

Dr inż. Tomasz WALA, dr inż. Krzysztof LIS (Politechnika Śląska):

BADANIE ODDZIAŁYWAŃ SIŁOWYCH PODCZAS CIĘCIA WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

Streszczenie

Siły reakcji wynikające z kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym zależą od wielu czynników, m.in. od parametrów obróbki oraz własności materiału i narzędzia. W przypadku obróbki skrawaniem na ostrzu narzędzia w układzie kartezjańskim definiuje się trzy składowe siły wzajemnie prostopadłych. Podobnie jest w przypadku cięcia wysokociśnieniową strugą wodną, dla której w analogicznym układzie określa się dwie siły składowe na jej czole (jest to siła posuwowa i siła wglębiania) oraz siłę prostopadłą do poprzednich, zwaną boczną. Czoło strugi tnącej definiowane jest jako punkt jej styku z przedmiotem w strefie usuwania materiału. Rozkład sił definiowany jest w punkcie leżącym na stycznej do czola strugi tnącej. Styczna czola strugi zmienia kąt pochylenia w zależności od punktu odchylenia strugi, co istotnie wpływa na wzrost siły posuwowej kosztem siły wglębiania. Zwiększanie grubości przedmiotu bez zmiany parametrów cięcia wpływa negatywnie na zmniejszenie zdolności erozyjnej wzdłuż kierunku siły wglębiania i na wzrost odchylenia strugi tnącej będącej konsekwencją wzrostu siły posuwowej. Zmiana prędkości cięcia wpływa wprost proporcjonalnie na zmianę siły posuwowej. Zmiana wymienionych parametrów wpływa też na zmianę wartości siły bocznej. Z punktu widzenia topografii powierzchni przeciętej jej jakość spada wskutek wzrostu siły posuwowej, natomiast wzrost siły wglębiania – decydującej o efektywności cięcia – wpływa na polepszenie jakości powierzchni. Artykuł przedstawia metodę wyznaczania sił podczas cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną w kierunkach zdefiniowanego układu ortogonalnego. Do pomiaru sił wykorzystano tor pomiarowy z czteroukładowym piezoelektrycznym czujnikiem siły. Dla zdefiniowanych parametrów procesu wyznaczono siły w trzech kierunkach, tj. siły: posuwową, wglębiania i boczną. W ramach badań sporządzono wykresy zmian wartości sił w zależności od prędkości posuwowej głowicy tnącej dla wybranych materiałów przedmiotu ciętego.

Słowa kluczowe: struga wodno-ścierna, oddziaływanie siłowe

THE STUDY OF FORCES INTERACTIONS DURING THE HIGH PRESSURE ABRASIVE WATERJET CUTTING

Abstract

The reaction forces due to contact of the tool with the workpiece, depends on many factors, which include processing parameters, material properties and tools.

In the case of machining with the cutting edge defines three component of forces mutually perpendicular in the Cartesian system. The same is the case of high-pressure abrasive waterjet cutting, in which the analogical system defines two component forces on forehead of waterjet (i.e. feed force and drill force), and a force component perpendicular to those forces, which called the lateral force. The front face of the cutting waterjet is defined as a point of its contact with the workpiece in the zone of material removal. The distribution of forces is defined at a point on the tangent to the face of waterjet.

Tangent face of waterjet changes an angle of the jet depending on localization of point, where the jet is deflected from the her axis, which significantly affects the growth of feed force at the expense of drill force.

Without changing the cutting parameters, the increasing the thickness of the workpiece has a negative impact on capacity reduction erosion along the direction of the drill force and the deflection of cutting jet increasing as a consequence of increase in feed force. The change the cutting speed affects directly proportional to the change of feed force. Changing these parameters also affects the change in value of the lateral force.

From the point of view of the machined surface topography increase feed force affects the deterioration of the surface, while the drill force is the force which determines the cutting efficiency influences the improvement of the quality of the cut surface.

This article presents a method for determining the cutting forces during the high pressure abrasive waterjet cutting in the direction defined by an orthogonal system. For measuring the forces were used the piezoelectric 4-axis force sensor with the defined measuring track. For a defined conditions of process were obtained forces in three directions, i.e. the feed force, drill force and lateral force. The study show the relations of changes the forces value, depending on the speed of the cutting head cutter for the selected materials of workpiece.

