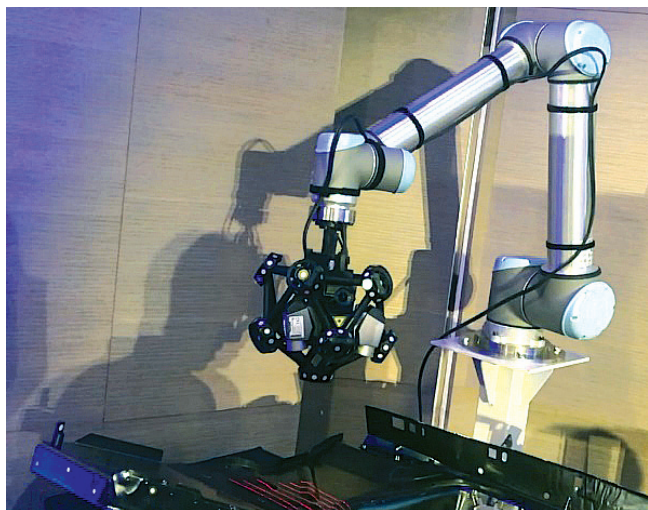


W takim ujęciu raporty z pomiarów i uzyskane dane nie są zatem liczbami i wartościami parametrów, ale powierzchniami.

Rozwijając przekonanie powstałe kilkadziesiąt lat temu przy wprowadzaniu systemów zapewnienia jakości, że najsłabszym ogniwem nowych systemów wytwarzania i oceny produktów jest człowiek, również w metrologicznej strategii Przemysłu 4.0 wpływ człowieka powinien być istotny na etapie konstruowania i urządzeń pomiarowych, ale w trakcie ich działania ma się sprowadzać do działań wspomagających. Coraz częściej producenci są świadomi deficytu fachowców, co skłania ich do poszukiwania rozwiązań alternatywnych, w tym z wykorzystaniem robotów.

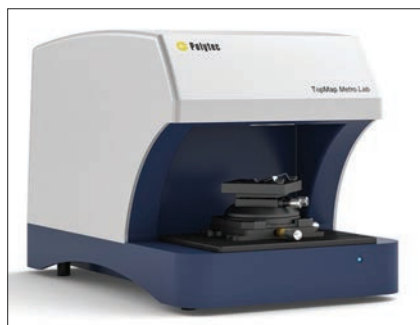
Aby jednak człowiek mógł bezpiecznie funkcjonować w takim środowisku, pojawiła się koncepcja robotów współpracujących, coraz chętniej stosowanych w metrologii długości i kąta. Realizują one zautomatyzowane czynności pomiarowe i wspierają operatora przy czynnościach wymagających wytrzymałości albo siły. Przykładowy skaner pomiarowy z robotem współpracującym przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Skaner z robotem współpracującym podczas skanowania elementu tłoczonego

Ważną cechą większości robotów współpracujących jest bardzo ułatwione ich programowanie w trybie ucącym. Polega ono na zapamiętywaniu kolejnych ręcznie ustawionych położeń robota i powtarzaniu ich (z większą prędkością) w trybie automatycznym.

Kolejnym elementem nowego ujęcia metrologii jest silny nacisk na projektowanie systemów odpornych na awarie. Konstruktor przewiduje możliwości kolizji elementów ruchomych z przedmiotem (lub innymi elementami urządzenia pomiarowego) i dąży do ich schowania – dotyczy to np. elementów optyki ruchomej przemieszczających się pod specjalną osłoną (rys. 3).



Rys. 3. Ruchome elementy optyki schowane pod górną osłoną w skanującym interferometrycznym koherencyjnym [3]

Dzięki takiemu zabezpieczeniu optyka w trakcie pomiarów i przemieszczania w dół w żadnym momencie nie uderzy w stolik ani znajdujący się na nim przedmiot. Dla elementów, których nie da się ukryć, projektowane są często wbudowane mechanizmy sprężynowe wykrywające przeciążenie przy kontakcie i wyłączające ruch podsystemów przyrządu pomiarowego.

