

# ASPEKT EKONOMICZNY WYKORZYSTANIA METODY KOREKCJI TORU NARZĘDZIA W OBRÓBCE SKRAWANIEM

Monika KULISZ

**Streszczenie:** Osiągnięcie założonej dokładności wymiarowej obrabianych skrawaniem przedmiotów, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności procesu, jest istotnym problemem, z którym zmagają się przedsiębiorstwa produkcyjne. Rozwiązaniem może być obróbka z zastosowaniem obniżonych parametrów tylko w fazie wykańczającej lub zastosowanie korekcji toru narzędzia skrawającego dla parametrów standardowych. W pracy przedstawiono porównanie kosztów obróbki toczenia wałka  $\varnothing 60h9$  z uwzględnieniem obu metod. Wyniki eksperymentu wskazują na znaczną przewagę zastosowania metody korekcji toru narzędzia.

**Słowa kluczowe:** toczenie, aspekt ekonomiczny, koszt obróbki, korekcja, obróbka skrawaniem

## 1. Wstęp

Zadaniem technologa projektującego procesy obróbki skrawaniem jest taki dobór parametrów, aby osiągnąć maksymalną wydajność procesu. Jednocześnie nie można dopuścić do przekroczenia narzuconych przez konstruktora tolerancji wymiarów i chropowatości powierzchni. W tej sytuacji technolog musi dokonać optymalizacji, projektując operację usunięcia nadmiaru w dwu fazach: obróbki zgrubnej i dokładnej. Przyczyną stosowania takiej strategii jest obecność znacznych sił skrawania, a więc i odkształceń obserwowanych w fazie obróbki zgrubnej przy podwyższonych parametrach. Błędy kształtu i wymiarów, powstałe w tej fazie, zazwyczaj przekraczają wartości dopuszczalne, stąd konieczna jest faza obróbki dokładnej wykonanej przy zaniżonych parametrach. W wyniku zastosowania powyższej strategii osiąga się zazwyczaj narzucone parametry geometryczne wyrobu, jednak wydajność operacji jest dużo mniejsza od potencjalnie możliwej, szczególnie dla przedmiotów o małej i zróżnicowanej sztywności. Rzutuje to w sposób oczywisty na ekonomię wytwarzania, szczególnie przy produkcji seryjnej lub masowej [1-4].

Alternatywnym rozwiązaniem otrzymania wyrobów o narzuconych przez konstruktora wymiarach jest zastosowanie stałej korekcji położenia narzędzia realizowanej przez operatora obrabiarki w układzie sterowania. Operacja ta przesuwa tor narzędzia o stałą wartość. Niestety przesunięcie narzędzia nie niweluje powstawania błędów wymiaru spowodowanych, m.in. zmienną sztywnością obrabianego przedmiotu i odkształceniami cieplnymi. Pomimo przesunięcia narzędzia w przypadku, np. obrabianych części o małej sztywności, otrzymany wymiar nie będzie się zawierał w założonym polu tolerancji, ponieważ rozrzut błędów wymiaru jest większy niż założone pole tolerancji.

Skuteczniejszą metodą obróbki przedmiotów o małej sztywności od korekcji położenia narzędzia jest zastosowanie korekcji toru narzędzia skrawającego [5]. Metoda ta może mieć zastosowanie przy założeniu powtarzalnej obróbki przedmiotu na obrabiarce sterowanej numerycznie i polega na zmianie programu sterującego CNC. Dane do zmiany programu są

pozyskiwane w wyniku przeprowadzenia obróbki testującej z parametrami zapewniającymi wysoką wydajność. Proces korekcji przeprowadzany jest w kilku etapach. Pierwszym etapem jest testujący proces toczenia. W drugim, po dokonaniu pomiaru odchyłek wymiarów otrzymanych w wyniku eksperymentu, określa się wartości błędów, które należy skorygować. W trzecim etapie otrzymane odchyłki uwzględnia się w modelu geometrycznym obrabianego przedmiotu. Ostatni etap to uwzględnienie zmodyfikowanego modelu geometrycznego w generowanym programie sterującym obrabiarką. Tak zmodyfikowany program sterujący wykorzystuje się do seryjnej obróbki przedmiotów.

