2_{skor.}$ ) stanowiącego miarę korelacji zachodzących między parametrami procesu cięcia i parametrami jakościowymi. Przykładem tego może być wykres zmienności średniego arytmetycznego odchylenia  $Sa$  w funkcji prędkości posuwu, zamieszczony na rys. 5.



Rys. 5. Współzależności występujące między  $Sa$  i  $v_f$  ( $l = 3$  mm,  $d_w = 0,25$  mm,  $d_o = 0,76$  mm,  $\dot{m}_a = 3$  g/s,  $p = 350$  MPa,  $r = 10$  mm)

Fig. 5. Dependences between  $Sa$  and  $v_f$  ( $l = 3$  mm,  $d_w = 0,25$  mm,  $d_o = 0,76$  mm,  $\dot{m}_a = 3$  g/s,  $p = 350$  MPa,  $r = 10$  mm)

Bazując na otrzymanych wynikach badań, sporządzono tab. 1. Zamieszczono w niej przedziały zmienności zarówno parametrów procesu cięcia, jak i wybranych wskaźników chropowatości i falistości powierzchni. Analizując przytoczone wartości, można zauważyć, że najsilniejszy wpływ na kształtowanie struktury geometrycznej przeciętych powierzchni stopu aluminium wywiera prędkość posuwu. Natomiast promień krzywizny wycinanego kształtu jest parametrem, który w najmniejszym stopniu oddziałuje na wartość parametrów chropowatości i falistości. Tworzy on najmniej liczne istotne związki korelacyjne z rozpatrywanymi wskaźnikami ukształtowania geometrycznego powierzchni.

Wyraźny wpływ wszystkich trzech parametrów procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną ( $p$ ,  $v_f$ ,  $r$ ) na wskaźniki jakościowe SGP, odnotowano w przypadku trzech parametrów chropowatości powierzchni: średniego arytmetycznego odchylenia ( $Sa$ ), średniego kwadratowego odchylenia ( $Sq$ ) i wysokości obszaru nośności ( $SHTp$ ), oraz czterech parametrów falistości powierzch-

ni: średniego arytmetycznego odchylenia profilu falistości ( $Wa$ ), średniego kwadratowego odchylenia profilu falistości ( $Wq$ ), maksymalnej wysokości profilu falistości ( $Wm$ ) i średniego odstępów falistości ( $Swm$ ).

Tab. 1. Przedziały zmienności parametrów procesu oraz wybranych wskaźników SGP

Tab. 1. Ranges of variations of process parameters and of chosen SGP indicators

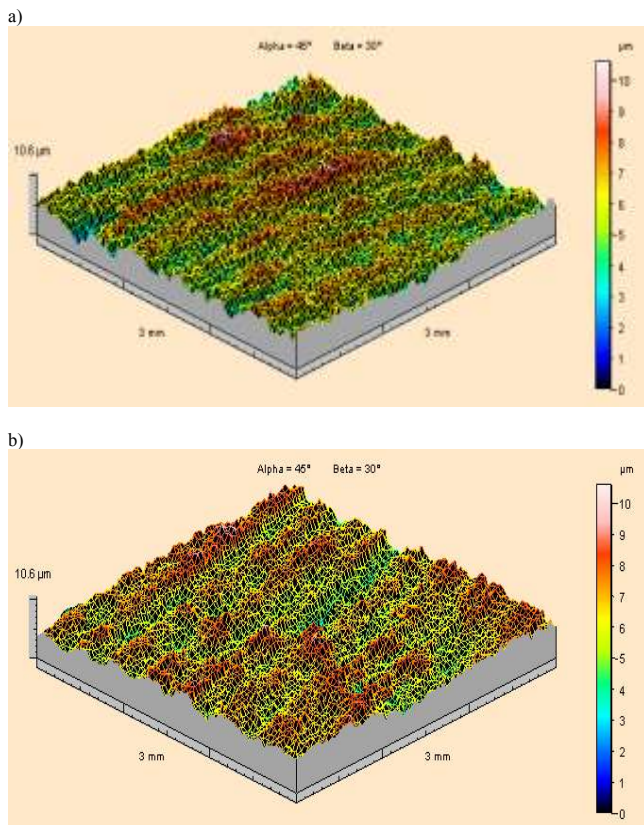
	$p$ [MPa] (175→350)	$v_f$ [mm/s] (0,75→2,16)	$r$ [mm] (10→40)
$Sa$ [ $\mu$ m]	(16,81→6,87)	(6,87→28,4)	(8,76→8,14)
$Sq$ [ $\mu$ m]	(20,90→8,69)	(8,69→33,6)	(11,2→10,3)
$St$ [ $\mu$ m]	(170,0→50,2)	(50,20→262)	(86,4→65,0)
$Sz$ [ $\mu$ m]	(143,0→44,20)	(49,50→173)	(74,1→53,9)
$Sp$ [ $\mu$ m]	–	(24,70→139)	–
$Sv$ [ $\mu$ m]	–	(25,50→123)	–
$SHTp$ [ $\mu$ m]	(27,00→14,3)	(14,30→62,60)	(18,2→16,7)
$Sds$ [pks/mm <sup>2</sup> ]	–	(1085→120)	–
$Sal$ [mm]	–	(0,081→0,369)	–
$Sfd$ [–]	–	(2,57→2,23)	–
$Wa$ [ $\mu$ m]	(14,03→3,84)	(3,84→25,10)	(5,19→3,56)
$Wq$ [ $\mu$ m]	(16,08→4,82)	(4,82→27,30)	(6,19→4,25)
$Wc$ [ $\mu$ m]	(48,84→8,05)	(8,05→56,90)	–
$Wm$ [ $\mu$ m]	(35,39→10,60)	(10,60→53,10)	(15,60→10,20)
$Wp$ [ $\mu$ m]	(17,03→7,21)	(7,22→24,50)	–
$Wv$ [ $\mu$ m]	(18,36→3,39)	(3,39→28,60)	–
$Swm$ [mm]	(1,52→0,239)	(0,239→1,50)	(0,487→0,189)

