Nowe możliwości pomiaru płaskości elementów uszczelnień

New possibilities of flatness measurement of sealing elements

JAROSŁAW SZYMANEK WŁADYSŁAW JAKUBIEC DOMINIK ZEMANEK PAWEŁ ROSNER*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.174

Przedstawiono nowe możliwości w zakresie dokładnych pomiarów odchyłki płaskości dzięki zastosowaniu interferometru TOPOS. Omówiono dotychczas stosowane sposoby pomiaru odchyłki płaskości pierścieni uszczelniających, a także zasadę pomiaru i budowę interferometru z wyposażeniem (ze stołem obrotowym) pozwalającym na istotne zwiększenie zakresu pomiarowego. Zaprezentowano przykładowe wyniki testów i pomiarów.

SŁOWA KLUCZOWE: odchyłka płaskości, interferometr, uszczelnienia mechaniczne

In the paper are presented new possibilities of accurate measurement of flatness deviation with use of TOPOS interferometer. Methods of measurements of flatness deviation of sealing rings which are used so far, were discussed. Paper presents principle of measurement and construction of interferometer with equipment (with rotary table) which allow to significantly extension of measuring range. Examples of results of tests and measurements were presented.

KEYWORDS: flatness deviation, interferometer, mechanical sealing

Proces wytwarzania czołowych uszczelnień mechanicznych (rys. 1) jest bardzo trudny ze względu na potrzebne do niego maszyny technologiczne, oprzyrządowanie, narzędzia, wyposażenie pomiarowe i organizację produkcji [1]. W artykule skupiono uwagę na wyposażeniu pomiarowym, ponieważ to właśnie pomiary są kluczowe w procesie wytwarzania dokładnych części uszczelnień – bez dokładnych pomiarów nie da się wykonać wyrobów spełniających wysokie wymagania w zakresie płaskości powierzchni.

O dokładności wykonania uszczelnienia jako całości decyduje przede wszystkim dokładność wykonania pierścieni ślizgowych, które są wytwarzane z różnych materiałów, trudnych zarówno do obróbki, jak i do pomiaru (rys. 2).



Rys. 1. Uszczelnienie mechaniczne: 1 – pierścień stały, 2 – pierścień obrotowy, 3 – pierścień oporowy, 4 – sprężyna, 5 – korpus uszczelnienia

* Mgr inż. Jarosław Szymanek (jszymanek@anga.com.pl), mgr inż. Dominik Zemanek (dzemanek@anga.com.pl) – ANGA Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o.; dr hab. inż. Władysław Jakubiec, prof. ATH (wjakubiec@ath.bielsko.pl), mgr inż. Paweł Rosner (prosner@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej



Rys. 2. Pierścienie wykonane z różnych materiałów [1]: a) ceramiki 99,5% Al_2O_3 , b) węgla impregnowanego antymonem, c) spiekanego węglika krzemu SiC

Przez pojęcie dokładności wykonania pierścieni ślizgowych rozumie się przede wszystkim małe tolerancje płaskości.

Powierzchnie robocze pierścieni ślizgowych uzyskuje się w procesie docierania, prowadzonym w cyklu: docieranie–pomiar–ocena. Ten cykl jest powtarzany aż do uzyskania wymaganej płaskości. Z tego powodu ważnym kryterium doboru wyposażenia do pomiaru odchyłki płaskości jest czas pomiaru.

Dotychczasowe możliwości pomiaru odchyłki płaskości

Pomiary odchyłki płaskości są szczególnie skomplikowane i wymagają specjalnego wyposażenia pomiarowego. W przypadku przedmiotów typu tarcza lub pierścień o średnicach z przedziału od kilkudziesięciu do kilkuset milimetrów dostępne są klasyczne sposoby pomiaru odchyłki płaskości:

 Pomiar z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Jest to pomiar stykowy, w którym mierzony przedmiot jest unieruchamiany z użyciem sił mogących powodować jego odkształcenia. Osiągane niepewności pomiaru są rzędu 1÷3 μm.

 Pomiar z użyciem przyrządów ze stołem obrotowym, przeznaczonych do pomiaru odchyłki okrągłości. Jest to pomiar stykowy, w którym przedmiot jest unieruchamiany z użyciem sił mogących powodować jego odkształcenia. Osiągane niepewności pomiaru są rzędu 0,8÷2 μm.

