

Tomasz WALA¹

ZASTOSOWANIE OBRÓBKII WODNO-ŚCIERNEJ DO SZYBKIEGO WYTWARZANIA PROTOTYPOW

Szybkie wytwarzanie prototypów przez zastosowanie wysokociśnieniowej technologii cięcia strumieniem wodno-ściernym warunkowane jest możliwością manipulowania położeniem głowicy tnącej w stosunku do przedmiotu. Dodatkowe możliwości można uzyskać przez manipulowanie pozycją przedmiotu obrabianego w trakcie procesu. Obecnie na rynku przemysłowym technologie przeznaczone do szybkiego wytwarzania prototypu pozwalają na kształtowanie modelu określonego urządzenia, jednocześnie uwzględniając kinematykę ruchową. Dlatego też należy zaznaczyć, że prototypowanie przez zastosowanie metody wodno-ścierniej dotyczy tylko i wyłącznie jednej części danego zespołu. Artykuł przedstawia metody i ograniczenia podczas manipulowania położeniami głowicy tnącej i przedmiotem obrabianym w metodzie obróbki wodno-ścierniej, z wykorzystaniem 5-osiowego sterowania dla nadania przedmiotowi (prototypowi) określonego kształtu.

1. WATERJET W UJĘCIU 3-WYMIAROWYM

Rozwój procesów technologicznych dotyczących niekonwencjonalnych metod obróbki w zakresie stosowania 5-osiowego sterownia jest w szczególności istotny z punktu widzenia ustawiania narzędzia. Ma to szczególne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa procesu, a zarazem dokładności procesu obróbki. Jedną z takich metod obróbki, w której pozycjonowanie narzędziem z wykorzystaniem 5-ciu osi wymaga odpowiedniego przygotowania jest obróbka wodno-ścierna. Wynika to przede wszystkim z istoty narzędzia, którym jest strumień wodny wydostający się z dyszy głowicy tnącej o bardzo dużej prędkości [1]. Strumień ten po przecięciu przedmiotu wymaga przestrzeni, aby pozostała energia strumienia ulega szybkiemu rozproszeniu, tj. już poza strefą cięcia. Spełnienie tego warunku jest konieczne, aby, możliwe było otrzymanie poprawnego kształtu i wymiarów przedmiotu z cechami trójwymiarowości. W niektórych przypadkach spełnienie tego warunku mocno ogranicza wykonanie takiej obróbki, która pozwoliłaby na pełne ukształtowanie przedmiotu bez stosowania dodatkowych operacji wykonanych inną metodą, np. obróbką skrawaniem.

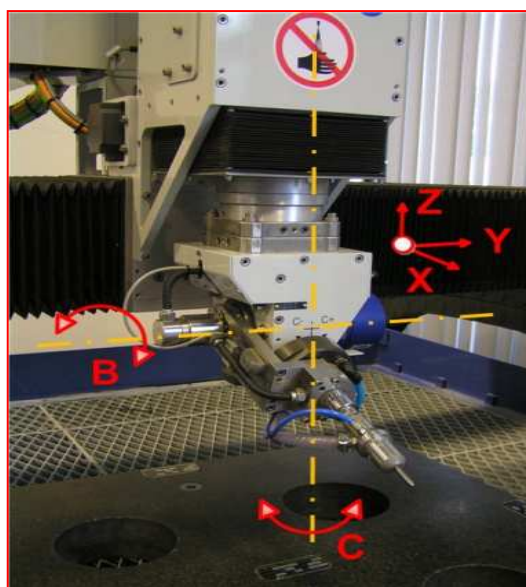
Obecnie w wielu obszarach w przemyśle używa się technologii cięcia wodno-ściernego, a dotyczy to szczególnie przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, a także firm produkujących zbiorniki. Takie wielozakresowe zastosowanie metody cięcia wodno-

¹Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach

ściernego wymusza niejako na producentach maszyn Waterjet, aby obróbka umożliwiała wykonanie wielozadaniowych procesów kształtowania od zwykłego cięcia, fazowania po nawet toczenia.

Przygotowanie obróbki wodno-ścierniej w technice 3D, oprócz kwestii rozproszenia energii strumienia wodnego poza strefą cięcia, musi również wykluczyć ewentualny jego kontakt z elementami samej maszyny. Z tego powodu obróbka w przypadku dużych gabarytów przedmiotu wymaga zastosowania maszyn o zwiększonej strefie obróbczej, co też przekłada się na zwiększone gabaryty stołu maszyny.