Keywords: abrasive waterjet, forces interactions

BADANIE ODDZIAŁYWAŃ SIŁOWYCH PODCZAS CIĘCIA WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNO-ŚCIERNĄ

Tomasz WALA¹, Krzysztof LIS²

1. WPROWADZENIE

W procesie obróbki wodno-ściernej, strumień pod bardzo wysokim ciśnieniem jest dostarczany przez pompę do dyszy wodnej, z którego przekształcony zostaje w strugę o bardzo wysokiej prędkości. Podczas przejścia przez komorę mieszania, tworzy się podciśnienie, która zasysa cząsteczki ściernie i jako struga wodno-ścierna zostaje skoncentrowana w dyszy ściernej. Usuwanie materiału obrabianego w głównej mierze jest wynikiem wielokrotnego uderzenia cząstek ściernych o dużej prędkości [1].

Obróbka wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną to proces, którego efektywność zależy od wielu parametrów. Parametry takie jak ciśnienie pompy, natężenie przepływu strumienia ściernego to główne parametry odpowiadające za efektywność procesu cięcia. Za prędkość cięcia, odpowiada prędkość posuwu głowicy tnącej, która wpływa również na uzyskaną jakość cięcia. Na jakość powierzchni obrabianej pod kątem jej chropowatości wpływa również zmiana gradacja stosowanego ścierniwa. W przypadku konieczności osiągnięcia większej precyzji przecięcia pod kątem zbieżności szczeliny, jej geometrię można sterować przez zmianę rozmiarów dysz stosowanych w głowicy tnącej lub też niewielką korekcję kąta pochylenia osi strugi względem powierzchni przedmiotu.

W miarę rozwoju zaawansowanych materiałów o podwyższonych własnościach (zwiększona twardość, wytrzymałość w wysokiej temperaturze), potrzebne są procesy, które poradzą sobie z ich obróbką. Porównując typowe i niekonwencjonalne metody obróbki (metoda obróbką skrawaniem, metoda obróbką laserową lub plazmową) metoda cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną może być uznana za przodującą metodę z powodu pewnych kluczowych cech, do których należą:

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn

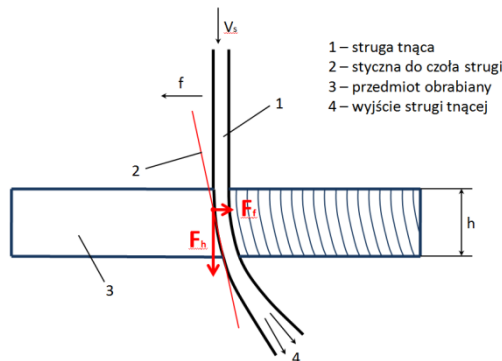
² Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn

- usuwanie materiału przez efekt ścierny cząsteczkami o wysokiej energii kinetycznej, co umożliwia obróbkę dowolnego materiału obrabianego niezależnie od jego właściwości (zaawansowane materiały ceramiczne [2], kompozyty diamentowe [3]);
- proces przebiega dzięki bardzo małym siłom skrawania, umożliwiając tym samym stosowanie maszyn o niskiej sztywności;
- obróbka materiałów wrażliwych na wpływ ciepła;
- wycinanie złożonych konturów z zastosowaniem pięcioosiowego sterowania głowicą według zaprogramowanej ścieżki (fazowanie, obróbka powierzchni krzywoliniowych [4]).

W odniesieniu do przedstawionych wyżej głównych cech metody, w ramach niniejszego artykułu celem było zbadanie wpływu prędkości cięcia wysokociśnieniową strugą tnącą na zmiany wartości sił, będących odpowiedzią na oddziaływanie strugi tnącej na przedmiot cięty dla wybranych parametrów.

2. ROZKŁAD SIŁ PODCZAS CIĘCIA WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNĄ

Siły reakcji pod wpływem kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym zależą od wielu czynników, do których należą m.in. parametry obróbki, własności materiału i narzędzia. O ile w przypadku obróbki skrawaniem na ostrzu narzędzia definiuje się trzy składowe siły wzajemnie prostopadłych, to w przypadku cięcia wysokociśnieniową strugą wodną określa się dwie siły składowe na jej czole. Czoło strugi tnącej definiowane jest jako punkt jej styku z przedmiotem w strefie usuwania materiału. Rozkład sił definiowany jest w punkcie leżącym na stycznej do czoła strugi tnącej, jak przedstawiono na Rys. 1. Styczna czoła strugi zmienia kąt pochylenia w zależności od punktu odchylenia strugi, co istotnie wpływa na wzrost siły posuwowej kosztem siły wglębienia.



