

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **234995**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **424982**

(51) Int.Cl.  
**B23C 3/00 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **21.03.2018**

---

(54) **Sposób minimalizacji chropowatości powierzchni podczas 5-osiowego frezowania powierzchni krzywoliniowych**

---

(43) Zgłoszenie ogłoszono:  
**23.09.2019 BUP 20/19**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:  
**18.05.2020 WUP 05/20**

(73) Uprawniony z patentu:  
**POLITECHNIKA POZNAŃSKA, Poznań, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:  
**SZYMON WOJCIECHOWSKI, Kościan, PL**

(74) Pełnomocnik:  
**rzec. pat. Marcin Walkowiak**

---

**PL 234995 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób minimalizacji chropowatości powierzchni podczas 5-osio-owego frezowania powierzchni krzywoliniowych. Sposób według wynalazku znajduje zastosowanie w wykończeniowej oraz precyzyjnej obróbce części o złożonych, krzywoliniowych zarysach, stosowanych głównie w produkcji form i matryc, a także przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i inżynierii biomedycznej.

Chropowatość powierzchni ukształtowana podczas frezowania uzależniona jest głównie od geometrii frezu, dobranych wartości parametrów frezowania, typu materiału obrabianego, a także właściwości dynamicznych i błędów geometrycznych układu obrabiarka-uchwyt-narzędzie. Znane obecnie metody obniżenia wartości parametrów chropowatości powierzchni podczas frezowania bazują głównie na zmianie wartości parametrów frezowania (np. prędkości obrotowej  $n$  i prędkości skrawania  $v_c$ , posuwu na ostrze  $f_z$ ). Działania te w znaczący sposób mogą wpłynąć na obniżenie chropowatości powierzchni, jednakże mogą się również przyczynić do wydłużenia czasu obróbkowego lub obniżenia okresu trwałości ostrzy frezu, co w warunkach produkcyjnych jest często niedopuszczalne. Inne podejścia dotyczą układu narzędzie-uchwyt i obejmują zastosowanie frezów o większych średnicach  $D$ , mniejszych promieniach zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej  $r_n$ , mniejszych wysięgach narzędzia  $l$ , a także użyciu uchwytów o zwiększonej sztywności i współczynnika tłumienia drgań, wysokiej klasie wyważenia dynamicznego, a także mniejszej wartości bicia promieniowego i osiowego. Znane są także metody oparte na zmianie strategii obróbkowej.

Jednakże, niezależnie od podejścia, stosowane dotychczas sposoby obniżania wartości parametrów chropowatości powierzchni podczas frezowania powierzchni krzywoliniowych nie uwzględniają wartości kąta pochylenia osi frezu  $\beta$ , względem pionowej osi Z – co pokazano na fig. 1 rysunku. Kąt ten zlokalizowany jest w – przechodzącej przez pionową oś Z – płaszczyźnie P, prostopadłej do płaszczyzny stycznej z kierunkiem ruchu posuwowego  $v_f$  frezu i pionowej osi Z. Wiele badań wykazuje, że wartość dobrego kąta  $\beta$  w istotny sposób rzutuje na wartości sił i drgań wygenerowanych podczas frezowania, a w ten sposób również na formowaną strukturę geometryczną obrobionej powierzchni. Znane jest obecnie podejście frezowania z pochyleniem osi frezu o stałą wartość kąta  $\beta$ , w celu wydłużenia trwałości ostrza. Niemniej jednak dobór wartości kąta  $\beta$  w tym przypadku nie uwzględnia uzyskanego stanu struktury geometrycznej obrobionej powierzchni, a w ten sposób nie może być stosowany na potrzeby minimalizacji parametrów chropowatości. Dlatego też, zasadnym okazało się opracowanie sposobu frezowania powierzchni krzywoliniowej ze stałą – w funkcji drogi skrawania – wartością kąta  $\beta$ , dobraną w taki sposób, aby zminimalizować wartości parametrów chropowatości powierzchni. Należy jednak podkreślić, że w zależności od rodzaju materiału obrabianego i zastosowanego układu obrabiarka-uchwyt-narzędzie, wartości kątów  $\beta$  minimalizujące chropowatość powierzchni mogą być różne. W związku z tym obniżanie chropowatości powierzchni podczas frezowania powierzchni krzywoliniowych na bazie dobrego kąta  $\beta$  jest zadaniem złożonym, wymagającym opracowania ukierunkowanego sposobu.

