

Zbigniew LECHNIAK<sup>1</sup>

## DOKŁADNOŚĆ WYTWARZANIA POWIERZCHNI ŚRUBOWYCH METODĄ WEDM

Wycinanie elektroerozyjne WEDM jest obróbką dokładną, często stosowaną jako obróbka wykończeniowa. W pracy przedstawiono reprezentatywne powierzchnie śrubowe, spełniające kryteria znacznych wartości i intensywnej zmienności pochyłeń. Po obróbce WEDM przeprowadzonej w wielu wariantach poddano uzyskane powierzchnie znacznej liczbie pomiarów, które ujawniły tendencje utraty uzyskiwanych dokładności w miarę wzrostu wartości kątów pochyłeń powierzchni. W pracy zaprezentowano sposób podniesienia dokładności wytwarzania powierzchni śrubowych metodą korekty programu obróbkowego, zarówno w oparciu o dane analityczne jak i wyliczenia wynikające z przeprowadzonych eksperymentów.

### 1. WSTĘP

Zastosowanie elektrody roboczej wykonanej w formie cienkiego drutu metalowego i rozwiązanie kinematyczne polegające na wprowadzeniu dodatkowego ruchu drutu wzdłuż jego osi stanowiło istotny postęp technologiczny w obróbce elektroerozyjnej (EDM) i praktycznie wyeliminowało wpływ zużycia elektrody na błędy kształtu wykonywanych przedmiotów. Powstała nowa odmiana obróbki elektroerozyjnej powszechnie określana jako WEDM (*Wire Electrical Discharge Machining*). Metoda ta zapewnia osiąganie wysokiej dokładności wytwarzania rzędu kilku mikrometrów dla przedmiotów o ścianach prostopadłych do płaszczyzny stołu wycinarki elektroerozyjnej [1],[2]. Wytwarzanie pewnych rodzajów powierzchni z zastosowaniem tej metody nastęrcza jednak trudności związanych z osiąganiem wymaganych dokładności, szczególnie dla przypadków powierzchni o znacznych i intensywnie zmieniających się pochyleniach, dla których stosowane przez producentów obrabiarek zalecenia nie dają pożądaných efektów. Ciągłe nie rozwiązany problem w tej metodzie jest możliwość osiągania podobnej dokładności w przypadku powierzchni o ścianach pochylonych, szczególnie wtedy, gdy pochylenie jest znaczne i szybko zmienia się w trakcie wędrówki drutu wzdłuż obrabianej powierzchni. Prowadzenie obróbki dla drutu pochylonego w stosunku do pionu pod zwiększającym się

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania

kątem jest kłopotem technologicznym i okupione jest zarówno spadkiem wydajności jak i dokładności obróbki. Producenci maszyn do tej obróbki podają szereg wskazówek zapewniających minimalizację błędów kształtu wytwarzanych powierzchni stożkowych lub pochylonych powierzchni płaskich.

Jednym z zaleceń jest ograniczenie mocy generatora obrabiarki o jeden procent maksymalnej wartości na każdy dodatkowy stopień odchylenia elektrody drutowej od położenia pionowego.

Aby ułatwić użytkownikom osiągnięcie tej dokładności bez tak gruntownej wiedzy producenci maszyn stworzyli zestawy przeznaczone do obróbki powierzchni pochylonych z kątami obróbki od  $3^\circ$  do  $30^\circ$ . Firma Charmilles oferuje taki zestaw pod nazwą Taper Expert, jako oprzyrządowanie dodatkowe dla swoich obrabiarek. Zestaw stanowi głównie opcja, która aktywuje się w układzie sterowania maszyny oraz komplet specjalnych dysz i przewodników drutu zapewniających optymalne prowadzenie drutu nawet przy dużym nachyleniu.

W odniesieniu do układu sterowania, aktywacja zestawu łączy w sobie dwa następujące efekty:

- korektę offsetu zgodnie z zaprogramowanym kątem pochylenia (parametr TCO - Taper Correction Offset) według przedstawionej powyżej procedury,
- dokładne względne pozycjonowanie przewodników i przedmiotu obrabianego (parametr TCG – Taper Correction Guides), na podstawie płaszczyzny stołu obrabiarki i wartości uzyskanych w specjalnym cyklu pomiarowym aplikacji Taper Expert.

