

Marzena SUTOWSKA^{1*}

MODEL PROCESU CIĘCIA STOPU ALUMINIUM WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

W artykule przedstawiono wyniki badań zależności występujących między średnim kwadratowym odchyleniem chropowatości powierzchni S_q , a zasadniczymi parametrami procesu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną (AWJ - *Abrasive Water Jet*). Znajomość oddziaływania warunków obróbki na strukturę geometryczną przeciętych powierzchni umożliwiła opracowanie statystycznego modelu procesu cięcia stopu aluminium gat. PA4. Aby sprawdzić czy wyznaczona zależność zapewnia w pełni precyzyjne sterowanie dynamiką procesu krzywoliniowego przecinania stopu aluminium przeprowadzono badania weryfikujące. Badania kontrolne udowodniły, że wyznaczony statystycznie model może być z powodzeniem wykorzystywany do sterowania procesem cięcia stopu aluminium, realizowanym na obrabiarkach przeznaczonych do przecinania materiałów strugą wodno-ścierną. Prace eksperymentalne wykonywano na centrum obróbkowym AWJ typ RCT 32 firmy Resato oraz prototypowym stanowisku badawczym zbudowanym na bazie przecinarki plazmowej typu TOPAZ-S firmy Eckert. Strukturę geometryczną przeciętych powierzchni mierzono za pomocą wielogłowicowego systemu pomiarowego Talyscan CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. Do opracowania modelu procesu cięcia stopu aluminium wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną zastosowano moduł Estymacja Nieliniowa programu STATISTICA.

1. WSTĘP

W okresie ostatnich kilkunastu lat niezawodność obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uległa istotnej poprawie, zwłaszcza metod cięcia [3]. Wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna stanowi uniwersalne i łatwo zmienne narzędzie technologiczne, którego zakres zastosowań obróbkowych stale się rozszerza m.in. w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, produkcji tworzyw sztucznych, medycynie [1]. Jest to związane z postępowaniem technicznym, który pozwala na stosowanie dużego ciśnienia wody [5], a także licznymi zaletami tej metody obróbki, do których należy: brak termicznego oddziaływania strugi na materiał obrabiany, brak konieczności zmiany narzędzia, niewielkie siły naporu w strefie erozji, możliwość przecinania szerokiej gamy materiałów [7].

Oddziaływanie wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej na materiał jest zróżnicowane i zależy od momentu pędu cząstek ściernych [6],[11]. Zmienny charakter procesu wnikania strugi wodno-ścierniej w materiał wywołuje m. in. zakłócenia struktury

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Centrum NTH, Koszalin

* E-mail: marzena.sutowska@tu.koszalin.pl

geometrycznej powierzchni w dolnej części strefy cięcia [9]. Powstałe w ten sposób błędy obniżają jakość wycinanych przedmiotów. Do ilościowej oceny mikrotopografii powierzchni przecięcia można zastosować parametry chropowatości powierzchni rozpatrywane w układzie 3D [8].

Podstawowymi parametrami procesu technologicznego, charakteryzującymi cięcie materiałów strugą wodno-ścierną, są: ciśnienie strugi wodnej, prędkość posuwu, wydatek ścierniwa, średnica dyszy wodnej, średnica dyszy ogniskującej oraz odległość dyszy ogniskującej od materiału [10]. Znajomość oddziaływania warunków obróbki na jakość otrzymywanych przecięć stwarza możliwość opracowania modelu procesu przecinania materiałów, w celu zapewnienia wysokiej jakości cięcia [2].

W niniejszym artykule podjęto próbę określenia modelu procesu cięcia stopu aluminium gat. PA4 wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prognozującego jakość powierzchni cięcia, ocenianą na podstawie średniego kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni Sq .

2. METODYKA BADAŃ

Prace badawcze przeprowadzono w celu określenia zależności występujących między średnim kwadratowym odchyleniem chropowatości Sq , a zasadniczymi parametrami obróbki (ciśnieniem wody p , prędkością posuwu v_f , promieniem toru ruchu głowicy tnącej r). Zaplanowane prace eksperymentalne realizowano na centrum obróbkowym typu RCT 32 przeznaczonym do cięcia materiałów strugą wodno-ścierną firmy Resato (rys. 1).

