

Analiza i badania symulacyjne wybranych warunków pomiarów odchyłek geometrycznych i zarysów kształtu powierzchni walcowych

Analysis and simulation studies of selected conditions of geometric deviation's measurements and cylindrical surface profiles

KRZYSZTOF NOZDRZYKOWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.569

Zaprezentowano wyniki badań, których praktyczne zastosowanie umożliwia dobór prędkości obrotowej gwarantującej stały styk końcówki trzpienia czujnika pomiarowego z powierzchnią walcową mierzonego przedmiotu. Rozważania analityczne poparto wynikami badań symulacyjnych i doświadczalnych. Badania wykazały, że zwiększenie prędkości obrotowej wpływa w sposób istotny na kształt rejestrowanego zarysu i wartość wyznaczonej odchyłki okrągłości.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza sił, badania symulacyjne, odchyłki geometryczne, zarysy okrągłości

The results of tests presented herein lead to practical applications, such as the proper choice of rotary speed guaranteeing a constant contact between the measuring sensor's spindle tip and cylindrical surface of measured object. Analytical considerations have been supported by the results of simulations and experimental tests. The research has shown that an increase in rotary speed essentially affects the recorded profile shape and the value of determined roundness deviation.

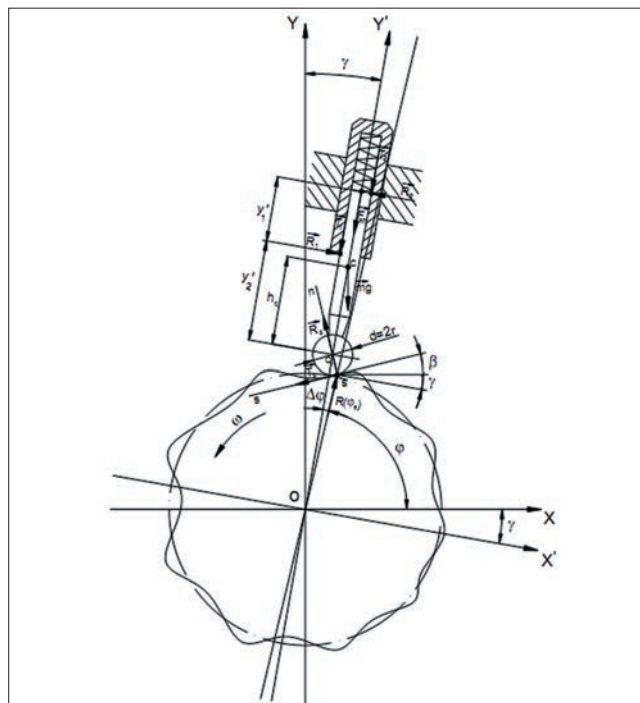
KEYWORDS: force analysis, simulations tests, geometric deviation, roundness profile

Pomiary zarysów kształtu powierzchni walcowych wykonuje się najczęściej metodami bezodniesieniowymi lub odniesieniowymi. Pomiary takie prowadzone są w wyniku realizacji wzajemnego względnego ruchu trzpienia pomiarowego i obrotu przedmiotu mierzonego albo jednocześnie poosiowego przemieszczenia trzpienia czujnika i jego obrotu względem nieruchomego przedmiotu mierzonego. W nowoczesnych przyrządach lub układach pomiarowych ruch obrotowy przedmiotu lub czujnika względem przedmiotu odbywa się w sposób zautomatyzowany.

