

Pomiar i kompensacja walcowości wałków o małej sztywności w procesie szlifowania osiowego

Cylindricity error measurement and compensation in traverse grinding of low-stiffness shafts

JAN BUREK
PAWEŁ SUŁKOWICZ
ROBERT BABIARZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.172>

Przedstawiono układ pomiaru i kompensacji odchyłki walcowości szlifowanych przedmiotów o małej sztywności. Opracowano własny program generujący tor ruchu ściernicy – na podstawie modelu uwzględniającego odkształcenie sprężyste wałka oraz podzespołów szlifierki sterowanej numerycznie – w zależności od siły szlifowania.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie osiowe, szlifowanie wałków, odchyłka walcowości, pomiar walcowości

This paper presents a system of measurement and compensation of cylindricity error in low-stiffness shafts grinding. A programme, that generates the path of a grinding wheel taking into account the elastic deformation of the shaft and grinding machine on the basis of the grinding force measurement was developed

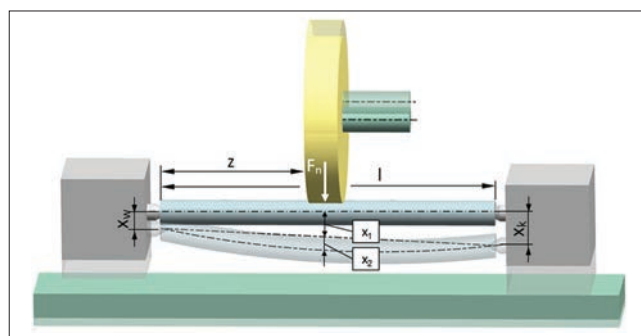
KEYWORDS: traverse grinding, cylindrical grinding, cylindricity error, cylindricity measurement

Części osiowosymetryczne stanowią blisko połowę części wytwarzanych na potrzeby przemysłu maszynowego. Wśród nich ok. 12% stanowią wały o małej sztywności, czyli takie, w których stosunek długości do średnicy l/d jest większy od 10. Znajdują one zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle lotniczym (wały turbin, wałki sprężynujące, elastyczne i skrętne), narzędziowym (wierćta, rozwiertaki, narzędzia specjalne), maszynowym (wałki wirników, pomp, generatorów, prowadnic) czy motoryzacyjnym (półosie, wały napędowe) [1, 2].

Wały o małej sztywności najczęściej wykonuje się z wysokowytrzymałych stali stopowych. Typowe metody ich obróbki obejmują toczenie zewnętrzne oraz szlifowanie. Obróbka tokarska powinna zapewniać 8.-11. klasę tolerancji oraz chropowatość $Ra = 0,63 \pm 2,5 \mu\text{m}$, natomiast operacja szlifowania – 5. lub 6. klasę tolerancji przy chropowatości $Ra < 0,63 \mu\text{m}$ [3].

Mała sztywność przedmiotów powoduje problemy z osiągnięciem wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej. Podczas szlifowania takich części następuje odkształcenie sprężyste, skutkujące błędami walcowości i wymiaru wykonywanych elementów [4].

Z wielu badań wynika, że podatność kłów konika i wrzeciennika przedmiotu oraz obrabianego przedmiotu, którego stosunek długości do średnicy l/d jest większy od 10, stanowi ok. 90% podatności układu OPN (obrabiarka–przedmiot obrabiany–narzędzie) [5]. Na rys. 1 przedstawiono przemieszczenia sprężyste tych elementów.



Rys. 1. Odkształcenia sprężyste przedmiotu oraz kłów wrzeciennika przedmiotu i konika

Przemieszczenie sprężyste przedmiotu x_1 , będące skutkiem przemieszczeń kła wrzeciennika przedmiotu x_w oraz kła konika x_k , można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$x_1 = \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 \cdot \frac{F_n}{k_w} + \left(\frac{z}{l}\right)^2 \cdot \frac{F_n}{k_k} \quad (1)$$

gdzie: k_w – sztywność kła wrzeciennika przedmiotu, k_k – sztywność kła konika, F_n – składowa normalna siły szlifowania.

Z kolei ugięcie przedmiotu jest określane następująco:

$$x_2 = \frac{F_n \cdot z^2 \cdot (l-z)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot l} \quad (2)$$

gdzie: E – moduł Younga; I – moment bezwładności przekroju kołowego.

