

Dr inż. Łukasz NOWAKOWSKI;  
dr hab. inż. Edward MIKO, prof. PŚk (Politechnika Świętokrzyska):

## **MODELE DO PROGNOZOWANIA PARAMETRU CHROPOWATOŚCI Ra POWIERZCHNI FREZOWANYCH**

### Streszczenie

Praca zawiera zestawienie modeli wykorzystywanych do prognozowania parametru chropowatości Ra powierzchni frezowanych czołowo oraz walcowo. Jej celem jest przybliżenie metod prognozowania chropowatości technologom oraz inżynierom projektującym procesy frezowania z uwzględnieniem pożądanej chropowatości powierzchni. Przeprowadzona analiza i opis modeli ułatwią przybliżony dobór takich wartości parametrów skrawania, które pozwolą na osiągnięcie wymaganej chropowatości powierzchni.

**Słowa kluczowe:** *chropowatość powierzchni, modele prognozowania chropowatości powierzchni, frezowanie czołowe i walcowe*

## **MODELS FOR PREDICTION OF Ra ROUGHNESS PARAMETERS OF MILLED SURFACES**

### Abstract

The study comprises a comparison of models used to predict the Ra roughness parameter of face and cylindrical milled surfaces. The goal of the study is to provide an insight into roughness prediction methods to technologists and engineers designing milling processes with consideration to the desired surface roughness. The conducted analysis and description of models will facilitate the approximate selection of such machining parameter values that will allow achievement of the required surface roughness.

**Keywords:** *surface roughness, surface roughness prediction models, face and cylindrical milling*

# MODELE DO PROGNOZOWANIA PARAMETRU CHROPOWATOŚCI Ra POWIERZCHNI FREZOWANYCH

Łukasz NOWAKOWSKI<sup>1</sup>, Edward MIKO<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Obróbka frezarska jest obecnie jedną z podstawowych technik wytwarzania stosowanych w przemyśle maszynowym do kształtowania przedmiotów (wyrobów). Głównym problemem, przed którym staje technolog projektując proces frezowania jest osiągnięcie uprzednio zdefiniowanej, jakości produktu dla danego wyposażenia, kosztorysu i ograniczeń czasowych. Niestety dla niektórych charakterystyk jakościowych produktu takich jak struktura geometryczna powierzchni (SGP) trudno jest być pewnym, że te wymagania zostaną spełnione, ponieważ proces powstawania SGP podczas obróbki frezarskiej jest bardzo złożony i wpływa na niego wiele czynników.

Zadaniem technologa jest optymalny dobór wartości parametrów skrawania, które zapewnią pożądaną jakość SGP oraz maksymalną produktywność procesu frezowania przy wykorzystaniu dostępnych środków.

Aby pokonać te problemy na całym świecie trwają prace mające na celu opracowanie modeli, które próbują symulować warunki podczas obróbki frezarskiej, opisać przyczyny i wyniki relacji pomiędzy różnymi czynnikami, które w rezultacie wpływają na końcową, jakość produktu.

Celem pracy jest przybliżenie metod prognozowanie chropowatości technologom oraz inżynierom, którzy projektują proces frezowania z uwzględnieniem pożądanego chropowatości powierzchni. Przeprowadzona analiza i opis modeli ułatwi przybliżony dobór wartości parametrów skrawania, które umożliwią osiągnięcie pożądanego wartości parametru Ra chropowatości powierzchni.