Na dokładność wymiaru mają także wpływ inne czynniki niż parametry obróbki. Są to np. błędy systemu pozycjonowania narzędzia, błędy geometryczne obrabiarki, dokładność wykonania lub zamocowania narzędzia, sztywność układu OUPN, itp. [6-8]. Błędy powstałe w wyniku powyższych czynników mają najczęściej charakter systematyczny, dlatego można je kompensować. Podczas obróbki z przejściem wykańczającym należałoby je uwzględnić przy zamocowywaniu przedmiotu i kalibracji urządzenia. W obróbce z korekcją toru narzędzia skrawającego zostaną one automatycznie uwzględnione w zmodyfikowanym programie sterującym obrabiarką.

Powyżej wymienione zostały dwa różnorodne rozwiązania postawionego na wstępie problemu. Dla przedsiębiorstw produkcyjnych istotna jest ekonomiczna kwestia przedstawionych rozwiązań, które z nich jest bardziej opłacalne dla przedsiębiorstwa, jeżeli efekt wymiarowy jest taki sam. W artykule przedstawione zostało porównanie kosztów obróbki toczenia wałka o  $\varnothing 60h9$  (Rys. 1) dwoma metodami. Wałek ten wykonany jest ze stali 40 HM i jest to przedmiot produkowany w przedsiębiorstwie Zakład Obróbki Metali KOMECH w Lublinie.

Dla wałka  $\varnothing 69h9$  określone są następujące dopuszczalne odchyłki wymiaru  $\langle -0,087; 0 \rangle$  [9]. W celu osiągnięcia takiego zakresu tolerancji można zastosować dwie metody obróbki: pierwsza – obróbka z przejściem wykańczającym, druga – obróbka z korekcją toru narzędzia.

Operacje procesu technologicznego wałka  $\varnothing 60h9$  produkowanego w Zakładzie Obróbki Metali KOMECH przedstawiają się następująco:

10. Ciąć na wymiar  $l=456$  mm.
20. Planować czoła na wymiar  $l=455$  mm i wykonać nakiełki.
30. Wiercić otwór  $\varnothing 8.5$  mm i gwintować M10x1.
40. Wiercić i gwintować M24.
50. Toczyć na średnicę  $\varnothing 60h9$ .
60. Wiercić otwór  $\varnothing 6$ .

Obie metody obróbki różnią się wyłącznie operacją 50 (toczenia). W związku z powyższym analiza została przeprowadzona wyłącznie dla operacji toczenia.

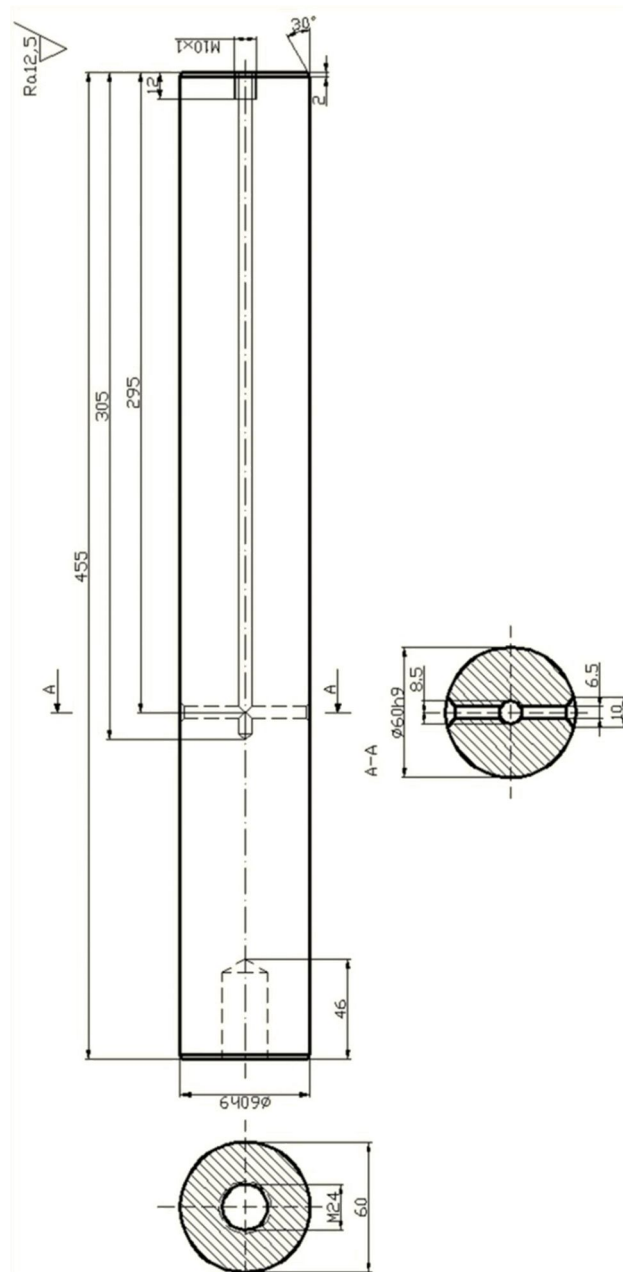
## **2. Obróbka z przejściem wykańczającym**