• Pomiar z użyciem profilometrów przeznaczonych do pomiarów chropowatości i falistości powierzchni. W ogólnym przypadku istnieje możliwość wykonywania pomiarów stykowych (ostrze odwzorowujące) i bezstykowych (metody optyczne). W pomiarach 3D (optycznych i stykowych) jest nimi objęta bardzo mała powierzchnia. Zastąpienie pomiaru płaskości pomiarami prostoliniowości oprócz ograniczeń co do długości odcinków prostoliniowych wnosi dodatkowe trudności interpretacyjne [1]. W pomiarach stykowych może występować rysowanie powierzchni ostrzem odwzorowującym. Z powodu ryzyka uszkodzeń powierzchni oraz braku możliwości oceny globalnej odchyłki płaskości ta technika ma bardzo ograniczone zastosowanie.

 Pomiary z zastosowaniem płaskich szkieł interferencyjnych, wykonywane ręcznie i ze wzrokową oceną charakteru oraz wartości odchyłki kształtu [7,8]. Takie pomiary są stosowane z powodzeniem w przypadku małych powierzchni, np. powierzchni pomiarowych mikrometrów czy płytek wzorcowych. Osiągane niepewności pomiaru odchyłki płaskości są wtedy rzędu 0,3 µm. Przy większych powierzchniach pojawiają się dwa poważne ograniczenia techniczne związane z ręcznym manipulowaniem wzajemnym położeniem szkła interferencyjnego i mierzonego przedmiotu oraz ze wzrokową interpretacją obrazu prążków. Wzrokowa interpretacja jest szczególnie trudna w przypadku przedmiotów typu pierścień, gdzie ze względu na brak ciągłości prążków nie ma możliwości oceny globalnej odchyłki kształtu. Pomiary przedmiotów o ciemnych powierzchniach są utrudnione ze względu na złą widoczność prążków. Istotną wadę stanowi czasochłonność i ograniczone możliwości interpretacji wyników pomiaru. W najlepszym wariancie tej metody pomiary odchyłki płaskości są wykonywane z zastosowaniem światła monochromatycznego (sodowego). W celu odpowiedniej interpretacji konieczne jest ręczne, mało precyzyjne przesuwanie szkieł interferencyjnych, w górę lub w dół względem mierzonej powierzchni. Nawet dla prostych powierzchni interpretacja obrazu prążków interferencyjnych nie jest łatwa. Obraz prążków może być niejednoznaczny - powierzchnia wklęsła i wypukła daje trudne do rozróżnienia obrazy prążków. Przy ocenie wzrokowej nie da się uzyskać dostatecznie dobrej rozdzielczości. Ponadto niewielkie zmiany kształtu powierzchni oraz zmiany ograniczone do małej powierzchni są trudne do wykrycia.

Nowe potrzeby

W przypadku pierścieni ślizgowych do uszczelnień bezstykowych o podwyższonych parametrach pracy konieczna jest większa dokładność wykonania struktur powierzchniowych wywołujących efekt gazodynamiczny, co pociąga za sobą konieczność stosowania dokładniejszych sposobów pomiaru. Uzasadnione jest więc zastosowanie do pomiarów najnowszego dostępnego interferometru, który w porównaniu z dotychczasowymi rozwiązaniami zapewnia większą dokładność i zdecydowanie krótszy czas pomiaru. Dzięki temu możliwa jest produkcja uszczelnień bezstykowych o podwyższonych parametrach pracy (w tym uszczelnień z pierścieniami ślizgowymi zabezpieczonymi powłokami węglikowymi oraz z diamentu amorficznego, wykonanymi w technologii CVD), przeznaczonych do stosowania w kompresorach procesowych. Zastosowanie interferometru do pomiaru elementów uszczelnień dostarcza bardziej szczegółowych informacji nt. charakteru odchyłki płaskości pierścieni ślizgowych, która decyduje o jakości tego elementu uszczelnienia gazodynamicznego. Płaskość tego elementu przekłada się na parametry i skuteczność całego uszczelnienia, determinując wartości krytyczne jego wytrzymałości.

Możliwości interferometru TOPOS

Zasada pomiaru interferometrem opiera się na interferometrii, bazującej na kącie padania światła (rys. 3). Dzięki temu możliwe jest wykonanie pomiarów płaskości zarówno powierzchni polerowanych, jak i nieodblaskowych, które nie byłyby mierzalne w przypadku tradycyjnych interferometrów do badania płaskości.