Skala w metrologii długości i kąta

Termin „skala” w nauce i życiu codziennym bywa różnie interpretowany [4]. Jako skala (np. Celsjusza) rozumie się zbiór liczb czy wartości używanych do porównania wielkości (lub poziomów). Skala jest też szeregiem dźwięków ułożonych według stałego schematu, wyraża zakres dźwięków danego instrumentu albo głosu ludzkiego.

W geografii, astronomii, meteorologii i statystyce termin skala jest stosowany do opisu i klasyfikacji wymiaru wielkości (najczęściej długości, odległości lub pola powierzchni). Obiekt jest więc mikroskopowy, jeśli jest zbyt mały, aby go zaobserwować gołym okiem, natomiast megatrend w statystyce dotyczy zjawiska globalnego lub trwającego bardzo długi czas.

W fizyce pojęcie skali dotyczy rzędu wielkości, przy czym rozgraniczenie ma często charakter arbitralny.

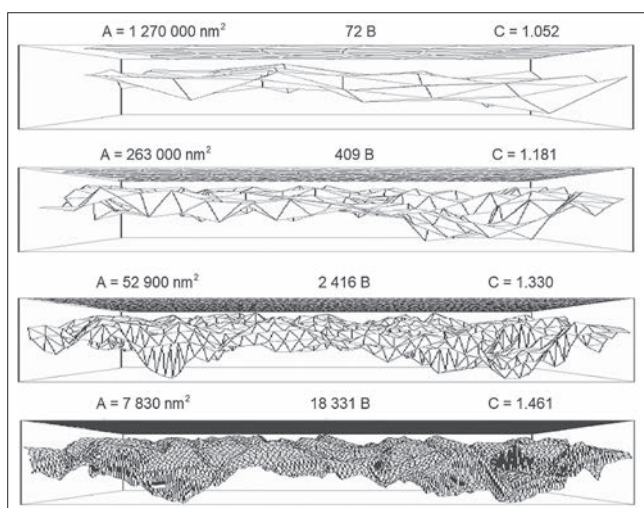
Metrologicznie skala jest traktowana jako synonim długości (mała skala = mała długość), okres sygnału z powierzchni (chropowatość – mała skala, błąd kształtu – duża skala) albo fragment sygnału częstotliwościowego (okno o pewnym zakresie, które można przemieszczać po całym uzyskanym sygnale). Metrologia długości i kąta w dużej skali (makro) odnosi się więc do pomiarów cech geometrycznych, w małej skali (nano i mikro) – do nierówności powierzchni, a w skali pośredniej (mezo) – do tego, co się otrzyma, kiedy nierówności zaczynają się przekształcać w elementy geometryczne.

Tradycyjnie do przyrządów wykorzystywanych w skali makro zaliczano współrzędnościowe m.in. maszyny pomiarowe i skanery, a w skali mikro – np. profilometry i interferometry. Skala mezo obejmowała przyrządy do pomiaru błędów kształtu. W ostatnich latach pojawiły się tendencje do rozszerzania zakresów niektórych z wymienionych przyrządów pomiarowych. Wśród współrzędnościowych maszyn pomiarowych pojawiają się konstrukcje aspirujące do skali mezo, a nawet mikro, z drugiej natomiast strony profilometry i interferometry światła białego o dużym zasięgu pozwalają na pomiar nie tylko nierówności powierzchni, lecz także cech geometrycznych w zakresie kilkudziesięciu milimetrów.