Dla obróbki z przejściem wykańczającym operacja toczenia będzie przebiegała następująco:

1. Toczenie zgrubne.
2. Toczenie wykańczające na średnicę  $d=\varnothing 60h9$ .

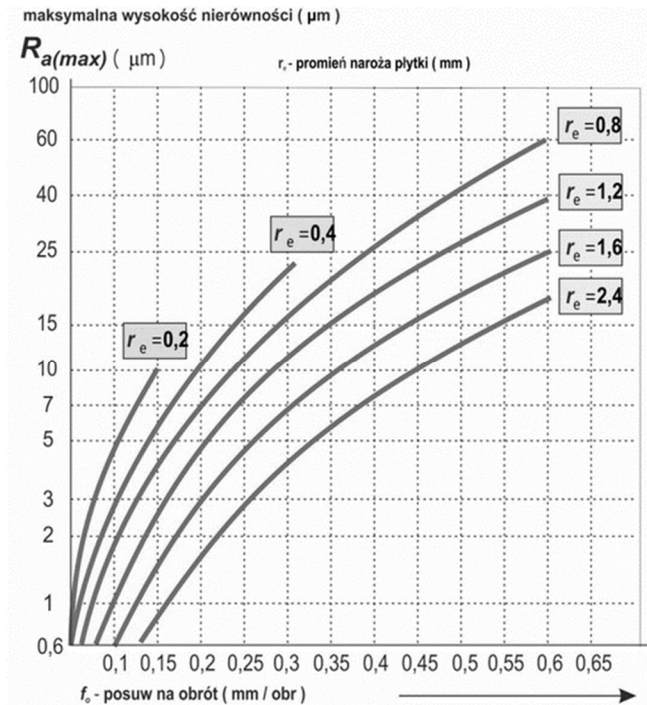
Do obróbki w obu przypadkach (przy obróbce z przejściem wykańczającym oraz obróbce z korekcją toru narzędzia) zastosowano płytkę skrawającą z węgla VCMT 160404-PS AH725 romboidalną  $35^\circ$  dedykowaną do obróbki stali i stali nierdzewnych wyprodukowaną przez Pabianicką Fabrykę Narzędzi Pařana. Charakteryzuje się ona bardzo

twardym podkładem i pokryciem (Ti, Al)N, dzięki czemu posiada wysoką odporność na ścieranie i na pęknięcia. Promień naroża tej płytki wynosi  $r_e = 0,4\text{mm}$ .



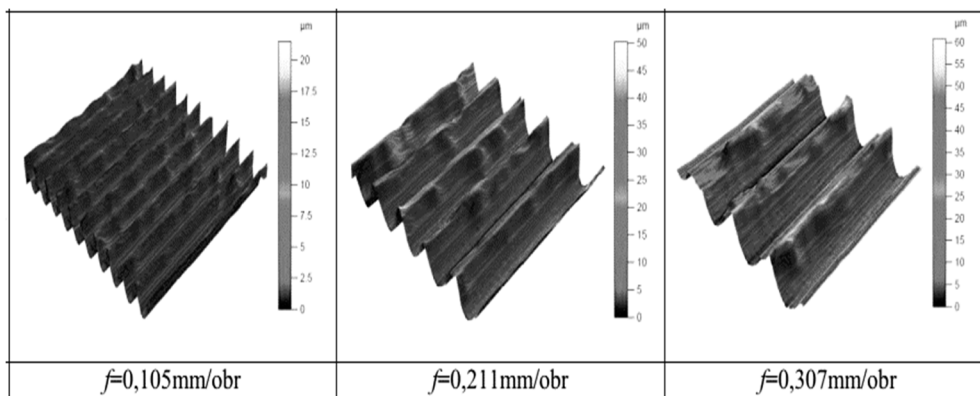
Rys. 1. Rysunek wałka  $\phi 60h9$

Na Rys. 2. przedstawiono zależność maksymalnej wysokości chropowatości powierzchni  $Ra(\text{max})$  [ $\mu\text{m}$ ] w zależności od posuwu  $f$  dla różnych promieni naroża.