Nie zauważono natomiast żadnych istotnych korelacji występujących między parametrami amplitudowymi: współczynnikiem skośności ( $Ssk$ ) i współczynnikiem skupienia ( $Sku$ ), parametrem powierzchniowym opisującym udział nośny ( $STp$ ), parametrami przestrzennymi: wskaźnikiem tekstury powierzchni ( $Str$ ), kierunkiem tekstury powierzchni ( $Std$ ), parametrami hybrydowymi: średniokwadratowym nachyleniem nierówności ( $Sdq$ ), średnią arytmetyczną krzywizną wierzchołków nierówności ( $Ssc$ ), rozwinięciem powierzchni ( $Sdr$ ) oraz parametrami funkcjonalnymi: wskaźnikiem nośności ( $Sbi$ ), wskaźnikiem zdolności przywierania płynu do powierzchni ( $Sci$ ), wskaźnikiem zatrzymania płynu przez wgłębienia ( $Svi$ ) a wielkościami wejściowymi procesu cięcia ( $p$ ,  $v_f$ ,  $r$ ).

W celu określenia wpływu wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej na strukturę geometryczną powierzchni przeprowadzono odpowiednie badania przy zastosowaniu profilografometru przestrzennego Talysurf CLI 2000. W pierwszym etapie określono strukturę geometryczną powierzchni (SGP) stopu aluminium gat. PA2 przed nałożeniem powłoki lakierniczej (rys. 6a). Stwierdzono, że na całej powierzchni występują wgłębienia i wzniesienia. Ich ułożenie jest naprzemienne i równoległe, co świadczy, że są to ślady pozostawione na powierzchni po procesie walcowania. Średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni ( $Sa$ ) wynosi 1,04  $\mu$ m, zaś wysokość nierówności ( $St$ ), rozumiana jako odległość między najwyższym i najniższym punktem powierzchni jest równa 10,6  $\mu$ m.



W przypadku zastosowania strugi wodno-lodowej o ciśnieniu 20 MPa i wydatku cząstek  $\text{CO}_2$   $\dot{m}_L = 156$  kg/h zauważono występowanie niemal identycznych wyników jak dla próbek przed malowaniem ( $Sa=1,03$   $\mu\text{m}$ ,  $St=10,7$   $\mu\text{m}$ ). Morfologia powierzchni to naprzemiennie ułożone wgłębienia i wzniesienia będące wynikiem procesu walcowania. Podobne wnioski wyciągnięto analizując wyniki badań SGP próbek oczyszczonych z dwóch warstw farby podkładowej strugą wodno-lodową o ciśnieniu roboczym wynoszącym 35 MPa oraz wydatku cząstek suchego lodu  $\dot{m}_L = 208$  kg/h. Obserwowane powierzchnie (rys. 6b) pokrywają ułożone równoległe i naprzemiennie wzniesienia i wgłębienia. Maksymalna wysokość nierówności ( $St$ ) jest równa 10,6  $\mu\text{m}$ , zaś średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni ( $Sa$ ) wynosi 1,06  $\mu\text{m}$ . Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że usuwanie powłoki lakierniczej wysokociśnieniową strugą wodno-lodową, niezależnie od zastosowanego w badaniach ciśnienia strugi i wydatku suchego lodu, nie wywołuje zmian struktury geometrycznej powierzchni podłoża, które stanowił dość miękki stop aluminium PA2.



