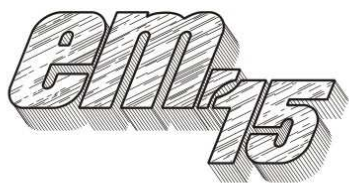


XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Znaczenie specyficznych cech systemów CAD/CAM dla poprawy dokładności wytwarzania powierzchni prostokreślnych metodą WEDM

Significance of specific CAD/CAM features for the accuracy improvement of ruled surfaces shaped by the WEDM

ZBIGNIEW LECHNIAK

Przedstawiono wyniki badań powierzchni o pochyleniach zmieniających się w dużym zakresie (od 0 do 30°). Wyniki pomiarów po obróbce WEDM ujawniły trend utraty uzyskiwanych dokładności w miarę wzrostu wartości kątów pochylenia powierzchni. Opracowano narzędzia do podniesienia dokładności wytwarzania powierzchni metodą korekty programu obróbkowego. Aby metoda mogła znaleźć zastosowania przemysłowe, niezbędne było rozpoznanie specyficznych cech systemów CAD/CAM w celu ujednoczenia sposobu uzyskiwania programu (kodu) obróbkowego dla wycinarek sterowanych numerycznie.

SŁOWA KLUCZOWE: WEDM, obróbka wieloosiowa, dokładność wytwarzania, CAD/CAM.

The investigation of highly sloped ruled surfaces (at angles from 0 to 30 deg.) was presented. The measurement of the WEDM-ed surfaces revealed accuracy deterioration, progressing with the surface slope increase. The tools for accuracy improvement, employing a method the NC part program correction were developed. To promote the industrial method application, it was necessary to recognize specific features of the relevant CAD/CAM systems in order to standardize the NC part program generation procedure for the CNC wire electrical discharge machines.

KEYWORDS: WEDM, multi-axis machining, manufacturing accuracy, CAD/CAM.

Wstęp

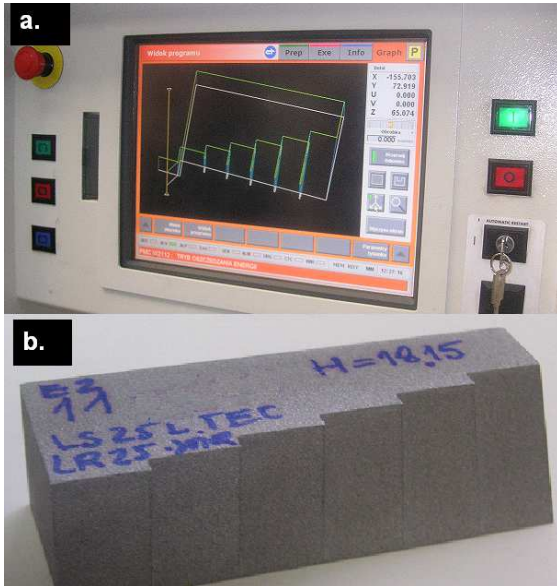
Precyzyjna obróbka przedmiotów zawierających powierzchnie prostokreślnie, szczególnie tych o znacznym

i dynamicznie zmieniającym się pochyleniu ścian bocznych w stosunku do płaszczyzny podstawy jest tą dziedziną zastosowań metody wycinania elektroerozyjnego (ang. WEDM – *wire electrical discharge machining*), w której wyraźnie ujawnia się przewaga technologiczna WEDM nad konkurencyjnymi procesami, a w szczególności nad obróbką skrawaniem. Mimo to, w miarę powiększania się lokalnego kąta nachylenia powierzchni obrabianej w stosunku do płaszczyzny stołu obrabiarki, następuje utrata dokładności obróbki oraz pogorszenie jakości uzyskiwanej powierzchni. W niniejszej pracy bliżej przyjrano się temu zjawisku i wykonano szereg eksperymentów mających na celu zauważenie spodziewanych prawidłowości dotyczących utraty dokładności powierzchni po obróbce oraz zaproponowano uniwersalną metodę poprawy tej dokładności.

