

Dr inż. Jan KACZMAREK (COMMON S.A.),  
mgr inż. Sebastian LANGE (COMMON S.A.),  
dr inż. Robert ŚWIĘCIK (Politechnika Łódzka),  
mgr inż. Artur ŻURAWSKI (COMMON S.A.):

## **IDENTYFIKACJA BŁĘDÓW PIONOWEGO CENTRUM FREZARSKIEGO ZA POMOCĄ SYSTEMU BALL - BAR ORAZ ICH KOREKCJA POPRZEZ POZIOMOWANIE OBRABIARKI**

### Streszczenie

Celem badań jest przeprowadzenie regeneracji formy wtryskowej na obrabiarkie CNC w procesie obróbki spełniającej określone wymagania dotyczące błędów kształtu i położenia. W publikacji przedstawiono wyniki badań diagnostycznych pionowego centrum frezarskiego CNC. Zidentyfikowano istotne błędy wpływające na dokładność wymiarowo-kształtową z użyciem kinematycznego pręta teleskopowo-kulkowego typu ballbar. Omówiono przyczyny powstawania błędów i dokonano ich korekcji poprzez dokładne poziomowanie obrabiarki.

**Słowa kluczowe:** obrabiarka CNC, dokładność geometryczna obrabiarki, diagnostyka obrabiarek, odchyłka, błąd okrągłości, odchyłka prostopadłości osi, ballbar, kompensacja błędów, regeneracja

## **VERTICAL CENTER ERRORS IDENTIFICATION AND THEIR CORECTION BY THE BALLBAR SYSTEM**

### Abstract

The purpose of the research is to regenerate injection mold on the CNC machine , ensuring that machining meets certain requirements concerning the shape and position errors . This publication presents the results of diagnostic tests CNC vertical milling center . Significant shape and dimensional accuracy error have been identified by the telescoping Ballbar systems. The sources of errors have been discussed, and correction has been made through accurate leveling of the machine.

**Keywords:** CNC machine, geometrical accuracy of the machine, machine diagnostic, error, roundness error, squareness error, ballbar, error compensation, regeneration

# **IDENTYFIKACJA BŁĘDÓW PIONOWEGO CENTRUM FREZARSKIEGO ZA POMOCĄ SYSTEMU BALLBAR ORAZ ICH KOREKCJA POPRZEZ POZIOMOWANIE OBRABIARKI**

Jan KACZMAREK<sup>1</sup>, Sebastian LANGE<sup>1</sup>, Robert ŚWIĘCIK<sup>2</sup>, Artur ŻURAWSKI<sup>1</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

Współczesny przemysł w dużym stopniu opiera się o obróbkę skrawaniem z wykorzystaniem, której kształtuje się coraz większą liczbę części maszyn i urządzeń. Obecnie obserwuje się tendencję do zwiększania wydajności obróbki, skrócenia jego czasu, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności kształtowo-wymiarowej realizowanych operacji obróbkowych.

Szybkie skrawanie materiału i możliwość wytwarzania skomplikowanych elementów to niewątpliwie atuty współczesnych obrabiarek CNC. Dokładność obrabiarki zależy w głównej mierze od błędów powodowanych przez odkształcenia cieplne, siły skrawania, ciężar elementów, błędów geometrycznych zespołów obrabiarki itd. Błędy te można znacząco redukować, ale nie jest możliwe ich całkowite wyeliminowanie [3].

Redukcję błędów związanych z zarysem geometrycznym, przy zachowaniu maksymalnych wskaźników jakościowych wyrobu, można osiągnąć stosując szybką i częstą diagnostykę obrabiarek CNC [4]. Diagnostyka stanu technicznego obrabiarek sterowanych numerycznie jest dość ważnym zagadnieniem, które rozpatrywane powinno być nie tylko w przypadkach awarii czy przeglądów okresowych, ale także podczas wyboru obrabiarki do realizacji odpowiednich zadań technologicznych.