O poprawności odtworzenia mierzonego zarysu w dużej mierze decyduje rozkład sił wynikający ze współpracy: przedmiot mierzony–trzpień czujnika pomiarowego. Utrata kontaktu skutkuje zerowaniem sił wzajemnego oddziaływania trzpienia pomiarowego i przedmiotu mierzonego w miejscach ich styku punktowego (przy założeniu braku odkształceń powierzchniowych współpracujących elementów). Z analizy wzajemnej współpracy trzpienia czujnika pomiarowego i przedmiotu mierzonego wynika, że utrata ich styku może nastąpić w wyniku zbyt dużej prędkości obrotowej, która ze względu na zmienny kształt rejestrowanego zarysu okrągłości będzie skutkować wystąpieniem siły bezwładności (odśrodkowej), oddziałującej na trzpień pomiarowy, o wartości większej od nacisku czujnika pomiarowego. Taka przyczyna utraty kontaktu trzpienia czujnika pomiarowego z przedmiotem mierzonym jest bezpośrednio związana z prędkością obrotową ruchu względnego, naciskiem pomiarowym oraz średnicą przedmiotu i kształtem rejestrowanego zarysu okrągłości.

Zagadnienia tego typu nie są uważane za istotne i powszechnie pomija się je w zaleceniach odnośnie do doboru warunków realizacji pomiarów. Przyjmuje się obligatoryjnie, że utrata współpracy trzpienia pomiarowego z przedmiotem mierzonym nie jest możliwa. Przeprowadzone badania świadczą jednak, że taka możliwość istnieje, zwłaszcza gdy mierzony zarys charakteryzuje się dużą nieregularnością i znacznymi wartościami odchyłek kształtu [1, 2]. Odnosząc się przez analogię do pomiarów topografii powierzchni, zjawisko to – określane mianem „unoszenia” – analizowane jest w wielu opracowaniach zarówno w ujęciu kinematycznym, jak i dynamicznym [3–6].

Analiza sił w układzie pomiarowym



Rys. 1. Rozkład sił przy współpracy mierzonego przedmiotu–trzpienia czujnika pomiarowego. Oznaczenia: r – promień końcówki pomiarowej, d – średnica końcówki pomiarowej ($d=2r$), $R(\varphi_s)$ – chwilowa wartość promienia mierzonego zarysu okrągłości w punkcie styku S , φ – chwilowy kąt obrotu, $\Delta\varphi$ – kąt określający przesunięcie punktu styku S końcówki pomiarowej z zarysem mierzonym względem kierunku przemieszczenia trzpienia pomiarowego czujnika, R_s – reakcja normalna w punkcie styku końcówki pomiarowej z zarysem mierzonym, T_s – siła tarcia (styczna) w punkcie styku końcówki pomiarowej z zarysem mierzonym, γ – kąt określający usytuowanie kierunku przemieszczeń trzpienia pomiarowego względem osi x przyjętego układu współrzędnych, β – kąt określający usytuowanie siły tarcia (stycznej) T_s względem osi x , ω – prędkość kątowa, y_1 – współrzędna określająca wzajemne usytuowanie reakcji R_1 i R_2 , y_2 – współrzędna określająca usytuowanie reakcji normalnej R_1 względem środka O_1 końcówki pomiarowej czujnika, h_0 – współrzędna określająca usytuowanie środka ciężkości trzpienia pomiarowego czujnika względem środka O_1 końcówki pomiarowej czujnika, F_{sp} – nacisk pomiarowy, R_1 i R_2 oraz T_1 i T_2 – reakcje normalne i styczne w końcowych punktach styku trzpienia i prowadnicy (uwzględniające w przypadku luzu na prowadnicy zginanie trzpienia pomiarowego czujnika)

* Dr hab. inż. Krzysztof Nozdrzykowski prof. AM w Szczecinie (k.nozdrzykowski@am.szczecin.pl) – Wydział Mechaniczny, Instytut Podstawowych Nauk Technicznych Akademii Morskiej w Szczecinie

Podczas analizy rozkładu sił przy współpracy mierzony przedmiot–trzępień czujnika pomiarowego można się posłużyć pomocniczym schematem przedstawionym na rys. 1.

Schemat ten stanowi też podstawę do sformułowania zależności pomiędzy występującymi siłami wynikającymi z równowagi kinostatycznej końcówki pomiarowej.