Problem utraty dokładności powierzchni pochylnych

Aby zorientować się co do skali utraty dokładności, wykonano badania powierzchni poddanych obróbce WEDM, pochylnych o dyskretnie zwiększające się wartości kątów od położenia pionowego, w zakresie od 0 do 30 stopni. Za miarę takiej dokładności przyjęto odchylenie katowe i liniowe od nominalnego kształtu opisanego w postaci modelu w systemie CAD/CAM. Badano też parametry struktury geometrycznej uzyskanej powierzchni – chropowatość i falistość. Stanowisko badawcze składało się m.in. z wycinarki elektroerozyjnej Agie Charmilles, pracującej z zanurzeniem przedmiotu w dielektryku w trakcie obróbki, na której wytwarzano próbki ze stali narzędziowej i stopu aluminium PA9N o handlowej nazwie Fortal (rys. 1). Kształt próbek dobrany był tak by kąt pochylenia drutu zmieniał się w maksymalnych dopuszczalnych technologicznie granicach (30 stopni). Wymiary gabarytowe próbek wynosiły 30x60 mm, zaś wysokości próbek miały trzy różne wartości

18,15; 36,30 i 54 mm. Próbkę wytworzono w jednym lub dwóch przejściach obróbkowych, starając się prowadzić proces z maksymalną wydajnością, ustalając automatycznie przez układ sterowania wycinarki. Obróbce podlegały wszystkie ściany próbki przedstawionej na rys. 1, ze względu na chęć uzyskania dokładnych baz przy późniejszych pomiarach próbek.

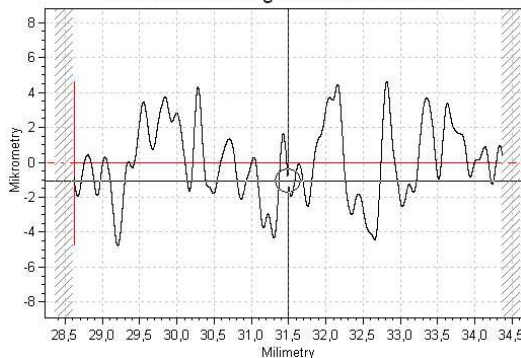


Rys. 1. Obróbka powierzchni o zmiennym pochyleniu: a. widok ekranu układu sterowania wycinarki FI440SLP, b. widok próbki z fortału po obróbce

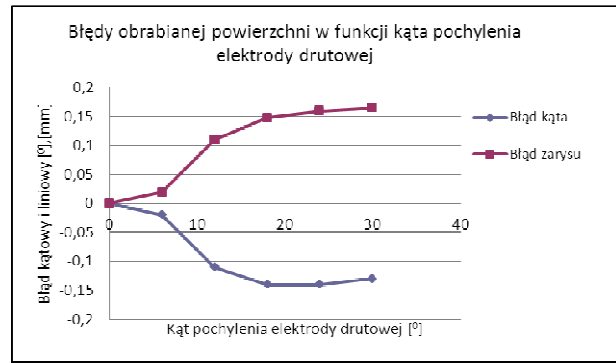
Wyniki pomiarów wskazują na wyraźny, nieliniowy spadek dokładności obróbki w miarę wzrostu kąta pochylenia elektrody drutowej [1]. Z wielu zestawów uzyskanych pomiarów wybrano wyniki pomiarów dla próbki z fortału, zaprezentowane na rys. 3. Dolna krzywa pokazuje niedokładność kąta, zaś górna niedokładność liniową. Zwracają uwagę duże wartości błędów wymiarów liniowych, rzędu 0,15 mm dla kątów pochylenia drutu w przedziale 18-30° [2]. W przypadku kątów pochylenia większych od 18°, dodatkowe przejście obróbkowe zupełnie nie poprawiało jakości powierzchni.



zl-steel-e24-2-0deg - 6 - W/23x0.25mm/G/Prosta LS
zl-steel-e24-2-0deg - 6.1mm/PW/FTS 3 D