---

<sup>1</sup> Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce

## 2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA SGP

Jakość struktury geometrycznej powierzchni, która zostanie uzyskana w wyniku procesu frezowania zależy od czynników związanych z obrabiarką, narzędziem, materiałem obrabianym i procesem obróbki. Najczęściej spotykanymi w literaturze modelami konstytuowania chropowatości powierzchni są zależności, które opisują stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrza na powierzchni obrabianej. Chropowatość powierzchni w tych modelach zależy od konfiguracji naroża ostrza, jako czynnika geometrycznego i posuwu na ostrze, jako czynnika kinematycznego. Przykłady takich zależności zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie modeli matematycznych do prognozowania chropowatości powierzchni frezowanych

Sposób obróbki	Model matematyczny		Uwzględnione czynniki	Źródło	
Frezowanie czołowe ostrzami o zaokrąglonym narożu	$Rt = \frac{f_z^2}{8 \cdot r_\epsilon}$	(1)	Odwzorowanie ostrza przez: $f_z$ – posuw na ostrze, $r_\epsilon$ – promień naroża ostrza	[3]	
	$Ra = \frac{0,0321 \cdot f_z^2}{r_\epsilon}$	(2)		[1], [16]	
	$Ra = \frac{f_z^2}{32 \cdot r_\epsilon}$	(3)		[7]	
Frezowanie czołowe ostrzami o ostrym narożu	$Ra = \frac{f_z}{4} \cdot \left( \frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r} \right)$		(4)	Odwzorowanie ostrza przez: $f_z$ – posuw na ostrze, $\kappa_r$ – kąt przystawienia główny $\kappa'_r$ – kąt przystawienia pomocniczy	[11]
Frezowanie walcowe	$Ra = \frac{318 \cdot f_z^2}{4D}$		(5)	Odwzorowanie ostrza przez: $f_z$ – posuw na ostrze, D – średnica narzędzia	[14]

Zależność (6) określa wartość parametru Ra uwzględniając posuw na ostrze promień narzędzia oraz liczbę ostrzy narzędzia a także uwzględnia czy proces frezowania walcowego przebiega współbieżnie czy przeciwbieżnie [10], [12].

$$Ra = \frac{f_z^2}{32 \cdot (R \pm \frac{f_z \cdot z}{\pi})} \quad (6)$$

gdzie:  $f_z$  – posuw na ostrze, R – promień narzędzia, z – liczba ostrzy narzędzia,  $\pm$  – znak „+” dotyczy frezowania przeciwbieżnego a „-” – frezowania współbieżnego.

Przedstawione modele są jednak niedokładne, gdyż nie uwzględniają wielu czynników mających istotny wpływ na chropowatość powierzchni frezowanych. Chropowatość powierzchni wyznaczona z tych modeli może być zaniżona od 1,5 do 15 razy w stosunku do wyników pomiaru [5], [6]. Struktura geometryczna powierzchni a w szczególności chropowatość powierzchni jest w rzeczywistości kształtowana na skutek oddziaływań zdeterminowanych i losowych [13].

Głównym powodem rozbieżności między teoretyczną a rzeczywistą wartością chropowatości powierzchni jest złożoność oddziaływania zjawisk, które towarzyszą skrawaniu materiału na proces generowania struktury geometrycznej powierzchni.

Rusek w pracy [9] stwierdza, że na jakość struktury geometrycznej powierzchni uzyskanej w wyniku procesu skrawania wpływają dwa czynniki: odwzorowanie krawędzi naroża ostrza oraz przemieszczenia względne narzędzia i przedmiotu obrabianego. Autorzy [4] twierdzą, że w rzeczywistych warunkach ostrza głowicy frezarskiej nie są idealnie ustawione w gnieździe korpusu, błędy te wynikają z technologii wykonania narzędzia i wpływają na chropowatość powierzchni obrabianej.

Model matematyczny uwzględniający czynniki związane z narzędziem i obrabiarką opracował autor pracy [15]. Zależność (7) prezentuje model chropowatości powierzchni frezowanej walcowo uwzględniającą wariancję przemieszczeń względnych frezu i przedmiotu obrabianego oraz wariancję bicia promieniowego ostrzy narzędzia.

$$Ra = \frac{5}{9} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{f_z^4}{150 \cdot d^2} + D^2(\xi) + D^2(\rho)} \quad (7)$$

gdzie:  $f_z$  – posuw na ostrze,  $d$  – średnica narzędzia,  $D^2(\rho)$  – wariancja bicia ostrzy frezu lub głowicy frezowej,  $D^2(\xi)$  – wariancja przemieszczeń względnych w układzie N – PO.