Warunkiem oderwania się końcówki pomiarowej od mierzonej powierzchni jest zerowanie się reakcji normalnej R_s , dlatego przy dokonywaniu w dalszej kolejności podstawień i przekształceń można wyznaczyć wartość przyspieszenia a_{o1} środka końcówki pomiarowej czujnika wynikającego z jej ruchu względnego po krzywiznie mierzonego profilu:

$$a_{o1} = g (\sin \mu - \cos \gamma) - \frac{2g \sin \mu}{y_1} \left(\frac{\mu d_1}{2} - y_2 + h_c \right) - \frac{P_k}{m} (OO_1 - OO_{10}) \quad (1)$$

Zgodnie z ogólnie przyjętą teorią analizy harmonicznego zarysu okrągłości dowolny zmierzony zarys okrągłości $R(\varphi)$ można zapisać w postaci zależności [7–10]:

$$R(\varphi) = R_o + \sum_{n=2}^k C_n \cdot \cos n(\varphi - \varphi_n) \quad (2)$$

gdzie: R_o – promień okręgu średniego, C_n – amplituda składowej n harmonicznego zmierzonego zarysu, φ_n – przesunięcie fazowe składowej n harmonicznego, φ – chwilowy kąt obrotu, n – numer składowej harmonicznego.

Chwilowa zmiana wartości przemieszczenia trzępienia pomiarowego czujnika (trajektorii czujnika) jest uzależniona od profilu mierzonego, promienia r końcówki pomiarowej oraz kąta γ określającego usytuowanie kierunku przemieszczeń trzępienia pomiarowego w przyjętym układzie współrzędnych.

Jeśli przyjmie się stałą wartość promienia R_o , zmianie chwilowej wartości przemieszczenia trzępienia może odpowiadać zmiana odległości OO_1 , którą – z uwzględnieniem zależności wynikających ze schematu (rys. 1) – można opisać zależnością funkcyjną:

$$OO_1 = R(\varphi) \sqrt{1 - \frac{r^2 \operatorname{tg}^2(\beta + \gamma)}{R^2(\varphi) (1 + \operatorname{tg}^2(\beta + \gamma))}} + \frac{r}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\beta + \gamma)}} \quad (3)$$

Zależność (3) stanowi zapis drogi przemieszczeń trzępienia pomiarowego czujnika wyrażony w postaci parametrów określających mierzony zarys, parametrów układu pomiarowego (promienia r i kąta γ) oraz chwilowej wartości kąтового położenia φ zarysu mierzonego przedstawionego w biegunowym układzie współrzędnych.

Różniczkując podwójnie funkcję (3) względem φ oraz zakładając, że przy stałej prędkości kątowej w iloraz $d\omega/d\varphi = 0$, otrzymano zależność opisującą wartość przyspieszenia a_{o1} , odpowiadającą przyspieszeniu wyznaczonemu z zależności (1).