Rys. 6. Struktura geometryczna powierzchni stopu aluminium PA2: a – powierzchnia przed nałożeniem powłoki lakierniczej, b – powierzchnia po usunięciu dwóch warstw farby podkładowej wysokociśnieniową strugą wodno-lodową ( $p=35$  MPa,  $\dot{m}_L = 208$  kg/h,  $TS=4 \times 1,2$  mm,  $L_1=200$  mm,  $L_2=250$  mm,  $\kappa=90^\circ$ ,  $t=30$  s)

Fig. 6. Geometric structure of the aluminum alloy PA2 substrate surface: a – before applying a lacquer, b – after removal of two primer layers by the ice-water jet ( $p=35$  MPa,  $\dot{m}_L = 208$  kg/h,  $TS=4 \times 1,2$  mm,  $L_1=200$  mm,  $L_2=250$  mm,  $\kappa=90^\circ$ ,  $t=30$  s)

#### 4. Podsumowanie

Uzyskane rezultaty prac eksperymentalnych wykazały, że najsilniejszy wpływ na kształtowanie struktury geometrycznej przeciętych powierzchni stopu aluminium gat. PA4, spośród trzech rozpatrywanych parametrów procesu cięcia ( $p$ ,  $v_f$ ,  $r$ ) wywiera

prędkość posuwu, która decyduje o czasie oddziaływania strugi wodno-ścierniej na obrabiany materiał. Natomiast promień trajektorii głowicy tnącej jest parametrem, który w najmniejszym stopniu oddziałuje na wartość wskaźników chropowatości i falistości powierzchni. Na podstawie otrzymanych wyników badań wyznaczono przedziały zmienności wybranych parametrów SGP w zależności od zmiany warunków realizacji procesu cięcia.

Analiza struktury geometrycznej powierzchni stopu aluminium gat. PA2 poddanej oddziaływaniu strugi wodno-lodowej wykazała, że wykorzystanie wysokociśnieniowej strugi wodnej z dodatkiem cząstek suchego lodu  $\text{CO}_2$  w procesach czyszczenia nie wywołuje zmian mikrotopografii powierzchni podłoża.

#### 5. Literatura

- [1] Huang L., Folkes J., Kinnell P., Shipway P. H.: Mechanisms of damage initiation in a titanium alloy subjected to water droplet impact during ultra-high pressure plain waterjet erosion. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, s. 1906–1915, 2012.
- [2] Azhari A., Schindler Ch., Kersch E., Grad P.: Improving surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-012-3962-1, 2012.
- [3] Bodnárová L., Sitek L., Hela R., Foldyna J.: New potential of highspeed water jet technology for renovating concrete structures. *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. XIX, No. 2, s. 1–7, 2011.
- [4] Borkowski J., Borkowski P.: Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe. Monografia INTH nr 154, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
- [5] Borkowski J., Borkowski P., Chomka G.: Thermodynamical aspects of high-pressure water-ice jet formation. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Wrocław, vol. II, No.1, s. 35–46, 2002.
- [6] Chomka G.: Ocena przydatności stosowania cząstek suchego lodu  $\text{CO}_2$  w obróbce powierzchni strugą wodno-lodową. *PAK*, vol. 59, nr 7, s. 656–659, 2013.
- [7] Dunsy C. M., Hashish M.: Feasibility study of the use of ultrahigh-pressure liquefied gas jets for machining of nuclear fuel pins. *Proceedings of the 8th American Water Jet Conference*, vol. II, Houston, Texas, s. 505–517, 1995.
- [8] Liu H. T., Fang S., Hibbard C., Maloney J.: Enhancement of ultrahigh-pressure technology with LN2 cryogenic jets. *Proceedings of the 10th American Waterjet Conference*. vol. I, Huston, Texas, s. 297–313, 1999.
- [9] Chomka G., Chudy J.: Analysis and interpretation of measurements of surface machining effectiveness in the process of varnish removal by a water-ice jet. *Tehnički vjesnik*, vol. 20, nr 5, s. 847–852, 2013.
- [10] Sutowska M.: Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną. *PAK*, vol. 57, s. 535–537, 2011.
- [11] Pawlus P.: Topografia powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005
- [12] Oczó K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych. OWPR, Rzeszów, 2003.
- [13] Stout K.J.: The development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. Commission of the European Communities, EUR 15178 EN.4.
- [14] PN-M-04255:1974: Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.

otrzymano / received: 02.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2014

artykuł recenzowany / revised paper