Oprogramowanie interferometru pozwala na wybór czułości działania urządzenia (0,5; 1; 2 i 4 µm/prążek)



i tym samym – na odpowiednie ustawienie systemu pomiarowego względem właściwości mierzonej powierzchni. Dzięki temu powierzchnie o bardzo wysokiej dokładności, takie jak polerowane uszczelnienia mechaniczne, można zmierzyć z najwyższą czułością (0,5 μm/prążek), podczas gdy niższe ustawienia czułości umożliwiają również pomiar nierówności, powierzchni nierównych lub zużytych [6].

Ocena komputerowa zapewnia trójwymiarowe, szybkie i obiektywne testy części. Zgodnie z zasadą działania interferometru kilka obrazów przesuniętych fazowo prążków uzyskuje się za pomocą wbudowanej kamery. Na podstawie tych obrazów wyznaczany jest kształt mierzonej części. Pomiar trwa krócej niż 2 s dla maksymalnie 300 000 punktów. Mierzony obszar, który ma zostać poddany ocenie, może zostać wykryty automatycznie przez oprogramowanie lub określony przez użytkownika na podstawie wyboru odpowiedniego kształtu geometrycznego (np. okręgu, pierścienia lub prostokąta). Położenie i rozmiar tego obszaru można określić za pomocą linii granicznej, która jest nakładana na obraz części. Wykluczenie z pomiaru brzegów przedmiotu można ustawić osobno dla konturu zewnętrznego i wewnętrznego [6].

Interferometr nadaje się do pomiarów detali wykonanych z różnych materiałów (takich jak: metal, szkło, polimery, ceramika) i w różnej technologii (np. szlifowania, docierania czy polerowania). Wyniki pomiarów mają postać liczbową. Interferometr wykorzystuje światło o dużej intensywności, co pozwala na oświetlenie całej powierzchni i daje wyraźny obraz prążków. W czasie pomiaru nie ma potrzeby manipulowania przedmiotem w celu uzyskania odpowiedniego obrazu prążków (zamiast tego stosowana jest modulacja fazy światła). Obraz prążków w postaci cyfrowej może zostać poddany dowolnemu opracowaniu, przy czym istotna jest zwłaszcza możliwość filtracji, powodująca oddzielenie (w zależności od potrzeb) składowych o niskiej lub wysokiej częstotliwości.

Interferometr ze stołem obrotowym pokazano na rys. 4.

Interferometr TOPOS (Lamtech) wykorzystuje światło laserowe. Modulacja fazy odbywa się przez zmianę kąta padania światła i zastępuje ręczne przesuwanie przedmiotu. Interpretacja obrazu prążków interferencyjnych jest wykonywana przez specjalistyczne oprogramowanie interferometru, dzięki czemu unika się niejednoznaczności interpretacyjnych i dokładnie mierzy nawet bardzo małe zmiany kształtu powierzchni. Interferometr pozwala



Rys. 5. Obraz fragmentu mierzonego pierścienia na ekranie komputera interferometru

na pomiar części (bez jej przemieszczania) o maksymalnej średnicy 100 mm.

Dzięki wyposażeniu interferometru w precyzyjny stół obrotowy możliwy jest pomiar pierścieni o średnicy zewnętrznej do 400 mm. W takim przypadku wykonywanych jest kilka ujęć w różnych położeniach kątowych stołu. Dobór liczby ujęć, przemieszczenia kątowe stołu i łączenie poszczególnych fragmentów odbywa się automatycznie – pracownik ustala jedynie kształt i wymiary obszaru mierzonego w jednym cyklu (rys. 5).

Wyniki pomiaru przedstawiane są graficznie i standardowo obejmują: wartości odchyłki płaskości (*FLTt* i *H95%*) [4,5], wizualizację 3D i wykres powierzchniowy topografii powierzchni, histogram wysokości punktów profilu względem płaszczyzny odniesienia i wykresy profilu w czterech przekrojach. Odchyłki płaskości mogą być wyznaczane względem płaszczyzny średniej lub jako szerokość minimalnej strefy. Parametr *H95%* oznacza maksymalną różnicę wysokości rzędnych po odrzuceniu 2,5% najwyższych i 2,5% najniższych punktów profilu. Przedstawienie graficzne wyniku pomiaru ułatwia operatorowi interpretację wyników. Wartość 95% podano jako przykład – można zadać dowolną inną.