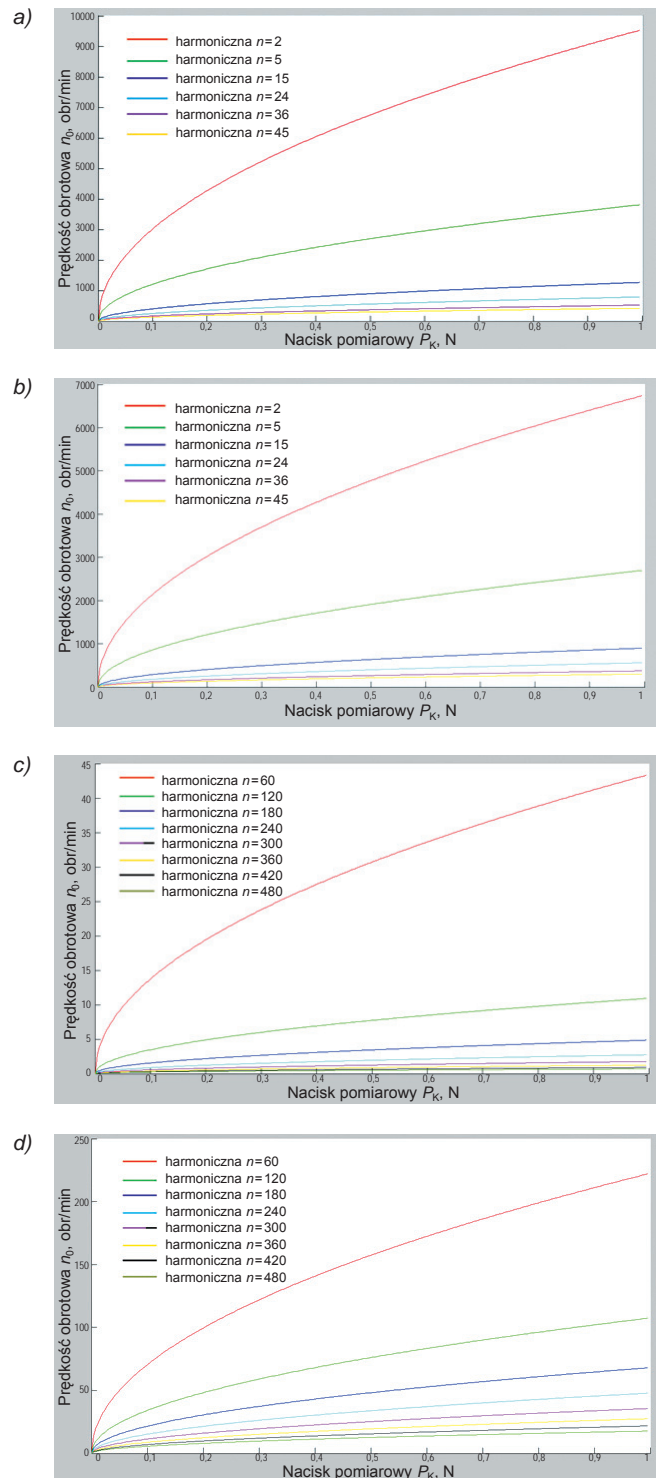
Porównując zależności (1) i zróżniczkowaną podwójnie funkcję (3) oraz przyjmując: $\gamma = 0$, $r = \text{const.}$, otrzymano:

$$n_o = f(R_o, C_n, n, \varphi_n, \varphi, P_k) \quad (4)$$

Zależność (4) umożliwia wyznaczenie minimalnej prędkości obrotowej n_o , przy której nastąpi utrata styku końcówki trzępienia pomiarowego czujnika z mierzoną powierzchnią w zależności od średnicy przedmiotu i charakteru zmian rejestrowanego zarysu oraz siły bezwładności (odśrodkowej), równoważącej nacisk trzępienia pomiarowego czujnika P_k .

Testowanie modelu

Na podstawie zależności (4) przeprowadzono analizę wpływu średnicy przedmiotu mierzonego i parametrów opisujących mierzony zarys okrągłości oraz nacisku pomiarowego P_k na wartość minimalnej prędkości obrotowej, przy której nastąpi utrata kontaktu końcówki pomiarowej z mierzoną powierzchnią. Stopień zależności zachodzących pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami wpływowymi przedstawiono w sposób ilościowy i jakościowy na wykresach.



Rys. 2. Graficzna interpretacja zależności $n_o = f(P_k)$ dla: a) $C_n = 50 \mu\text{m}$, $R_o = 150 \text{ mm}$, $n = (2-45)$; b) $C_n = 100 \mu\text{m}$, $R_o = 150 \text{ mm}$, $n = (2-45)$; c) $C_n = 50 \mu\text{m}$, $R_o = 15 \text{ mm}$, $n = (60-480)$; d) $C_n = 100 \mu\text{m}$, $R_o = 150 \text{ mm}$, $n = (60-480)$