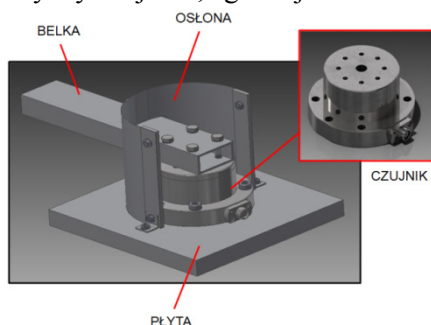
Rys. 1. Siły występujące od czoła strugi podczas cięcia przedmiotu; v_s – prędkość strumienia, f – kierunek prędkości posuwowej strugi tnącej, F_f – siła posuwowa, F_h – siła wglębienia

Nie zmieniając parametrów cięcia zwiększanie grubości przedmiotu wpływa negatywnie na zmniejszenie zdolności erozyjnej wzdłuż kierunku siły wgłębienia i na wzrost odchylenia strugi tnącej będącej konsekwencją wzrostu siły posuwowej. Zmiana prędkości cięcia wpływa wprost proporcjonalnie na zmianę siły posuwowej.

Z punktu widzenia topografii powierzchni przeciętej wzrost siły posuwowej wpływa na pogorszenie jakości powierzchni, natomiast siła wgłębienia jest siłą decydującą o efektywności cięcia wpływająca na polepszenie jakości powierzchni cięcia.

3. BUDOWA STANOWISKA POMIAROWEGO

Kluczowym elementem stanowiska jest czteroskładowy piezoelektryczny czujnik siły 9272 firmy Kistler. Zaproponowane stanowisko (Rys. 2) pozwala na pomiar sił podczas cięcia wysokociśnieniową strugą tnącą. Kierunek osi X czujnika i jej zwrot były zgodne z osią X maszyny. Natomiast kierunek osi Y czujnika był również zgodny z osią Y maszyny, ale przeciwnie skierowany do niej. Oś Z przebiegała w kierunku normalny do górnej płaszczyzny czujnika, zgodnej ze zwrotem osi Z maszyny.



Rys. 2. Widok stanowiska pomiarowego

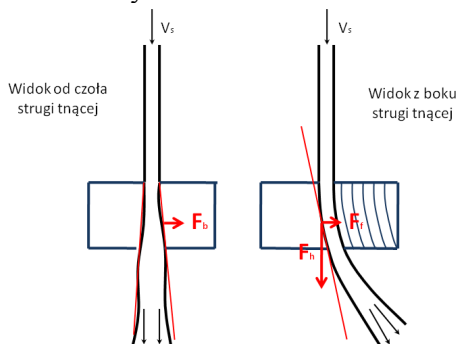
Tor pomiarowy (Rys. 3) składał się z czujnika Kistler 9272 oraz wzmacniacza czterokanałowego Kistler 5020A, komputera klasy PC wyposażonego w kartę pomiarową NI USB 6211 oraz oprogramowanie LabView.



Rys. 3. Schemat toru pomiarowego

W odniesieniu do reakcji sił, jak pokazano na rys. 4, siła F_x odpowiada sile posuwowej F_t , natomiast mierzona siła F_z odpowiada sile wgłębnej F_h . Siła F_y teoretycznie powinna być siłą o wartości bliskiej zero przy prawidłowym procesie cięcia, gdyż jej

oddziaływanie wynika z odpowiedzi prostopadłej do kierunku posuwu i kierunku wglębiania (składowa F_b na rys. 4). Jej niezerowe wartości mogą wynikać z zawirowań strugi, podczas odchylenia strugi tnącej przy wyjściu ze strefy cięcia przedmiotu. Można również przypuszczać że wartość siły F_b może informować o występującej zbieżności szczeliny.



Rys. 4. Rozkład składowy sił reakcji dla strugi tnącej od jej czoła

4. PARAMETRY PROCESU CIĘCIA STOSOWANE PODCZAS REJESTRACJI SIŁ

W trakcie prowadzenia badań eksperymentalnych przeprowadzono pomiary dla dwóch rodzajów materiałów. Wybrane materiały stosowane podczas badań to aluminium oraz stal St3S. Próbki miały grubość 12mm oraz 20mm. Podczas badań stosowano następujące parametry obróbki: ciśnienie pompy 330 MPa, natężenie ścierniwa 340 g/min. W konstrukcji głowicy zastosowano dyszę wodną o średnicy otworu 0,35 mm i dyszę ścierną o średnicy otworu 1 mm. Po próbach cięcia przeprowadzono dodatkowo testy związane z dwoma rodzajami metody przebijania przedmiotu: punktowego i rotacyjnego.

5. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie wykresów zarejestrowanych podczas pomiarów sił wyznaczono wartości średnie sił oraz momentów zasadniczej części procesu, czyli cięcia w całym przekroju materiału oraz zestawiono otrzymane wyniki w tabelach 3, 4, 5, 6.

Tabela 3. Wartości średnich sił reakcji w trakcie cięcia aluminium o grubości 20 mm.

| Posuw [mm/min] | Siła F_b [N] | Siła F_r [N] | Siła F_h [N] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 98 | 0,03 | 3,99 | 2,35 |
| 137 | 0,57 | 3,93 | 2,34 |
| 217 | 0,46 | 9,06 | 3,31 |
| 304 | 0,12 | 10,57 | 9,46 |

Tabela 4. Wartości średnich sił reakcji w trakcie cięcia stali węglowej ST3 o grubości 20 mm

| Posuw [mm/min] | Siła F_b [N] | Siła F_f [N] | Siła F_h [N] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 24 | 0,13 | 3,88 | 1,3 |
| 31 | 0,08 | 5,46 | 1,74 |
| 43 | 0,22 | 7,38 | 3,65 |
| 68 | 0,01 | 8,2 | 4,74 |
| 96 | 0,44 | 8,99 | 7,62 |

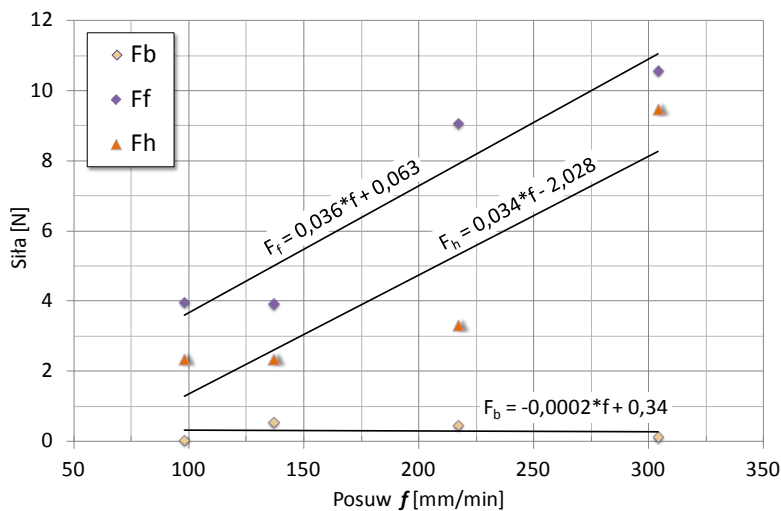
Tabela 5. Wartości średnich sił reakcji w trakcie cięcia aluminium o grubości 12 mm

| Posuw [mm/min] | Siła F_b [N] | Siła F_f [N] | Siła F_h [N] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 24 | -0,11 | 2,74 | 2,13 |
| 31 | 0,11 | 4,21 | 3,02 |
| 43 | 0,21 | 5,64 | 3,85 |
| 68 | 0,84 | 8,42 | 5,84 |
| 96 | 0,83 | 10,4 | 7,9 |

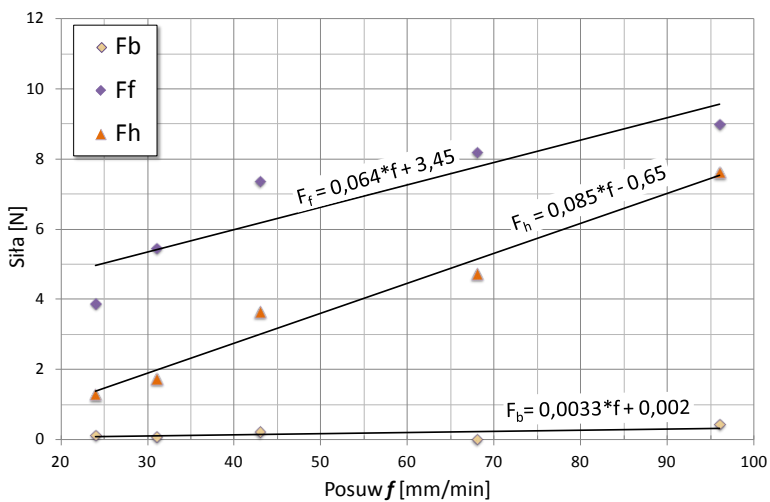
Tabela 6. Wartości średnich sił reakcji w trakcie cięcia stali węglowej ST3 o grubości 12 mm