W procesie cięcia w przestrzeni 3D oprócz pozycjonowania głowicy tnącej w trzech głównych osiach X, Y, Z występują również dwie dodatkowe osie, w których pozycja kątowa głowicy tnącej zmieniana jest (oś B), natomiast obrót głowicy tnącej realizowany jest wokół osi Z (oś C) (rys.1). Z reguły maksymalne ustawienie kątowe głowicy tnącej w osi B wynosi 45 stopni. Jednak w szczególnych przypadkach, istnieje możliwość kątowego ustawienia głowicy tnącej nawet do kąta równego 90 stopni. Wymaga to jednak zastosowania, w przyrządach mocujących przedmiot, specjalnych tzw. kierownic strumienia, które zapewnią jego skierowanie do wanny z wodą po wyjściu ze strefy cięcia.



Rys. 1. Główne osie głowicy tnącej maszyny Waterjet [2]

Fig. 1. The main axis waterjet cutter head machine [2]

Zaletą rozwiązania z wymiennymi kierownicami strumienia jest stosunkowo szybka i łatwa ich wymiana, w przypadku zniszczenia (zerodowania) kierownic w trakcie procesu cięcia.

Dokładność cięcia w metodzie Waterjet ściśle zależy od stałej odległości pomiędzy końcówką dyszy głowicy tnącej a przedmiotem obrabianym. W przypadku przedmiotów o krzywoliniowych powierzchniach wymagane jest zastosowanie specjalnych systemów, które pozwolą na korekcję ścieżki przejścia narzędzia, wygenerowanej wcześniej w programie numerycznym z uwzględnieniem rzeczywistych odchyłek górnej powierzchni przedmiotu. Mając wygenerowany sterujący kod NC ścieżki przejścia narzędzia na podstawie modelu CAD przedmiotu nie zawsze da się uwzględnić rzeczywiste odchylenia od wymiarów. Problem ten bardzo często dotyczy przedmiotów odlewanych. Szczegółowy opis sposobu korekcji ścieżki narzędzia jest przedstawiony w piątym rozdziale.

W cięciu 5-osiowym poza przejazdem w osiach X i Y wymagane jest sprzężenie jednoczesnej zmiany pozycji głowicy w osiach Z, B i C. Pozycja głowicy względem przedmiotu musi zawsze spełnić dwa warunki, tj. stała odległość końcówki głowicy od powierzchni przedmiotu obrabianego oraz prostopadłość osi strumienia wodnego do powierzchni przedmiotu obrabianego. Takie warunki dotyczące pozycjonowania głowicy

względem powierzchni przedmiotu zapisane są domyślnie w kompilatorach do generowania kodu NC, będących na wyposażeniu oprogramowania CAM.

W wielu przypadkach 5-osiowych maszyn Waterjet, kompilacja kodu NC wykonywana jest na bazie wcześniej zaprogramowanych makr w sterowniku maszyny, np. cięcie profilu rurowego o znanym promieniu (rys. 2) [2]. Jednak w przypadku, gdy powierzchnia obrabianego przedmiotu należy do grupy krzywoliniowych, nie mających bezpośredniego odwzorowania funkcją matematyczną, dobrym rozwiązaniem może być metoda skanowania powierzchni. Takie skanowanie powierzchni może być przeprowadzane różnymi metodami, np. mechanicznymi lub optycznymi.

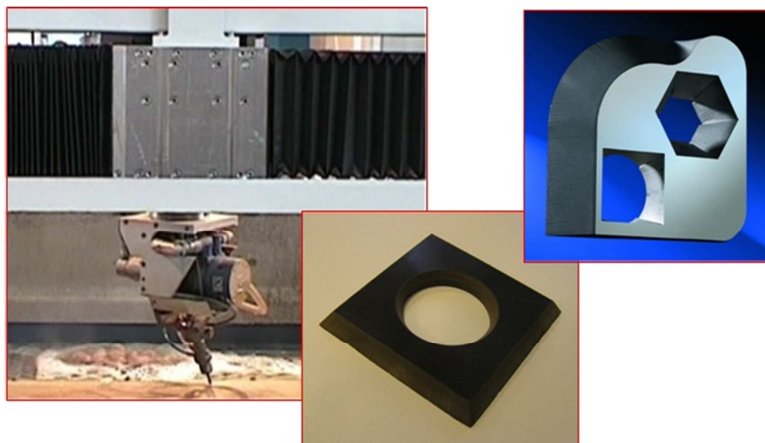


Rys. 2. Wycinanie otworów na profilu rurowym
Fig. 2. Cutting holes for pipe profile