Przykłady wykresów prezentujących zależność $n = f(P_k)$ pokazano na rys. 2a–d. Obliczenia realizowano dla regularnych zarysów okrągłości opisanych zależnością (2), dla $n = (2-45)$ (na wykresach dla $n = 2, 5, 15, 24, 36, 45$), a więc harmonicznym opisujących zarysy kształtu, oraz $n = (60-480)$ (na wykresach dla $n = 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480$), czyli harmonicznym opisujących zarysy falistości. Analizę przeprowadzono dla średnicy przedmiotu $D_o = (0-300)$ mm i nacisku pomiarowego charakterystycznego dla szerokiej gamy stosowanych czujników (w tym czujników indukcyjnych) $P_k = (0-0,96)$ N (przy masie końcówki pomiarowej $m = 4$ g).

Obliczenia te wykazały, że zmiana średnicy D_o nie wpływa istotnie na wartość minimalnej prędkości obrotowej, przy której może nastąpić utrata styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu. Wpływ tego parametru jest widoczny dopiero przy małych średnicach $D_o = (0-10)$ mm. Decydujące znaczenie mają natomiast kształt zarysu mierzonego, opisany parametrami C_n i n , oraz nacisk pomiarowy P_k .

Średni nacisk pomiarowy stosowanych obecnie do pomiarów odchyłek i zarysów kształtu czujników indukcyjnych wynosi $P_{ki} = 0,63$ N. Prędkości obrotowe podczas pomiarów zarysów okrągłości nie powinny więc przekraczać kilku obrotów na minutę (zwłaszcza przy dużych parametrach C_n i n charakteryzujących ich profil). Czujniki indukcyjne z wychylnym trzpieniem mają nacisk pomiarowy nieprzekraczający 0,5 N i w tym przypadku prawdopodobieństwo utraty kontaktu jest duże. Prawdopodobieństwo to rośnie znacznie przy małych średnicach przedmiotu mierzonego, co zobrazowano na rys. 2c.

Zakładając jednak, że ocenie podlegać będą odchyłki kształtu, które opisuje się harmonicznymi w zakresie $n = (2-45)$, oraz że prędkości obrotowe będą takie, jak w przypadku okrągłościomierzy (w granicach do 6 obr/min), to przy utrzymaniu średniego nacisku pomiarowego $P_k = (0,5-0,65)$ N nie ma obawy utraty styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu.

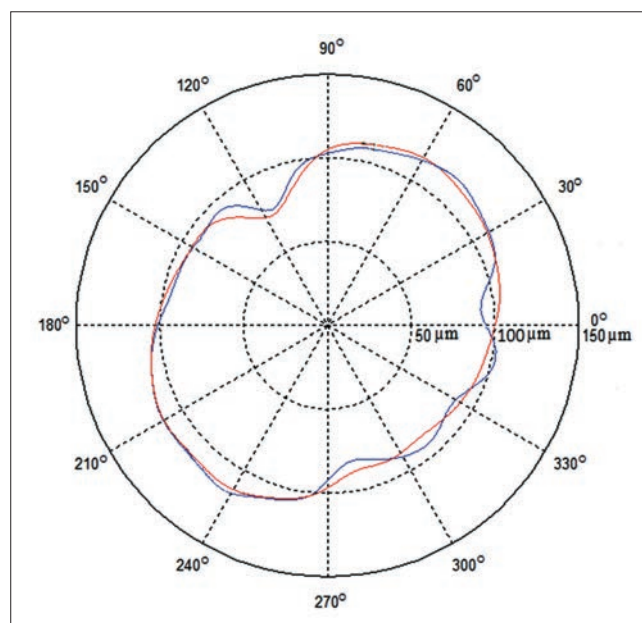
Do przyjęcia takiego wniosku upoważniają wyniki symulacyjnych badań modelowych rozkładu sił na styku końcówki trzpienia pomiarowego czujnika z przedmiotem mierzonym zrealizowane za pomocą programu Working Model 2005. W programie tym zamodelowany został kształt zarejestrowanego zarysu okrągłości. Kształt ten otrzymano z pomiarów zarysów okrągłości czopów głównych wału korbowego, ustalonego w pryzmach. Badania symulacyjne przeprowadzono z różnymi: prędkościami obrotowymi profilu, naciskiem trzpienia pomiarowego oraz parametrami układu pomiarowego. W przypadku analizowanego zarysu opisanego $n = 50$ harmonicznymi i odchyłki okrągłości wynoszącej $48,9$ μm , z zachowaniem rzeczywistych proporcji pomiędzy parametrami układu pomiarowego i przy standardowym nacisku pomiarowym oraz zmianie prędkości obrotowej w zakresie od 0 do 8 obr/min nie odnotowano zerowania się sił w punkcie styku trzpienia pomiarowego z zarysem.