Specjalny cykl kalibracji w opcji Taper Expert można wykonać dopiero po uprzednim wykonaniu cyklu pionowania drutu z kątem pochylenia drutu równym  $3^\circ$  i z odpowiednią konfiguracją trzech innych parametrów. Precyzja obróbki pochylenia zależy w dużej mierze od dokładności wartości z tego cyklu, która określa podstawowe parametry ZID i AXOZ dla kąta pochylenia  $3^\circ$ . Oba cykle należy wykonać przy użyciu specjalnego oczka z odpowiednim mocowaniem umożliwiającym pomiar dla dużych kątów pochylenia drutu, który znajduje się w zestawie Taper Expert. Cykl kalibracji w opcji Taper Expert określa wartości współczynników korekty, które będą musiały być stosowane dla kątów nachylenia  $30^\circ$ ,  $28^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $19^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $10^\circ$  i  $3^\circ$ , czyli parametr TCG w Taper Expert.

Brak jest jednak zaleceń dla bardziej skomplikowanych przypadków, w których mamy do czynienia z dużymi i zmiennymi kątami pochylenia drutu w trakcie pracy. Celem tej pracy było głównie badanie wpływu wartości i zakresu zmienności kąta pochylenia na dokładność powierzchni wytwarzanych metodą WEDM i zaproponowanie skutecznego sposobu ograniczenia niedokładności wytwarzania przedmiotów o powierzchniach znacznie i w zmienny sposób odchylonych od położenia pionowego w stosunku do płaszczyzny podstawy obrabianego przedmiotu, odpowiadającej poziomej płaszczyźnie stołu obrabiarki. Praca obejmowała teoretyczną analizę przyczyn błędów powstających podczas obróbki, a w dalszej kolejności badania doświadczalne mające zweryfikować wysunięte przypuszczenia i poszerzyć je o zjawiska związane z praktycznym przebiegiem obróbki.

W części eksperymentalnej zastosowano trzy różne nowoczesne wycinarki elektroerozyjne sterowane numerycznie, przy czym dwie z nich umożliwiały natrysk dielektryka pod ciśnieniem, trzecia zaś pracowała w zanurzeniu części obrabianej w wannie z destylowaną i dejonizowaną wodą jako dielektrykiem. Geometria próbek była tak dobrana, by maksymalnie wykorzystać cały technologicznie uzasadniony zakres zmienności kąta pochylenia drutu i zapewnić dużą zmienność tego pochylenia. Wybrano do tego celu powierzchnie śrubowe często występujące w technologii maszyn.

## 2. ANALIZA MOŻLIWOŚCI MINIMALIZACJI BŁĘDU KSZTAŁTU POWIERZCHNI POCHYLONYCH

Producenci wycinarek elektroerozyjnych zdają sobie sprawę z utraty dokładności wykonania przedmiotów o dużych kątach pochylenia ścian i proponują procedury korygujące podstawowe parametry ustawienia przewodnika drutu, jak ta omówiona we wstępie tak, by dla znacznych wartości kątów pochylenia drutu skompensować rosnącą niedokładność spowodowaną zmianą położenia obliczeniowego punktu, w którym zachodzi przejście z położenia pionowego do położenia pochylonego.

Dokładność wytwarzania złożonych powierzchni prostokreślnych znacznie odbiega od dokładności wytwarzania przedmiotów o ścianach prostopadłych do podstawy, a nawet pochylonych do podstawy pod stałym kątem. Powierzchnia prostokreślna 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 prostokreślnej  
 $t, u$  – parametry opisujące powierzchnię prostokreślną.

Równanie to dogodniej opisuje powierzchnię wytwarzaną w trakcie obróbki WEDM niż ogólna definicja powierzchni prostokreślnej:

$$S(t,u)=p(t)+ur(t), \quad (2)$$

gdzie:  $S(t,u)$  - punkt na powierzchni,  $p(t)$  - punkt zakreślający krzywą przestrzenną,  
 $r(t)$  - jednostkowy wektor zakreślający inną krzywą przestrzenną na kuli o jednostkowym promieniu.

Powierzchnia określona równaniem (1) będzie pewnym szczególnym przypadkiem powierzchni prostokreślnej zakreślanej w wyniku prowadzenia prostoliniowego odcinka (drutu) jednocześnie po dwóch płaskich krzywych, z których jedna definiowana jest w płaszczyźnie dolnego przewodnika drutu, druga zaś w płaszczyźnie górnego przewodnika.