Istnieje kilka sposobów sprawdzania dokładności obrabiarek. Bazują one na pomiarach dokładności geometrycznej obrabiarki [2,4]. Najbardziej rozpowszechnionymi metodami kontroli obrabiarek są metody wykorzystujące interferometrię laserową

---

<sup>1</sup> COMMON S.A., ul. Aleksandrowska 67/93, 91-205 Łódź (www.common.pl)

<sup>2</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

[6] oraz systemy diagnostyczne, np. typu QC10 Ballbar firmy Renishaw, czy też Cross-Grid firmy Heidenhain [1,3,11]. Są one dość powszechnie stosowane w przemyśle i pozwalają na wyznaczenie kluczowych parametrów obrabiarek. Pozwalają również na ich monitorowanie, co wpływa na zmniejszenie ryzyka produkcji braków i ponoszenia start.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań diagnostycznych pionowego centrum frezarskiego CNC. Diagnostykę stanu obrabiarki przeprowadzono w związku z koniecznością regeneracji formy wtryskowej, przy zapewnieniu obróbki spełniającej określone wymagania dotyczące błędów kształtu i położenia. Przed wykonaniem regeneracji tej formy zidentyfikowano istotne błędy, wpływające na dokładność wymiarowo-kształtową, za pomocą kinematycznego pręta teleskopowo-kulkowego Ballbar. Omówiono przyczyny powstawania błędów i dokonano ich korekcji poprzez dokładne poziomowanie obrabiarki.

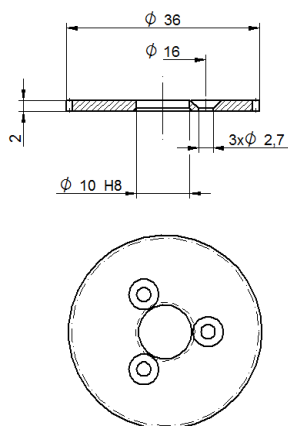
## 2. METODYKA I ZAKRES PROWADZONYCH PRAC

Pionowe centrum frezarskie CNC powinno charakteryzować się dokładnym odwzorowaniem zadanej trajektorii ruchu, gdyż ma to bezpośredni związek z otrzymywanymi cechami geometrycznymi wykonywanego przedmiotu [12]. Konieczność sprawdzenia obrabiarki pod kątem dokładności odtwarzania trajektorii wynika z zadania produkcyjnego, jakim była regeneracja formy wtryskowej do wytwarzania kół zębatach z tworzywa sztucznego.

Widok formy wtryskowej przedstawiono na rysunku 1, a wymiary koła zębatego na rysunku 2.



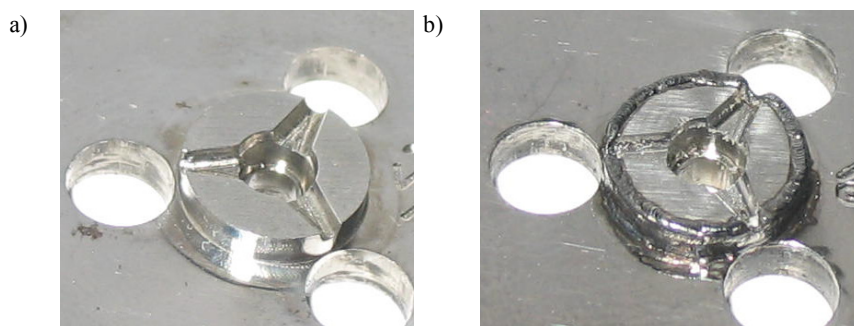
Rys. 1. Forma wtryskowa



Rys. 2. Rysunek poglądowy koła zębatego

Każda forma w trakcie eksploatacji ulega naturalnemu zużyciu, które jest przyczyną zmian w geometrii gotowego wyrobu. W takich przypadkach, za każdym razem konieczne jest dokonanie wyboru: wykonanie nowej formy lub jej części, czy też naprawa? Najczęściej pojawiające się wady obejmują niewielkie fragmenty formy. Czas potrzebny na wykonanie nowego elementu lub wkładki oraz koszty odgrywają kluczową rolę. Zatem naprawa formy poprzez napawanie wydaje się być korzystną alternatywą [7].

W przypadku regenerowanej formy, wymagane jest zwiększenie średnicy wewnętrznej pasowanego otworu  $\varnothing 10H8$  koła zębatego (rys. 2). Ta zmiana powoduje konieczność zwiększenia wymiaru średnicy rdzenia formującego (rys. 3a) w formie wtryskowej. Operację tę wykonano poprzez napawanie materiału na regenerowaną powierzchnię (rys. 3b) i powtórna obróbkę na obrabiarce CNC.