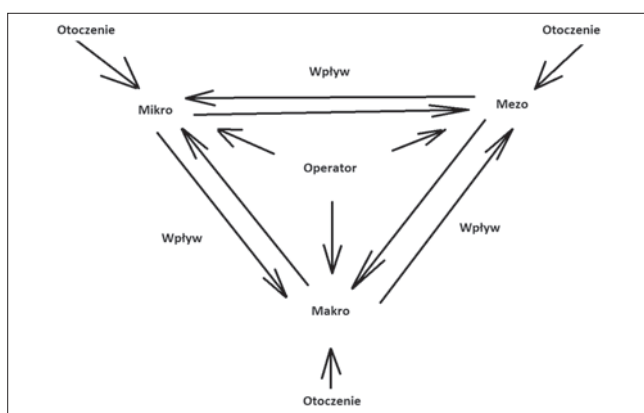
Podczas digitalizacji powierzchni w dowolnej skali obserwowany obszar jest obliczany jako funkcja od skali szeregu dopasowań płytek wirtualnych pokrywających ją w sposób mozaikowy [5]. Obszary płytek lub łatek reprezentują skalę przestrzenne obserwacji. Dopasowania są powtarzane z płytkami o coraz mniejszych obszarach, w celu wyznaczenia obserwowanych obszarów w zależności od skali przestrzennych obserwacji (rys. 4) [6].

Wymiar trójkątnych płytek lub łatek przedstawianych na powierzchni jest skalą obserwacji. Obszary nominalne, pokryte przez poszczególne dopasowania płytek, są przedstawione na górze każdego wykresu.

Pomiary w jednej skali są uwarunkowane tym, co się dzieje w pozostałych skalach. W ten sposób zachodzi pełna interakcja pomiędzy skalami, co zmusza operatora (który zresztą sam też jest czynnikiem wpływającym) do uwzględnienia takiej interakcji, ponieważ – obok warunków otoczenia – ma ona wpływ na wyniki pomiarów (rys. 5).



Rys. 4. Odzworowanie powierzchni za pomocą płytek o różnej wielkości (skali): A – powierzchnia, B – liczba płytek, C – obszar względny



Rys. 5. Interakcje zachodzące pomiędzy skalami w metrologii długości i kąta

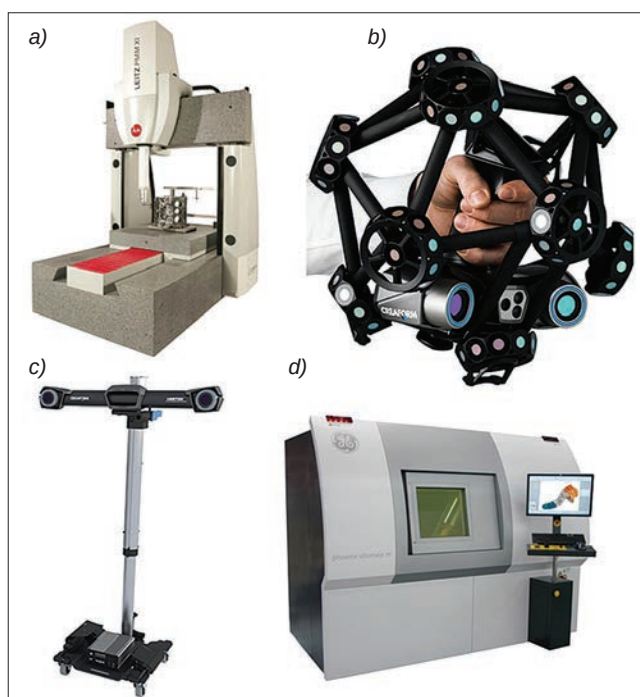
Aby uzyskać całościową informację na temat mierzonego przedmiotu, konieczna jest jego analiza w różnych skalach. W ten sposób weryfikacja metrologiczna obejmuje cechy geometryczne i kształty oraz nierówności powierzchni. To jest wyznacznikiem pojawiania się technik integrujących pomiary w różnych skalach, zarówno pod kątem sprzętu, jak i oprogramowania. Połączenie danych z różnych skal w jednym modelu pozwala m.in. na wykorzystanie tak uzyskanego zbioru danych w pracach symulacyjnych uwzględniających wszystkie aspekty mechaniki kontaktu.

Analiza w skali makro

Digitalizacja w skali makro polega na zbieraniu współrzędnych punktów pomiarowych w celu określenia kształtów geometrycznych. Mogą to być figury i bryły geometryczne albo powierzchnie swobodne.