Rys. 2. Pomiar falistości powierzchni o zmiennym pochyleniu: a. widok próbki w trakcie pomiaru, b. przykładowy profil falistości próbki stalowej, zastosowano filtr 0,25 mm



Rys. 3. Przebieg kąтового i liniowego błędu kształtu obróbki WEDM w funkcji kąta pochylenia elektrody drutowej

Pomiary prowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej oraz na wysokiej klasy profilometrze Form Talysurf, który oprócz pomiarów chropowatości i falistości, posiada specjalne trzpienie pomiarowe z końcówką stożkową do pomiaru kształtu powierzchni (rys. 2).

Specyficzne cechy wybranych systemów CAD/CAM wytypowanych do realizacji poprawy dokładności

Systemy CAD/CAM oferują definicję powierzchni prostokreślnych w formacie odpowiednim dla prowadzenia drutu po dwóch płaskich krzywych, według zależności, zgodnie z którą powierzchnia prostokreślna $S(t,u)$ może być opisana ogólnym równaniem parametrycznym:

$$S(t,u) = (1 - u)p(t) + uq(t), \quad (1)$$

gdzie: $p(t)$ and $q(t)$ – dwie nie przecinające się krzywe leżące na powierzchni prostokreślniej,
 t, u – parametry opisujące powierzchnię prostokreślną.

W przypadku systemu Creo Parametric v.2.0, taki warunek spełnia powierzchnia typu *Boundary Blend*, która w szczególnym przypadku staje się powierzchnią prostokreślną rozpiętą na dwóch krzywych krawędziowych. W systemie NX v.9 tę funkcję spełnia powierzchnia *mesh surface*, której szczególnym przypadkiem jest *ruled surface*. Wymienione typy powierzchni mogą należeć do klasy rozwijalnych (np. stożek), czyli takich które dają się rozłożyć na płaszczyźnie lub przecinania, lub do klasy nierozwijalnych (np. hiperboloida jednopowłokowa).

Bardziej istotne dla proponowanego projektu poprawy dokładności są cechy modułów CAM w systemach CAD/CAM. W języku APT, w którym najwcześniej opracowano format zbioru danych CLDATA (ang. *Cutter Location Data* lub *Center Line Data*) będący cyfrową reprezentacją trajektorii narzędzia obróbkowego wyznaczoną przez system komputerowego programowania obróbki, każde położenie wzdłuż trajektorii dla obróbek wieloosiowych określone jest przez sześć współrzędnych. Trzy pierwsze określają położenie wybranego punktu narzędzia, zaś trzy pozostałe to wartości cosinusów kierunkowych osi narzędzia w prawoskrętnym układzie współrzędnych. Plik CLDATA jest na ogół nadal stosowany w większości systemów CAD/CAM, lecz jego szczegółowa postać jest różna – są także rozwiązania, w których CLDATA ma postać niejawną, binarną. Przy realizacji proponowanej metody poprawy dokładności jej autor był zmuszony do rezygnacji z takich systemów ze względu na brak niezbędnej dokumentacji. Ciekawe rozwiązania konstrukcji i analizy CLDATA proponowane są w systemie Creo Parametric, szczególnie w kategorii obróbek wieloosiowych. Tabela 1 ukazuje współ-