Istotą wynalazku jest sposób minimalizacji chropowatości powierzchni podczas 5-osio-owego frezowania powierzchni krzywoliniowych, w którym w pierwszej kolejności przeprowadza się co najmniej trzy przejścia robocze narzędzia, obejmujące frezowanie frezem kulistym lub torusowym powierzchni płaskich na pięcioosiowej frezarce. Przy czym istotnym jest, aby każde z wykonywanych przejść roboczych narzędzia przeprowadzane było z inną zadaną wartością kąta pochylenia osi frezu ( $\beta_1, \beta_2, \dots$ ), zawartą w przedziale  $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$  i stałymi wartościami pozostałych parametrów skrawania (osiowej głębokości skrawania  $a_p$ , prędkości skrawania  $v_c$  oraz promieniowej głębokości skrawania  $a_e$ ), z zachowaniem odległości wierszowania  $b_r > a_e$ .

Następnie dokonuje się pomiarów rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni, wzdłuż wykonanych rowków w obrobionym przedmiocie.

Po czym na bazie sformułowanego równania regresji w postaci wielomianu stopnia drugiego, rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni w funkcji kąta  $\beta$ , a następnie poszukiwaniu wartości kąta  $\beta_{opt}$ , odpowiadającego minimalnej wartości parametru chropowatości powierzchni, ustala się pochylenie osi frezu o niezmienną w funkcji toru narzędzia wartość kąta  $\beta_{opt}$ . Ustaloną wartość implementuje się w stosowanej strategii frezowania powierzchni krzywoliniowej, jako optymalną dla minimalizacji chropowatości powierzchni.

Sposób według wynalazku przedstawiono pomocniczo na rysunku, na którym fig. 1 pokazuje modelowy schemat ideowy zawierający etapy sposobu minimalizacji chropowatości powierzchni podczas 5-osio-owego frezowania powierzchni krzywoliniowych oraz zasad ustalenia optymalnych wartości i ich

implementacji; fig. 2 pokazuje frezowanie frezem kulistym z kątem  $\beta$ , fig. 3 natomiast pokazuje schemat serii trzech przejść roboczych frezem kulistym powierzchni płaskiej z różnymi wartościami kąta  $\beta$ , spełniającymi warunek  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$ , fig. 4 pokazuje obróbkę powierzchni krzywoliniowej z zastosowaniem kąta  $\beta_{opt}$ , na fig. 5 porównano zmierzone wartości parametru  $Ra$  podczas frezowania powierzchni krzywoliniowej z kątem  $\beta = 0^\circ$  oraz  $\beta_{opt} = 22^\circ$ .

W pierwszym etapie realizacji sposobu według wynalazku przeprowadzono cztery przejścia robocze narzędzia 1 obejmujące frezowanie frezem kulistym lub torusowym powierzchni płaskich na pięcioosiowej frezarce – co pokazano ideowo na fig. 3.

Każde wykonywane przejście narzędzia realizowano z inną zadaną wartością kąta pochylenia osi frezu ( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ), lecz ze stałymi wartościami pozostałych parametrów skrawania (osiowej głębokości skrawania  $a_p$ , prędkości skrawania  $v_c$  oraz promieniowej głębokości skrawania  $a_e$ ). Przy czym istotnym jest, aby wykonane w wyniku przejść narzędzi rowki nie nakładały się na siebie. W tym celu zastosowano odległość wierszowania  $b_r > a_e$ .

Realizując sposób według wynalazku należy pamiętać, że niezależnie od rodzaju materiału obrabianego, należy dobrać wartości kąta pochylenia osi frezu  $\beta$ , zawarte w przedziale:  $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ , gdyż w przypadku wartości kątów  $\beta > 60^\circ$  istnieje ryzyko kolizji elementów układu obrabiarka-uchwyt-narzędzie z obrabianym przedmiotem lub systemem mocowania.