Badania analityczno-symulacyjne uzupełniono badaniami doświadczalnymi. Ich celem była ocena wpływu prędkości obrotowej na kształt rejestrowanego zarysu w przypadku pomiarów powierzchni walcowej, która w warunkach rzeczywistych charakteryzuje się w większym lub mniejszym stopniu nieregularnymi zarysami kształtu przekrojów poprzecznych. Badania obejmowały pomiary zarysów okrągłości czopów głównych wspomnianego wału korbowego, którym był wał korbowy silnika średnioobrotowego napędu głównego statku przeznaczony do regeneracji, o średnicy czopa głównego $D = 150$ mm. Pomiary

realizowano ze zmienną prędkością obrotową wału i naciśkiem trzpienia pomiarowego czujnika. Prędkość obrotowa zmieniana była w sposób bezstopniowy, natomiast oś trzpienia pomiarowego usytuowana była w płaszczyźnie poziomej. Wyeliminowany został w ten sposób wpływ ciężaru trzpienia na zmianę nacisku pomiarowego.

Wyniki badań potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia, że przy niewielkich prędkościach obrotowych nie ma obawy utraty styku końcówki trzpienia pomiarowego czujnika z powierzchnią mierzonego przedmiotu. Zwiększenie prędkości obrotowej przy minimalnym nacisku pomiarowym powoduje jednak stopniowy wzrost amplitud przemieszczeń trzpienia pomiarowego, a w rezultacie – zmiany kształtu rejestrowanego zarysu.

Przykładowe wyniki pomiarów zarysów okrągłości czopa nr 7 (licząc od strony koła rozrządu), zrealizowane dla różnych prędkości obrotowych wału i z zachowaniem stałego nacisku pomiarowego wynoszącego 0,5 N, przedstawiono na rys. 3. Mierzony zarys charakteryzował się znaczną odchyłką okrągłości i nieregularnością, w rezultacie przy prędkości obrotowej $n = 12$ obr/min zaobserwowano zmiany w kształcie rejestrowanego zarysu i wyznaczonej wartości odchyłki okrągłości. Przy niewielkich prędkościach obrotowych wartość odchyłki okrągłości wynosiła 42,04 μm , natomiast przy prędkości obrotowej $n = 12$ obr/min sięgała 44,53 μm .



Rys. 3. Zarejestrowane zarysy okrągłości zobrazowane z uwzględnieniem harmonicznymi $n = (2-45)$: a) przy nacisku pomiarowym 0,5 N i prędkości obrotowej 6 obr/min (kolor czerwony), b) przy nacisku pomiarowym 0,5 N i prędkości obrotowej 12 obr/min (kolor niebieski)