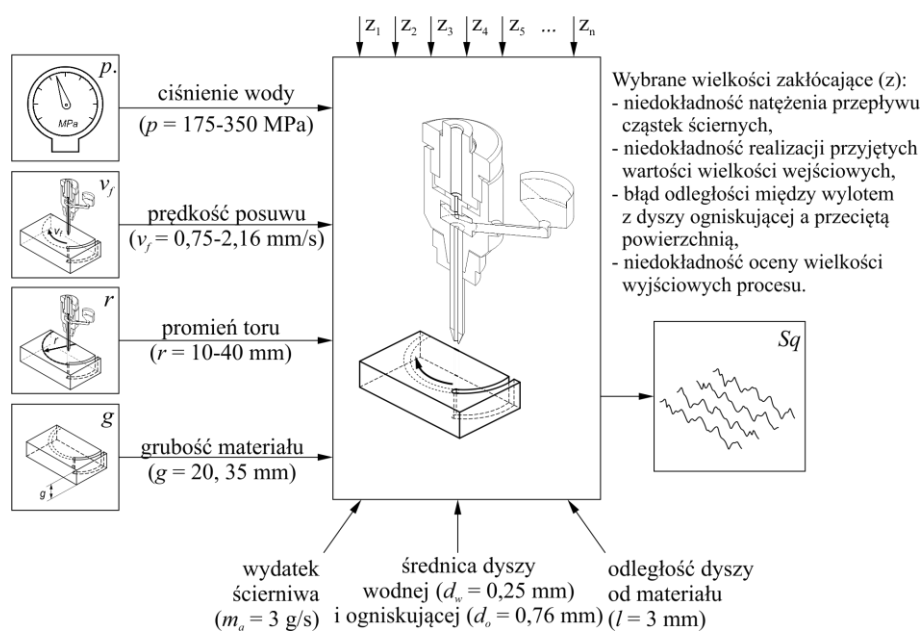


Rys. 1. Centrum obróbkowe AWJ typ RCT 32: a) widok ogólny, b) wzmacniacz ciśnienia, c) głowica tnąca
Fig. 1. Abrasive water jet cutting center type RCT 32: a) general view, b) pressure intensifier, c) cutting head

Parametr Sq jest ściśle skorelowany ze średnim arytmetycznym odchyleniem (Sa), powszechnie stosowanym w praktyce przemysłowej do określenia właściwości eksploatacyjnych powierzchni [4]. Wysoka korelacja ($R^2_{skor.} = 0,9984$), występująca między wymienionymi parametrami amplitudowymi chropowatości powierzchni, umożliwia w razie potrzeby, obliczenie wartości średniego arytmetycznego odchylenia przy wykorzystaniu wyznaczonego empirycznie równania: $Sq \approx 1,25 \cdot Sa$ [8]. Ponadto, parametr opisujący średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni Sq , w przeciwieństwie do wskaźnika Sa , jest bardziej wrażliwy na występowanie pojedynczych, przypadkowych wzniesień lub wgłębień, co w głównej mierze wynika z definicji tego parametru i jest cechą pożądaną przy opracowywaniu modelu ze względu na jego dokładność.

Zasadniczym zespołem centrum jest stacjonarny wzmacniacz ciśnienia PowerJet PJE-4-4000, wyposażony w silnik elektryczny o mocy 37 kW, który napędza pompę hydrauliczną. Wzmacniacz zapewnia wytwarzanie strugi wodnej o następujących parametrach roboczych: maksymalnym ciśnieniu wody $p_{max} = 380$ MPa, maksymalnym wydatku wody $Q_{max} = 3,8$ dm³/min. Do badań została zastosowana głowica tnąca typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato, która składa się z korpusu, wewnątrz którego umieszczona jest dysza wodna oraz dysza ogniskująca. Podczas badań ustalanie prędkości posuwu głowicy tnącej następowało automatycznie, zgodnie z wartościami przypisywanymi domyślnie przez program Cadcraft GEMS R4.