Przedmiotem dociekań w pracy były źródła błędów kształtu powierzchni pochylonych, które są liczne i które można podzielić na dwie grupy. Pierwsza to czynniki dające się ująć w formie zależności analitycznych bądź tabelarycznych. W celu poprawienia dokładności obróbki powierzchni pochylonych należy uwzględnić korektę offsetu i mocy generatora

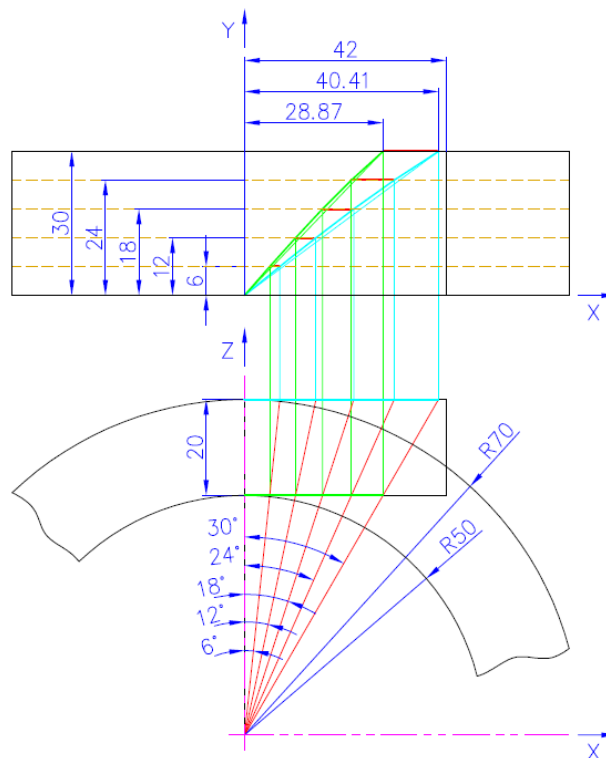
względem wartości standardowych dobranych z tablic technologicznych. Wartości offsetu określają odległość środka drutu od zarysu powierzchni obrabianej mierzona zawsze w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny stołu. Wartości dobrane z tablic będą więc dokładne jedynie dla obróbek powierzchni prostopadłych do płaszczyzny stołu.

Aby zachować dobraną z tablic wartość offsetu podczas obróbki powierzchni pochylonych należy zmodyfikować parametr offsetu według podanej wzoru:

$$\text{Offset zmodyfikowany} = \text{Offset standardowy} / \cos(\alpha)$$

gdzie:  $\alpha$  = kąt pochylecia drutu;

Offset standardowy = promień drutu + elektrodowa szczelina



Rys. 1. Geometria obranej powierzchni prostokreślnej dobrana tak, aby zapewnić maksymalny technologicznie uzasadniony kąt pochylecia drutu 30 stopni (dla wycinarek firmy Charmilles)

Fig. 1. Geometry of the selected ruled surface is adapted in order to attain the maximum technologically justified wire inclination of 30 degrees (for the Charmilles wire cutting machines)

Druga grupa źródeł błędów to oddziaływania o charakterze losowym, jak na przykład, konfiguracja geometryczna lokalnego kształtu wycinanego przedmiotu mająca wpływ na rozpylanie się strugi dielektryka w trakcie pracy wycinarki. Ze względu na trudności w opracowaniu racjonalnego algorytmu dla poprawy dokładności w takich przypadkach, autor przyjął, że racjonalne będzie wykonanie przedmiotów testowych przed wykonaniem części z materiałów docelowych [2]. Wartości korekcji parametrów ustawienia przewodnika w funkcji kąta odchylenia drutu od położenia pionowego, mające wpływ na dokładność wykonania powierzchni pochylonych, zależą od geometrii oczek prowadzących drut i podane są przez producentów w formie tabelarycznej. W sytuacji gdy wykonawcy części

zależy na szczególnie dokładnym odwzorowaniu określonego kąta pochylenia powierzchni, sugerowane jest najpierw wykonanie próby, następnie pomiar i zmiana parametrów przewodnika drutu przed właściwą obróbką. Wszystkie te zabiegi są bardzo czasochłonne i muszą być skrupulatnie powtarzane dla każdego przypadku zmiany kąta pochylenia drutu.

### 3. OPIS BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Przeprowadzone prace doświadczalne miały na celu zbadanie wpływu wartości kąta pochylenia i jego zmienności na dokładność wytwarzania powierzchni metodą WEDM.