Zależność (8) opisuje konstytuowanie chropowatości powierzchni frezowanej czołowo ostrzami o ostrym narożu. Autor pracy [11] przy opracowywaniu modelu uwzględnił:

- stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie ostrza [8],
- przemieszczenia względne głowicy frezowej i przedmiotu obrabianego w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej [4],
- bicie czołowe ostrzy [4].

$$Ra = \sqrt{\left(\frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r}\right)^2 \frac{f_z^2}{16} + \frac{3}{4} D^2(\xi) \left(1 + \frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{(\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r)^2}\right) + \frac{3}{8} e^2 \left[1 + \frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r}\right] \left(1 - \cos \frac{2\pi}{z}\right)} \quad (8)$$

gdzie:  $f_z$  – posuw na ostrze,  $D^2(\xi)$  – wariancja przemieszczeń względnych w układzie N – PO,  $\kappa_r$ ,  $\kappa'_r$  – kąt przystawienia główny, pomocniczy,

e – bicie czołowe (promieniowe) ostrzy, z – liczba ostrzy narzędzia.

Dla przypadku gdy  $\frac{f_z \cdot z}{2e} > 50$  bicie czołowe ostrzy będzie powodować falistość powierzchni. Wtedy do zależności (8) trzeba wstawić  $e=0$  i zależność przyjmie następującą postać:

$$Ra = \sqrt{\left(\frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r}\right)^2 \cdot \frac{f_z^2}{16} + \frac{3}{4} \cdot D^2(\xi) \left(1 + \frac{\tan \kappa_r \cdot \tan \kappa'_r}{(\tan \kappa_r + \tan \kappa'_r)^2}\right)} \quad (9)$$

Analizując dokładnie geometrię płytek skrawających narzędzia stwierdzono, że krawędź ostrza skrawającego nie jest idealnie ostra, lecz posiada pewien promień zaokrąglenia  $r_n$ , który powstaje w procesie produkcji. Brammertz w pracy [2] wykazał, że rozbieżności między teoretyczną i rzeczywistą chropowatością powierzchni są spowodowane tym, że podczas skrawania nie zostanie usunięta część naddatku obróbkowego, którego grubość jest równa pewnej wartości granicznej, zwanej minimalną grubością warstwy skrawanej  $h_{\min}$ .

Najbardziej rozbudowanym modelem analitycznym do prognozowania chropowatości powierzchni frezowanych czołowo jest model opracowany przez autora [11] uwzględnia on:

- stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrzy głowicy frezowej,
- resztkową część naddatku obróbkowego,
- przemieszczenia względne głowicy frezowej i materiału obrabianego w kierunku prostopadłym do powierzchni obrobionej,
- bicie czołowe ostrzy,
- zużycie ostrzy skrawających.

Ponadto założono, że:

- drgania w układzie obróbkowym występują niezależnie od bicia ostrzy.

Autor pracy [11] profil poprzeczny powierzchni utworzonej po przejściu i – tego ostrza podczas l – tego obrotu głowicy frezowej, przemieszczającej się wzdłuż osi x ruchem posuwowym, wykonującej dodatkowo drgania oraz bicie czołowe ostrzy, zapisał za pomocą równania:

$$y_{i1}(x) = \frac{1}{2r_e} \cdot (x - f_z \cdot i_1)^2 + \rho_i + \xi_{i1} \quad (10)$$