W przypadku osiowej głębokości  $a_p$  i prędkości skrawania  $v_c$  ich stałe wartości mogą być dobrane zgodnie z zaleceniami technologicznymi obróbki lub producenta narzędzia, odnośnie badanego materiału obrabianego.

Dobór minimalnej liczby przejść, wynoszącej co najmniej trzy podyktowany jest koniecznością wyznaczenia równania regresji rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni w funkcji kąta  $\beta$ .

W kolejnym etapie sposobu dokonuje się pomiarów rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni 2, wzdłuż wykonanych rowków w obrobionym przedmiocie. W tym celu można zastosować ogólnie dostępne stykowe lub optyczne profilografometry. W wyniku przeprowadzonych pomiarów, otrzymuje się wartości rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni dla zbadanych wartości kąta  $\beta$ .

Na podstawie wyniku pomiarów formułuje się równania regresji 3 rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni w funkcji kąta  $\beta$ . Ze względu na niemonotoniczny wpływ wielkości  $\beta$  na parametry chropowatości powierzchni, stosuje się model w postaci wielomianu stopnia drugiego, wyrażony w następującej postaci:

$$Ri = a \cdot \beta^2 + b \cdot \beta + c \quad (A)$$

gdzie:  $Ri$  – rozpatrywany parametr chropowatości powierzchni (np.  $Ra$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej lub  $Rz$  – wysokość chropowatości powierzchni),

$a, b, c$  – wyznaczone doświadczalnie stałe.

W finalnym etapie zaproponowanego sposobu wyznacza się wartości kąta  $\beta_{opt}$  4, odpowiadającego minimalnej wartości parametru chropowatości powierzchni. W tym celu można posłużyć się matematyczną metodą poszukiwania minimum funkcji, opisanej wzorem (A). W wyniku przekształceń, otrzymuje się:

$$\beta_{opt} = \frac{-b}{2a} \quad (B)$$

którą to wartość implementuje się w stosowanej strategii frezowania powierzchni krzywoliniowej 5, bazującej na pochyleniu osi frezu o niezmienną w funkcji toru narzędzia i wyznaczoną na bazie równania (B) wartość kąta  $\beta_{opt}$  – jak pokazano na fig. 3. W tym celu można posłużyć się ogólnie dostępnym oprogramowaniem typu CAM.

Sposób pozwala na obniżenie chropowatości obrobionej powierzchni krzywoliniowej bez ingerencji w parametry frezowania. W ten sposób można uzyskać poprawę jakości obrobionej powierzchni bez wydłużenia czasu obróbkowego lub obniżenia okresu trwałości ostrzy frezu. W efekcie może się to przyczynić do poprawy efektów technologicznych i ekonomicznych obróbki.

Sposób minimalizacji chropowatości obrobionej powierzchni zrealizowano podczas frezowania zahartowanej stali narzędziowej o średniej twardości 45 HRC, pełnowęglkowym frezem kulistym z powłoką TiAlN (średnica narzędzia  $D = 8$  mm, liczba ostrzy  $z = 2$ , główny kąt natarcia  $\gamma_o = -10^\circ$ , główny kąt

przyłożenia  $\alpha_o = 6^\circ$ , kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej  $\lambda_s = 30^\circ$ ). Przejścia robocze przeprowadzono na pięcioosiowym centrum frezarskim.

W celu wyznaczenia równania (A) – jak wcześniej wskazano – wykonano cztery przejścia doświadczalne, obejmujące frezowanie powierzchni płaskiej z kątami pochylenia obrabianej powierzchni:  $\beta_1 = 0^\circ$ ,  $\beta_2 = 10^\circ$ ,  $\beta_3 = 20^\circ$ ,  $\beta_4 = 30^\circ$ , stałym posuwem na ostrze  $f_z = 0,04$  mm/ostrze, stałą prędkością skrawania  $v_c = 150$  m/min i stałą osiową głębokością skrawania  $a_p = 0,15$  mm. Pomiaru parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  wykonano równoległe do kierunku ruchu posuwowego, przy zastosowaniu stykowego profilografometru. Otrzymano równanie (A), w następującej postaci:

$$Ra = 0,0002 \beta^2 - 0,0088 \cdot \beta + 0,245 \quad (A)$$

Po podstawieniu współczynników równania (A) do równania (B), otrzymano wartość  $\beta_{opt} = 22^\circ$ .