Rys. 2. Obróbka próbek metoda WEDM: a) widok ekranu układu sterowania jednej z zastosowanych wycinarek FI444SLP, b) widok próbek z fortalu po ich wytworzeniu na innej wycinarce ROBOFIL 290

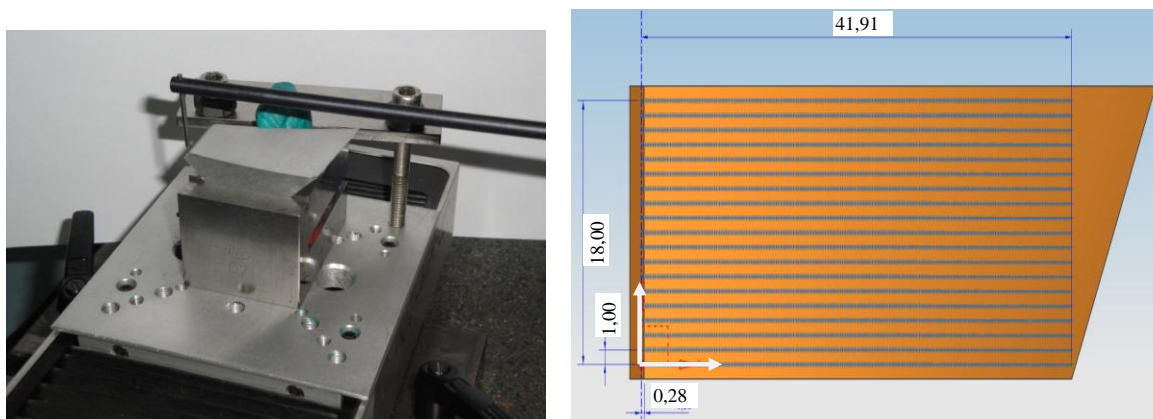
Fig. 2. Machining of samples WEDM method: a) view of the control panel of the applied wire cutting machine FI444SLP, b) view of the wire cut samples of the alumina alloy EN AW-7075 (fortal) after the machining on the ROBOFIL 290 machine

Za miarę takiej dokładności przyjęto odchylenie od nominalnego kształtu opisanego w postaci modelu w systemie CAD/CAM. Stanowisko badawcze składało się m.in. z trzech wycinarek elektroerozyjnych, na których wytwarzano próbki ze stali NC6 i stopu aluminium PA9N o handlowej nazwie fortal (rys. 2). Kształt próbek dobrany był tak, by kąt pochylenia drutu zmieniał się w maksymalnych dopuszczalnych technologicznie granicach (30 stopni). Wymiary gabarytowe próbek wynosiły 42x32x20mm. Próbkę wytworzono w jednym lub dwóch przejściach obróbkowych, starając się prowadzić proces z maksymalną wydajnością, ustalaną automatycznie przez układ sterowania wycinarki. Obróbce podlegały wszystkie ściany próbki przedstawionej na rys. 2 ze względu na chęć uzyskania dokładnych baz przy późniejszych pomiarach próbek. Czas pełnej obróbki próbek z fortalu wynosił 7,5-10 minut, natomiast czas obróbki próbek stalowych wynosił 30 minut, czyli trzy, a nawet czterokrotnie dłużej w stosunku do próbek ze stopu aluminium.

Wytworzone próbki zostały zmierzone przy zastosowaniu dwóch niezależnych urządzeń pomiarowych: przyrządu Form Talysurf do badania struktury geometrycznej powierzchni, z przystawką do pomiaru konturu i współrzędnościowej maszyny pomiarowej Zeiss Vista. Głównym celem badań była kompleksowa ocena błędu kształtu wytworzonych próbek. Rysunek 3 przedstawia zastosowany przedmiot zamocowany na stoliku pomiarowym i zasadę pomiaru. Ponieważ model powierzchni przedmiotu obrabianego widoczny na rysunku z prawej strony pochodził z systemu CAD/CAM, więc najbardziej miarodajną techniką pomiarową są pomiary współrzędnościowe.

W trakcie pomiarów okazało się, że procedura pomiaru przy pomocy profilometru wymagała pracochłonnych przeliczeń związanych z położeniem najniższego punktu stożkowej końcówki o promieniu  $20\mu\text{m}$  do położenia punktu styku z powierzchnią przedmiotu oraz kłopotliwego ustalenia punktu początkowego kartezjańskiego układu współrzędnych XYZ.