Rys. 2. Zależność maksymalnej wysokości nierówności  $R_{a(max)}$  w zależności od posuwu  $f$  dla różnych promieni naroża [10]

Na dokładność obróbki, chropowatość powierzchni, a także jej wydajność duży wpływ ma parametr, jakim jest posuw. Im mniejszy posuw, tym chropowatość obrabianej powierzchni jest mniejsza, dlatego przy obróbkach wykańczających powinien być on możliwie najmniejszy. Widoki izometryczne chropowatości powierzchni obrobionych w zależności od wartości posuwu przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Widoki izometryczne chropowatości powierzchni obrobionych w zależności od wartości posuwu [11]

Niestety, wraz ze zmniejszaniem prędkości posuwu zmniejsza się również wydajność obróbki, ponieważ wydłuża się czas procesu. Zatem dobór prędkości posuwu musi zapewniać dokładność wymiarową toczonej powierzchni przy maksymalnej możliwej wówczas (ze względu na chropowatość powierzchni) wydajności obróbki. Dla obróbki wykańczającej posuw stosuje się na poziomie od 0,1 mm/obr do 0,3 mm/obr [12].

Aby uzyskać po obróbce wałek w tolerancji  $\text{Ø}60\text{h}9$ , można przyjąć, zgodnie z zaleceniem producenta płytek skrawających [10], podane poniżej parametry procesu toczenia.

Toczenie zgrubne:

- posuw  $f=0,5$ [mm/obr];
- prędkość obrotowa  $n=450$ [obr/min];
- szybkość skrawania  $V_c=86$  [m/min];
- ilość przejęć  $i=1$ ;
- głębokość skrawania  $a_p=0,25$ .

Toczenie wykańczające:

- posuw  $f=0,1$ [mm/obr];
- prędkość obrotowa  $n=1800$ [obr/min];
- szybkość skrawania  $V_c=340$  [m/min];
- ilość przejęć  $i=1$ ;
- głębokość skrawania  $a_p=0,15$ .

Dla danej klasy dokładność obróbki IT9 zachowana zostanie zakładana chropowatość ( $12,5[\mu\text{m}]$ ) powierzchni, ponieważ dla promienia naroża  $r_e = 0,4$  [mm] i wielkości posuwu  $f=0,1$ [mm/obr] maksymalna wysokość nierówności wyniesie  $R_{a(\text{max})} = 3[\mu\text{m}]$  (rys.2).

### 3. Obróbka z korekcją toru narzędzia

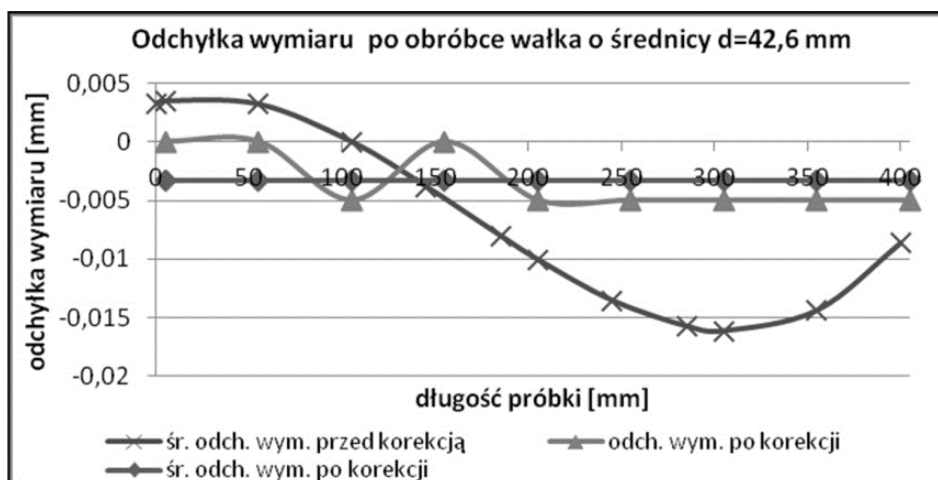
Innym sposobem uzyskania wymiaru wałka  $\text{Ø}60\text{h}9$  w założonej tolerancji jest przeprowadzenie operacji toczenia z korekcją toru narzędzia [5].

