

Krzysztof NADOLNY

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

Oszacowanie dokładności kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie

Dr inż. Krzysztof NADOLNY

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2001 r.). W 2006 r. obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską. Od 2006 r. jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w badaniach nad innowacyjnymi narzędziami ściernymi oraz nowymi odmianami kinematycznymi procesu szlifowania. Opublikował z tego zakresu ponad 40 artykułów i referatów naukowych.



e-mail: krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule opisano metodykę oszacowania dokładności kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernic z użyciem specjalnego oprzyrządowania. Konieczność kształtowania kąta nakroju stożkowego w zakresie 0-1,5° wymusiła opracowanie urządzenia pozwalającego osiągnąć żądaną precyzję. W trakcie konstruowania przyrządu oszacowano jego błąd systematyczny zadawania kąta, który następnie zweryfikowano na podstawie pomiarów różnicy między kątem zadanim a zmierzonym na powierzchni ściernicy. Wyznaczony błąd nie przekroczył wartości $\pm 0,03^\circ$.

Słowa kluczowe: pomiar geometrii ściernicy, nakrój stożkowy ściernicy, jednoprzęciowe szlifowanie otworów.

Estimation of precision of shaping the conic chamfer on active surface of zonal diversified grinding wheels

Abstract

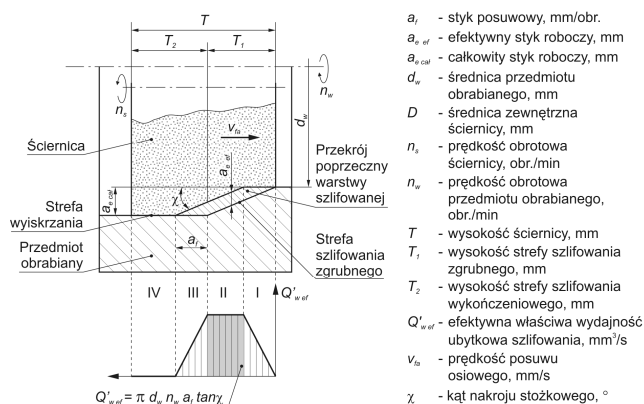
The paper presents methodology of estimating the precision of shaping the conic chamfer on the grinding wheel active surface using a special device. An idea of single-pass internal cylindrical grinding as well as the zonal diversified grinding wheel used in that process (Fig. 2) are described. Necessity of shaping the conic chamfer within the range 0-1.5° resulted in working out a device enabling achievement of the demanded precision (Fig. 3). During construction of the device its systematic error of angle setting was estimated. That error was next verified by measurements of the difference between the set and measured angle on the grinding wheel surface. To do it, micro-geometries of the grinding wheel active surface with six different conic chamfer angles ($\chi=0.00, 0.38, 0.57, 0.86, 1.15$ and 1.50°) were shaped. An angle between the lines approximated by 16 points of the cylindrical zone profile and 16 points of the conic zone profile of the grinding wheel active surface was measured. Each measurement was repeated five times. The conducted investigations show that the error of shaping the conic chamfer on the grinding wheel active surface within the range 0-1.5° when using special instrumentation is approximately equal to $\pm 3\%$. That value means that the conic chamfer was shaped with accuracy of $\pm 0.03^\circ$, which is satisfactory in the considered application.

Keywords: measurement of grinding wheel, grinding wheel conic chamfer, single-pass internal cylindrical grinding

1. Wstęp

Jedną z najnowszych odmian kinematycznych procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych jest szlifowanie jednoprzęciowe [1-3]. Polega ono na usuwaniu całego nadmiaru obróbkowego w jednym przejściu wzdłużnym ściernicy, przy zachowaniu żądanej jakości powierzchni przedmiotu obrabianego. W tego typu procesie stosuje się znacznie mniejszą prędkość posuwu osiowego ściernicy v_{os} , jednak sumaryczny czas obróbki pojedynczego otworu zostaje znacząco skrócony poprzez zwiększenie głębokości szlifowania a_e .

Do prawidłowej realizacji szlifowania jednoprzęciowego konieczne jest zastosowanie specjalnych ściernic z ukształtowanym nakrojem stożkowym w części atakującej. Strefa stożkowa o kącie χ i szerokości b , pozwala na rozłożenie całkowitego nadmiaru obróbkowego na długości nakroju stożkowego uformowanego na czynnej powierzchni ściernicy. Większość materiału usuwana jest w strefie stożkowej, w której przebiega szlifowanie zgrubne. W strefie walcowej następuje szlifowanie wykończeniowe i wyiskrzanie powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 1).