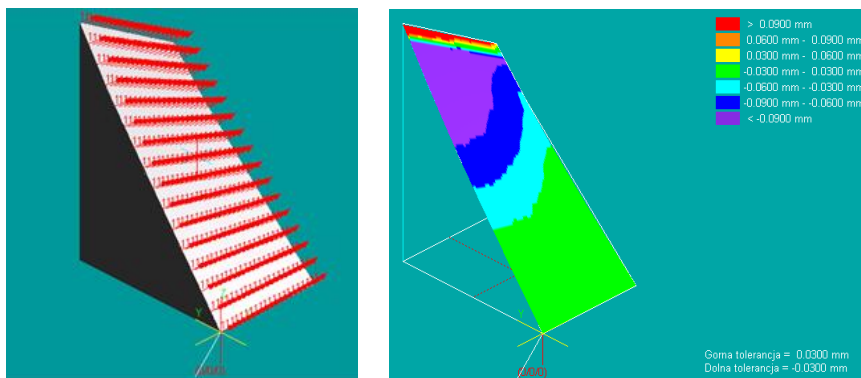
Bardziej przydatne okazały się pomiary na CMM w formie digitalizacji, tj. przez określenie współrzędnych kolejnych punktów zetknięć elektrostrykowej sondy pomiarowej firmy Renishaw z powierzchnią przedmiotu, po uprzednim wprowadzeniu kanonicznej postaci powierzchni z systemu CAD/CAM do oprogramowania maszyny pomiarowej (rys. 4). Uzyskano zbiór współrzędnych punktów styku, który można między innymi reprezentować w formie chromatycznej mapy obrabianej powierzchni, gdzie przy pomocy odpowiedniej barwy oznacza się strefy o zbliżonych wartościach odchyłek od kształtu nominalnego.



Rys. 3. Pomiary obrabianej powierzchni na CMM: a) profilometr FORM TALYSURF z dodatkowym wyposażeniem do pomiaru kształtu, b) zasada pomiaru kształtu oparta na pomiarze w równoodległych płaskich przekrojach, tu o rozstępie 1mm

Fig. 3. Measurements of the machined surface for CMM: a) profilometer FORM TALYSURF with an adapter for contour measurement, b) schematic view of part shape measurement as based on planar, evenly-distributed cross-sections, with the offset of 1mm in this case

Wyniki pomiarów z rys. 4 wyraźnie wskazują, że największe błędy podczas obróbki badanych próbek wystąpiły w górnej strefie powierzchni, gdzie występowało największe pochylenie powierzchni (tj. największe odchylenie drutu od położenia pionowego, do 30 stopni).



Rys. 4. Z lewej: zbiór wektorów prostopadłych do powierzchni obrabianej, wskazujących kierunki zetknięć sondy pomiarowej z przedmiotem, z prawej: mapa chromatyczna powierzchni z obszarami o zbliżonych wartościach odchyłek od wymiarów nominalnych

Fig. 4. Left: A set of vectors perpendicular to the surface, pointing to a place of touching the part with a measuring probe, right: color map of the surface, with strips of similar values of deviation from the nominal part geometry

#### 4. METODA POPRAWY DOKŁADNOŚCI WYTWARZANIA POWIERZCHNI PROSTOKREŚLNYCH O SILNIE ZMIENIAJĄCYCH SIĘ KĄTACH POCHYLENIA

Ruch drutu w stałym układzie współrzędnych kartezjańskich  $X, Y, Z$  opisywany jest za pomocą ciągu czterech współrzędnych  $\{x, y, u, v\}$ . Współrzędne  $x, y$  opisują ruch dolnej głowicy wycinarki, natomiast współrzędne  $(u, v)$  opisujące ruch głowicy górnej są w istocie współrzędnymi  $x_w, y_w$  wektora  $\vec{w}$  rozpiętego między głowicą dolną i głowicą górną wycinarki, położonego w kierunku pochylonego drutu. Powierzchnia prostokreślna może być również zdefiniowana jako zakreślona przez prostą przemieszczającą się po dwóch płaskich krzywych, z których krzywa dolna  $c_r$  leży w płaszczyźnie referencyjnej, równoległej do płaszczyzny  $XY$  na wysokości  $z=z_r$ , związanej z dolną głowicą wycinarki elektroerozyjnej, zaś krzywa górna  $c_s$  leży w płaszczyźnie wtórnej, również równoległej do płaszczyzny  $XY$  na wysokości  $z=z_r$  związanej z górną głowicą wycinarki elektroerozyjnej, zgodnie z równ.(1). Płaskie krzywe  $c_r$  i  $c_s$  są kierownicami zakreślonej powierzchni  $S_{rt}$ . W proponowanej metodzie, program NC utworzony przez postprocesor w systemie CAD/CAM podlega dodatkowej edycji polegającej głównie na zmianie współrzędnych  $\{x, y, u, v\}$  określających lokalne położenie drutu. Współrzędne  $\{x, y, u, v\}$  opisują tworzące  $l$  powierzchni prostokreślnej odtwarzanej w trakcie pracy wycinarki elektroerozyjnej.