Korekcję toru narzędzia skrawającego dla operacji toczenia można przedstawić w następujących etapach [5]:

1. Przeprowadzenie testującego procesu toczenia z zastosowaniem założonych racjonalnych, ze względu na kryteria ekonomiczne, parametrów obróbki.
2. Pomiar odchyłek średnic na całej długości otrzymanego w wyniku eksperymentu wałka.
3. Wyznaczenie funkcji aproksymującej optymalny skorygowany tor narzędzia.
4. Zapisanie funkcji aproksymującej nowy tor narzędzia w programie sterującym obrabiarką (przy pomocy systemu CAM).
5. Przeprowadzenie obróbki z zastosowaniem skorygowanego programu sterującego.
6. Wykonanie pomiarów kontrolnych po operacji technologicznej toczenia.

Przedstawiony algorytm przeprowadzany jest jednorazowo dla danej partii produkcyjnej. Czas przeprowadzenia algorytmu można oszacować na około pół godziny.

W publikacji [5] przeprowadzono weryfikację tego algorytmu dla obróbki wałka o średnicy nominalnej  $d=42,6$  [mm]. Po korekcji otrzymano wymiar  $42,6$  [mm] z odchyłką  $\langle -0,005; 0 \rangle$ . Zakres pola tolerancji dla wyżej przedstawionego przykładu to  $0,005$  [mm]. Wyniki tego eksperymentu pokazano na rys. 4. Dla wałka  $\text{Ø}60\text{h}9$  dopuszczalna odchyłka wymiaru jest większa  $\langle 0,087; 0 \rangle$ . Można zatem przypuszczać, że wymiar po obróbce będzie zawierał się w polu tolerancji.



Rys. 4. Odchyłka wymiaru przed i po korekcji dla wałka o średnicy d=42,6 mm [5]

Aby uzyskać po obróbce wałek w tolerancji  $\text{Ø}60\text{h}9$ , należy przyjąć podane poniżej parametry procesu toczenia.

Obróbka z korekcją toru narzędzia:

- prędkość obrotowa  $n=800$  [obr/min];
- szybkość skrawania  $V_c=150$  [m/min];
- posuw  $f=0,2$  [mm/obr];
- ilość przejść  $i=1$ ;
- głębokość skrawania  $a_p=0,4$  [mm].

Dla danej klasy dokładności obróbki IT9 zachowana zostanie chropowatość powierzchni, ponieważ dla promienia naroża  $r_e = 0,4$  [mm] (zgodnie z Rys. 2) i wielkości posuwu  $f=0,2$  [mm/obr] maksymalna wysokość nierówności wyniesie  $R_{a(\max)}=12,5$  [ $\mu\text{m}$ ]. Na podstawie badań doświadczalnych dla wyżej wymienionych parametrów obróbki wałka  $\text{Ø}60\text{h}9$  chropowatość powierzchni osiągnięto na poziomie  $R_{a(\max)}=11$  [ $\mu\text{m}$ ]. Jest ona niższa niż maksymalna dopuszczalna.

#### 4. Porównanie kosztów obróbki toczenia wałka omówionymi metodami

Czas jednostkowy główny obróbki (1):

$$t_{gj} = \frac{L \cdot i}{f \cdot n} \text{ [min]} \quad (1)$$

gdzie: L – całkowita droga narzędzia [mm],  
i – liczba przejść narzędzia,  
f – posuw [mm/obr],  
n – prędkość obrotowa [obr/min].

Całkowita droga narzędzia (2):

$$L = l + ld + lw \quad [mm] \quad (2)$$

gdzie:  $l$  – długość obrabianego przedmiotu [mm],

$ld$  – dobieg [mm],

$lw$  – wybieg [mm].

Dla analizowanego wałka  $\varnothing 60h9$   $ld = lw = 2mm$ ,  $l = 455mm$ , zatem droga narzędzia wynosi  $L = 459 mm$ .

