Zastosowanie replik do kontroli części z wykorzystaniem stykowych pomiarów współrzędnościowych

The use of replicas in the measurement of machine elements with use of contact coordinate measurements

MAREK HAWRYLUK MAREK KURAN JACEK ZIEMBA*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.169

Współczesna technika pozwala na projektowanie i wykonanie elementów maszyn o tak skomplikowanej geometrii, że ich weryfikacja z wykorzystaniem współrzędnościowych maszyn pomiarowych jest trudna lub wręcz niewykonalna. Zaprezentowano możliwość zastosowania replik fragmentów geometrii wyrobu do kontroli cech geometrycznych z wykorzystaniem pomiarów stykowych na maszynie współrzędnościowej. SŁOWA KLUCZOWE: pomiary współrzędnościowe, repliki cech geometrycznych

Modern technology allows to design and manufacture machine elements with complex geometry that makes it difficult or even impossible to use coordinate measuring machines for verification of them. The article presents the possibility of using replicas of product geometry to control geometric features using contact measurements on a coordinate machine.

KEYWORDS: coordinate masurements, replicas of geometric features

Najbardziej czasochłonnym etapem w procesie produkcyjnym jest weryfikacja poprawności wykonania gotowego wyrobu. Przy panującej obecnie tendencji do przyspieszania produkcji jednym ze sposobów, by skrócić czas kontroli geometrii wytwarzanego elementu jest zastosowanie współrzędnościowej techniki pomiarowej. Aby uzyskać dostęp do geometrii wyrobu ukrytej w jego wnętrzu, można wykonać replikę tego wyrobu i zmierzyć jej geometrię.

Technika ta jest stosowana zwłaszcza podczas pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Ułatwiają to również funkcje, w które wyposażone jest oprogramowanie współczesnych profilometrów, wprost oferujące możliwość analizy topografii uzyskanych przez pomiar replik struktury geometrycznej powierzchni wyrobu.

Materiały wykorzystywane do wykonania takich replik muszą się charakteryzować dużą sztywnością, małą odkształcalnością powierzchni oraz niewielkimi zmianami geometrii podczas utwardzania. Takie właściwości są zaletami w przypadku pomiarów m.in. cech struktury powierzchni wyrobu, ale uniemożliwiają wykonanie repliki skomplikowanej geometrii wyrobu z powodu niemożliwości wydobycia repliki z odtwarzanych np. otworów, wewnętrznych gwintów czy wielowypustów bez jej zniszczenia. Konieczne jest wtedy wykonanie częściowej repliki elementu geometrycznego [1], niepozwalającej na całościową weryfikację poprawności jego wykonania, lub poszukiwanie materiałów pozwalających na znaczne odkształcenia gotowej repliki podczas usuwania jej z replikowanego elementu.

Takie możliwości oferują m.in. dwuskładnikowe masy plastyczne utwardzane chemicznie Plastiform, w zależności od przeznaczenia charakteryzujące się dobrym wypełnieniem odtwarzanej geometrii, znaczną sprężystością pozwalającą na wyjęcie repliki z mierzonego elementu bez jej zniszczenia i dobrą replikacją nierówności powierzchni. Głównym przeznaczeniem tych mas jest jednak zastosowanie ich w pomiarach optycznych, z użyciem mikroskopów i projektorów [2], do pomiaru wybranych cech repliki w całości lub na jej przekrojach wykonywanych specjalnym podwójnym nożem dostarczanym przez producenta mas.

Zakres badań

Mierzono repliki wykonane z mas Plastiform firmy Rivelec. Do prób wybrano masy, które można usunąć z replikowanych elementów nawet o znacznie skomplikowanej geometrii. Zdolność taka została zdefiniowana przez producenta jako wartość RC (*removal constraint*) wyznaczona z zależności:

$$RC = \left(1 - \frac{D_{\min}}{D_{\max}}\right) \cdot 100\%$$

gdzie: D_{\min} – najmniejsza średnica otworu, przez który ma być usunięta replika, D_{\max} – największa średnica replikowanego elementu.

Aby możliwe było usunięcie repliki z otworu o skomplikowanej geometrii, wartość RC powinna być większa niż 0%. Warunek ten spełniają masy wymienione w tablicy. Dodatkowo producent podaje nominalne wartości twardości poszczególnych materiałów w skali A Shore'a. W przypadku pomiarów stykowych korzystne jest posługiwanie się materiałem o możliwie dużej twardości, co przekłada się na mniejszą podatność powierzchni materiału na odkształcenia podczas pomiarów stykowych.