Posługując się trygonometrycznym szeregiem Fouriera, po dokonaniu obliczeń zarys okrągłości można przedstawić w postaci tzw. dyskretnego widma amplitudowego [8,9]. Analiza widma amplitudowego wykazała, że w przypadku zarysu zarejestrowanego przy prędkości obrotowej $n = 6$ obr/min dominujące były trzy pierwsze harmoniczne o wartościach kolejno: $n_1 = 14,853$ μm , $n_2 = 2,568$ μm , $n_3 = 4,006$ μm . Podobna prawidłowość wystąpiła w przypadku zarysu zarejestrowanego przy prędkości obrotowej $n = 12$ obr/min, dla której wartości trzech pierwszych harmonicznych (jednocześnie dominujących) wynosiły odpowiednio: $n_1 = 18,596$ μm , $n_2 = 2,011$ μm , $n_3 = 5,877$ μm . W obu przypadkach największą wartość przyjęła więc harmoniczna n_2 charakteryzująca owalność.

Pomiędzy harmonicznymi występowały natomiast różnice wartości świadczące o różnicach w zarejestrowanych zarysach kształtu. Miarą występujących różnic może być też wyliczona wartość współczynnika interkorelacji wzajemnej [9, 10], który dla analizowanych zarysów wynosił $\rho = 0,9132$. Świadczy ona o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy porównywanymi zarysami, niemniej jednak odbiega od wartości najwyższych, bliskich jedności.

Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki wskazują na konieczność utrzymania przy pomiarach odchyłek i zarysów kształtu powierzchni walcowych niewielkich prędkości obrotowych przedmiotu mierzonego (nieprzekraczających kilku obrotów na minutę). Potwierdzają to rozważania teoretyczne, badania symulacyjne oraz badania doświadczalne. Wyniki tych badań wykazały też, że zwiększanie prędkości obrotowej wpływa w sposób bezpośredni na kształt rejestrowanego zarysu oraz wartość wyznaczanej odchyłki okrągłości.

Możliwość wystąpienia braku styku końcówki pomiarowej z mierzoną powierzchnią zależy w dużej mierze od parametrów pomiarów i charakteru zmian rejestrowanego zarysu. Prędkość obrotowa powinna być więc dostosowana do rejestrowanego zarysu, a pomocne w tym zakresie mogą być wyprowadzone zależności analityczne wiążące prędkość obrotową przedmiotu z naciskiem pomiarowym i wielkościami opisującymi kształt tego zarysu.

LITERATURA

1. Fita S. „Analiza błędów metod pomiaru kształtu przedmiotu o przekroju kołowym”. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska. Wrocław: Politechnika Wrocławska 1977.
2. Żebrowska-Łucyk S. „Wpływ nacisku pomiarowego czujników okrągłościomierzy na dokładność odwzorowania kształtu zarysów”. VII Konferencja Naukowo-Techniczna – Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn, Kielce 1997. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. T. II, Kielce (1977): s. 132+138.
3. Whitehouse D.J. “Dynamic aspects of scanning surface instruments and microscopes”. *Nanotechnology*. Vol. 1 (1990): pp. 93–102.
4. Whitehouse D.J. “Enhancement of instrument and machine capabilities”. *Nanotechnology*, 7 (1996): pp. 45 – 51
5. Pawlus P., Śmieszek M. “The influence of stylus flight on change of surface topography parameters”. *Precision Engineering*. Vol. 29 (2005): pp. 272–280.
6. Tian Y., Liu X., Zhang D.G., Chetwynd D.G. “Dynamic modeling of the fidelity random surface measurement by the stylus method”. *Wear*. Vol. 266, Iss. 5–6, March 2009.
7. Adamczak S., Domagalski R., Janecki D. “Experimental into the significance of determination of harmonic roundness profiles and surface waviness”. 9th DAAAM International Symposium. Technical University Cluj-Napoca. Romania (1998).
8. Adamczak S. „Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn”. *Monografie, Studia, Rozprawy*. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, 1998.
9. Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu falistości i chropowatości”. Warszawa: WNT, 2008.
10. Nozdrzykowski K. „Metodyka pomiarów geometrycznych odchyłek powierzchni walcowych wielkogabarytowych elementów maszyn na przykładzie wałów korbowych silników okrętowych”. Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2013. ■