Tradycyjnie stosowanym urządzeniem pomiarowym są w tym przypadku współrzędnościowe maszyny pomiarowe, wyposażone w końcówki stykowe i optyczne. Maszyna w wersji stykowej pozwala obliczyć maksymalne błędy dopuszczalne z zakresu ułamków mikrometrów, co jest nadal poza zakresem możliwości technik optycznych w skali makro. Wadą maszyny jest powolne zbieranie punktów i kontakt z mierzoną powierzchnią, który w pewnych sytuacjach jest niedopuszczalny.

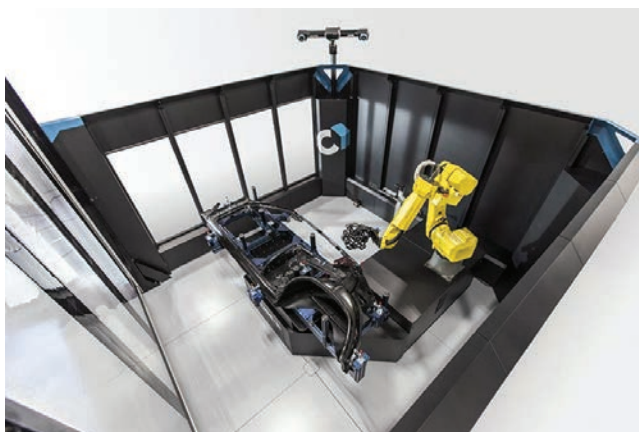
W XXI w. pojawiły się skanery optyczne. Pierwsze wykorzystywały światło strukturalne, a najnowsze są oparte na promieniowaniu pochodzącym z lasera i działają tak szybko, że użytkownik może pracować na podstawie zbiorów



Rys. 6. Przyrządy pomiarowe pracujące w skali makro: a) współrzędnościowa maszyna pomiarowa, b) głowica laserowa skanera, c) tracker do głowicy laserowej, d) tomograf komputerowy

danych wpisujących się w *big data*. Jeszcze więcej informacji dostarczają pomiary realizowane za pomocą tomografów komputerowych (CT), które pozwalają na zbieranie danych nie tylko z widocznych, ale także z niewidocznych powierzchni przedmiotu i jego wnętrza [7, 8]. Przykładowe urządzenia pracujące w skali makro pokazano na rys. 6.

Automatyzacja procesu zbierania punktów polega na zastosowaniu współrzędnościowej maszyny pomiarowej pracującej w trybie CNC z systemem załadunkowym oraz celi pomiarowej dla optycznego systemu skanującego (rys. 7). Tomografy na razie bardzo rzadko są stosowane w przemysłowych pomiarach seryjnych, ale i w takich sytuacjach przedmioty można umieszczać automatycznie na taśmie transportującej je do przestrzeni pomiarowej.



Rys. 7. Optyczny system skanujący w autonomicznej celi pomiarowej [9]

Pokazany na rysunku system wykorzystuje tracker śledzący położenie głowicy laserowej, dzięki czemu nie wymaga dodatkowych znaczników na przedmiocie czy uchwycie, a układ promieni świetlnych pozwala mierzyć jednocześnie powierzchnie pochłaniające i odbijające promieniowanie bez konieczności matowienia. Można zastosować kilka trackerów, aby zwiększyć zakres i uprościć sekwencję pomiarową.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe i skanery optyczne pracujące w układzie autonomicznym są wyposażone w układy kontroli przestrzeni pomiarowej pod kątem wykrycia w nich niepożądanych obiektów, do których zalicza się również człowiek.

Analiza w skali mikro i nano

Digitalizacja w obszarze mikro i nano opiera się na zupełnie innych przesłankach. Jej celem nie jest bowiem identyfikacja geometrii, ale uwypuklenie najistotniejszych cech nierówności powierzchni, polegające na obliczeniu elementu odniesienia i wartości parametrów lub charakterystyk funkcyjnych. W tym obszarze wyróżnienie skali ma największe zastosowanie. Sprowadza się ono do wyodrębnienia poszczególnych składowych z sygnału uzyskiwanego z powierzchni.