Reasumując, precyzyjne prowadzenie głowicy tnącej względem górnej powierzchni przedmiotu obrabianego wymaga odpowiedniego przygotowania projektowego CAD/CAM. Wymagania odnośnie odwzorowania ruchu głowicy względem krzywoliniowych powierzchni wymusiły, na przestrzeni ostatniej dekady, tematy projektów rozwojowych w zakresie sterowania głowicą tnącą, które już w obecnym czasie są w większości wdrażane do przemysłu. Poniżej w kolejnych rozdziałach przedstawiono przykłady niektórych rozwiązań cięcia przedmiotów z wykorzystaniem 5-osiowego sterowania głowicą tnącą.

2. CIĘCIE Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI PRZESTRZENNEJ DLA PRZEDMIOTÓW Z POWIERZCHNIĄ PŁASKĄ

Możliwości wycinania przedmiotu metodą wodno-ścierną z wykorzystaniem sterowania 5-cio osiowego najczęściej ogranicza się do wykonania cięcia pod kątem w zakresie +/- 45 stopni (sterowanie osią B), z wykorzystaniem jednocześnie obrotowej osi C wokół osi Z – rys. 3. Pozwala to na przykład na wykonanie zabiegu fazowania na otworze. Grubość przedmiotu obrabianego i stała wartość odległości końcówki dyszy głowicy od powierzchni przedmiotu obrabianego decydują o wymiarze fazy odpowiedniej krawędzi.



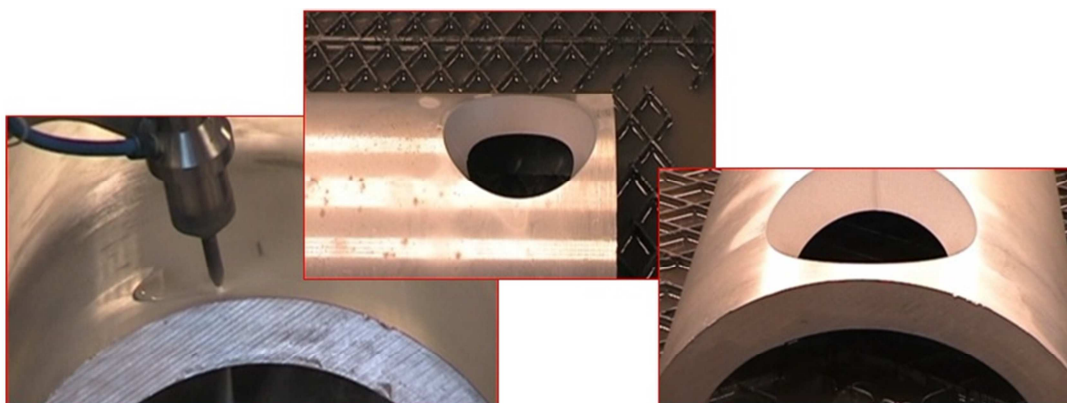
Rys. 3. Przykłady wycinania otworów z wykorzystaniem osi B i obrotowej osi C [2]
Fig. 3. Examples of cutting holes using the B-axis and C-axis rotary [2]

Sprzężenie ruchów we wszystkich 5-ciu osiach umożliwia wykonanie takiego ukształtowania konturu wzdłuż grubości przedmiotu, który przy górnej powierzchni będzie miał kształt kwadratu, a przy dolnej powierzchni kształt koła (rys.3).

3. CIĘCIE Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI PRZESTRZENNEJ DLA PRZEDMIOTÓW Z POWIERZCHNIĄ KRZYWOLINIOWĄ

W przypadku, gdy górna powierzchnia przedmiotu obrabianego nie jest płaska, zachodzi konieczność sprzężenia osi Z z wysokością powierzchni przedmiotu (zmienna grubość). O ile, gdy powierzchnia jest łatwa do zdefiniowania, np. profil kołowy, gdzie jego kształt definiowany jest przez wartość promienia koła, o tyle powierzchnia krzywoliniowa bez możliwości odwzorowania funkcją matematyczną, wymaga zastosowania już zaawansowanych programów CAM.