Rys. 3. Rdzeń formujący formy wtryskowej: a) widok przed regeneracją, b) widok po regeneracji napawaniem

Wkładki formujące formy wtryskowej wykonano z materiału 1.2311 ulepszonego do twardości 50HRC. Napawanie przeprowadzono na spawarce laserowej firmy Sisma: SWA150, drutem spawalniczym EL-TOOL 52L o twardości (46-52 HRC). Zastosowanie tego rodzaju napawania nie powoduje deformacji cieplnych w tak małych elementach form wtryskowych. Niewielki wpływ temperatury w tym procesie jest wynikiem krótkich impulsów oraz kontroli czasu topienia [7].

Regenerację wkładki formy wtryskowej przeprowadzono na pionowym centrum frezarskim MoriSeiki NV5000. Obrabiarka ta wyposażona jest w liniały pomiarowe na każdej z osi. Zastosowano metodę frezowania z interpolacją kołową.

Ze względu na wymagania geometrii i kształtu docelowego otworu w kole zębatym, niezbędne było sprawdzenie obrabiarki w zakresie możliwości dokładnej obróbki, przed wykonaniem procesu skrawania.

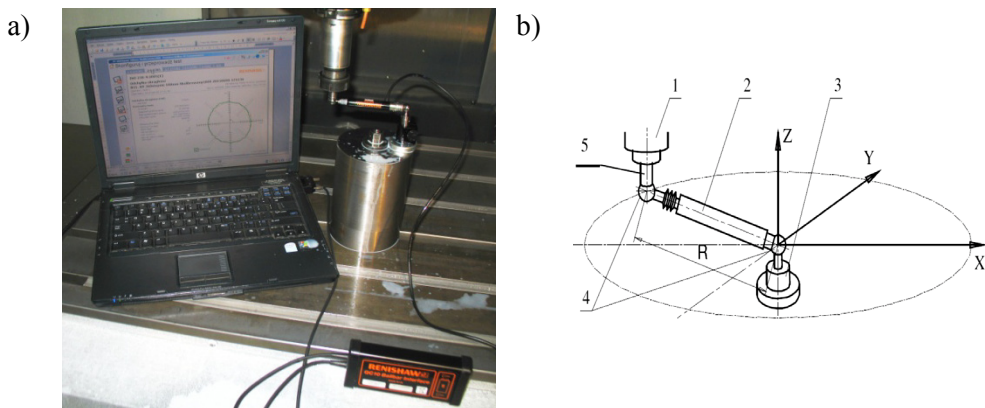
### 3. IDENTYFIKACJA BŁĘDÓW PIONOWEGO CENTRUM FREZARSKIEGO CNC ORAZ SPOSOBY ICH KOMPENSACJI

Każda obrabiarka ma określoną dokładność, z jaką może wytwarzać przedmioty. Nie jest możliwe wyeliminowanie wszystkich błędów maszyny. Zastosowanie metod kompensacji błędów może przyczynić się do poprawy dokładności obróbki, nawet przy wykorzystaniu obrabiarki o nominalnie mniejszej dokładności [3,8].

#### 3.1. BADANIE DOKŁADNOŚCI OBRABIARKI TESTEM QC10 BALLBAR

System diagnostyczny QC10 Ballbar o dokładności pomiaru  $0,7\mu\text{m}$  oraz rozdzielczość  $0,1\mu\text{m}$  umożliwia wykrywanie błędów geometrycznych, które występują w układach napędowych obrabiarek CNC. Podczas testu diagnostycznego z wykorzystaniem tego systemu, możliwe jest identyfikowanie parametrów obrabiarki, takich jak: odchyłka okrągłości, odchyłka prostopadłości, błąd nawrotu, luz nawrotny badanej osi oraz luz poprzeczny [5,10]. Szybki test QC10 Ballbar pozwala na pomiar odchyłki okrągłości interpolacji kołowej pionowego centrum frezarskiego. Oprogramowanie diagnostyczne firmy Renishaw umożliwia identyfikację wartości poszczególnych błędów składowych oraz ich procentowy udział w całkowitej odchyłce okrągłości. Dodatkowo oferuje rozbudowaną bazę pomocy z podpowiedziami przyczyn błędów i sposobami ich rozwiązania.

Na rysunku 4 przedstawiono sondę diagnostyczną Ballbar zamocowaną na stole obrabiarki oraz schematycznie - zasadę działania testu.