Całkowita wartość przemieszczenia sprężystego układu w dowolnym punkcie szlifowanego przedmiotu o małej sztywności może być w przybliżeniu superponowana jako suma zależności (1) i (2). Na skutek tego odkształcenia powstają błędy wymiaru i błędy walcowości szlifowanych przedmiotów. Odkształcenia kłów szlifierki powodują odchyłkę stożkowości, a ugięcia przedmiotu – odchyłkę baryłkowości.

Zmniejszenie wartości błędów wymiaru i kształtu szlifowanych wałków o małej sztywności w praktyce przemysłowej osiąga się na dwa sposoby. Pierwszy polega na zredukowaniu wartości siły szlifowania dzięki zastosowaniu niskich parametrów technologicznych (wartości prędkości posuwu osiowego v_{fa} oraz dosuwu ściernicy a_e – zwiększenie liczby przejść ściernicy). Jest to jednak nieekonomiczne ze względu na znaczące wydłużenie czasu obróbki. Drugi sposób to stosowanie podtrzymek (stałych bądź ruchomych). Niestety, ich ustawianie jest czasochłonne i wiąże się z ryzykiem uszkodzenia powierzchni, a w przypadku podtrzymek ruchomych także z wyższymi

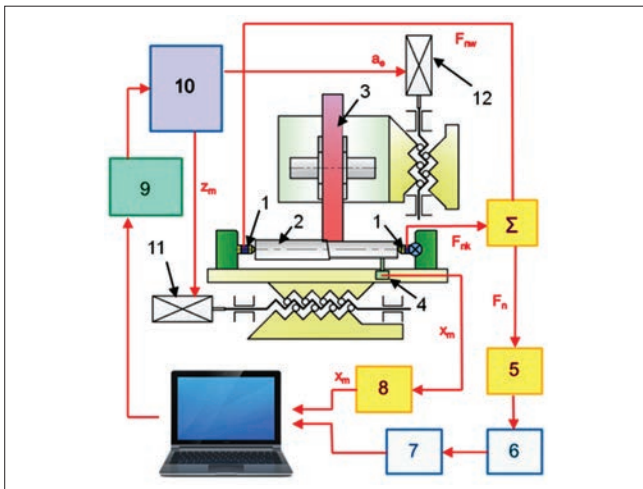
* Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Sułkowicz (sulkowicz@prz.edu.pl), dr inż. Robert Babiarsz (robertb@prz.edu.pl) – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

kosztami, ponieważ konieczne jest zastosowanie dodatkowego napędu. Poszukuje się więc takich rozwiązań w sterowaniu ruchami ściernicy, które zapewnią kompensację odkształcenia sprężystego przedmiotu, zwłaszcza w przypadku szlifierek CNC, w których możliwe jest sterowanie w osi X wrzeciennikiem ściernicy.

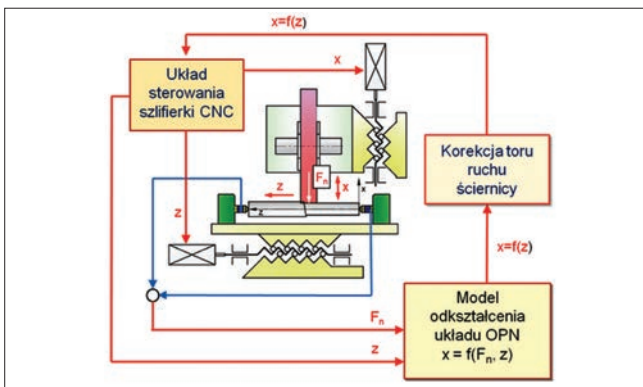
Cel prac

Celem autorów było opracowanie i sprawdzenie układu pomiaru odchyłki walcowości wałków o małej sztywności, a także kompensacja tej odchyłki. Na potrzeby kompensacji odchyłki opracowano metodę polegającą na sterowaniu dosuwem ściernicy podczas szlifowania wzdłużnego na podstawie zmierzonych wartości składowej F_n siły szlifowania. Schemat blokowy układu pomiarowego i sterowania przedstawiono na rys. 2.