Przykłady procesu cięcia na profilach kołowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wycinanie na profilu kołowym [2]
Fig. 4. Cutting the circular profile [2]

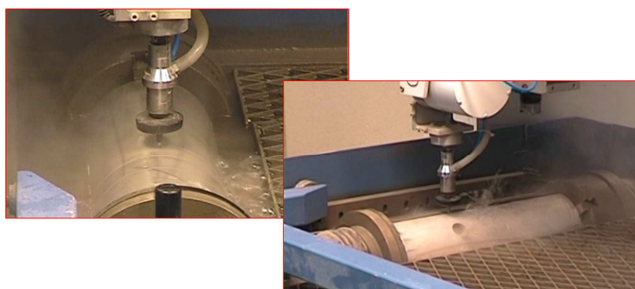
Przykład wycinania wymagającego znacznie bardziej zaawansowanego sterowania głowicy tnącej w przestrzeni trójwymiarowej przedstawiono na rys. 5. Warunkiem przygotowania takiego procesu cięcia przedmiotu z tak ukształtowaną powierzchnią krzywoliniową jest dostęp do modelu CAD, który wirtualnie przedstawia położenie tej powierzchni w osi Z, która decyduje o pozycji głowicy tnącej nad linią cięcia.



Rys. 5. Wycinanie wypłytki z odlewu łopatki turbiny [3]
Fig. 5. Cutting burrs on turbine blades after casting [3]

Przy szeroko rozumianej manipulacji narzędziem, którym jest strumień wodno-ścierny, strefa cięcia wynikająca z pozycji głowicy musi uwzględniać przepisy bezpieczeństwa. Rozwiązywane jest to m.in. przez powiększony rozmiar stołu (większa strefa obróbki) i specjalne zabezpieczenia chroniące przed oddziaływaniem strumienia. Na dzień dzisiejszy istnieją maszyny, które posiadają również całkowicie zamkniętą strefę cięcia, tym samym zabezpieczając otoczenie od niebezpiecznego oddziaływania strumienia tnącego. Istnieją również rozwiązania, w których stosuje się również manipulowanie przedmiotem obrabianym podczas cięcia. Takie podejście wymaga odpowiedniego sterowania, które synchronizuje ruchy głowicy z przemieszczeniem przedmiotu obrabianego. Takie rozwiązania w obecnym czasie należą do bardzo kosztownych rozwiązań.

W przemyśle maszynowym stosującym technologię obróbki wodno-ściernej można spotkać rozwiązania, w którym przedmiot obrabiany może obracać się względem głowicy tnącej. Mocuje się wtedy np. przedmiot w uchwycie obrotowym napędzanym dodatkowym silnikiem (rys. 6).

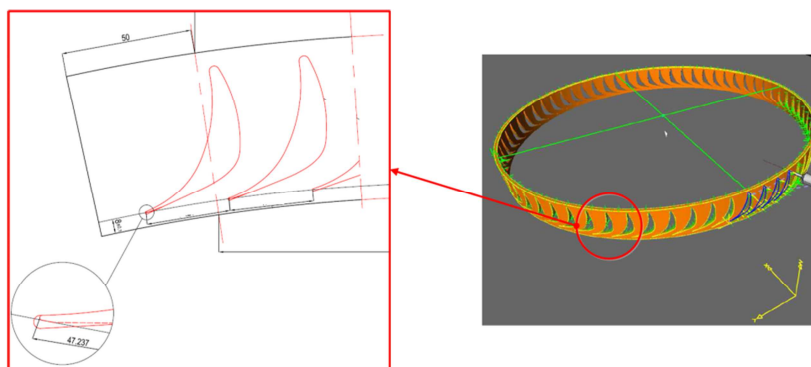


Rys. 6. Wycinanie obrotowych przedmiotów cylindrycznych [3]
Fig. 6. Cutting rotating cylindrical workpiece [3]

Prędkość obrotowa przedmiotu zależy od prędkości posuwu głowicy tnącej i żądanej jakości powierzchni, podobnie jak podczas dwuwymiarowego cięcia przedmiotów płaskich, gdzie głowica tnąca przemieszcza się z zadaną prędkością posuwową.