przy czym:  $i_1 = z(l-1) + i - 1$

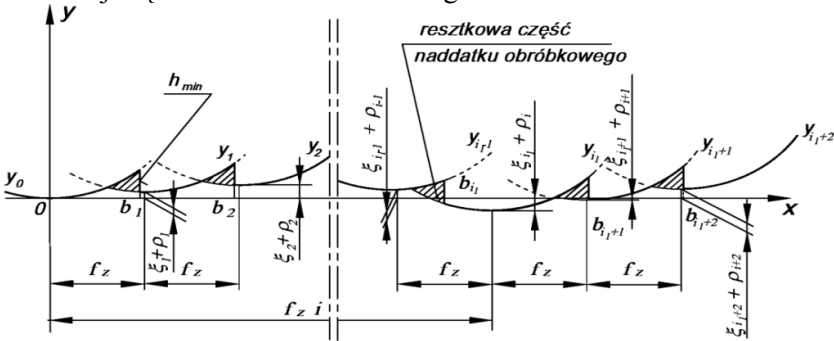
gdzie:  $\rho_i$  – chwilowe położenie i – tego ostrza względem przedmiotu obrabianego, pochodzące od bicia czołowego,  $\xi_{i1}$  – chwilowe przemieszczenie względne i – tego ostrza podczas l – tego obrotu głowicy frezowej, pochodzące od drgań względnych, z – liczba ostrzy frezu.

Chwilowe położenie i – tego ostrza względem przedmiotu obrabianego pochodzące od bicia czołowego  $\rho_i$  można opisać za pomocą zależności:

$$\rho_i \approx -e \cdot \cos \left[ (i-1) \cdot \frac{2\pi}{z} \right] \quad (11)$$

gdzie:  $e$  – bicie czołowe ostrzy.

Na rys. 6 przedstawiono profil poprzeczny stereometryczno-kinematycznego odwzorowania ostrzy głowicy frezowej na powierzchni obrabianej uwzględniający jej przemieszczenia względem przedmiotu obrabianego, bicia czołowego ostrzy oraz resztkowej części nadatku obróbkowego.



Rys. 1. Profil poprzeczny nierówności powierzchni frezowanej czołowo z posuwem  $f_z$  głowicą frezową z ostrzami o zaokrąglonym narożu o promieniu  $r_\epsilon$ , powstający przy uwzględnieniu przemieszczeń względnych  $\xi_{ii}$  narzędzia i przedmiotu obrabianego oraz chwilowego położenia ostrzy, pochodzącego od bicia czołowego  $\rho_i$  [11]

W zależności od kształtu profilu powierzchni frezowanej, która wynika z wartości posuwu autor pracy [11] podaje kilka charakterystycznych równań. Zależności służące do wyznaczenia parametru  $R_a$  powierzchni frezowanej czołowo dla odpowiednich przedziałów posuwów podano poniżej.

Podczas frezowania czołowego z dużymi posuwami  $f_z \leq \sqrt{2r_\epsilon h_{\min}}$  do prognozowania chropowatości powierzchni należy stosować zależność (12), w której dominującą rolę odgrywa człon zawierający posuw  $\left(\frac{f_z^4}{972 \cdot r_\epsilon^2}\right)$ , który uwzględnia wpływ odwzorowania ostrza. Zauważono, że wraz ze wzrostem posuwu wpływ stereometryczno-kinematycznego odwzorowania ostrzy na wartość parametru  $R_a$  jest coraz większy.

$$Ra = \sqrt{\frac{f_z^4}{972r_\epsilon^2} \cdot \frac{5}{81} h_{\min}^2 + \frac{50}{81} \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos \left( \frac{2\pi}{z} \right) \right) \right] + \frac{40r_\epsilon^2 h_{\min}^2}{27f_z^4} \cdot \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{z} \right) \right) \right]} \quad (12)$$

gdzie:  $f_z$  – posuw na ostrze,  $r_\epsilon$  – promień naroża ostrza,  $h_{\min}$  – minimalna grubość warstwy skrawanej,  $D^2(\rho)$  – wariancja bicia ostrzy frezu lub głowicy frezowej,  $D^2(\xi)$  – wariancja przemieszczeń względnych w układzie N – PO z – liczba ostrzy narzędzia.