TABLICA. Masy Plastiform użyte w badaniach

Masa	F20 D.A.V.	F30 E.S.A.D.	F40 B.R.A.D.	P25 J.A.D.	P35 S.O.F.T.
<i>RC</i> , %	30	20	35	20	20
Shore A, °Sh	20	20	40	25	35

^{*} Dr hab. inż. Marek Hawryluk (marek.hawryluk@pwr.edu.pl), dr inż. Marek Kuran (marek.kuran@pwr.edu.pl), dr inż. Jacek Ziemba (jacek. ziemba@pwr.edu.pl) – Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii Politechniki Wrocławskiej

Pomiarom poddano repliki otworu pierścienia wzorcowego produkcji firmy Mitutoyo, o nominalnej średnicy D = 19,997 mm. Repliki wykonano na pierścieniu ułożonym na płaskiej powierzchni zwierciadła projektora, w celu zapewnienia możliwie podobnej odchyłki prostopadłości ich osi w stosunku do powierzchni mającej być bazą podczas dalszych pomiarów.

Pomiary replik przeprowadzono na maszynie współrzędnościowej Mitutoyo Crysta Plus-M544. Mierzono średnicę zewnętrzną repliki ustawionej bezpośrednio na płycie pomiarowej maszyny współrzędnościowej. Średnicę wyznaczono dla czterech rodzajów aproksymacji zarysu: najmniejszych kwadratów LSCI (Gaussa), minimalnej strefy MZCI (Czebyszewa), elementu opisanego MICI oraz elementu wpisanego MCCI, na podstawie zmierzonych na powierzchni repliki 12 punktów, równomiernie rozłożonych na jej obwodzie, na wysokości 5 mm od powierzchni bazowej, co stanowi połowę jej wysokości. Jako odniesienie dla wyników pomiarów zastosowano wartości uzyskane podczas pomiaru pierścienia wzorcowego, wykorzystując przedstawiony schemat postępowania podczas pomiaru.

Wykorzystano sondę TP20 firmy Renishaw, z końcówką zakończoną kulką o średnicy Ø3 mm, o standardowej sile nacisku pomiarowego. W celu określenia ewentualnego wpływu kierunku pomiaru na siłę nacisku pomiarowego zmierzono tę siłę w kierunkach osi +*X*, –*X* oraz +*Y*, –*Y*, a także osi +*Z*. Pomiary wykonano cyfrowym siłomierzem firmy AST, wyposażonym w tensometryczny przetwornik siły ściskającej o zakresie 0÷100 N i kroku cyfrowym 0,01 N.

Zmierzono także twardość utwardzonych mas za pomocą twardościomierza Shore'a typu A, by określić ewentualne różnice w stosunku do wartości podanych przez producenta i ich wpływ na wynik pomiaru replik.

Wyniki badań

Badania wstępne obejmowały pomiar siły nacisku pomiarowego oraz twardości próbek mas wykorzystanych do wykonania replik. Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiaru siły nacisku pomiarowego sondy TP20 w różnych kierunkach, zgodnych z osiami układu współrzędnych maszyny pomiarowej.



Rys. 1. Wartości siły nacisku pomiarowego sondy TP20 o standardowej sile pomiarowej, w zależności od kierunku pomiaru

Przedstawione wyniki są wartością średnią z serii 10 pomiarów wykonanych dla każdego kierunku pomiaru maszyny współrzędnościowej. Jak można zaobserwować, wartości nacisku pomiarowego – zarówno w kierunku ± *X*, jak i kierunku ± Y – są zbliżone i nie przekraczają wartości $F_{\pm X} \approx F_{\pm Y} = 0,1$ N. Odpowiadają one danym firmy Renishaw [3], która dla sondy o standardowym nacisku pomiarowym podaje w kierunkach pomiaru $\pm XY$ wartość siły $F_{\pm XYnom} = 0.08$ N.