4. PRZYKŁAD PRZYGOTOWANIA PROCESU 5-OSIOWEGO CIĘCIA DLA PIERŚCIENI POD MOCOWANIE ŁOPATEK

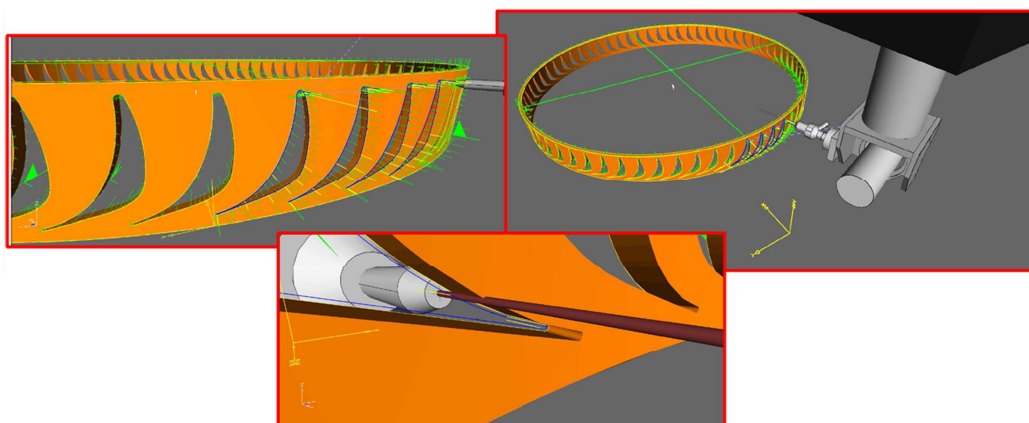
Poniżej przedstawiono przykład symulacji wycinania otworów pod łopatki na pierścieniu turbiny (rys.7). Pierścień ma kształt stożka, którego górna średnica wynosi 967mm a dolna średnica 948mm.



Rys. 7. Widok pierścienia z konturami otworów pod łopatki [4]

Fig. 7. View of the ring blade with contour holes [4]

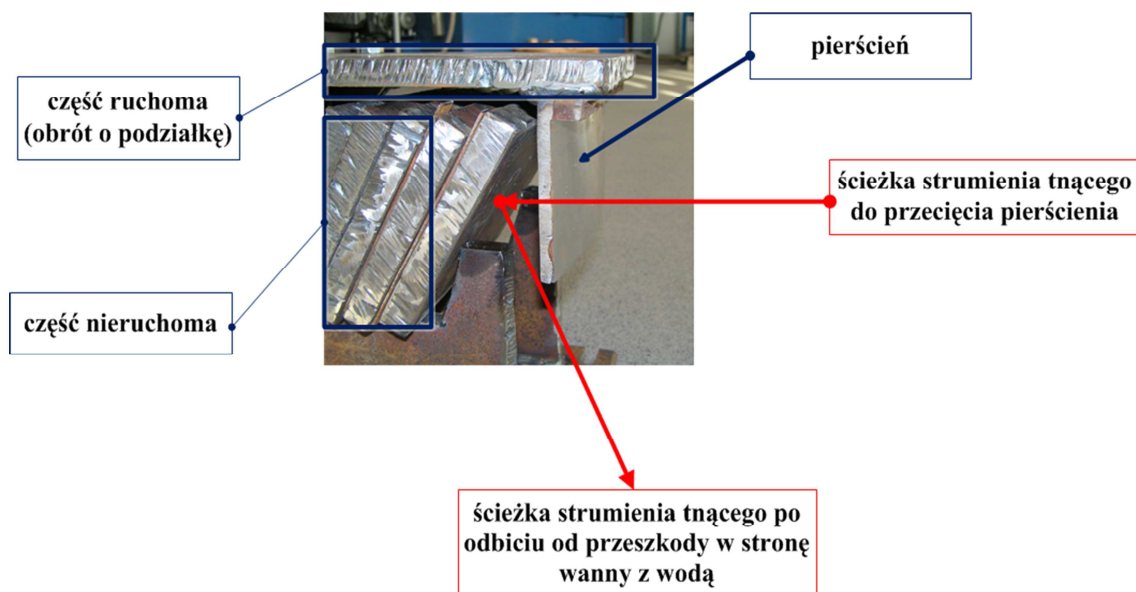
Kod numeryczny NC, sterujący pozycją głowicy tnącej, przygotowano z pomocą oprogramowania dedykowanego dla sterowania w technice 3D „*WARICAM Professional 3: moduł CAM dla kompleksowych zadań cięcia w 3D*”. Przykładową wizualizację i symulację przebiegu cięcia pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Wizualizacja zaprogramowanej ścieżki przejścia strumienia tnącego [4]