Zaletą pomiaru metodą digitalizacji jest możliwość pomiaru powierzchni obrabianej w ściśle określonych punktach. Z uwagi na odmianę mierzonej powierzchni prostokreślnej, wskazane są pomiary w kilku punktach wzdłuż kierunku tworzących. Na podstawie położenia punktów zmierzonych wzdłuż wybranej tworzącej utworzono nową prostą, reprezentującą uśrednione jej położenie na powierzchni mierzonej, z uwzględnieniem błędów obróbki. Posłużono się w tym przypadku metodą najmniejszych kwadratów, zapewniającą minimalny rozrzut odległości mierzonych punktów od wyznaczonej prostej  $l_m$ . Zbiór wyznaczonych w taki sposób tworzących daje obraz nowej powierzchni prostokreślnej, uwzględniającej błędy powstałe w trakcie jej wytwarzania. Wykorzystano

opracowaną wcześniej procedurę wyznaczania skorygowanego programu obróbkowego dla powierzchni prostokreślnej (rys. 5) [3].



Rys. 5. Zasada pracy oprogramowania uwzględniającego skorygowane współrzędne w programie obróbki: współrzędne  $(x, y, u, v)$  w programie obróbkowym  $\Rightarrow$  Pomiary przedmiotów testowych w przekrojach i w strefach po obróbce testowej  $\Rightarrow$  Korekta programu NC  $\Rightarrow$  Obróbka według współrzędnych poprawkowych  $(x', y', u', v')$

Fig. 5. Underlying principle for the software operation when making correction to the co-ordinates present in an NC part program:  $(x, y, u, v)$  co-ordinates for successive wire movements  $\Rightarrow$  sample measurements after the test machining  $\Rightarrow$  NC program correction  $\Rightarrow$  machining according to the corrected co-ordinates  $(x', y', u', v')$

## 5. WNIOSKI

W pracy przybliżono problem utraty dokładności obróbki dla dużych wartości kątów pochylenia powierzchni prostokreślnych obrabianych metodą WEDM, z jednoczesną znaczną zmiennością wartości tych kątów dla danego przedmiotu. Analitycznie i doświadczalnie potwierdzono, że dokładność obróbki powierzchni prostokreślnych silnie zależy od wartości kątów pochylenia. Zaproponowano metodę zmniejszenia niedokładności uzyskanych powierzchni, opartą na analizie błędów systematycznych, a w dalszym etapie na wynikach obróbki przedmiotów z materiałów testowych. W chwili obecnej nie ustalono jeszcze stopnia przystawiania wyników pomiarów powierzchni przedmiotów testowych do wyników pomiarów dla części z materiałów docelowych, zatem planowane są badania nad weryfikacją metody obróbki przedmiotów z materiałów testowych.

## LITERATURA

- [1] SAKAI Y., GOTO A., NAKAMURA K., HATTON K., KOBAYASHI K., 2007, *Improvement of Machining Accuracy in Wire Electrical Discharge Machining*, Proc. ISEM XV, Pittsburgh.
- [2] LECHNIAK Z., 2009, *Badanie dokładności silnie i zmiennie pochylnych powierzchni wytworzonych metodą WEDM*, Inżynieria Maszyn, 12, 2-3, Wrocław.
- [3] LECHNIAK Z., 2010, *Consideration on how to improve accuracy of variably sloped surfaces manufactured by WEDM*, Proc. of 5<sup>th</sup> Int'l Conf. on Adv. in Prod. Eng., Warsaw.



## ACCURACY OF SCREW SURFACES MANUFACTURED BY THE WEDM

Wire electrical discharge machining (WEDM) enjoys a reputation of precision treatment and is often used as finishing manufacturing operation. The relevant screw surfaces have been proposed in this paper, satisfying criteria for high and strongly varying surface slopes. A series of experiments have been performed and then the machined samples have been subjected to extensive measurements which disclosed that the accuracy loss is directly linked to surface slope angle increase. The author of the paper suggests a method for accuracy improvement by modifying the NC program whereas the corrective procedure is based both on analytical data and on calculations resulting from the performed experiments.