Wykonano również dodatkowo pomiary nacisku w kierunku osi +*Z* (nie była ona wykorzystywana w badaniach). Jak widać na rys. 1, wartość nacisku w tym kierunku jest nieznacznie większa od 0,2 N. Jest to wynik mniejszy od podanego przez producenta, który dla tego kierunku pomiaru i dla tej sondy podaje wartość maksymalną nacisku na poziomie $F_{\pm Znom} = 0,75$ N. Uzyskane wyniki potwierdzają, że nacisk pomiarowy sondy TP20 w kierunkach osi maszynowego układu współrzędnych w płaszczyźnie *XY* nie przekracza wartości deklarowanych przez producenta. Można więc wnioskować, że w przypadku pomiarów w innych kierunkach wartość ta również nie zostanie przekroczona, pomimo trójgraniastości charakterystyki siły nacisku dla tego typu sond [4]

Na rys. 2. przedstawiono wyniki pomiaru twardości Shore'a typu A replik. Wyniki porównano z wartościami nominalnymi, podanymi przez producenta mas, firmę Rivelec.



Rys. 2. Wyniki pomiaru twardości Shore'a typu A replik w zależności od użytej masy w porównaniu z wartościami nominalnymi

Przedstawione wyniki są wartością średnią z serii 10 pomiarów wykonanych dla każdej z replik w różnych punktach na ich powierzchni. Jak można zaobserwować, twardość replik wykonanych z mas F40 B.R.A.D. oraz P35 S.O.F.T. odpowiada wartościom nominalnym [5] – nieznacznie je przekraczają lub są nieco mniejsze od wartości podanych przez producenta; odpowiednio:

- 38A °Sh wobec 40A °Sh dla masy F40 B.R.A.D.,
- 36A °Sh wobec 35A °Sh dla masy P35 S.O.F.T.

W przypadku mas o mniejszej deklarowanej twardości, wartości zmierzone dla próbek były wyraźnie większe od deklarowanych przez producenta; odpowiednio:

- 27A °Sh wobec 20A °Sh dla masy F20 D.A.V.,
- 24A °Sh wobec 20A °Sh dla masy F30 E.S.A.D.,
- 33A °Sh wobec 25A °Sh dla masy P25 J.A.D.

Większa twardość próbek w przypadku pomiarów stykowych jest zjawiskiem korzystnym.



Rys. 3. Wyniki pomiaru średnic replik wykonanych z różnych mas plastycznych dla różnych metod aproksymacji zarysu w porównaniu z wynikami pomiaru replikowanego elementu

Główną część badań stanowiły pomiary średnicy replik wykonanych z mas Plastiform, odtwarzających otwór pierścienia wzorcowego. Na rys. 3 zaprezentowano wyniki tych pomiarów w odniesieniu do wyników pomiarów pierścienia wzorcowego.

Przedstawione wyniki są wartością średnią z serii 10 pomiarów wykonanych dla każdej repliki oraz dla każdej metody aproksymacji zarysu przekroju. Jak można zaobserwować, wyniki pomiarów wartości średnic wyznaczonych dla replik różnią się od zmierzonej wartości replikowanego otworu. Różnice te wynoszą w zależności od zastosowanej metody aproksymacji: 0,156÷0,176 mm dla okręgu LSCI, 0,155÷0,175 mm dla okręgu MZCI, 0,143÷0,155 mm dla okręgu MCCI i 0,191÷0,211 mm dla okręgu MICI dla mas F40 B.R.A.D., P25 J.A.D. oraz P35 S.O.F.T.

W przypadku mas F20 D.A.V. oraz F30 E.S.A.D. różnice są większe i wynoszą: 0,263÷0,362 mm dla okręgu LSCI, 0,269÷0,367 mm dla okręgu MZCI, 0,231÷0,321 mm dla okręgu MCCI i 0,280÷0,439 mm dla okręgu MICI. Jak widać, różnice wyników pomiarów zmieniają się w sposób proporcjonalny do wartości zmierzonych twardości poszczególnych próbek i są podobne dla mas F40 B.R.A.D., P25 J.A.D. oraz P35 S.O.F.T., których zmierzona twardość Shore'a jest na podobnym poziomie i rośnie wraz ze zmniejszaniem się zmierzonej twardości dla mas F20 D.A.V. oraz F30 E.S.A.D.

Po porównaniu wyników pomiarów replikowanego elementu z wartością nominalną jego średnicy różnice wynoszą 0,002÷0,004 mm w zależności od zastosowanej aproksymacji, co mieści się w błędzie pomiaru wykorzystanej do badań maszyny współrzędnościowej, dla której producent określił wartość maksymalnego dopuszczalnego błędu na poziomie MPE = 0,0036 mm dla wymiaru odpowiadającego nominalnej średnicy mierzonego elementu.