W celu walidacji sposobu przeprowadzono frezowanie powierzchni krzywoliniowej o promieniu wklęsłości wynoszącej 200 mm, z zastosowaniem frezowania w trybie wierszowania z posuwem na ostrze i odległością wierszowania  $f_z = b_r = 0,04$  mm/ostrze, prędkością skrawania  $v_c = 150$  m/min i osiową głębokością skrawania  $a_p = 0,15$  mm. Niemniej jednak w pierwszym przypadku zastosowano podejście tradycyjne (bez pochylenia osi frezu –  $\beta = 0^\circ$ ), natomiast w drugim zaimplementowano stałą wartość pochylenia osi frezu, wynoszącą  $\beta_{opt} = 22^\circ$ .

Wykonane na obrobionych powierzchniach pomiary wykazały, że zastosowanie sposobu minimalizacji chropowatości powierzchni umożliwia – w badanym przypadku – zmniejszenie wartości parametru  $Ra$  o około 32% w stosunku do wartości otrzymanych podczas frezowania bez zastosowania opracowanego sposobu, co przedstawia fig. 5 rysunku.

### Zastrzeżenie patentowe

1. Sposób minimalizacji chropowatości powierzchni podczas 5-osiowego frezowania powierzchni krzywoliniowych, **znamienny tym**, że w pierwszej kolejności przeprowadza się co najmniej trzy przejścia robocze narzędzia (1), obejmujące frezowanie frezem kulistym lub torusowym powierzchni płaskich na pięcioosiowej frezarce, przy czym każde z przejść roboczych narzędzia przeprowadzane jest z inną zadaną wartością kąta pochylenia osi frezu ( $\beta_1, \beta_2, \dots$ ), zawartą w przedziale  $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$  i stałymi wartościami pozostałych parametrów skrawania (osiowej głębokości skrawania  $a_p$ , prędkości skrawania  $v_c$  oraz promieniowej głębokości skrawania  $a_e$ ), z zachowaniem odległości wierszowania  $b_r > a_e$ , następnie dokonuje się pomiarów rozpatrywanego parametru chropowatości powierzchni (2), wzdłuż wykonanych rowków w obrobionym przedmiocie i na podstawie pomiarów ustala się (4) pochylenie osi frezu o niezmienną w funkcji toru narzędzia wartość kąta  $\beta_{opt}$ .