rzędne należące do trajektorii, które będą poddawane zmianom wynikającym z wcześniejszych pomiarów, zgodnie z algorytmem opisanym we wcześniejszej pracy autora [1, rozdz. 4]. Instrukcja MULTAX/ON inicjuje generowanie wektorów opisanych przez sześć współrzędnych. W systemie Creo Parametric zastosowano rozbudowany podsystem postprocessingu G-Post, zgodnie z którym istnieje możliwość „tuningu” pliku CLDATA z pomocą specjalnego makrojęzyka, tak by uzyskać pożądaną postać programu (kodu) NC. Polecenia SYNCTR oznaczają tu położenie drutu określone przez sposób definiowania płata powierzchni z jej fizycznymi granicami bądź położenie drutu wymuszone przez projektanta w celu jednoznacznego określenia kształtu powierzchni obrabianej metodą WEDM, np. dla uniknięcia niżej opisanego „efektu szpuli”. Inna możliwość konstrukcji CLDATA w systemie Creo, to zapis w postaci dwóch niezależnych trajektorii dla dolnego i górnego zarysu powierzchni prostokątnej (SYNCTR/LOWER i SYNCTR/UPPER) i pozostawienie matematycznego zadania utworzenia ciągu kolejnych położeń drutu prowadzonego wzdłuż dwóch zarysów dla postprocesora [3] [7]. Ukazuje to tabela 2. Proces synchronizacji ruchu górnej i dolnej głowicy wycinarki trwa między poleceniami SYNCTR/ON i SYNCTR/OFF.

Tab. 1. Przykładowy obraz pliku CLDATA dla obróbki wieloosiowej w systemie Creo, w trybie MULTAX

```

$$* Pro/CLfile Version 2.0 - M070
$$-> MFGNO / HC-WEDM-MULTAX-FOUR-VARIETIES
PARTNO / HC-WEDM-MULTAX-FOUR-VARIETIES
MACHIN / UNCX43, 1
UNITS / MM
RAPID
GOTO / -8.5000000000, 0.0000000000, 0.0000000000
FEDRAT / 10.000000, MMPM
MULTAX / ON
GOTO / -12.4874405840, 0.5992067230, 0.0000000000, $
-0.2878359623, 0.0000000000, 0.9576797266
LOAD / WIRE, 1
GOTO / -12.4874405840, 0.5992067230, 0.0000000000, $
-0.2878359623, 0.0000000000, 0.9576797266
GOTO / -12.8877377559, 0.2996033615, 0.0000000000, $
-0.2878359623, 0.0000000000, 0.9576797266
SYNCTR / NEXT, 1
GOTO / -13.2880349277, 0.0000000000, 0.0000000000, $
-0.2878359623, 0.0000000000, 0.9576797266
SYNCTR / NEXT, 2
GOTO / -13.4195230672, -0.0984126078, 0.0000000000, $
-0.2878359623, 0.0000000000, 0.9576797266
GOTO / -14.0991028609, -0.659284980, 0.0000001051, $
-0.2667556008, -0.0143717672, 0.9636570457

```

W systemie NX v.9 (tab. 3) format pliku CLDATA wykazuje różnice formatowania w stosunku do systemu Creo Parametric. Rolą dodatkowego postprocesora-formatera jest doprowadzenie formatu zapisu CLDATA do postaci zastosowanej w APT [1, tab. 1]. Ten format definiuje wprawdzie wysokość płaszczyzn dla zarysu dolnego i górnego (UPPER, LOWER), ale arytmetyczny procesor systemu wylicza przebieg trajektorii pochylonego drutu. W proponowanej metodzie poprawy dokładności, ze zmianą kolejnych położeń drutu nie zmienia się liczba kolejnych położeń, natomiast zmianie ulegną cosinusy kierunkowe kątów wektora osi drutu oraz przebieg trajektorii dolnego zarysu, po którym prowadzony jest drut.

Praktyczne aspekty zastosowań metody do realizacji poprawy dokładności

Operacje wieloosiowego wycinania części o złożonych kształtach niosą wielorakie ryzyko popełnienia błędów programowania trajektorii prowadzących do błędnego odwzorowania powierzchni kształtowanych tą metodą.