Rys. 4. Zasada pomiaru diagnostycznego frezarki CNC szybkim testem QC10 Ballbar: a) widok ogólny, b) schemat i zasada przygotowania do testu [4]; 1 – wrzeciono frezarki, 2 – przetwornik pomiarowy (teleskopowy pręt kinematyczny), 3 – podstawka magnetyczna centrująca, 4 – końcówki kuliste, 5 – uchwyt magnetyczny, R – promień rysunku nominalnego

Pomiar diagnostyczny pionowego centrum frezarskiego przeprowadzono przy prędkości posuwu stołu  $v_f = 1000$  mm/min. Wyniki pomiaru analizowane były w dwóch wariantach: w pierwszym według diagnostyki zaproponowanej przez firmę Renishaw, w drugim zaś, według normy ISO 230-4 (powszechnie stosowanej w diagnostyce nowych obrabiarek). Wyniki pomiarów z przeprowadzonego testu przedstawiono na rysunku 5.

ISO 230-4:2005(E)

RENISHAW

Odchyłka okrągłości

B6. XY 360stopnie 100mm Skalibrowany1000 20150608-163517

Operator: tech-1  
Data testu: 2015-cze-08 16:35:17

Obrabiarka: MORI NV5000 COMMON  
QC10: H33335, Data ostatniej kalibracji: 2011-07-25

Odchyłka okrągłości (CCW)

Wartość 8,1µm

Parametry testu

Promień 100,000mm

Częstota próbkowania 41,667Hz

Zaprogramowany posuw 1000,0mm/min

Kierunek ruchu CCW (przeciw do

kier ruchu wskaz

zegara)

Plaszczyzna testu XY

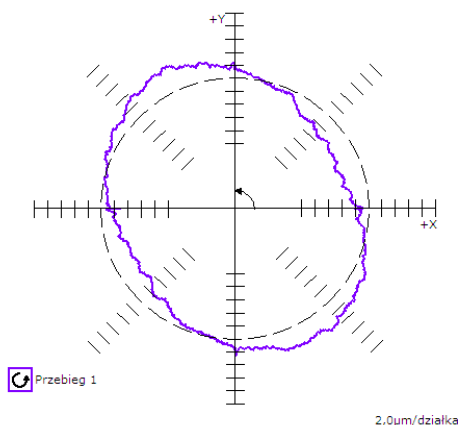
Centrum okręgu testowego

Kąt początkowy 0°

Kąt końcowy 360°

Zakres kątowy biegu 180°

jałowego



Rys. 5. Wyniki pomiaru wstępnego badania obrabiarki w/g normy ISO 230-4

Podczas analizy wyników pomiaru centrum frezarskiego skoncentrowano się na błędzie okrągłości, który wynosił  $8,4 \mu\text{m}$  (test w/g diagnostyki zaproponowanej przez Renishaw) oraz  $8,1 \mu\text{m}$  (test w/g normy ISO230-4). Dominującą składową analizowanego błędu był błąd prostopadłości, którego wartość wynosiła  $57,7 \mu\text{m/m}$  (43% udziału w całkowitym błędzie) i skalowania, czyli różnica odchyłki pozycjonowania –  $6,3 \mu\text{m}$  (24%). Brak prostopadłości osi przyczynia się również do istotnych problemów związanych z kształtowaniem powierzchni cylindrycznych, zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych. Występowanie odchyłki prostopadłości może wynikać z niewłaściwego wzajemnego ustawienia prowadnic osi X i Y, zużycia prowadnic lub ich odkształceń sprężystych oraz cieplnych. Przyczyną powstawania odchyłki prostopadłości może być również niewłaściwe lub nieprecyzyjne wypoziomowanie stołu obrabiarki [12].

Błąd skalowania natomiast związany jest z niewłaściwą skalą (podziałką) w układzie pomiarowym. Przy zadanym przemieszczeniu poszczególne osie wykonują za duże lub za małe przemieszczenia. Ponieważ błąd ten może być związany również

z niewypoziomowaniem stołu obrabiarki, należy badania przeprowadzić z różnymi wartościami pozycji zadanej w osi Z [10]. Jeśli otrzymane wyniki nie wykazują istotnych różnic, wówczas może świadczyć to tylko o błędzie skali. Usunięcie tego błędu możliwe jest poprzez kompensację błędu osi w układzie sterowania. Wymaga to jednak wykonania dokładnych pomiarów pozycjonowania osi w całym zakresie jej ruchu, np. interferometrem laserowym.