Występuje tu szereg technik pomiarowych uwzględniających różne właściwości fizyczne, wśród których wyróżnia się profilometrię stykową i bezstykową (np. wykorzystującą głowice konfokalne), techniki interferometryczne (w tym skaningową interferometrię koherencyjną), mikroskopię optyczną (np. różnicowania ogniskowego, konfokalną), a także mikroskopię opartą na właściwościach atomowych (skaningową mikroskopię tunelową, mikroskopię sił atomowych itp.). Niektóre z tych technik pozwalają na analizę w skali nano i mikro, inne wychodzą poza mikro i wkraczają w skalę mezo.

Przykładowe przyrządy pracujące w skali mikro i nano pokazano na rys. 8.



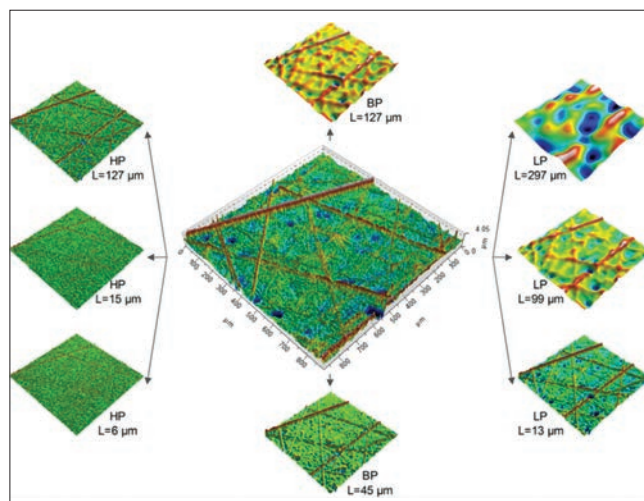
Rys. 8. Przykładowe przyrządy pomiarowe pracujące w skali mikro: a) profilometr stykowy, b) profilometr konfokalny multisensorowy, c) skaningowy interferometr koherencyjny i d) mikroskop różnicowania ogniskowego

Pracując na sygnale związanym z nierównościami, można się skupić na dużej lub małej skali, w zależności od zastosowanego pasma przenoszenia. W normach dotyczących topografii powierzchni [10] występuje filtr S, usuwający z powierzchni pierwotnej składowe poziome o małej skali, i filtr L, usuwający składowe o dużej skali. Wszystkie parametry odnoszą się więc do powierzchni o ograniczonej skali, która może być potraktowana jako powierzchnia S-F (po usunięciu kształtu) lub S-L (po usunięciu kształtu i falistości). To jest pierwszy poziom wyodrębnienia skali z sygnału.

Współczesna produkcja często wymaga znacznie więcej. Na badanej powierzchni występują nierówności, których przyczyna powstawania wiąże się z różnymi zjawiskami i procesami. Metrologia powierzchni pozwala je wyróżnić właśnie poprzez zastosowanie odpowiedniej skali. Najpowszechniejszymi technikami są tu filtracja, dyskretna transformata falkowa (DWT) i dyskretna dekompozycja modalna (DMD) [11].

Filtracja jest najprostszą metodą. Stosuje się m.in. filtry Gaussa, Gaussa odporne, falkowe, modalne i morfologiczne. Można się również posłużyć różnymi wartościami odcięcia (tzn. długościami fali, od których filtr rozpoczyna swoje działanie).

Dzięki bardzo różnym pasmom przenoszenia można wydzielić z powierzchni szereg jej składowych, co pokazano na rys. 9 [12]. Zastosowano odporny filtr Gaussa (odpowiednio: HP – górnoprzepustowy, LP – dolnoprzepustowy, BP – pasmowoprzepustowy) o wartości odcięcia (na rys. 9 oznaczonej jako L): 6, 9, 10, 13, 15, 19, 23, 29, 36, 45, 56, 74, 99, 127, 178, 297 i 446 μm .