## Rysunki

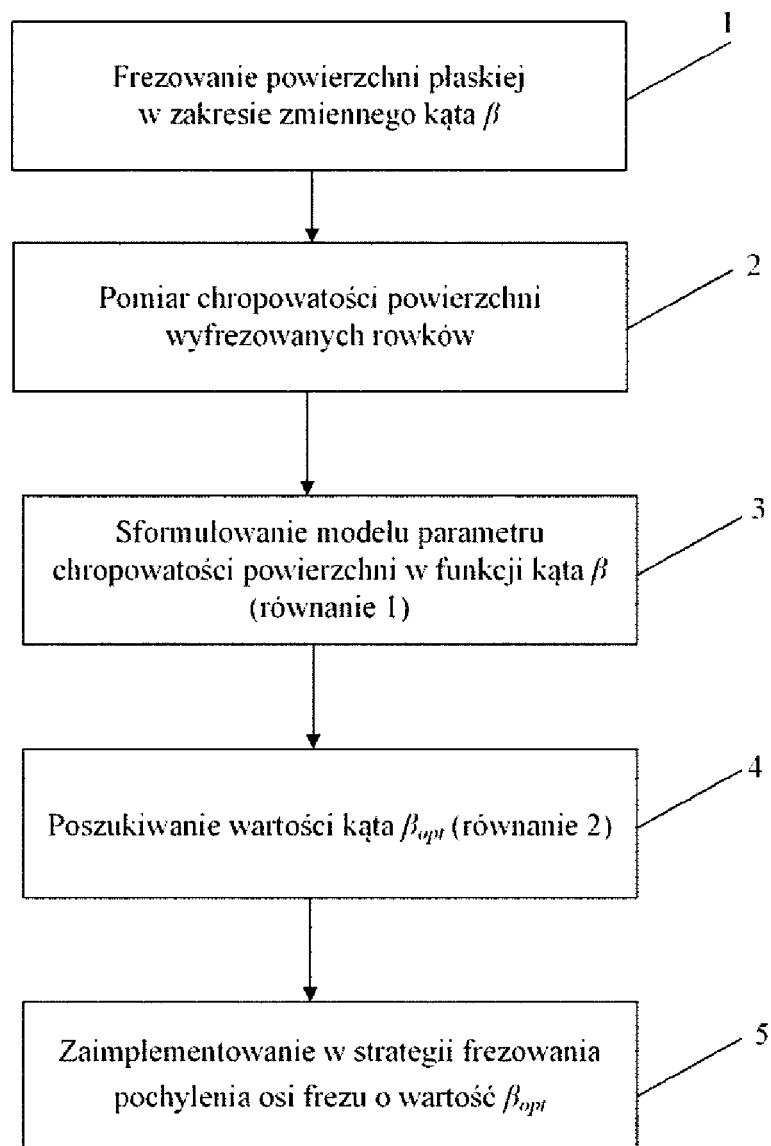


fig. 1

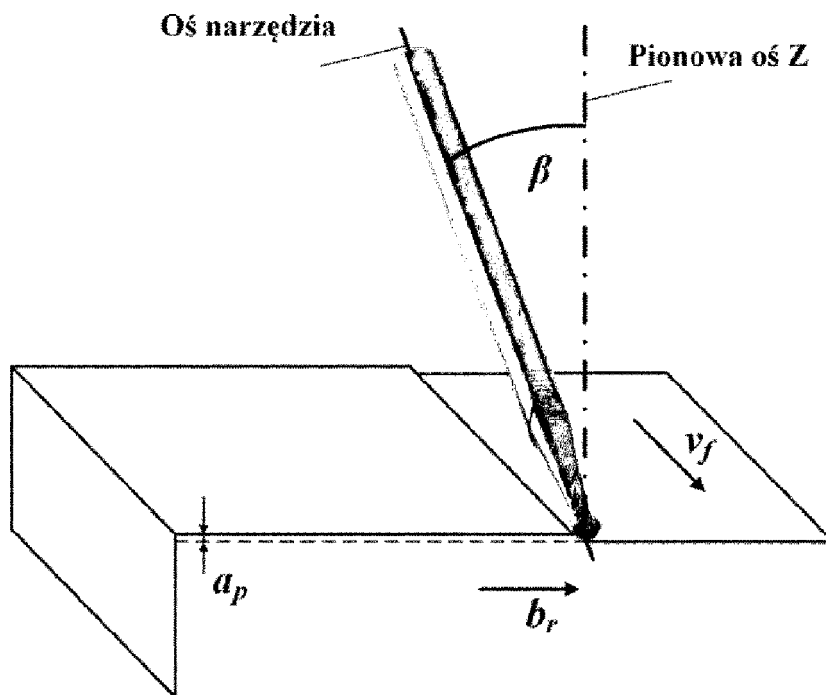


fig. 2