Fig. 8. Visualization of the programmed path of cutting waterjet [4]

Główne problemy napotkane w ramach przygotowania sterowania w powyższym przypadku wiązały się m.in. z tym, że sterowanie głowicą tnącą wymagało ustawienia jej w pozycji równoległej do poziomu stołu. Poniżej na rys. 9 pokazano elementy konstrukcyjne przyrządu stanowiącego kierownicę i sposób kierowania strumienia tnącego po wyjściu ze strefy cięcia.



Rys. 9. Sposób kierowania strumienia tnącego do wanny
Fig. 9. The way of waterjet directing into basin

Dla zabezpieczenia przedmiotu obrabianego i elementów maszyny przed uszkodzeniem oraz dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy zaproponowano sposób skierowania strumienia tnącego do wanny przez pakiet blach ułożonych pod kątem. Blachy refleksyjne o grubości 20 mm ułożono szeregowo. Dodatkowo ustalono dystans o wartości 2mm pomiędzy kolejnymi blachami. Dystans zapewniał zwiększone tłumienie energii strumienia.

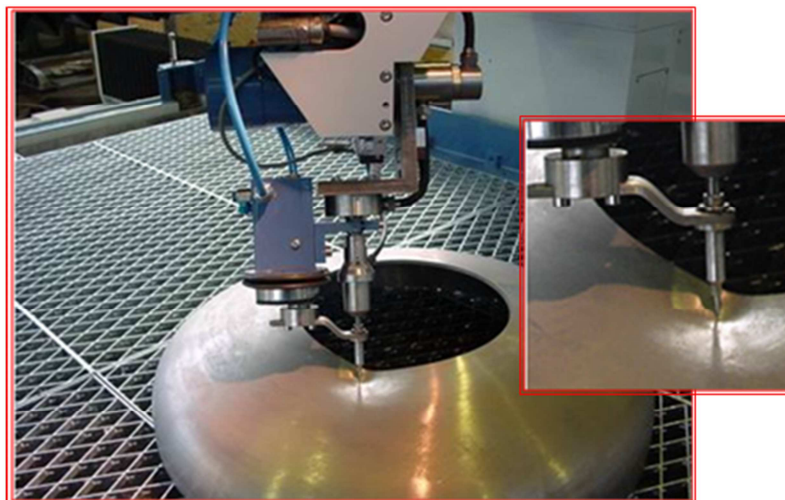
Wielkość przedmiotu obrabianego nie pozwalała na zdefiniowanie ścieżki głowicy dla wszystkich otworów wokół pierścienia, ze względu na ograniczoną strefę obróbki na stole (maszyna Waterjet o rozmiarze stołu 1500·2000mm). W tym celu zbudowano przyrząd mocujący pierścień z funkcją podziału koła, zadaniem którego było obracanie pierścieniem o zadaną ilość otworów.

Wstępne testy wykonywania otworów na pierścieniu pozwoliły na ocenę konstrukcji przyrządu mocującego pierścień. Przyrząd mocujący składał się: z części nieruchomej - pakiet blach kierujących strumień do wanny i z części ruchomej - przyrząd do mocowania przedmiotu umożliwiającej jego obrót przez podział koła. Podział koła pierścienia polegał na tym, że co pięć otworów przedmiot wykonywał obrót, natomiast program sterujący głowicą realizował cykl cięcia pięciu otworów ze zwłoką czasową na podział koła.

5. KOREKCJA KODU NC DLA ZAPEWNIENIA STAŁEGO DYSTANSU, NA PRZYKŁADZIE OBRÓBKII PIERŚCIENI POD MOCOWANIE ŁOPATEK

Kolejne trudności obróbki to konieczność zachowania stałego odstępów pomiędzy powierzchnią pierścienia a końcówką dyszy ścierniej głowicy tnącej. Ze względu na tolerancje produkcyjne przedmiotu, przejazd głowicy tnącej, na podstawie programu sterującego opartego na modelu CAD, może powodować odchylenie względem rzeczywistej powierzchni pierścienia. To mogło powodować niebezpieczeństwo kolizji przedmiotu z głowicą tnącą oraz niestałość odległości końcówki dyszy od przedmiotu, od której zależą niedokładności wymiaru konturu. W celu zabezpieczenia przed tymi niekorzystnymi sytuacjami zaproponowano specjalny system 3D odstępów.