Przeprowadzono dodatkowe pomiary diagnostyczne, zmieniając położenie osi Z, przyjmując wartość równą 200 mm (rys. 4a). Celem tego dodatkowego testu była możliwość weryfikacji źródła błędu. Wyniki tych pomiarów wskazują na istotne pogorszenie się wartości błędów prostopadłości i skalowania. I tak błąd prostopadłości był większy o około 16%, natomiast błąd skalowania o około 24% , w porównaniu do wartości błędów uzyskanych podczas pierwotnie przeprowadzonego testu ( $Z=0$ ).

Uzyskane wyniki mogą sugerować, że czynnikiem istotnie wpływającym na otrzymywane błędy prostopadłości i skalowania, jest niewłaściwe wypoziomowanie obrabiarki. Aby to zweryfikować należy sprawdzić poziomicowanie obrabiarki.

### 3.2. KOREKCJA BŁĘDÓW OBRABIARKI

Poziomicowanie centrum frezarskiego przeprowadzono za pomocą poziomiccy o dokładności: 0,02mm/m, zgodnie z procedurą producenta obrabiarki. Korpus obrabiarki NV5000 posadowiony jest na ośmiu stopach. Poziomicowanie polegało na regulacji poszczególnych punktów podparcia korpusu obrabiarki. Po wykonaniu tych czynności przeprowadzono ponownie test dokładności interpolacji kołowej Ballbar.

Na podstawie tego testu uzyskano odchyłkę okrągłości o wartości 4,8 $\mu$ m. Należy zaznaczyć, że wynik ten jest bardzo dobrym rezultatem jednak jest większy od wartości 3,4  $\mu$ m, jaką osiągnął producent podczas odbioru obrabiarki. Podjęto próbę dodatkowych czynności regulacyjnych i powtórnie wykonano test interpolacji kołowej na poziomie stołu obrabiarki, z prędkością posuwu stołu  $v_t=1000$  mm/min. Uzyskano odchyłkę okrągłości o wartości 2,8 $\mu$ m w/g normy ISO 230-4. Wyniki te przedstawiono na rysunku 6. Pozostałe parametry takie jak: błąd nawrotu, odchyłka okresowa w osi X i Y, nie uległa zmianie. Taki wynik pozwalał na przeprowadzenie obróbki regeneracji powierzchni formujących przy pomocy interpolacji kołowej.

Po przeprowadzeniu wszystkich regulacji, w wyniku których osiągnięto zamierzony rezultat okrągłości, przeprowadzono obróbkę wkładki formującej celem usunięcia materiału nałożonego podczas napawania.