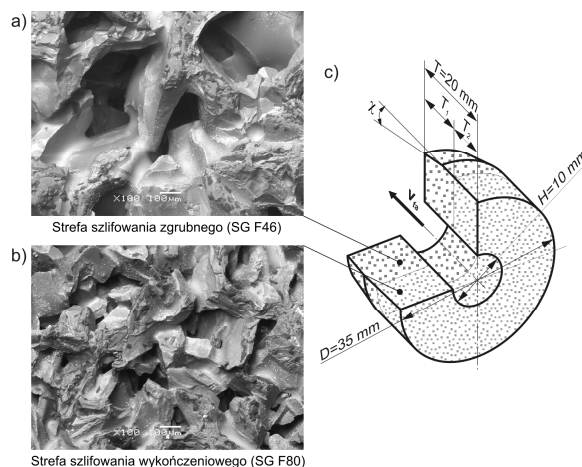


Rys. 1. Obciążenie czynnej powierzchni ściernicy z nakrojem stożkowym w procesie jednoprzęciowego szlifowania otworów [1-3]

Fig. 1. Grinding wheel load during single-pass internal grinding with use of a grinding wheel with a conical coarse grinding zone [1-3]

Bardzo istotnym zagadnieniem jest możliwość precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego, którego kąt χ i szerokość b dobierana jest w zależności od głębokości szlifowania a_e , całkowitej wysokości ściernicy T oraz wymagań jakościowych powierzchni obrabianych przedmiotów.

Chropowatość powierzchni obrabianej można obniżyć poprzez zastosowanie ściernic o strefowo zróżnicowanej budowie, które opracowano w Politechnice Koszalińskiej (rys. 2).



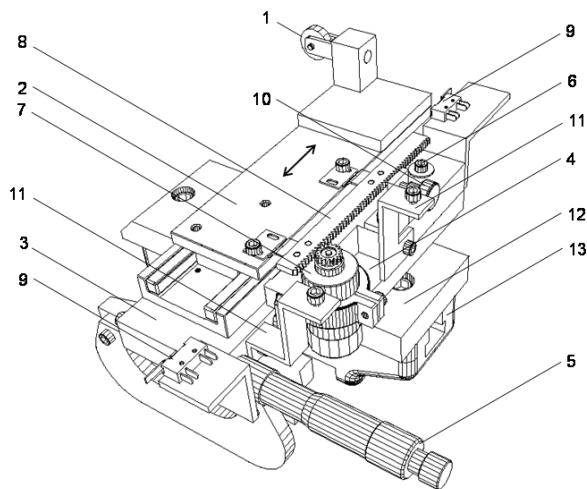
Rys. 2. Przykład ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie z ziarnami mikrokryształicznego korundu spiekane SG i spoiwem szlankryształicznym: a) strefa szlifowania zgrubnego; b) strefa szlifowania wykończeniowego; c) schemat budowy [4-6]

Fig. 2. Example of a grinding wheel whose structure is zonally diversified with micro-crystalline sintered corundum grains SG and glass-crystalline bond: a) rough grinding zone; b) finish grinding zone; c) structure [4-6]

Ściernice takie charakteryzują się strefą szlifowania zgrubnego, zbudowaną z ziaren o dużych rozmiarach i drobnoziarnistą strefą szlifowania wykończeniowego i wyskrzania, w której umieszczono ziarna o mniejszych rozmiarach. W przypadku zastosowania takiej ściernicy, nakrój stożkowy kształtowany jest jedynie w gruboziarnistym obszarze szlifowania zgrubnego.

2. Przyrząd do kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy

Efektywna realizacja procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie możliwa jest przy zapewnieniu precyzyjnego kształtowania makrogeometrii wykorzystywanych ściernic. Aby umożliwić szybkie kształtowanie nakroju stożkowego o określonych parametrach geometrycznych na czynnej powierzchni narzędzi ściernych, konieczne było skonstruowanie specjalnego oprzyrządowania (rys. 3).