Eksperymenty realizowano przy użyciu ścierniwa w postaci granatu #80. Jest to ścierniwo powszechnie używane do kreowania strugi wodno-ściernej podczas przecinania materiałów. Materiałem obrabianym był stop aluminium gatunek PA4 o grubości 20 i 35 mm. Podczas badań wycinano próbki walcowe o promieniu 10, 20, 30 i 40 mm. Graficzną postać modelu badań przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat modelu badań
Fig. 2. The diagram of research model

Po zakończeniu eksperymentów, strukturę geometryczną przeciętych powierzchni odwzorowywano przy użyciu wielogłowicowego systemu pomiarowego Talyscan CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. Do pomiarów używano bezstykowego czujnika laserowego LK-031 firmy Keyence, umożliwiającego pomiar w zakresie nierówności 169 nm - 9,7 mm. Pomiary mikrotopografii odbywały się w 401 przejściach z krokiem co 10 μm . W jednym przejściu rejestrowanych było 801 punktów co 5 μm z prędkością ruchu stolika $v = 1 \text{ mm/s}$. Każdy pomiar był realizowany w trybie jednorzebiegowym. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano obróbce przy użyciu oprogramowania TalyMap Universal. Dla każdej z otrzymanych mikrotopografii wyznaczano wartość średniego kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni Sq .

Do opracowania modelu procesu cięcia stopu aluminium PA4 strugą wodno-ścierną został użyty moduł Estymacja Nieliniowa programu STATISTICA. W estymacji zależności nieliniowej została wykorzystana metoda Rosenbrocka i quasi-Newtona.

3. MODEL PROCESU CIĘCIA

Aby określić postać modelu procesu krzywoliniowego przecinania stopu aluminium PA4 strugą wodno-ścierną, przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań oddziaływania warunków obróbki (p , v_f , r) na chropowatość przeciętych powierzchni (Sq).

Opracowany statystycznie model, określający średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni Sq [μm], zawarto w formie następującego wzoru:

$$Sq = 3076 \cdot p^{-1,43} \cdot v_f \cdot r^{-0,23} \cdot g^{1,13} \quad (1)$$

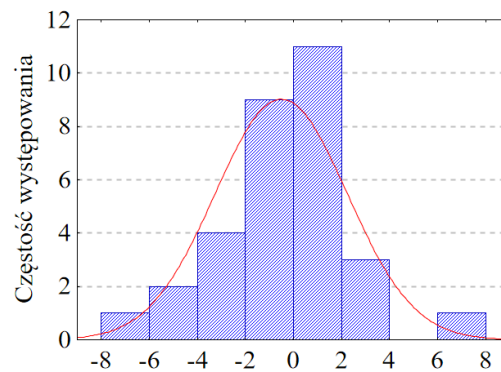
gdzie: p - ciśnienie wody [MPa], v_f - prędkości posuwu głowicy tnącej [mm/s], r - promień toru ruchu głowicy tnącej [mm], g - grubość przecinanego materiału [mm].

Dla wyznaczonej zależności udział wariancji wyjaśnionej, wyrażony za pomocą współczynnika determinacji i określony dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wynosi $R^2 = 0,925$. Uzyskana wartość świadczy o dobrym dopasowaniu modelu do danych eksperymentalnych.

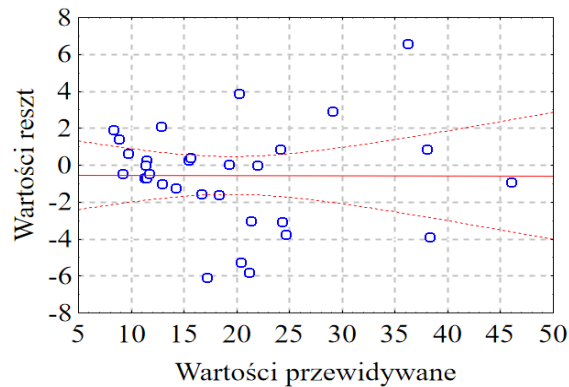
Aby potwierdzić adekwatność wyznaczonej zależności, wykonano statystyczne badanie reszt, czyli różnic występujących między wartościami przewidywanymi (oszacowanymi) i wartościami ustalonymi eksperymentalnie. W analizie regresji przyjęto założenia, że odchylenia losowe reszt są niezależne i podlegają rozkładowi normalnemu. Oznacza to, że proponowany model można uznać za adekwatny do danych eksperymentalnych tylko w przypadku, gdy otrzymane reszty będą wykazywać tendencję potwierdzającą poczynione założenia. Oceny słuszności założenia o rozkładzie normalnym reszt dokonano na podstawie histogramu liczebności reszt (rys. 3).