Tab. 2. Przykładowy obraz pliku CLDATA dla obróbki wieloosiowej w systemie Creo w trybie LOWER/UPPER

```

$$* Pro/CLfile Version 2.0 - M070
$$-> MFGNO / HC-WEDM-MULTAX-FOUR-VARIETIES
PARTNO / HC-WEDM-MULTAX
MACHIN / UNCX43, 1
UNITS / MM
RAPID
GOTO / -8.5000000000, 0.0000000000, 0.0000000000
SET / UPPER, 30.000000, LOWER, 0.000000
CLDIST / 30.000000
$$-> CSYS / 1.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000,
0.0000000000, $
0.0000000000, 1.0000000000, 0.0000000000,
0.0000000000, $
0.0000000000, 0.0000000000, 1.0000000000,
0.0000000000, $
0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 1.0000000000,
0.0000000000
SYNCTR / ON
SYNCTR / LOWER
LOAD / WIRE, 1
FEDRAT / 10.000000, MMPM
GOTO / -8.5000000000, 0.0000000000, 0.0000000000
GOTO / -13.5000000000, 0.0000000000, 0.0000000000
SYNCTR / NEXT, 1
CIRCLE / -7.4998325555, -7.9998667888, 0.0000000000, $
0.0000000000, 0.0000000000, 1.0000000000, 9.999939000
GOTO / -1.0536345778, -15.6448919445, 0.0000000000
...
SYNCTR / UPPER
GOTO / -22.5166666667, 0.0000000000, 30.0000000000
SYNCTR / NEXT, 1
CIRCLE / -2.1329733802, 0.0004472601, 30.0000000000, $
0.0000000000, 0.0000000000, 1.0000000000, 20.3836932914
GOTO / 2.2249442792, -19.9119485242, 30.0000000000
...

```

Tab. 3. Przykładowy obraz pliku CLDATA dla obróbki wieloosiowej w systemie NX v.9

```

$$ISO
UNITS/MM
TOOL PATH/INTERNAL TRIM
TLDATA/WEDM,0.2000,25.0000,0.0000
MSYS/0.0000,0.0000,0.0000,1.0000000,0.0000000,0.0000000,
0.0000000,1.0000000,0.0000000
$$ centerline data
PAINT/PATH
PAINT/SPEED,10
PAINT/PATH,DASH
PAINT/COLOR,186
FROM/8.2339,4.0882,0.0000,0.0000000,0.0000000,1.0000000
SET/UPPER,25.0000,LOWER,0.0000
LOAD/WIRE
PAINT/PATH
GOTO/8.1348,6.2784,0.0000,-0.0860201,-0.1730045,0.9811575
CUTCOM/LEFT,1
PAINT/COLOR,42
GOTO/10.4944,8.5133,0.0000
PAINT/COLOR,31
GOTO/9.0701,10.0171,0.0000,-0.0603646,-0.1823116,0.9813861
GOTO/6.9944,11.5623,0.0000,-0.0271457,-0.1886893,0.9816616
GOTO/4.6623,12.6835,0.0000,0.0063824,-0.1891591,0.9819257
GOTO/2.1592,13.3397,0.0000,0.0391978,-0.1838181,0.9821784
GOTO/-0.4231,13.5066,0.0000,0.0703229,-0.1729343,0.9824197

```

W przypadku prowadzeniu drutu wzdłuż dwóch krzywych może wystąpić tak zwany „efekt szpuli”, czyli zarysy górny i dolny będą kształtowane prawidłowo, lecz bryła ograniczona powierzchnią rozpiętą między nimi będzie miała charakterystyczne zwężenie tak, jak w przypadku hiperboloidy jednopowłokowej [5]. Inną możliwością błędnego kształtowania powierzchni części będzie tak zwane złobienie (ang. *gouging*) w sytuacji, gdy kształtując jeden fragment powierzchni, naruszamy narzędziem inny fragment powierzchni. Może to np. nastąpić, gdy wartości offsetu drutu są większe niż wartości elementarnych przemieszczeń i wtedy może nastąpić chwilowe odwrócenie zwrotu trajektorii osi drutu prowadzącej do wcinania się drutu w kształtowaną powierzchnię. Inne strategie prowadzenia drutu prowadzące do błędów to nieprawidłowe zdefiniowanie położenia płaszczyzn dla krzywych, po których wzdłużony jest drut. Wówczas w narożach może nastąpić odwrócenie trajektorii drutu i powstaje charakterystyczny obraz błędu podcięcia naroża [6]. Należy także starannie planować procedurę aktywacji offsetu drutu, która zwykle nie następuje w miejscu, lecz wzdłuż pewnego segmentu, który nie może być ponadto równoległy do kolejnego segmentu, na którym wartość offsetu powinna być w pełni rozwinięta. Podczas aktywowania