Rys. 3. Przyrząd do precyzyjnego kształtowania nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy: 1 – obciążacz, 2 – stół przesuwny, 3 – podstawa górna przemieszczająca się o zadany kąt, 4 – nieruchoma podstawa dolna, 5 – śruba mikrometryczna, 6 – oś obrotu podstawy górnej, 7 – silnik napędowy, 8 – listwa zębata, 9 – wyłącznik krańcowy, 10 – śruba blokująca ruch stołu, 11 – wspornik obudowy, 12 – płyta mocująca, 13 – standardowa podstawa obciążacza szlifierki RUP 28P

Fig. 3. Device for precise dressing of conic chamfer on grinding wheel active surface: 1 – dresser, 2 – slide plate, 3 – upper basis turning about specified angle, 4 – immovable bottom base, 5 – micrometer screw, 6 – axis of rotation of upper base, 7 – driving motor, 8 – toothed rack, 9 – limit switch, 10 – blockade of table, 11 – bracket of casing, 12 – backing plate, 13 – standard dresser base of a RUP 28P grinding machine

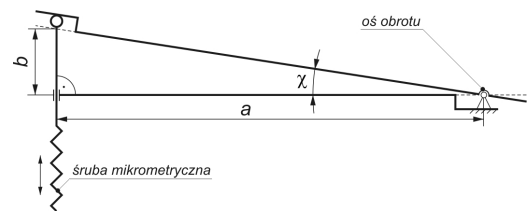
Najważniejszym elementem urządzenia jest stół przesuwny, do którego przytwierdzona została tarczowa oprawa jednoziarnistego obciążacza diamentowego, oraz śruba mikrometryczna, dzięki której można zadawać żądane wartości kąta nakroju. Śruba ta przymocowana została do dolnej części podstawy i bezpośrednio przesuwa górną jej część, na której zamocowany jest stół przesuwny. Przyrząd wyposażony został układ napędu stołu składający się z: zasilacza, silnika napędowego, przekładni ślimakowej i listwy zębatej. Ruch posuwisto zwrotny zapewniły wyłączniki umieszczone w pozycjach skrajnych przesuwu stołu. Całość zamocowana została do górnej części podstawy w celu zachowania niezmiennych kinematyki obciążania przy różnych wartościach kąta. Przyrząd zamocowany został na standardowej podstawie obciążacza szlifierki RUP 28P.

Podczas konstruowania przyrządu dążono do uzyskania jak największej dokładności odwzorowania kąta nakroju stożkowego χ . W tym celu dołożono starań, aby poszczególne elementy składowe wykonane zostały z dostateczną precyzją. Ponadto zastosowano stolik przesuwny o dużej sztywności, a do przemieszczania kątownego stolika wykorzystano śrubę mikrometrycz-

ną. Zapewniono również znaczną odległość między osią obrotu a punktem przyłożenia kulistej końcówki śruby mikrometrycznej ($a=180$ mm), dzięki czemu wykorzystywany zakres zmienności $\chi=0\div 1,5^\circ$, osiągany był poprzez przesunięcie końcówki śruby mikrometrycznej o 4,71 mm.

3. Błąd systematyczny zadawania kąta

Schemat ideowy układu do zadawania wychylenia kątownego zastosowanego w opracowanym przyrządzie przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu do zadawania wychylenia kątownego
Fig. 4. Schematic diagram of the setup for angle deflection

W przyjętym rozwiązaniu konstrukcyjnym kąt χ wyznaczany jest metodą pośrednią poprzez bezpośredni pomiar odległości a i b :

$$\operatorname{tg}\chi = \frac{b}{a} \Rightarrow \chi = \arctg \frac{b}{a}, \quad (1)$$

gdzie: a – odległość między osią obrotu a punktem styku kulistej końcówki śruby mikrometrycznej z ruchomą podstawą górną przyrządu; b – odległość przemieszczenia końcówki śruby mikrometrycznej.

W pomiarach metodą pośrednią błąd systematyczny wyniku pomiaru zależy od [7]:

- błędów systematycznych wielkości mierzonych bezpośrednio;
- zależności określających związek między wielkością mierzoną pośrednio a wielkościami mierzonymi bezpośrednio.

Cytowana literatura podaje, że jeżeli wielkość Y (mierzona pośrednio) jest związaną z niezależnymi wielkościami X_1, X_2, \dots, X_N (mierzonymi bezpośrednio) równaniem:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (2)$$

wówczas błąd systematyczny obliczany jest ze wzoru na wyznaczanie błędu pomiaru metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta Y = \frac{\partial F}{\partial X_1} \cdot \Delta X_1 + \frac{\partial F}{\partial X_2} \cdot \Delta X_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial X_N} \cdot \Delta X_N, \quad (3)$$

gdzie: $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_N$ są błędami systematycznymi pomiaru bezpośredniego wielkości X_1, X_2, \dots, X_N .