Podczas szlifowania pierwszego przedmiotu (jako testowego) mierzona jest składowa normalna siły szlifowania F_n . Na podstawie zarejestrowanych wartości siły obliczana jest wartość przemieszczenia sprężystego układu. Następnie generowany jest program sterujący torem ruchu ściernicy, który zostaje wprowadzony do układu sterowania obrabiarki – kolejny przedmiot szlifowany jest już z korekcją dosuwu ściernicy. Z uwagi na zmianę właściwości skrawnych ściernicy (jej zużycie) ten proces jest powtarzany dla każdego kolejnego przedmiotu obrabianego w okresie trwałości ściernicy. Wartości odchyłek walcowości każdego przedmiotu są mierzone po obróbce na obrabiarce z wykorzystaniem czujnika indukcyjnego.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiaru i kompensacji odchyłek walcowości: 1 – siłomierz, 2 – przedmiot testowy, 3 – ściernica, 4 – czujnik indukcyjny, 5 – mostek pomiarowy, 6 – filtr cyfrowy, 7 – przetwornik A/C, 8 – układ pomiaru kształtu, 9 – układ dopasowujący, 10 – układ sterowania obrabiarki, 11 – silnik napędowy osi Z, 12 – silnik napędowy osi X

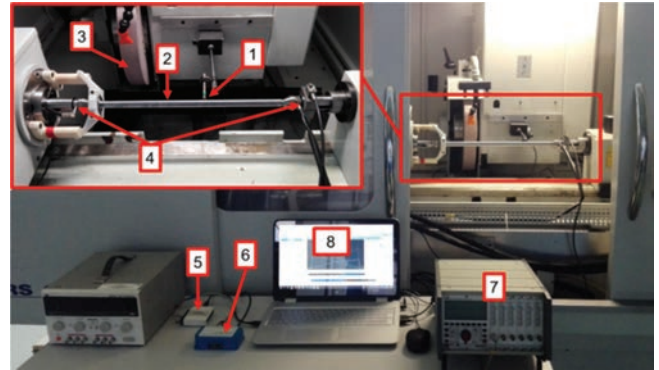


Rys. 3. Algorytm układu sterowania torem ruchu ściernicy

W ten sposób uzyskuje się informacje o aktualnych błędach, a to umożliwia wprowadzanie korekt do programu generującego kolejne tory ruchu ściernicy w osi X dla następnych przedmiotów. Algorytm układu sterowania torem ruchu ściernicy pokazano na rys. 3.

Warunki badań

Stanowisko badawcze zrealizowano na bazie trzyosiowej szlifiarki do wałków RS 600 C, wyprodukowanej przez firmę Geibel & Hotz, sterowanej CNC (rys. 4).

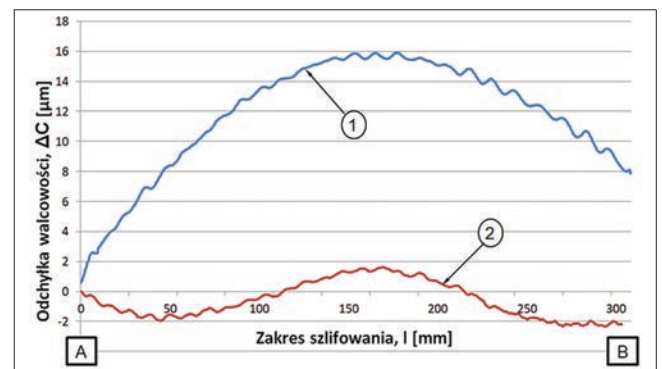


Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – czujnik indukcyjny, 2 – przedmiot testowy, 3 – ściernica, 4 – siłomierz, 5 – przetwornik A/C, 6 i 7 – wzmacniacze, 8 – komputer