Pomimo tego, że na wykresie nie zauważono żadnych istotnych różnic, które wskazywałyby na sprzeczność z założeniem normalności rozkładu, dokonano analitycznego sprawdzenia poprzez wykonanie testu normalności Shapiro-Wilka. Wyznaczona wartość statystyki testowej $W = 0,965$ jest większa od wartości krytycznej testu ($W_{0,05;31} = 0,929$), ustalonej dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i liczności próby $N = 31$. Względnie duże

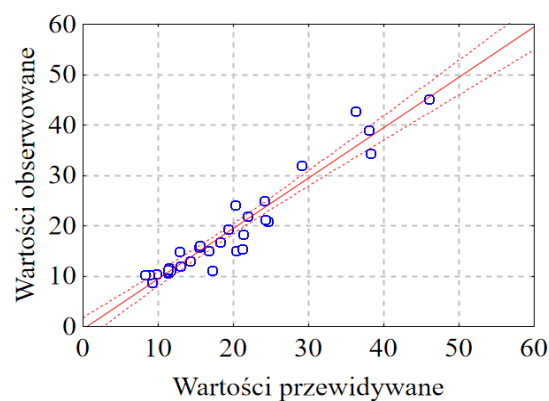
prawdopodobieństwo $p = 0,395$, przekracza wartość przyjętego poziomu istotności α . Na tej podstawie, analizowany rozkład reszt może być traktowany jako rozkład normalny.



Rys. 3. Histogram liczebności wartości reszt
Fig. 3. Relative frequency of residuals



Rys. 4. Wykres rozrzutu wartości reszt względem wartości przewidywanych
Fig. 4. Scatterplot for residues vs model values



Rys. 5. Wykres rozrzutu wartości obserwowanych względem wartości przewidywanych
Fig. 5. Scatterplot for observed values vs model values

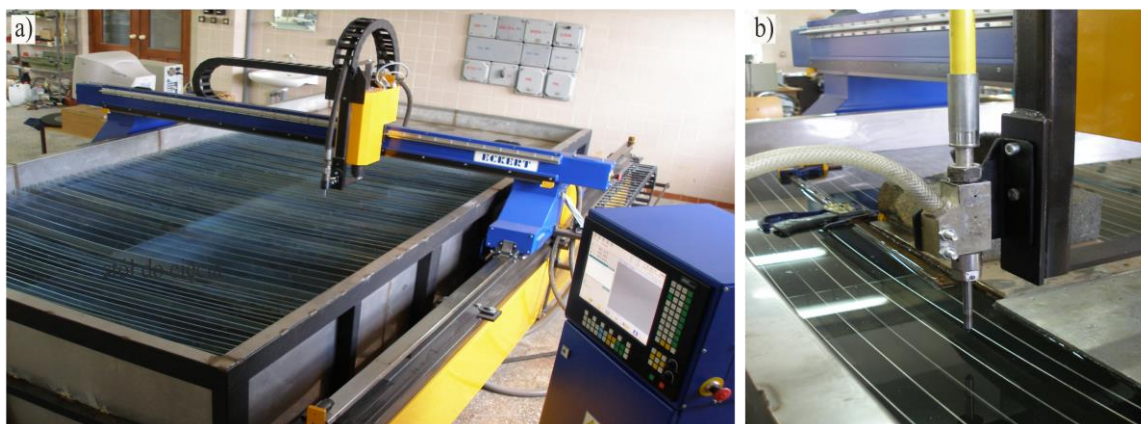
Biorąc pod uwagę fakt, że reszty podlegają rozkładowi normalnemu, co zostało udowodnione, należy uznać, że wyznaczony model opisany równaniem (1) jest adekwatny

do wyników badań. Potwierdza to wykres rozrzutu wartości reszt (rys. 4) i wartości obserwowanych (rys. 5) względem wartości przewidywanych.