| Posuw [mm/min] | Siła F_b [N] | Siła F_f [N] | Siła F_h [N] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 24 | 0,03 | 4,85 | 2,46 |
| 31 | 0,36 | 4,87 | 2,2 |
| 43 | 0,09 | 6,2 | 4,11 |
| 68 | 0,72 | 8,93 | 6,21 |
| 96 | 1,03 | 12,3 | 9,78 |

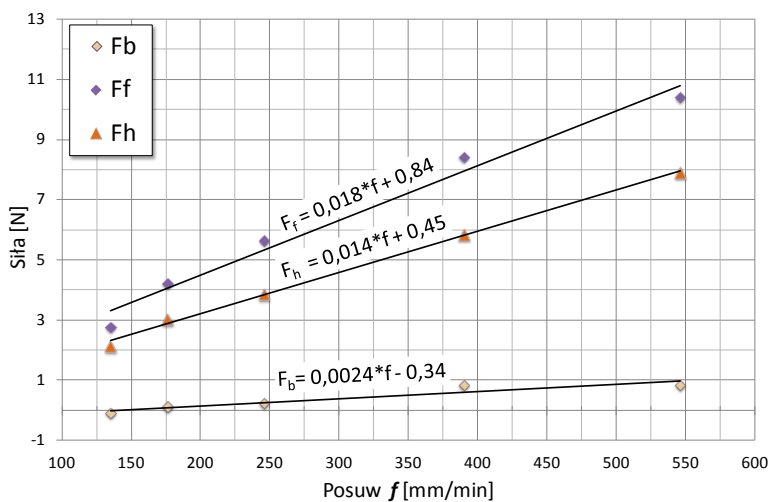
Wykresy na rysunkach 5, 6, 7, 8 przedstawiają uzyskane zależności sił od posuwu dla poszczególnych próbek.



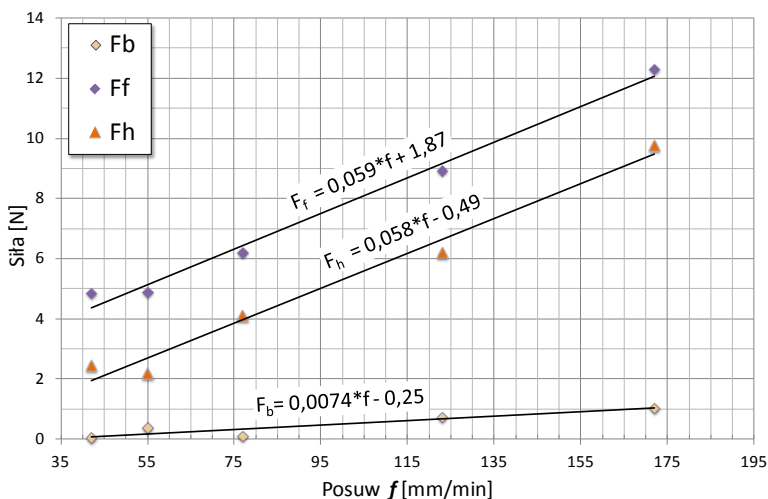
Rys. 5. Wyniki badań wpływu parametrów cięcia na siły działające na dyszę. Cięcie aluminium o grubości 20 mm



Rys. 6. Wyniki badań wpływu parametrów cięcia na siły działające na dyszę. Cięcie stali węglowej o grubości 20 mm.