W miarę zmniejszania się posuwu do zakresu  $\sqrt{r_\epsilon h_{\min}} < f_z \leq \sqrt{2r_\epsilon h_{\min}}$  wpływ odwzorowania ostrzy maleje (człon zawierający posuw maleje), a znaczącą

rolę zaczynają pełnić człony zawierające,  $h_{\min}$  oraz  $D^2(\xi)$  i  $D^2(\rho)$ , stąd dla tego zakresu prędkości posuwowej należy stosować zależność (13) poniżej.

$$Ra = \sqrt{\left[ \frac{f_z^4}{18\sqrt{3}r_\varepsilon} + \frac{2h_{\min}}{9\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{\min}}{f_z^2} \right) \right]^2 + \frac{50}{81} \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]} + \frac{40}{81} \left[ \frac{r_\varepsilon^2 h_{\min}^2}{f_z^2 (f_z^2 + 2r_\varepsilon h_{\min})} + \frac{2 \cdot r_\varepsilon^3 \cdot h_{\min}^3}{f_z^4 (f_z^2 + 2r_\varepsilon h_{\min})} \right] \cdot \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right] \quad (13)$$

Podczas frezowania z małymi wartościami posuwu  $f_z \leq \sqrt{r_\varepsilon h_{\min}}$ , do obliczenia wartości parametru Ra autor pracy [11] opracował zależność rekurencyjną. W tym przypadku podczas obróbki z małymi wartościami posuwu następuje częściowe wygładzenie wcześniej ukształtowanych nierówności powierzchni k – tym ostrzem.

$$Ra = \sqrt{\left[ \frac{f_z^2 k^2}{18\sqrt{3}r_\varepsilon} + \frac{2h_{\min}}{9\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{r_\varepsilon h_{\min}}{f_z^2 k^2} \right) \right]^2 + \frac{50}{81} \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]} + \frac{40}{81} \left[ \frac{r_\varepsilon^2 h_{\min}^2}{f_z^2 k^2 (f_z^2 k^2 + 2r_\varepsilon h_{\min})} + \frac{2r_\varepsilon^3 h_{\min}^3}{f_z^4 k^4 (f_z^2 k^2 + 2r_\varepsilon h_{\min})} \right] \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right] \quad (14)$$

Równania (13, 14) są skomplikowane i niewygodne w praktycznym zastosowaniu. Z tego względu autor podał również uproszczone zależności (tabela 2). Błąd wynikający z tego przybliżenia w najbardziej niekorzystnym teoretycznym przypadku nie przekracza 15%. Natomiast dla warunków obróbki wykończeniowej frezowaniem głowicą czołową z ostrzami okrągłymi będzie się mieścił w przedziale 1 – 5% [11].

Tabela 2. Uproszczone wzory do prognozowania chropowości powierzchni Ra frezowanych czołowo [11]

Lp.	Przedział posuwu $f_z$	Przybliżone zależności do obliczenia parametru Ra
1.	$f_z \leq \sqrt{2r_\varepsilon h_{\min}}$	$Ra = \sqrt{\frac{f_z^4}{972r_\varepsilon^2} \cdot \frac{5}{81} h_{\min}^2 + \frac{50}{81} \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]} + \frac{40r_\varepsilon^2 h_{\min}^2}{27f_z^4} \cdot \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]} \quad (15)$
2.	$\frac{100}{z} \frac{e}{z} < f_z \leq \sqrt{2r_\varepsilon h_{\min}}$	$Ra = \sqrt{\frac{16}{243} h_{\min}^2 + \frac{60}{81} D^2(\xi)} \quad (16)$
3.	$f_z \leq 100 \frac{e}{z}$	$Ra = \sqrt{\frac{16}{243} h_{\min}^2 + \frac{60}{81} D^2(\xi) \left[ D^2(\xi) + D^2(\rho) \left( 1 + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{2\pi}{z}\right) \right) \right]} \quad (17)$