Czas obróbki toczeniem (3):

$$T = P * tj + l * tpz + tp \quad [h] \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – czas obróbki toczeniem dla programu produkcyjnego wałków[h],

$P$  – program produkcyjny [szt.],

$tj$  – czas jednostkowy obróbki toczeniem [h/szt],

$l$  – liczba serii [seria],

$tpz$  – czas przygotowawczo – zakończeniowy dla serii [h/serie],

$tp$  – czas przeprowadzenia modyfikacji programu sterującego (występuje tylko w obróbce z korekcją toru narzędzia) [h].

Koszt obróbki toczeniem obejmujący koszt pracy pracownika oraz koszt maszynogodziny (4):

$$Kt = T * krm \quad [zł] \quad (4)$$

gdzie:  $Kt$  – koszt obróbki toczeniem dla programu produkcyjnego[zł],

$T$  – czas obróbki toczeniem dla programu produkcyjnego [h],

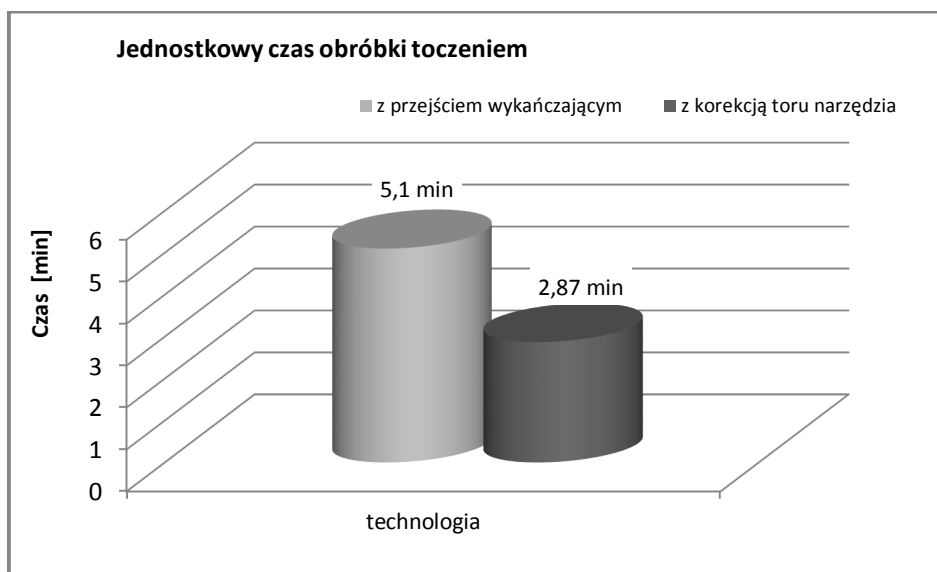
$krm$  – koszt pracy pracownika i koszt maszynogodziny [zł/h].

Koszt roboczogodziny oraz maszynogodziny przyjęto na poziomie  $kj=40zł/h$ , roczny program produkcyjny na poziomie 1000 szt., ilość serii  $l=40$ , czas przygotowawczo-zakończeniowy na serię produkcyjną  $tpz = 0,5 h$ .

Uzyskanie takiej samej dokładności obróbki możliwe jest, jak już wspomniano wcześniej, m.in. na dwa sposoby:

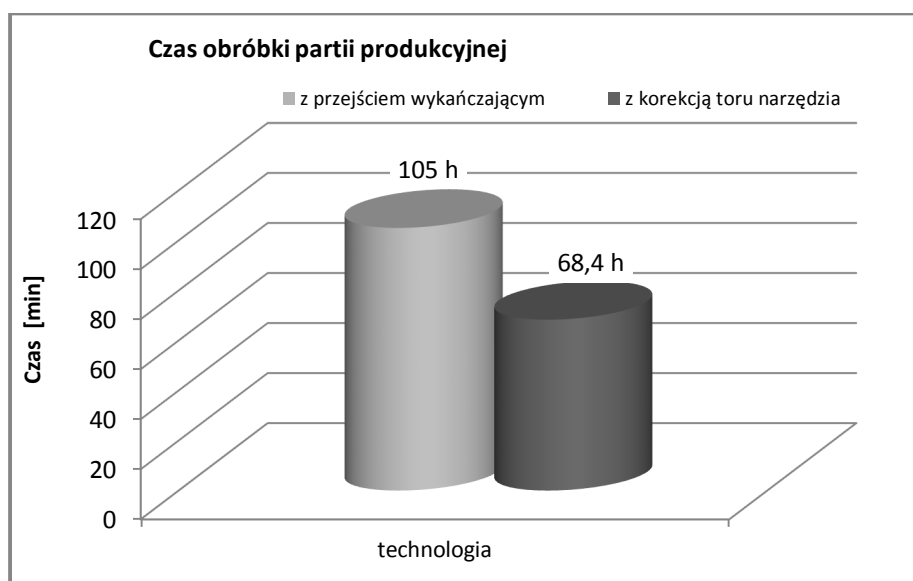
- obróbka z przejściem wykańczającym (strategia I),
- obróbka z korekcją toru narzędzia (strategia II).