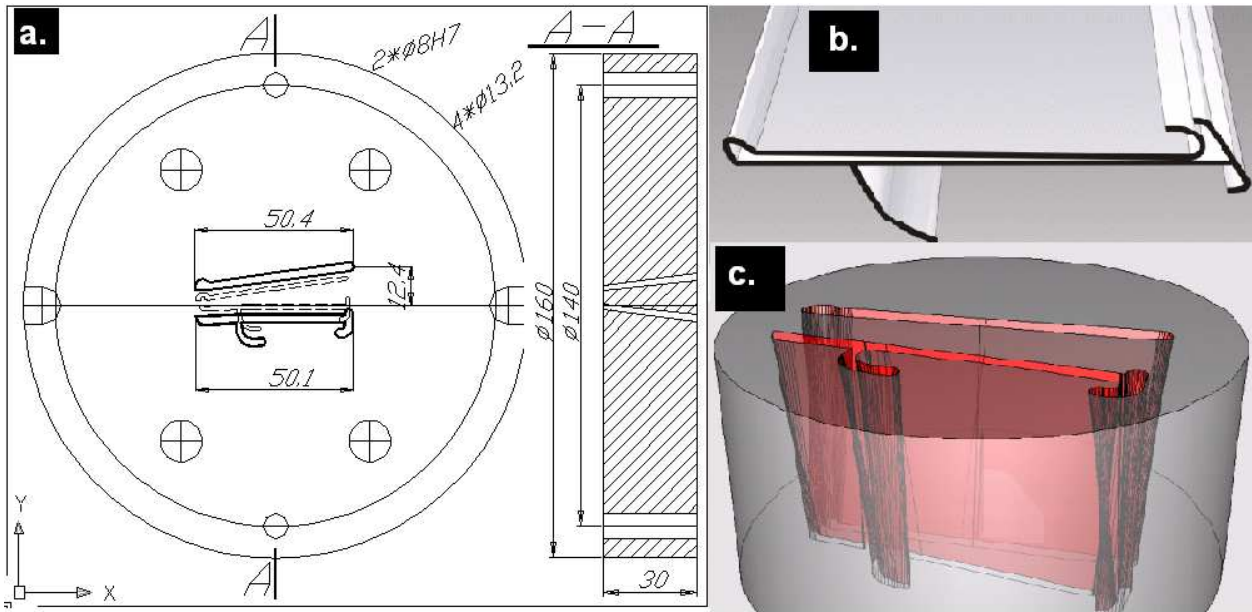
offsetu drutu, zwrot w ruchu wzdłuż dolnej i górnej krzywej prowadzącej musi być taki sam, gdyż w przeciwnym razie trajektoria osi drutu wzdłuż dolnej krzywej będzie wypadła po stronie przeciwnej do trajektorii osi drutu wzdłuż górnej krzywej i kąt nachylenia drut będzie obciążony niewielkim, trudnym do wychwycenia błędem o wartości zbliżonej do promienia drutu.