W celu zapewnienia zachowania stałego odstępów pomiędzy powierzchnią pierścienia a końcówką dyszy ścierniej zaproponowane zostało rozwiązanie firmy H.G. Ridder tzw. *system odstępów 3D* – rys. 10. W celu uwzględnienia odchyłek w systemie programowania 3D zastosowano *system odstępów 3D*. Na głowicy tnącej zamiast dyszy cięcia zamontowano czujnik pomiarowy. Zadaniem czujnika pomiarowego było śledzenie konturu 3D z wcześniej zdefiniowanymi parametrami i skonfrontowanie odchylenia wymiaru zadanego i rzeczywistego. Po wykonaniu przejazdu po ścieżce programowej sterujący kod NC zanalizowany został przez specjalne oprogramowanie, a różnice wymiarów dołożone jako wartość korygująca.



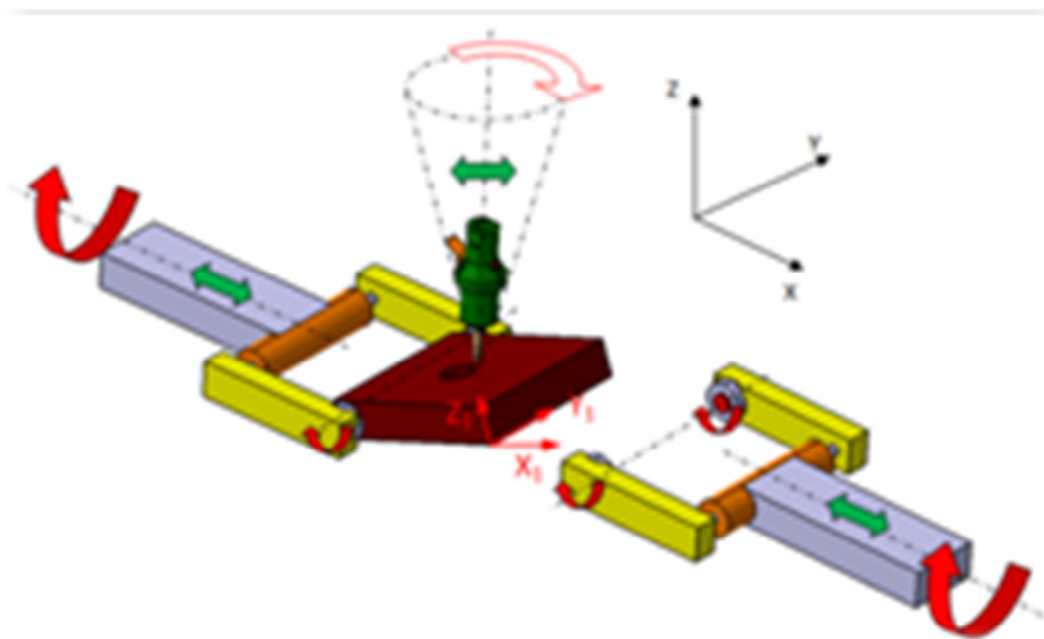
Rys. 10. Automatyczny system odstępów 3D do cięcia strumieniem wody (WARICUT waterjet systems, H.G. RIDDER GmbH) [2]

Fig. 10. 3D distance automatic system for waterjet cutting (WARICUT waterjet systems, H.G. RIDDER GmbH) [2]

Po takim sposobie przejazdu zdjęto czujnik pomiarowy i zamocowano dyszę wodną. Nowo wygenerowany program w zakresie zmian pozycji głowicy nad przedmiotem zapewniał stałą odległość pomiędzy końcówką dyszy a powierzchnią, tym samym zapewniając odpowiednią dokładność wymiarową dla wycinanego konturu.