Podczas obróbki wałka  $\varnothing 60h9$  z przejściem wykańczającym bez korekcji toru narzędzia czas jednostkowy obróbki wyniósł  $tj = 5,1 min$ . Obróbka przebiegała z jednym przejściem wykańczającym. Czas jednostkowy obróbki z korekcją toru narzędzia wyniósł  $tj = 2,87 min$ . (Rys.5). Dla strategii II jest on mniejszy o prawie 44%.



Rys.5 Jednostkowy czas obróbki toczeniem

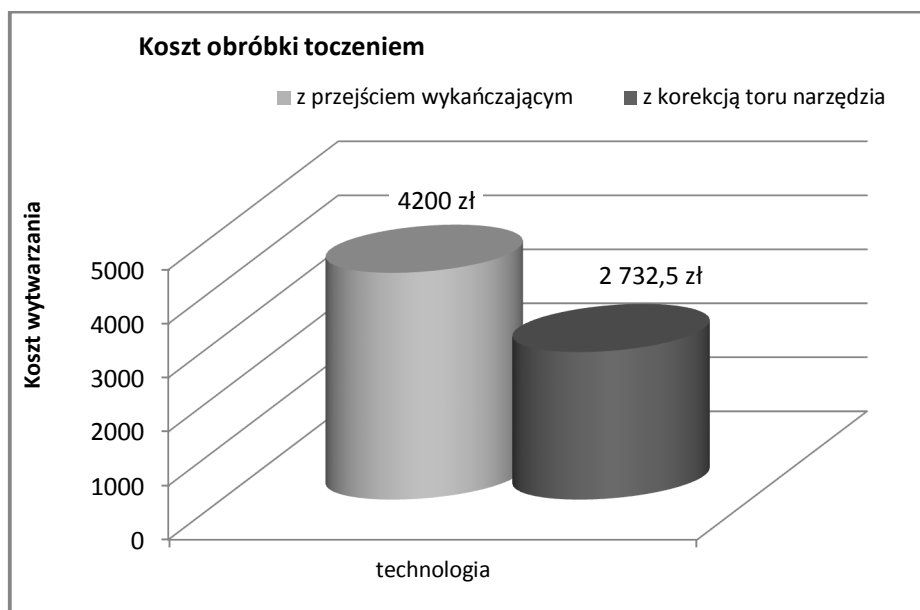
Czas obróbki 1000 szt. rocznie przedmiotów wykonanych pierwszą strategią wyniósł 105 h , zaś drugą 68,4 h (Rys. 6).



Rys.6. Czas obróbki toczeniem partii produkcyjnej 1 000 szt.

Koszt obróbki 1000 szt. rocznie przedmiotów wykonanych obróbką z przejściem wykańczającym, obliczony na podstawie wzoru (4), wyniósł 4200 zł, zaś drugą metodą 2732,5 zł. Zostało to przedstawione na Rys. 7.





Rys. 7. Koszt obróbki toczeniem

Dla obróbki z korekcją toru narzędzia koszt obróbki toczeniem 1000 szt. jest mniejszy o 34,9% od obróbki bez korekcji z przejściem wykańczającym. Zasadne jest więc stosowanie w warunkach przemysłowych korekcji toru narzędzia, ponieważ znacząco wzrasta efektywność ekonomiczna procesu technologicznego przy zachowaniu parametrów geometrycznych narzuconych przez konstruktora wyrobu.