**Odchyłka okrągłości  
BS15, XY 360stopnie 100mm Skalibrowany1000 20150608-175429**

Operator: tech-1

Obrabiarka: MORI NV5000 COMMON

Data testu: 2015-cze-08 17:54:29

QC10: H33335, Data ostatniej kalibracji: 2011-07-25

**Odchyłka okrągłości (CCW)**

Wartość 2,8µm

**Parametry testu**

Promień 100,0000mm

Częstość próbkowania 41,567Hz

Zaprogramowany posuw 1000,0mm/min

Kierunek ruchu CCW (przeciw do

kierunku ruchu wskaz

zegara) XY

Plaszczyzna testu XY

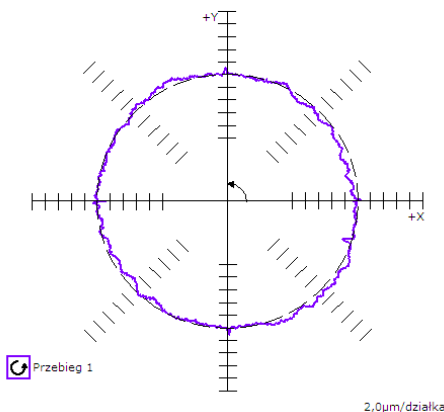
Centrum okręgu testowego

Kąt początkowy 0°

Kąt końcowy 360°

Zakres katowy biegu 180°

jałowego



Rys. 6. Odchyłka okrągłości po wykonaniu poziomowania w/g normy ISO 230-4

Rdzeń formujący po obróbce na centrum frezarskim został poddany kontroli na maszynie pomiarowej CMM firmy Nikon Metrology LKV10.7.6. Maszynę pomiarową szerzej zaprezentowano w pracy [9]. Błąd okrągłości regenerowanego rdzenia wyniósł 3,2 µm, przy zachowaniu wymaganej średnicy. Złożoną formę przekazano do użytkownika, w wyniku czego wytworzono koła zębate zgodne z wymaganą tolerancją rysunkową.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na przykładzie regeneracji wkładki formującej do formy wtryskowej, przedstawiono sposób szybkiej diagnostyki obrabiarki CNC przy pomocy testu Ballbar. Zaprezentowano także próbę korekcji błędów geometrii, wynikających z nieprawidłowego poziomowania obrabiarki. Postępowanie takie jest szczególnie ważne w produkcji jednostkowej, gdzie kluczowe jest wykonanie prawidłowej obróbki za pierwszym razem. Przedstawiono jak ważnym czynnikiem jest prawidłowe poziomowanie obrabiarki a w związku z tym dla zachowania dokładności w długim okresie czasu prawidłowy i stabilny fundament obrabiarki. Autorzy artykułu zwracają szczególną uwagę na ten aspekt, bardzo często nie doceniany wśród użytkowników i serwisantów maszyn.

Pozomowanie obrabiarki przy pomocy poziomicy nie zawsze prowadzi do możliwie najlepszych rezultatów. Doregulowanie śrub w stopach korpusu obrabiarki, na podstawie wyników pomiaru z testu Ballbar może być uzupełnieniem możliwości



regulacyjnych, których celem jest osiągnięcie możliwie najmniejszych wartości odchyłki okrągłości. Im korpus więcej posiada podpór, tym większe możliwości stwarza regulacja, kosztem zwiększonej pracochłonności, dlatego nie każda obrabiarka będzie podatna na ten rodzaj regulacji

Zaprezentowany przykład opierał się na założeniu nie ingerowania w kinematykę maszyny oraz software sterujący napędami obrabiarki. Zaznaczyć należy, że przedstawione pomiary wykonywane były w określonym miejscu na stole obrabiarki i nie dają pełnego obrazu błędów w całej przestrzeni obróbczej.

Dzięki korekcji błędów poprzez poziomowanie, mamy możliwość podnieść dokładność obróbki. Warto nadmienić, że tak dobre rezultaty można było uzyskać m.in. dzięki wyposażeniu obrabiarki w liniały osi. Do utrzymania najwyższych możliwych parametrów geometrycznych, wskazana jest konieczność regularnej diagnostyki obrabiarki.

#### LITERATURA

- [1] MAJDA P., *Pomiary i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*. Inżynieria Maszyn 2011; 16 (1-2), 126-134.
- [2] HONCZARENKO J., KWAŚNIEWICZ J., *Nowe systemy pomiarowe posprawdzania dokładności obrabiarek CNC*. Mechanik 2008; 12, 1012-1016.
- [3] TUREK P., MODRZYCKI W., JĘDRZEJEWSKI J., *Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn 2010; 15 (1-2), 130-149.
- [4] JÓZWIK J., PIEŚKO P., KRAJEWSKI G., *Ocena testu QC10 do kontroli Of-Line obrabiarek sterowanych numerycznie*. Eksploatacja i Niezawodność, 2010; 3, 10-20.
- [5] KOWALSKI T., JASTRZĘBSKI R., SZEPEKE A., OSÓWNIAK P., *Wyznaczanie dokładności urządzeń technologicznych metodą interpolacji kołowej*. Technologia i Automatykacja Montażu. 2010; 2, 14-21.
- [6] IWASAWA K., IWAMA A., MITSUI K., *Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and rotary encoder*. Precision Engineering, 2004; 28, 4: 399-408.
- [7] SZYMAŃSKI A.M., *Naprawy i regeneracja form wtryskowych*. Mechanik 2005; 3, 186-188.
- [8] RATAJCZYK E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005, Warszawa.
- [9] KACZMAREK J., ŚWIĘCIK R., ŻURAWSKI A., *Analiza dokładności obróbki na centrum frezarskim z wykorzystaniem sondy pomiaru przedmiotu*. W: Obróbka Skrawaniem. T.5. Nauka a Przemysł, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Opole, 2011, 311–318.
- [10] Materiały informacyjne firmy Renishaw.
- [11] TUREK P., KWAŚNY W., JĘDRZEJEWSKI J., *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*. Inżynieria Maszyn, 2010; 7-37.
- [12] JÓZWIK J. *Ocena odchyłki prostopadłości osi obrabiarki sterowanej numerycznie z wykorzystaniem systemu QC10 Ballbar*, Postępy Nauki i Techniki Nr4, 2010; 91-102.