4. ANALIZA POPRAWNOŚCI OPRACOWANEGO MODELU

Docelowym zastosowaniem opracowanego modelu procesu cięcia stopu aluminium PA4 wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prognozującego średnie kwadratowe odchylenie chropowatości S_q powierzchni otrzymywanych przecięć, stało się jego użycie do sterowania prototypowym stanowiskiem badawczym przeznaczonym do cięcia materiałów strugą wodno-ścierną (rys. 6), utworzonym w wyniku modernizacyjnej przebudowy przecinarki plazmowej typu TOPAZ-S firmy ECKERT.

Do budowy prototypowego stanowiska badawczego użyto kilku zespołów przecinarki plazmowej typu TOPAZ-S firmy ECKERT, do których należą: rama nośna, łożo z prowadnicami, układ napędowy wzdłużny i poprzeczny oraz sterownik komputerowy NEC 2000 S. Uwzględniając zakres roboczy tego urządzenia (2×3,5 m) zaprojektowano i wykonano zbiornik wodny, pełniący funkcję łapacza wody i ścierniwa. Został on umiejscowiony wewnątrz ramy nośnej. Do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej używano hydromonitora HDP-164. Jest on wyposażony w silnik SW 680 o mocy 176,5 KW, napędzający pompę wodną typu HDP 164 firmy Hammelmann, uzbrojoną w trzy nurniki o średnicy $\varnothing 17,5$ mm. Maksymalne ciśnienie wody, jakie można uzyskać przy użyciu tej pompy wynosi 300 MPa, a wydatek wody jest równy $22 \text{ dm}^3/\text{min}$ przy prędkości obrotowej silnika równej 1800 obr/min.



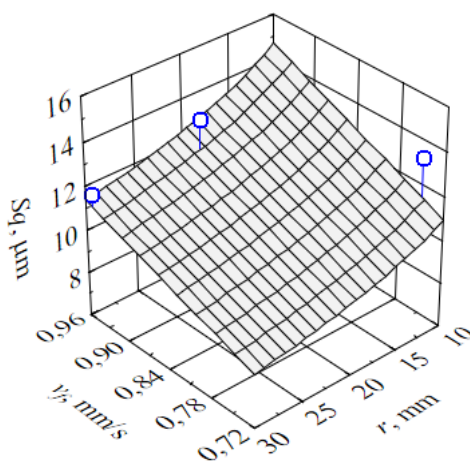
Rys. 6. Prototypowe stanowisko badawcze przeznaczone do cięcia materiałów strugą wodno-ścierną:
a) widok ogólny, b) głowica tnąca Hammelmann

Fig. 6. Prototype test stand designed for abrasive water jet cutting: a) general view, b) cutting head Hammelmann

Aby zweryfikować adekwatność wyznaczonego modelu, przeprowadzono badania kontrolne. Precyzując warunki badań, założono, że ciśnienie wody i grubość przecinanego materiału będą stałe i przyjmą wartość odpowiednio $p = 300 \text{ MPa}$ i $g = 20 \text{ mm}$. Zakres zmienności promienia toru ruchu głowicy tnącej r określono w przedziale 10-30 mm.

Następnie, wykorzystując opracowany statystycznie model procesu cięcia, określający średnie kwadratowe odchylenie chropowatości Sq , oszacowano wartości prędkości posuwu głowicy tnącej v_f , niezbędne do uzyskania wcześniej założonej chropowatości przeciętych powierzchni ($Sq = 10-13 \mu\text{m}$). Ustalone w ten sposób wielkości parametru obróbki (v_f) wprowadzono do sterownika NEC 2000 S.

Otrzymane rezultaty badań kontrolnych przedstawiono na rys. 7. Analizując położenie uzyskanych wyników eksperymentów (punktów) względem opracowanego statystycznie modelu (powierzchni) można wywnioskować, że różnice występujące między rezultatami badań weryfikujących i wartościami oczekiwanymi nie przekraczają $1,8 \mu\text{m}$ (14%). To względnie niewielkie zróżnicowanie wartości stanowi podstawę do stwierdzenia, że wyznaczony model może być wykorzystywany do sterowania procesem cięcia, realizowanym na prototypowym stanowisku badawczym.