Analiza kosztów uwzględniała tylko czas maszynowy i stawki roboczogodziny stanowiska. Dla porównania kosztów wykonania wałka  $\varnothing 60h9$  różnymi technologiami pominięto koszty związane z: zakupem materiału, narzędzi, itp. Jest to związane z tym, że wpływają one w niewielkim stopniu na koszt wykonania procesu obróbki. Zużycie narzędzia mimo wyższych parametrów obróbki jest niezauważalne, narzędzie podczas obróbki zachowało swoje właściwości zarówno technologiczne, jak i geometryczne. Zostało to potwierdzone w badaniach przeprowadzonych w przedsiębiorstwie Zakład Obróbki Metali KOMECH w Lublinie.

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono porównanie kosztów obróbki toczenia wałka  $\varnothing 60h9$  dwoma metodami: z przejściem wykańczającym oraz poprzez zastosowanie korekcji toru narzędzia skrawającego. Dobrano parametry obróbki tak, aby osiągnąć taką samą dokładność wymiarową obrabianego wałka. Dla obróbki toczeniem 1000 szt. z zastosowaniem algorytmu korekcji toru narzędzia skrawającego koszt jest mniejszy o 34,9%. W obu przypadkach otrzymany przedmiot mieści się w założonym polu tolerancji, dlatego ze względów ekonomicznych zasadne jest stosowanie w warunkach przemysłowych korekcji toru narzędzia.

W celu praktycznej realizacji programu sterującego obrabiarką, w wersji skorygowanej, opracowano algorytmy, wykorzystujące informacje z wielopunktowych pomiarów

geometrii przedmiotu po obróbce testowej, do wyznaczenia nowego toru narzędzia i zapisania go w formie programu sterującego obrabiarką. Algorytmy te zostały opisane w publikacji [5,13,14].

## Literatura

1. Anotaiapaiboon W., Makhanov S.S.: Minimization of the kinematics error for five-axis machining. *Computer-Aided Design*, 43, 12, 2011, s.1740-57.
2. Krupa K., Sieniawski J., Laskowski P.: Zużycie narzędzi skrawających podczas toczenia stopu Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. *Mechanik*, 83, 10, 2010, s.654-61.
3. Fenk J. C-X., Wank D. X-F., Surface roughness predictive modeling: neural networks vs. regression. *IIE Transactions*, 35, 1, 2003, s.11-27.
4. Munawa M., Ching-Shihn C. J., Ahmad M. N.: Investigation of cutting parameters effect for minimization of surface roughness in internal turning. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 1, 2011, s.121-127.
5. Kulisz M.: Weryfikacja algorytmu korekcji toru narzędzia przy toczeniu przedmiotów o małej sztywności, red. Jachowicz T., Kłonica M., Rudawska A. [W:] *Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn: wybrane zagadnienia problemowe. Perfekta info Renata Markisz*, Lublin, 2013, s.26-36.
6. Turek P., Kwaśny W., Jędrzejewski J.: Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn*, 15, 1-2, 2010, s.7-37.
7. Szadkowski J., Stryczek R., Nikiel G.: *Projektowanie procesów technologicznych na obrabiarkach sterowanych numerycznie*. Bielsko-Biała, 1995.
8. Górny J.: *Wykonywanie części maszyn w procesach obróbki skrawaniem*. Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2005.
9. Norma PN-EN ISO 286-1:2011.
10. [http://www.pafana.pl/porady\\_techiczne2.php](http://www.pafana.pl/porady_techiczne2.php) dostęp z dnia 5.01.2015.
11. Matras A.: Analiza wpływu wartości kąta natarcia i posuwu na chropowatość powierzchni obrobionej oraz wartości składowych całkowitej siły skrawania. *Inżynieria Maszyn*. 2014; 18, 4, s. 42-54.
12. Feld M.: *Technologia budowy maszyn. Techniki wytwarzania*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2000.
13. Kulisz M., Lipski J.: Correction of the cutting tool path for milling operations with circular interpolation, red. Świć A., Lipski J., Bojanowska A., [W:] *Informatics method as tools to solve industrial problems*. Lublin, 2012, s.41-50.
14. Kulisz M.: Correction method of the cutting tool path by the average value deviation of dimension for high performance milling operations. *Materiały z międzynarodowej konferencji "Machine-Building And Technosphere Of The XXI Century"*, Donieck, 2012, s.144-147.

Mgr inż. Monika KULISZ  
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa  
Politechnika Lubelska  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38  
tel./fax: (81) 53844 80  
e-mail: m.kulisz@pollub.pl