Wyznaczono niepewność wykonanych pomiarów dla 95% poziomu ufności. Wyniki tych obliczeń w postaci szerokości przedziału ufności przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Szerokości przedziałów ufności dla wyników pomiarów replik wykonanych z różnych mas plastycznych dla różnych metod aproksymacji zarysu w porównaniu z szerokością przedziału ufności replikowanego elementu

Jak można zaobserwować, wyniki szerokości przedziałów ufności również są uzależnione od twardości replik. Największe w szerokości przedziałów wahają się od 0,037 mm do 0,061 mm dla okręgu LSCI, od 0,049 mm do 0,066 mm dla okręgu MZCI, od 0,040 mm do 0,054 dla okręgu MCCI i od 0,042 mm do 0,092 mm dla okręgu MICI. Największe wartości szerokości przedziałów ufności uzyskano dla mas o najmniejszej zmierzonej twardości, czyli F20 D.A.V. i F30 E.S.A.D. Dla nich też zaobserwowano największe różnice przy poszczególnych metodach aproksymacji.

W przypadku mas o większej zmierzonej twardości, a więc F40 B.R.A.D., P25 J.A.D. oraz P35 S.O.F.T., zmienność przedziałów jest mniejsza, zarówno pod względem użytej do wykonania repliki masy plastycznej, jak i zastosowanej metody aproksymacji. Wyniki uzyskane dla mierzonych replik są 5÷9 razy większe od szerokości przedziału ufności uzyskanej w wyniku pomiaru replikowanego elementu, w zależności od rozpatrywanej metody aproksymacji zarysu.

Podsumowanie

Wykorzystanie replik, które umożliwiają odtworzenie geometrii otworów i jednocześnie można je usunąć z replikowanego elementu bez niebezpieczeństwa ich zniszczenia, do pomiarów na maszynie współrzędnościowej z głowicą stykową jest obarczone dużym błędem pomiaru. Wynosi on – w zależności od użytej masy plastycznej – od 0,143 mm do nawet 0,439 mm dla mierzonego elementu o średnicy nominalnej D = 19,997 mm. Również przedziały ufności dla 95% poziomu ufności są od pięciu do nawet dziewięciu razy większe, niż przedział ufności uzyskany podczas pomiaru replikowanego elementu, i wynoszą od 0,037 mm do 0,092 mm, co świadczy o dużym rozrzucie wyników pomiarów w poszczególnych próbach.

Wartości uzyskane podczas badań w zasadzie eliminują możliwość zastosowania mas do wykonywania replik w celu weryfikacji poprawności wykonania elementów maszyn z zastosowaniem stykowych pomiarów współrzędnościowych. Główną przyczyną wydaje się stosunkowo mała twardość replik po utwardzeniu, która pozwala na odkształcenie się ich powierzchni pomimo niewielkiej wartości nacisku pomiarowego sondy TP20. Zastosowanie sondy tego typu o obniżonym nacisku pomiarowym również nie rozwiązuje problemu.

Masy plastyczne Plastiform i repliki z nich wykonane mogą być prawdopodobnie z powodzeniem wykorzystane podczas pomiarów współrzędnościowych z wykorzystaniem technik bezstykowych, a więc laserowych głowic skanujących czy skanerów 3D. Pomimo mniejszej dokładności tego typu technik pomiarowych, umożliwiają one wykonanie pomiaru jako takiego, z zastosowaniem współrzędnościowych metod pomiarowych.

LITERATURA

- Weiler W., Kowalski J. "Dopóty dzban wodę nosi: Awarie rewolwerów .357 Magnum podczas używania amunicji .38 Special". Arsenał. 1 (2006): s. 12–17.
- Fita S., Nowicki J., Ziemba J. "Mikroskopowe pomiary gwintów okrągłych z wykorzystaniem procesora QM-DATA 200 i mas plastycznych". J. Zarzycki ed. *Komputerowe wspomaganie badań naukowych* XV. Wrocław: Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego, 2008.
- Renishaw. "TP20 user's guide". Renishaw document, part number H-1000-5008-04-A. 2014. www.renishaw.com (dostęp: 12.05.2018).
- Woźniak A., Byszewski M., Jankowski M. "Setup for triggering force testing of touch probes for CNC machine tools and CMMs". *Measurement Science Review*. 13, 1 (2013): s. 29–33.
- Rivelec. "Plastiform information brochure. Rivelec" Plastiform brochure issue no. 3. 2017. www.plastiform-info.com (dostęp: 12.05.2018).