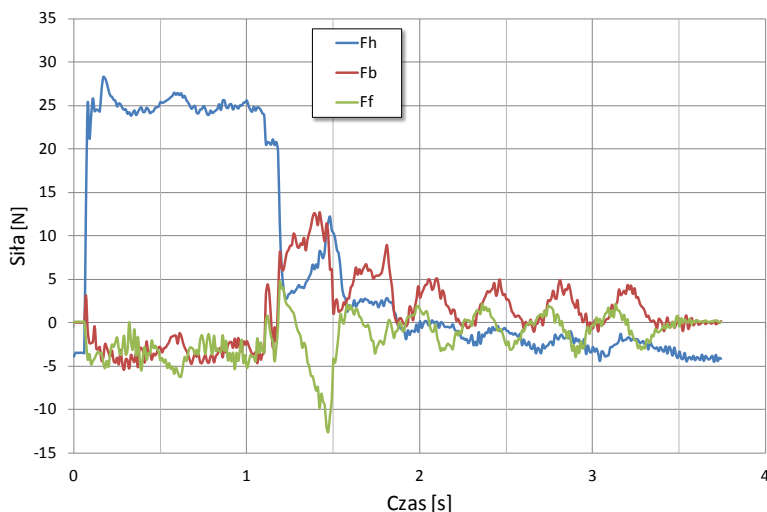


Rys. 7. Wyniki badań wpływu parametrów cięcia na siły działające na dyszę. Cięcie aluminium o grubości 12 mm.



Rys. 8. Wyniki badań wpływu parametrów cięcia na siły działające na dyszę. Cięcie stali węglowej o grubości 12 mm.

Tabela 7. zawiera zestawienie sił reakcji dla przebijania z zastosowaniem różnych strategii przebicia. Przedstawione na rys. 9 przebiegi sił reakcji podczas przebijania rotacyjnego próbki z aluminium o grubości 12 mm zawiera również przebiegi otrzymane po przebiciu.



Rys. 9. Wyniki badań wpływu parametrów cięcia na siły działające na dyszę. Cięcie stali węglowej grubości 12 mm.

Tabela 7. Wartości średnich sił reakcji w trakcie przebijania

| próbka | metoda przebijania | Siła F_b [N] | Siła F_f [N] | Siła F_h [N] |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| aluminium 12mm | rotacyjna | 3,21 | 3,79 | 28,53 |
| aluminium 12mm | punktowa | 3,63 | 3,83 | 27,08 |
| stal węglowa 12mm | rotacyjna | 3,91 | 3,56 | 30,85 |
| stal węglowa 12mm | punktowa | 5,65 | 3,6 | 24,66 |

6. WNIOSKI

Z przedstawionych wykresów i tabeli wynika, iż znaczący wpływ na wartość siły posuwowej F_f ma wartość prędkości posuwu. Wykazano, że większa prędkość posuwowa wywołuje wzrost wartości tej siły. W zakresie przeprowadzonych badań zmiana siły posuwowej F_f od prędkości posuwowej wykazuje liniową zależność.

Podczas badań zaobserwowano również nieznaczny wzrost sił w kierunku bocznym F_b prostopadle do kierunku cięcia (do siły posuwowej). Wzrost ten jest zauważalny dla próbek o mniejszej grubości, niezależnie od ciętego materiału. Dla grubszych próbek taka zależność nie występuje.

Wartość siły reakcji F_h odznacza się dużą nieregularnością w różnych zakresach wartości posuwu. Siła ta podobnie jak siła posuwowa charakteryzuje się wyraźnymi wyższymi wartościami w stosunku do siły posuwowej i siły bocznej. Jej wzrost obserwowany był wraz ze wzrostem prędkości posuwowej, co wynika z rosnących oporów podczas wgłębiania się strugi w przedmiot.

Pomiary przeprowadzane podczas przebijania wykazują pojawienie się siły reakcji F_h o wartościach rzędu 25 do 30N. Natomiast siły reakcji w kierunkach F_p i F_b są niewielkie będące skutkiem odbicia strugi i powrotu strumienia drążonym otworem na zewnątrz materiału. W przypadku przebijania rotacyjnego (Rys. 9) można zauważyć zmiany wartości sił F_h i F_b występujące po przebicciu, które odzwierciedlają zmianę kierunku ruchu głowicy po okręgu.

LITERATURA

- [1] Momber, A.W., Kovacevic, R., 1998. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. Springer, New York.
- [2] Srinivasu, D.S., Axinte, D.a., Shipway, P.H., Folkes, J., 2009. *Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (14), 1077–1088.
- [3] Axinte, D.A., Srinivasu, D.S., Kong, M.C., Butler-Smith, P.W., 2009. *Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: a preliminary investigation*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (10), 797–803
- [4] Wala T.: *Zastosowanie obróbki wodno-ściernej do szybkiego wytwarzania prototypów*. Inżynieria Maszyn, R.17, z.3, 2012, 84-93