6. MOŻLIWE KIERUNKI ROZWOJU 5-OSIOWEGO CIĘCIA METODĄ WATERJET

Ze względu na trudności odpowiedniego ustawienia głowicy w taki sposób, aby strefa po cięciu była bezpieczna, powstają pomysły rozwiązań manipulowania przedmiotem, aby w efekcie końcowym strumień był zawsze bezpiecznie skierowany do wanny. Interesującym przykładem, jest zastosowanie dwóch chwytaków naprzemiennie mocujących przedmiot obrabiany i manipulowanie przedmiotem względem głowicy tnącej. Takie rozwiązanie znacznie poszerzyłoby zastosowanie obróbki wodno-ściernej w technice trójwymiarowej praktycznie bez żadnych ograniczeń. Na rys. 11 przedstawiono ideę takiego szybkiego kształtowania przedmiotu metodą wodno-ściernego z przejmowaniem go przez dwa chwytaki. Istotą takiego sterowania jest przejście lokalnego układu współrzędnych X_1 , Y_1 , Z_1 samego przedmiotu przez głowicę tnącą. Jest to warunek, który umożliwiłby zapewnienie stałej odległości końcówki dyszy tnącej od górnej powierzchni przedmiotu obrabianego. Dodatkowo sterowanie głowicą tnącą, dzięki informacjom o położeniu przedmiotu obrabianego, zabezpiecza przed niepożądaną kolizją narzędzia z przedmiotem obrabianym.



Rys. 11. Idea szybkiego kształtowania przedmiotu w technice 3D metodą wodną-ścierną
Fig. 11. The idea of a rapid development of the workpiece in 3D using the abrasive waterjet

Powyższe rozwiązanie przedstawia alternatywne podejście do cięcia 5-osioowego. Jednak z powodu dużych obciążeń oddziałujących na układy mechaniczne napędów wynikających z sił bezwładności, przedstawiony system po krótkim okresie użytkowania ulegnie uszkodzeniu. Dlatego takie zrobotyzowane urządzenia stosowane mogą być dla przedmiotów o bardzo małej masie.

7. PODSUMOWANIE

Ograniczenia pozycjonowania narzędzia względem przedmiotu wynikające z istoty obróbki wodno-ścierniej nie wykluczają zastosowania tej metody w szybkim wytwarzaniu prototypów, chociaż odbywa się to w ograniczonym zakresie i tylko dla pojedynczego elementu. Obróbka wodno-ścierna jest stosowana do szerokiej gamy materiałów, praktycznie z nielicznymi tylko wyjątkami. Należy zwrócić uwagę, że zaletą obróbki wodno-ścierniej jest brak oddziaływania cieplnego. To pozwala na jej zastosowanie również do kształtowania przedmiotów z materiałów wrażliwych na ciepło, z punktu widzenia zmian strukturalnych, np. tworzywa sztuczne i materiały po ulepszeniu cieplnym.

Należy zaznaczyć, że metoda wodno-ścierna z zastosowaniem obróbki musi uwzględniać przepisy zachowania bezpieczeństwa maszyny i otoczenia, co często wymaga zastosowania specjalnych przyrządów mocujących czy manipulatorów, które uchronią przed niebezpiecznymi sytuacjami.

Metoda wodno-ścierna umożliwi zastosowanie specjalnych systemów kontrolujących program sterujący zapewniając najwyższą jakość obróbki. Symulacja obróbki prowadzonej na sucho pozwala na bezpośrednią korekcję położenia narzędzia względem przedmiotu przed obróbką, już po zaprogramowaniu maszyny.

LITERATURA

- [1] BABU RAO D., BASKEY D., RAWAT R.S., 2009, *Water Jet Cutter: An Efficient Tool for Composite Product Development*, National Conference on Scientific Achievements of SC & ST Scientists & Technologists, 14–16 April 2009, National Aerospace Laboratories, Bangalore-17, 104-107.
- [2] http://www.waterjet-ridder.com/en_waricut_hwm.php, WATERJET WARICUT typu HWM-P1520/1
- [3] <http://www.ridder.de/>, 2009, H.G. RIDDER - Automatisierungs-GmbH, Hannover Messe.
- [4] http://www.waterjet-ridder.pl/pl_waricut_waricam.php,

ABRASIVE WATERJET MACHINING APPLICATION FOR RAPID PROTOTYPING

The rapid prototyping with the application of high pressure abrasive waterjet cutting technology is determined by the possibilities of the cut head manipulation. The article shows the restrains of the cut head manipulation. The increase of possibility can achieve by the workpiece manipulation during the process. At presents on the industry market exists technologies, where prototype performance is associated with production once the whole assemble with moving parts. Therefore it should be marked that prototyping by using the abrasive waterjet method can be used only for single part of the assemble. The article shows modern relative manipulation method once by cut head and workpiece by using the abrasive waterjet machining for final shape of workpiece (prototype) performance.