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

1. Najczęściej spotykanymi w literaturze modelami konstytuowania chropowatości powierzchni są zależności, które opisują stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrza na powierzchni obrobionej.
2. Modele opisujące tylko stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrza na powierzchni obrobionej są niedokładne, gdyż nie uwzględniają wielu czynników mających istotny wpływ na chropowatość powierzchni frezowanych. Chropowatość powierzchni w tych modelach zależy od konfiguracji naroża ostrza, jako czynnik geometryczny i posuwu na ostrze, jako czynnik kinematyczny. Chropowatość powierzchni wyznaczona z tych modeli może być zaniżona od 1,5 do 15 razy w stosunku do wyników pomiaru [5], [6].
3. Model analityczny do prognozowania chropowatości powierzchni frezowanych czołowo, który bierze pod uwagę złożoność oddziaływania zjawisk towarzyszących skrawaniu materiału jest model opracowany przez autora [11] uwzględnia on:
  - stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrzy głowicy frezowej,
  - resztkową część nadatku obróbkowego,
  - przemieszczenia względne głowicy frezowej i materiału obrabianego w kierunku prostym do powierzchni obrobionej,
  - bicie czołowe ostrzy,
  - zużycie ostrzy skrawających.
  - drgania w układzie obróbkowym występują niezależnie od bicia ostrzy.
4. Modele analityczne konstytuowania chropowatości powierzchni wykorzystują tylko 9 czynników, z czego jeden wzór maksymalnie zawiera 6 czynników wpływających na SGP.

## LITERATURA

- [1] *Boothroyd G., Knight W.A.*: Fundamentals of machining and machine tools. Marcel Dekker. New York 2006.
- [2] *Brammertz P.H.*: Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindreihen. Industrie- Anzeiger, nr 2. Essen 1961, s. 25-32.
- [3] *Cieloszyk J., Olszak W., Skrodzewicz E., Sobkowiak E.*: Stan geometryczny powierzchni frezowanej czołowo z dużymi posuwami. Materiały Konferencji I Forum Prac Badawczych „Kształtowanie części maszyn przez usuwanie materiału”. Koszalin 1994, s. 46-55.
- [4] *Dae K.B., Tae J.K., Hee S.K.*: A dynamic surface roughness model for face milling. Precision Engineering, Vol. 20, No. 3. New York 1997, s. 171-178.
- [5] *Grzesik W.*: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. WNT. Warszawa 2010.



- [6] *Grzesik W.*: Podstawy skrawania materiałów metalowych. WNT. Warszawa 1998.
- [7] *Junelia B.L., Sekhon G.S.*: Fundamentals of Metal Cutting And Machine Tools. 1st edition Wiley Eastern Limited. New Delhi 1987.
- [8] *Kawalec M., Kodym J.*: Teoretyczna chropowatość powierzchni po frezowaniu czołowym. *Mechanik* 1974, s. 500-501.
- [9] *Lasota A., Rusek P.*: Influence of random vibrations on the roughness of turned sur-faces. *Journal of Mechanical Working Technology*, No. 7 1982/83, s. 277-284.
- [10] *Martelotti M.*: Analysis of the mailling process. *Trans.ASME*, Vol63 1941, s. 667-700.
- [11] *Miko E.*: Konstytuowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrabionych narzędziem o zdefiniowanej stereometrii ostrzy. Monografie, studia, rozprawy 46. Kielce 2004.
- [12] *Montgomery D., Altintas Y.*: Mechanism of cutting forces and surface generation in dynamic milling. *ASME J. ENG. IND.* 1991, s. 160-168.
- [13] *Oczóś K., Liubimov V.*: Struktura geometryczna powierzchni podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych. Rzeszów 2003.
- [14] *Palanisamy P., Rajendran I., Shanmugasundaram S.*: Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London 2006.
- [15] *Stępiński L.*: Wpływ przemieszczeń względnych w układzie: narzędzie przedmiot obrabiany, na chropowatość powierzchni frezowanej walcowo. Rozprawa doktorska, AGH. Kraków 1982.
- [16] *Whitehouse D.J.*: Handbook of Surface Metrology. Institute of Physics Publishing. Bristol 1994.