Badania doświadczalne polegały na szlifowaniu wzdłużnym – bez korekty oraz z korekcją toru ruchu ściernicy – przedmiotu testowego o długości $l = 400$ mm i średnicy $d = 22$ mm. Przedmiot wykonany ze stali 40H zamocowano na obrabiarce w kłach pierścieniowych siłomierzy piezoelektrycznych typu 9601A firmy Kistler, umożliwiających pomiar trzech składowych siły szlifowania. W celu wyeliminowania wpływu momentu obrotowego zabieraka na pomiar siły szlifowania zastosowano zabierak dwuramienny, skonstruowany specjalnie do tego celu. Przebiegi mierzonych sygnałów rejestrowano w programie LabVIEW SignalExpress. Badania przeprowadzono z użyciem ściernicy elektrokorundowej typu M60H12VE01PI-45 o średnicy $d_s = 400$ mm i szerokości $b_s = 50$ mm. Prędkość obwodowa ściernicy wynosiła $v_c = 35$ m/s, a przedmiotu obrabianego – $v_w = 23$ m/min. Dosuw ściernicy był równy $a_e = 0,06$ mm. Przedmiot szlifowano z posuwem osiowym $f_a = 4$ mm/obr.

Wyniki badań

Zmierzone przebiegi odchyłki profilu przedmiotu testowego, szlifowanego bez korekty oraz z korekcją toru ruchu ściernicy, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebieg odchyłki profilu przedmiotu testowego, mierzonego na obrabiarce: 1 – szlifowanie bez korekcji, 2 – szlifowanie z korekcją toru ruchu ściernicy, A – strona kła wrzeciennika przedmiotu, B – strona kła konika



Rys. 6. Pomiar odchyłki walcowości przedmiotu na okrągłościomierzu MarForm MMQ 400

Ze względu na mocowanie przedmiotu droga szlifowania była nieco krótsza i wynosiła ok. 300 mm. Zarys powierzchni na obwodzie przedmiotu szlifowanego mierzono sześć razy – co 60° – z wykorzystaniem czujnika indukcyjnego zamocowanego na wrzecienniku ściernicy obrabiarki. Pomiaru wykonywano, przemieszczając stół szlifierki wraz z przedmiotem względem czujnika indukcyjnego, po tworzącej powierzchni walcowej wzdłuż osi przedmiotu, z prędkością $v_m = 100$ mm/min.

Można zauważyć, że zastosowanie korekcji toru ruchu ściernicy przyniosło wyraźną poprawę dokładności przedmiotu obrobionego. W przypadku szlifowania bez korekcji toru ruchu ściernicy wyższe wartości odchyłek profilu szlifowanego przedmiotu uzyskano po stronie kła konika szlifierki, co wynika z jego mniejszej sztywności w porównaniu ze sztywnością kła wrzeciennika przedmiotu. Zmie-

rzona z użyciem czujnika indukcyjnego odchyłka walcowości dla przedmiotu szlifowanego bez korekcji toru ruchu ściernicy wyniosła ok. $16 \mu\text{m}$. Zastosowanie korekcji toru ruchu ściernicy poprzez sterowanie jej dosuwem w osi X w celu kompensacji przemieszczenia sprężystego umożliwiło zmniejszenie odchyłki walcowości do ok. $4 \mu\text{m}$. Aby potwierdzić pomiary wartości odchyłek walcowości szlifowanych przedmiotów, przeprowadzono również pomiary na okrągłościomierzu MarForm MMQ 400 (rys. 6).

Pomiary prowadzono z wykorzystaniem strategii przekrojów wzdłużnych, podobnie jak na szlifierce, mierząc profil przedmiotu sześć razy co 60° (rys. 7).

W przypadku szlifowania bez korekcji toru ruchu ściernicy uzyskano odchyłkę walcowości wynoszącą ok. $18 \mu\text{m}$. Dla szlifowania z korekcją toru ruchu ściernicy zmierzona odchyłka wyniosła ok. $4 \mu\text{m}$. Porównując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że czujnik indukcyjny zamocowany na korpusie wrzeciennika ściernicy może być z powodzeniem wykorzystany do pomiaru odchyłki walcowości szlifowanych przedmiotów bezpośrednio na szlifierce.