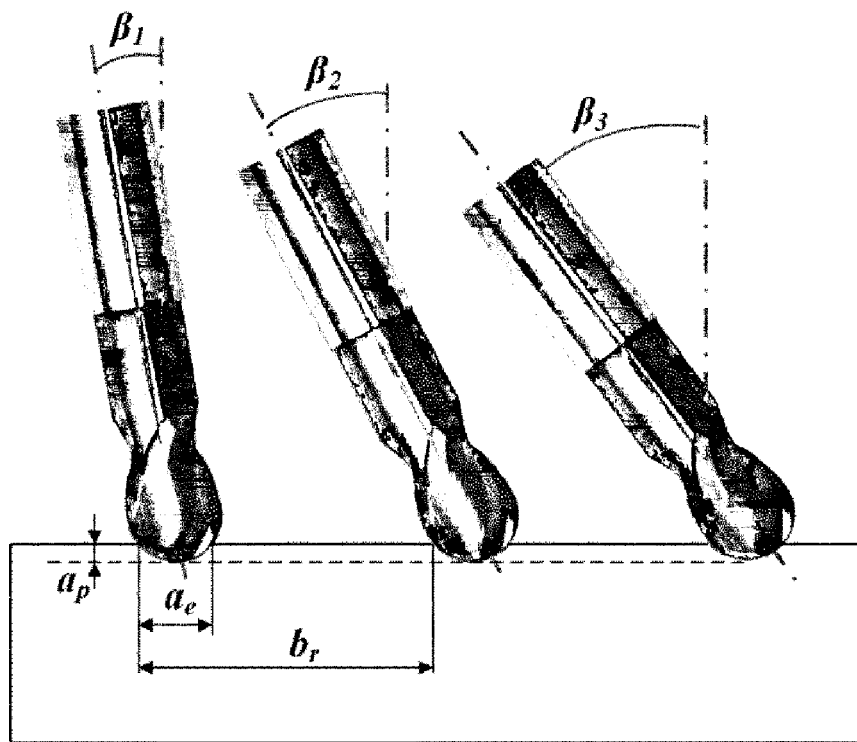


fig. 3

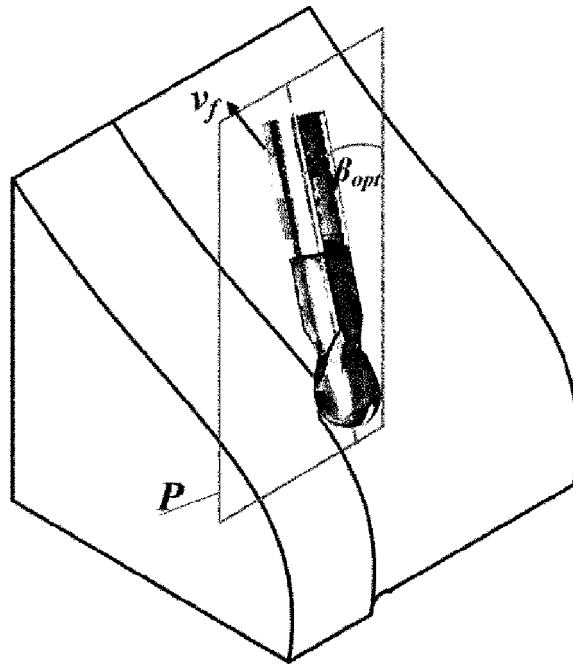


fig. 4

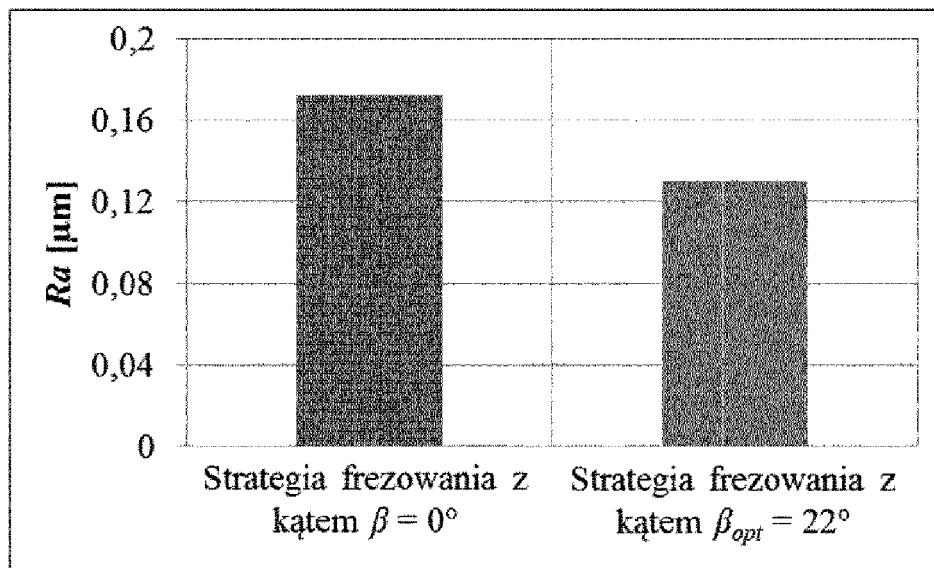


fig. 5