Rys. 7. Położenie wyników badań względem powierzchni modelu
Fig. 7. Location of the test results with respect to the model surface

Należy jednak pamiętać, że przy ustalaniu wymaganej wartości parametru Sq powinno się uwzględnić jego około 10% odchyłkę. Biorąc pod uwagę położenie punktów pomiarowych względem powierzchni wykresu 3D, można uznać, że wymagana poprawka jest korektą dodatnią, tzn. do wartości bazowej obliczonej na podstawie modelu należy dodać odpowiednią wartość procentową.

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych prac eksperymentalnych wykazano, że istnieje ścisła zależność między zasadniczymi parametrami procesu cięcia (p , v_f , r) strugą wodno-ścierną i chropowatością przeciętych powierzchni, wyrażoną średnim kwadratowym odchyleniem chropowatości (Sq). Znajomość oddziaływania warunków obróbki na strukturę geometryczną powierzchni umożliwiła opracowanie modelu procesu cięcia stopu aluminium gat. PA4 wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną.

Przeprowadzone badania weryfikujące efektywność wyznaczonej zależności dowiodły, że opracowany model zapewnia dokładne, pod względem jakości uzyskiwanej powierzchni, sterowanie procesem przecinania stopu aluminium gat. PA4. Przy zapewnieniu analogicznych warunków realizacji procesu, określony model może być zaimplementowany do systemów nadzoru w obrabiarkach przeznaczonych do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną i posłużyć do prognozowania jakości powierzchni przecięć.

LITERATURA

- [1] BORKOWSKI J., 2008, *Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe, Monografia INTH nr 154*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- [2] BORKOWSKI J., SUTOWSKA M., BORKOWSKI P., 2014, *Jakościowy model procesu cięcia wybranych materiałów metalowych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną*, *Mechanik*, 9, 255-258.
- [3] BIRTU C., AVRAMESCU V., 2012, *Abrasive water jet cutting - technique, equipment, performances*, *Nonconventional Technologies Review*, 16, 40-46.
- [4] FELD M., 2000, *Technologia budowy maszyn*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [5] HOOGSTRATE A., SUSUZLU T., KARPUSCHEWSKI B., 2006, *High performance cutting with abrasive waterjets beyond 400 MPa*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55, 339-342.
- [6] JERMAN M., VALENTINČIČ J., LEBAR A., ORBANIĆ H., 2015, *The study of abrasive water jet cutting front development using a two-dimensional cellular automata model*, *Journal of Mechanical Engineering*, 61, 292-302.
- [7] KRAJCARZ D., *Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting*, 2014, *Procedia Engineering*, 69, 838-843.
- [8] OCZOŚ K., LIUBIMOV V., 2003, *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [9] SUTOWSKA M., 2009, *Problematyka krzywoliniowego przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uwzględniająca kryteria jakości powierzchni*. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska.
- [10] SUTOWSKA M., 2011, *Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 57, 535-537.
- [11] WANTUCH E., KOT R., 2003, *Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym*. Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 329-337.

MODEL FOR CUTTING ALUMINUM ALLOY WITH HIGH-PRESSURE ABRASIVE WATER JET

The article presents the results of studies of relationships between the mean square deviation of surface roughness S_q , and the essential parameters of AWJ cutting process. The knowledge of the impact of machining conditions on the geometrical structure of the cut surface, allowed to develop a statistical model of the process of cutting aluminum alloy PA4. To test if designated relationship provides fully effective control of the curvilinear dynamic cutting process of aluminum alloy, the experimental verifications were carried out. The control tests showed that the designated statistical model can be successfully used to effectively control of the process of aluminum alloy cutting, carried out on machines designed for abrasive water jet cutting. The experimental work was carried out on the AWJ machining center, type RCT 32 (Resato International B.V, Netherlands) and prototype unit, built on the basis of plasma cutting center, type TOPAZ-S (Eckert AS Sp. z o.o., Poland). Geometrical structure of the cut surfaces was measured with the use of a high-resolution 3D Surface Profiling system – Talysurf CLI 2000 (Taylor Hobson, UK). To develop a model of the high-pressure abrasive water jet cutting process of aluminum alloy, the Nonlinear Estimation module from STATISTICA software (StatSoft, Inc., USA) was used.

Keywords: *materials cutting, abrasive water jet, surface roughness*