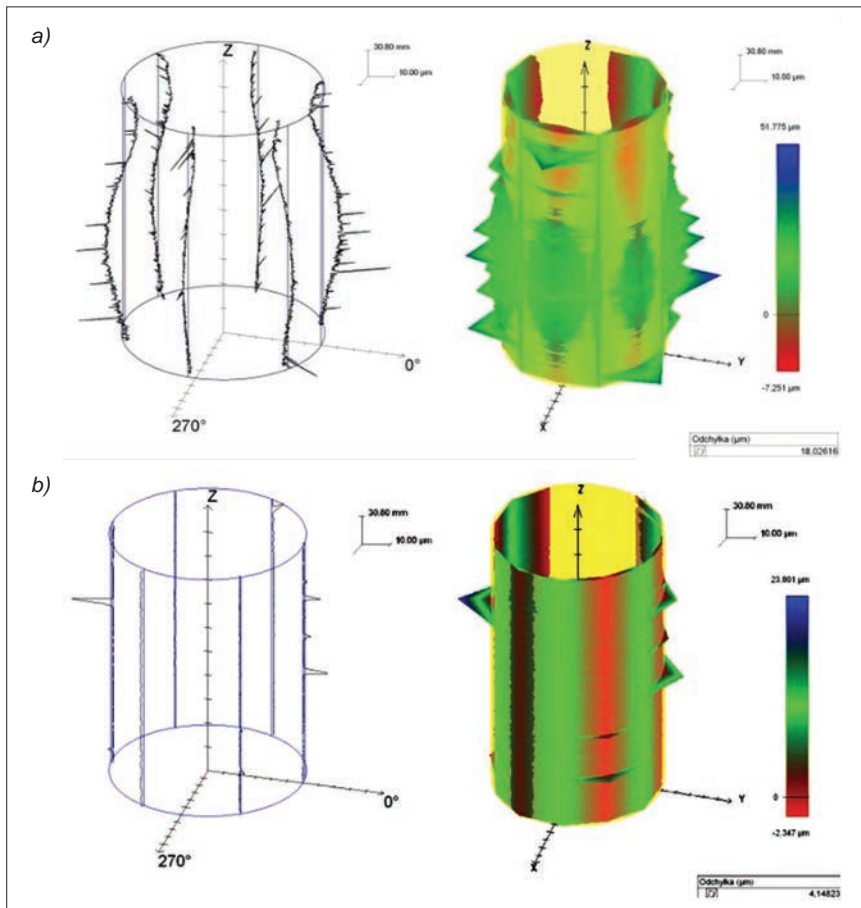
Podsumowanie

Podczas szlifowania wzdłużnego przedmiotów o małej sztywności bez podtrzymki następuje odkształcenie sprężyste układu OPN, a w konsekwencji pojawiają się odchyłki walcowości szlifowanych przedmiotów. Nowoczesne szlifierki CNC pozwalają na zaprogramowanie dowolnego toru ruchu ściernicy. Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest takie sterowanie dosuwem ściernicy podczas szlifowania wzdłużnego wałków o małej sztywności, które pozwoli na znaczne zmniejszenie błędów walcowości obrabianych przedmiotów.

Zastosowanie korekcji toru ruchu ściernicy podczas szlifowania wzdłużnego przedmiotu testowego pozwoliło na ok. czterokrotne zmniejszenie odchyłki walcowości. Pomiary na okrągłościomierzu wykazały wysoką korelację z pomiarami prowadzonymi na obrabiarkie. Można zatem stwierdzić, że czujnik indukcyjny, zamocowany na wrzecienniku ściernicy szlifierki po odpowiednim wzorcowaniu, zapewnia dostatecznie dokładny pomiar odchyłki walcowości.

LITERATURA

1. Świć A. „Technologia obróbki wałków o małej sztywności”. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2009.
2. Draczow A., Taranenko G., Hałas W. „Sterowanie układem dynamicznym obróbki części osiowosymetrycznych o małej sztywności”. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*. 2 (2009): s. 125–131.
3. Oczko K., Habrat W. „Doskonalenie procesów obróbki ścierniczej. Cz. II. Wysokoefektywne ściernice i procesy szlifowania”. *Mechanik*. 8–9 (2010): s. 517–529.
4. Cieniuszek W., Świć A. „Analiza porównawcza badań teoretycznych i eksperymentalnych sterowania dokładnością szlifowania wałków o małej sztywności”. *Problemi tekhniki. Nauchno-virobochnyj zhurnal*. 2 (2004): s. 239–242.
5. Burek J. „Regulacja i nadzorowanie procesu szlifowania wglębnego walcowych powierzchni zewnętrznych”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2017.



Rys. 7. Wyniki pomiaru odchyłki walcowości przedmiotu testowego mierzonego na okrągłościomierzu: a) szlifowanie bez korekcji toru ściernicy, b) szlifowanie z korekcją toru