Przykładowe wyniki pomiarów

Przykładowe wyniki pomiaru pierścienia pokazano na rys. 6. Już pobieżna analiza tych wyników wskazuje na wysokie osiągi przyrządu w zakresie dokładności. Wartość występującej odchyłki płaskości (poniżej 1 µm) obejmuje przecież zarówno dokładność wykonania, jak i błędy pomiaru, a pierścień ma znaczną średnicę (ponad 370 mm) – z tego powodu zastosowano obrót stołu obrotowego (16 położeń). Widoczna trójgraniastość odchyłki jest odzwierciedleniem odkształceń pierścienia podpartego w trzech punktach (błąd pomiaru pochodzący od ograniczonej sztywności mierzonego przedmiotu).

W celu upewnienia się co do możliwości interferometru wykonano pomiary wywzorcowanego szkła interferencyjnego i powierzchni roboczych dwóch płytek wzorcowych. Wyniki pomiaru odchyłki płaskości szkła interferencyjnego przedstawiono na rys. 7. Otrzymano wynik porównywalny z podanym na świadectwie wzorcowania. Ponadto na płytce wzorcowej wykonano badania odtwarzalności. Odchylenie standardowe dla 11 pomiarów wykonanych w różnych miejscach stołu przyrządu i w różnych orientacjach dla parametru *F* wynosi 22 nm, a dla *H95%* – 19 nm.



Rys. 6. Przykład protokołu pomiarowego pierścienia



Rys. 7. Przykład protokołu pomiarowego szkła interferencyjnego (w dolnej części protokołu znajdują się profile prostoliniowości w czterech przekrojach rozmieszczonych co 45°)



Rys. 8. Wyniki pomiaru odchyłki płaskości płytki wzorcowej klasy 0 (w dolnej części profile prostoliniowości w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach)



Rys. 9. Wyniki pomiaru odchyłki płaskości płytki wzorcowej klasy 2 (w dolnej części profile prostoliniowości w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach)

Wyniki pomiarów odchyłki płaskości dla dwóch płytek wzorcowych przedstawiono na rys. 8 i 9. Warto przypomnieć, że tolerancje płaskości płytek wzorcowych dla klas K, 0, 1 i 2 wynoszą odpowiednio: 0,05; 0,1; 0,15 i 0,25 µm [3].

Podawane przez oprogramowanie przyrządu profile powierzchni porównano z analogicznymi, uzyskanymi za pomocą profilometru stykowego. Ze względu na znaczne rozrzuty otrzymane wyniki nie pozwalają na jednoznaczne potwierdzenie porównywalności tych dwóch sposobów pomiaru.

Podsumowanie

Przeprowadzone testy potwierdzają wysokie parametry dokładnościowe interferometru, co widać zwłaszcza na przykładzie wyników pomiaru elementów wzorcowych: szkła interferencyjnego i płytek wzorcowych.

Wyniki mają postać graficzną wygodną do interpretacji. Wpływ osoby obsługującej przyrząd jest bardzo ograniczony.

Zastosowanie interferometru w procesie produkcji uszczelnień pozwala na uzyskanie znacznie dokładniejszych informacji o charakterze odchyłki płaskości pierścieni ślizgowych – kluczowych elementów uszczelnienia gazodynamicznego. Płaskość tych elementów przekłada się na parametry i skuteczność całego uszczelnienia.

LITERATURA

- Norymberczyk Ł., Płonka S. "Wpływ wybranych parametrów docierania na jakość powierzchni i wydajność obróbki pierścieni z węglika krzemu". *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1048–1049.
- Wizner M., Jakubiec W., Starczak M. "Description of surface topography of sealing rings". Wear. 271, 3–4 (2011): s. 571–575.
- PN-EN ISO 3650:2000 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Wzorce długości. Płytki wzorcowe.
- PN-EN ISO 12781-1:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Płaskość. Część 1: Terminologia i parametry płaskości.
- PN-EN ISO 12781-2:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Płaskość. Część 2: Operatory specyfikacji.
- TOPOS Instrument for fast, high accuracy non-contact flatness measurement of precision parts. Lamtech.
- https://www.kemet.co.uk/images/downloads/Flatness_Measuring_ Equipment.pdf (dostep: 15.05.2018 r.).
- https://www.kemet.co.uk/blog/lapping/how-to-measure-flatness-technical-article (dostęp: 15.05.2018 r.).