W rozpatrywanym przypadku równanie (3) przyjmie zatem postać:

$$\Delta \chi = \frac{\partial \chi}{\partial a} \cdot \Delta a + \frac{\partial \chi}{\partial b} \cdot \Delta b. \quad (4)$$

Aby wyeliminować wpływ znaku poszczególnych składników równania (4), zapisano je w następującej postaci:

$$|\Delta \chi| = \left| \frac{\partial \chi}{\partial a} \cdot \Delta a \right| + \left| \frac{\partial \chi}{\partial b} \cdot \Delta b \right|. \quad (5)$$

Następnie obliczono pochodną $\frac{\partial \chi}{\partial a}$:

$$\frac{\partial \chi}{\partial a} = \frac{\partial \chi}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial a},$$

gdzie:

$$z = \frac{b}{a}; \quad \frac{\partial \chi}{\partial z} = \frac{1}{1+z^2}; \quad \frac{\partial z}{\partial a} = -\frac{b}{a^2}.$$

Stąd:

$$\frac{\partial \chi}{\partial a} = \frac{1}{1+z^2} \cdot \left(-\frac{b}{a^2}\right) = \frac{1}{1+\frac{b^2}{a^2}} \cdot \left(-\frac{b}{a^2}\right) = -\frac{b}{a^2+b^2}. \quad (6)$$

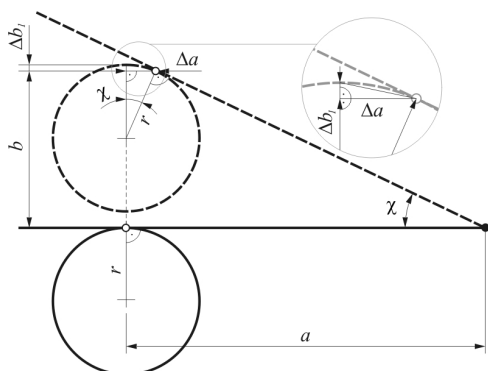
Analogicznie obliczono kolejną pochodną $\frac{\partial \chi}{\partial b}$:

$$\frac{\partial \chi}{\partial b} = \frac{1}{1+z^2} \cdot \frac{1}{a} = \frac{1}{1+\frac{b^2}{a^2}} \cdot \frac{1}{a} = \frac{a}{a^2+b^2}. \quad (7)$$

Po podstawieniu wyników obliczeń ze wzorów (6) i (7), równanie (5) przyjmuje postać:

$$|\Delta \chi| = \left| \frac{b}{a^2+b^2} \cdot \Delta a \right| + \left| \frac{a}{a^2+b^2} \cdot \Delta b \right|. \quad (8)$$

W kolejnym kroku wyznaczono błędy Δa i Δb_1 wynikające z przemieszczenia punktu styku zakończonej kuliście końcówki śruby mikrometrycznej z ruchomą podstawą górną przyrządu (rys. 5).



Rys. 5. Schemat obrazujący mechanizm zmiany punktu styku zakończonej kuliście końcówki śruby mikrometrycznej z ruchomą podstawą górną przyrządu; r – promień zaokrąglenia końcówki śruby mikrometrycznej

Fig. 5. Diagram depicting the point of spherical end joint of the micrometer screw with movable device upper base; r – rounding radius of micrometer screw tip

Wartości błędów Δa i Δb_1 obliczono, znając odległość $a=180$ mm i promień zaokrąglenia końcówki $r=4$ mm oraz przyjmując maksymalną wartość wychylenia kąтового górnej podstawy urządzenia wynoszącą $1,5^\circ$:

$$\sin \chi = \frac{\Delta a}{r} \Rightarrow \Delta a = r \cdot \sin \chi = 4 \cdot 0,0262 = \pm 0,1047 \text{ mm}. \quad (9)$$

Błąd Δb_1 wyznaczono, korzystając ze wzoru na strzałkę łuku odcinka kołowego:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{1}{4}a^2}. \quad (10)$$

W omawianym przypadku $h=\Delta b_1$ oraz $a=2\Delta a$, stąd:

$$\Delta b_1 = r - \sqrt{r^2 - \Delta a^2} = \pm 0,0014 \text{ mm}. \quad (11)$$

Odległość przemieszczenia końcówki śruby mikrometrycznej b dla kąta $\chi=1,5^\circ$ wynosi:

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{b}{a} \Rightarrow b = a \cdot \operatorname{tg} \chi = 180 \cdot 0,0262 = 4,7135 \text{ mm}. \quad (12)$$

Natomiast błąd Δb , zgodnie z *prawem sumowania się błędów systematycznych* [7], jest równy sumie obliczonej wyżej składowej Δb_1 (11) i granicznego dopuszczalnego błędu wskazań zastosowanego mikrometru o zakresie $50 \div 75$ mm, który wynosi [8] $\Delta b_2 = \pm 0,005$ mm. Stąd:

$$\Delta b = \Delta b_1 + \Delta b_2 = 0,0014 + 0,005 = \pm 0,0064 \text{ mm}. \quad (13)$$

Ostatecznie, po podstawieniu danych i obliczeniu równania (8), wyznaczono następującą wartość błędu systematycznego zadawania kąta w przyrządzie do precyzyjnego kształtowania makrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy (dla wartości maksymalnej ze stosowanego zakresu zmienności kąta $\chi=1,5^\circ$):

$$|\Delta \chi| = \left| \frac{4,7135}{180^2 + 4,7135^2} \cdot 0,1047 \right| + \left| \frac{180}{180^2 + 4,7135^2} \cdot 0,0064 \right| = 5,0591 \cdot 10^{-5} \quad (14)$$

Stąd: $\Delta \chi = \pm 5,0591 \cdot 10^{-5}$, °.

Bardzo mała wartość obliczonego błędu $\Delta \chi$ wynika z niewielkiego zakresu zmienności kąta nakroju stożkowego χ oraz z konstrukcji przyrządu (dużej odległości a od osi obrotu do punktu przyłożenia śruby mikrometrycznej).

4. Weryfikacja doświadczalna wyznaczonego błędu systematycznego

Wyznaczoną wartość błędu systematycznego $\Delta \chi$ porównano z wynikami pomiarów zadanych i otrzymanych kątów nakroju stożkowego ukształtowanych na czynnej powierzchni ściernicy z zastosowaniem opracowanego przyrządu.

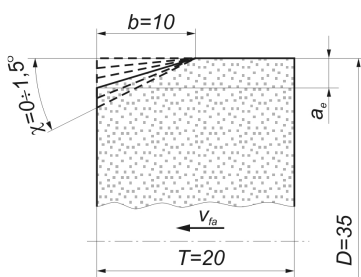
Pomiarów dokładności odwzorowania zadanego kąta nakroju stożkowego dokonano na stanowisku pomiarowym wyposażonym w projektor pomiarowy typu OPTIMUS G IL firmy Schunk Werth Messtechnik (rys. 6).

Dokładność pomiarowa wykorzystanego urządzenia, przy stosowanym powiększeniu (20x), wynosi wg danych producenta maksymalnie $\pm 0,2\%$.

W celu sprawdzenia dokładności zaprojektowanego urządzenia ukształtowano sześć makrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy z nakrojami stożkowymi o wartości kąta $\chi=0,00; 0,38; 0,57; 0,86; 1,15$ i $1,50^\circ$ (tab. 1), przy stałej szerokości nakroju $b=10$ mm (rys. 7).



Rys. 6. Stanowisko do pomiarów odległości i kątów wyposażone w projektor pomiarowy typu OPTIMUS G IL firmy Schunk Werth Messtechnik
 Fig. 6. Stand for distance and angle measurements equipped with an OPTIMUS G IL projection gauge by Schunk Werth Messtechnik



Rys. 7. Parametry nakrojów stożkowych wykonanych w celu oszacowania dokładności zastosowanego oprzyrządowania
 Fig. 7. Parameters of conic chamfers made for estimating the precision of the used device

Wybrano wartości skrajne oraz cztery przykładowe z wykorzystanego zakresu zmienności wynoszącego $0 \div 1,5^\circ$. Mierzono kąt pomiędzy liniami aproksymowanymi z 16 punktów zarysu walcowej i 16 punktów zarysu stożkowej strefy narzędzia ściernego, pięciokrotnie powtarzając każdy pomiar. Do badań wykorzystano ściernicę o następującej charakterystyce technicznej: 1-35x20x10-SG/F60 K 7 V DG, pozbawioną strefowo zróżnicowanej budowy, charakteryzującą się ziarnami typu SG o rozmiarze 60 w całej objętości. Takie narzędzie ściernie nie wprowadzało błędów pomiaru wynikających z różnego zarysu stref o odmiennej budowie.