Jeśli ostatecznie uda się uniknąć błędów programowania, to nadal możemy otrzymać powierzchnie obciążone znacznym błędem wynikającym z fizycznych cech procesu wycinania elektroerozyjnego [4] [5]. Przykładem zastosowań przedstawionej metody dla części o zdecydowanie skomplikowanych kształtach jest konstrukcja głowicy wytłaczarki do produkcji przedmiotów o wydłużonych kształtach z tworzywa sztucznego. Na rys. 4a. widoczny jest kształt kanałów przelotowych jednego z czterech segmentów głowicy wytłaczarki, która powoduje ukształtowanie listwy identyfikacyjnej tak jak na rys 4b. Płaszczyzny czołowe segmentu są szlifowane i muszą przylegać do płaszczyzn sąsiednich segmentów, zaś zarysy kanałów przelotowych dla sąsiadujących segmentów muszą być spasowane z dużą dokładnością. Wydaje się, że obróbka tych kanałów metodą WEDM z wieloosiowym prowadzeniem drutu, której symulacja pokazana jest na rys 4c., jest w tym przypadku wyjątkowo skuteczna i trudna do zastąpienia inną metodą. Ostatnim, nie pokazanym na rysunku segmentem głowicy będzie kanał o ścianach walcowych, z jedną tylko ścianą pochyłą, umożliwiającą połączenie dwóch strumieni ciekłego tworzywa (często o różnych kolorach) tak, by uzyskać jeden kształt listwy jak na rys. 4b.

Wskazano możliwości przemysłowych zastosowań opracowanej metody poprawy dokładności. Zaproponowany dodatkowy etap przetwarzania w systemach CAD/CAM prowadzi do ujednoczenia formatu pliku CLDATA i uzyskania skorygowanego programu (kodu) NC, co uniezależnia tę metodę od wyboru konkretnego systemu CAD/CAM. Podano także dyskusji najczęściej spotykane błędy wieloosiowego prowadzenia elektrody drutowej w obróbce WEDM, która jest skomplikowana i wymaga symulatorów zapewniających dużą wierność odtwarzania trajektorii elektrody.

LITERATURA

1. Lechniak Z. Metoda konwersji pliku CLDATA w sposób zapewniający wymiennność informacji w różnych systemach CAD/CAM. *Mechanik*, 8-9, 714-717/744, 2014.
2. Sakai Y., Goto A., Nakamura K., Hatton K., Kobayashi K. Improvement of Machining Accuracy in Wire Electrical Discharge Machining. *Proc. ISEM XV, Pittsburgh*, 71-176/639, 2007.
3. Bai J.C., Huang H., Lu Z.S., Feng Y.R., Guo Y.F. Trajectory planning for the Four Axis WEDM Machine and its Implementation. *Proc. ISEM XVI, Shanghai*, 261-264/720, 2010.
4. Liang J.F., Tsai C.F., Lin M.H., Liao Y. S. Measurement of Wire Deflection in Wire-cut EDM Machining. *ISEM XVI, Shanghai*, 223-226/720, 2010.
5. Lechniak Z. Consideration on how to improve accuracy of variably sloped surfaces manufactured by WEDM. *Proc. of 5th Int'l Conf. on Adv. In Prod. Eng.*, Warsaw, June, 58-63/552, 2010.
6. Herrero A., Uriarte L., Azcarate S., Sanchez J.A. Error Analysis of Thin Wire EDM Corner Machining. *Proc. ISEM XV, Pittsburgh*, 121-126/639, 2007.



Rys. 4. Wybrany segment głowicy wytłaczarki z kanałem przepływu ciekłego tworzywa, wytwarzany metodą WEDM, mieszczący się w polu zastosowań proponowanej metody poprawy dokładności: a. rysunek konstrukcyjny segmentu głowicy, b. profil wytłaczanej listwy, c. obraz przestrzennej geometrii kanałów przepływowych i symulacja obróbki z pokazaniem położenia kolejnych elektrody drutowej

7. Zhao W., Chen M., Chen H. A Novel Trajectory Interpolation Algorithm for WEDM – Unit Generalized Arc Length Increment Method, *Procedia CIRP*, Vol.6, *Proc. of the XVIIth CIRP Conf. on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, 255-260, Leuven, 2013.

Podsumowanie

W pracy rozpoznano i zastosowano szczególne cechy systemów CAD/CAM umożliwiające optymalne prowadzenie elektrody drutowej w wariancie wieloosiowym, gdzie duży zakres zmienności kątów pochylenia elektrody powoduje znaczną utratę dokładności obróbki.