Uśrednione wyniki, uzyskane z pięciu pomiarów dla każdej wartości kąta χ wraz z wyznaczonymi odchyłkami od wartości zadanej wyrażonymi w stopniach i w procentach, zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Uśrednione wyniki pomiarów kątów nakroju stożkowego czynnej powierzchni ściernicy
 Tab. 1. Averaged measurement results of conic chamfer angles of grinding wheel active surface

Wartość zadana $\chi, ^\circ$	Wartość zmierzona (średnia z 5 pomiarów) $\chi, ^\circ$	Różnica $\pm \Delta \chi, ^\circ$	Różnica $\pm \Delta \chi, \%$
0,00	0,0370	0,0370	3,70
0,38	0,3778	0,0058	0,58
0,57	0,5932	0,0407	4,07
0,86	0,8580	0,0023	0,23
1,15	1,0968	0,0463	4,63
1,50	1,4522	0,0319	3,19
Średnia odchyłka od wartości zadanej:		0,0273	2,73

Średni błąd $\Delta \chi$ wyznaczony na podstawie pomiarów geometrii czynnej powierzchni ściernicy wynosi $\pm 2,73 \cdot 10^{-2}$. Jest to zatem wartość o trzy rzędy większa niż obliczony wcześniej błąd systematyczny urządzenia do kształtowania nakroju stożkowego narzędzi ściernych ($\pm 5,06 \cdot 10^{-5}$). Zwiększenie błędu wykonania nakroju o danym kącie wynika z charakterystyki stanowiska badawczego, przez co, poza niedokładnością samego urządzenia, na uzyskaną geometrię ściernicy wpływa również:

- błąd równoległego ustawienia obciążacza względem wrzeciona narzędzia ściernego w pozycji bazowej (0°);
- odkształcenie sprężyste układu obciążacz-ściernica występujące podczas kształtowania czynnej powierzchni ściernicy;
- bicie wywołane błędem współosiowego zamocowania trzpienia ściernicy we wrzecionie;
- drgania układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie.

Dodatkowo zmierzone wartości kąta odczytano z powierzchni ściernicy, obarczając pomiar błędem aproksymacji prostych na podstawie 16 punktów zarejestrowanych na nieregularnym zarysie narzędzia ściernego.

5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że błąd kształtowania nakroju stożkowego w zakresie $\chi = 0 \div 1,5^\circ$, przy zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania, wynosi w przybliżeniu $\pm 3\%$. Wartość ta przekłada się na błąd rzędu $\pm 0,03^\circ$, co odpowiada uzyskaniu żądanej głębokości szlifowania a_e z dokładnością $\pm 0,0079$ mm i szerokości nakroju b z błędem $\pm 0,3$ mm (wartości maksymalne dla $\chi = 1,5^\circ$). Wynika z tego, że opracowane urządzenie zapewnia zadowalającą precyzję kształtowania makrogeometrii narzędzi ściernych, konieczną do prawidłowej realizacji procesu jednoprzęściowego szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

6. Literatura

- [1] Klocke F., Hegener G.: Schnell, gut und flexibel: Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen. IDR, 33(1999)2, 153-160.
- [2] Weinert K., Finke M., Kötter D.: Wirtschaftliche Alternative zum Hartdrehen. Innenrund-Schälenschleifen steigert Flexibilität beim Schleifen von Futterteilen. Maschinenmarkt, 109(2003)48, 44-47.
- [3] Oczko K.E.: Doskonalenie techniki szlifowania. Część II. Mechanik, 78(2005)10, 745-750.
- [4] Herman D., Plichta J., Nadolny K.: New ceramic abrasive tools for rough and finishing grinding in one pass. Materials Science Forum, Vol. 526 (2006), s. 163-168.
- [5] Nadolny K., Plichta J., Herman D., Słowiński B.: Single-Pass Grinding – An Effective Manufacturing Method for Finishing. 19th International Conference on Systems Engineering - ICSSENG 2008, Las Vegas, USA, August 19-21, pp. 236-241.
- [6] Nadolny K., Plichta J.: Jednoprzęściowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 158, Praca zbiorowa pod redakcją K. Nadolnego i J. Plichty, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008.
- [7] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [8] Gliwiński J.: Metody sprawdzania narzędzi do pomiarów długości i kąta. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1979.

otrzymano / received: 15.02.2010
 przyjęto do druku / accepted: 12.04.2010

artykuł recenzowany