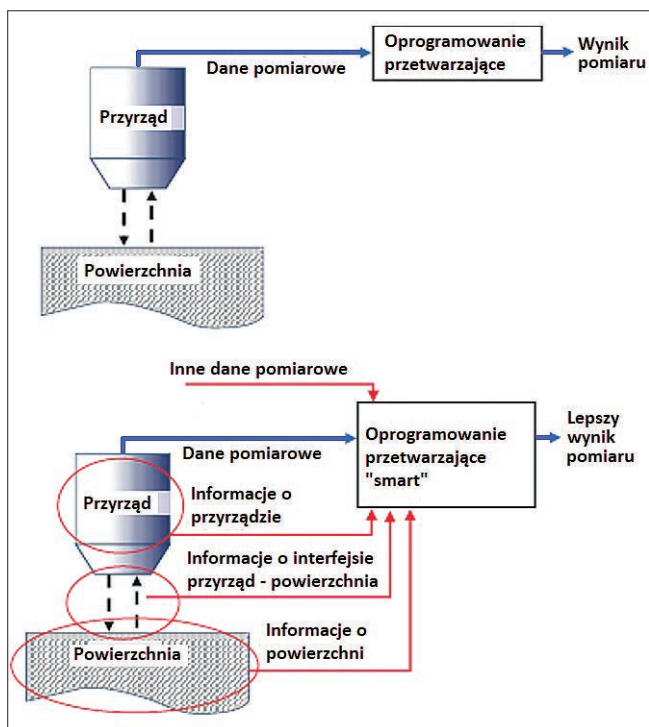


Rys. 9. Uwypuklenie różnych cech powierzchni za pomocą filtrów

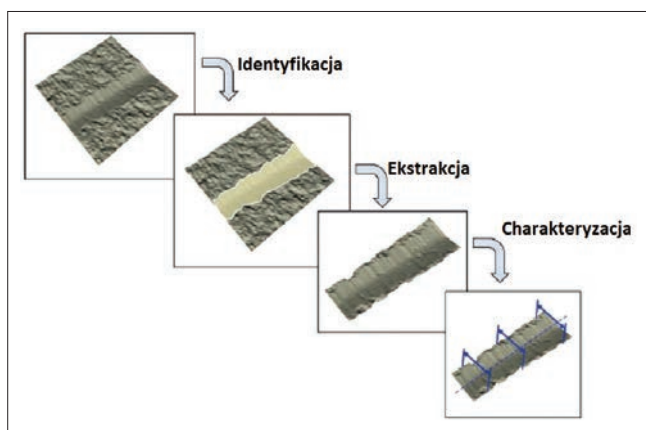
W tym przypadku analiza powierzchni posłużyła do porównania materiałów stosowanych na repliki i wiarygodności ich odwzorowania. Technika ta nadaje się również bardzo dobrze do zestawiania funkcjonalności przyrządów pomiarowych używanych do analizy nierówności powierzchni. Sygnał uzyskany z tych samych powierzchni, podzielony na poszczególne zakresy skali mikro daje znacznie lepsze przesłanki do oceny niż wartości parametrów powierzchni pokazane przez różne przyrządy. Możliwe jest porównanie konkretnych przyrządów dla danych częstotliwości sygnału uzyskiwanego z powierzchni, a w innych zakresach takie zestawienie nie jest możliwe.

Takie podejście do pomiarów nierówności powierzchni wpisuje się również w rozwijaną ostatnio strategię metrologii powierzchni bogatej w informacje (*information-rich surface metrology*), wykorzystującej nie tylko wyniki pomiaru, ale i wiedzę związaną z jego uwarunkowaniami. Pokazano to na rys. 10 [13].

Na podstawie metrologii powierzchni bogatej w informacje możliwa jest również charakteryzacja powierzchni bazująca na cechach. Można ją podzielić na trzy etapy (przykład na rys. 11) [13]: identyfikację cechy (cecha jest identyfikowana za pomocą szablonu kształtu i wielkości podanych w informacjach referencyjnych), wyodrębnienie cechy (izolacja cechy z bazowego zbioru jako niezależnego tworzywa geometrycznego) i charakteryzację cechy (opis cechy pod kątem wielkości, kształtu i parametrów).



Rys. 10. Dodatkowe źródła informacji i zmiany w przepływie informacji przy przejściu z konwencjonalnego podejścia do metrologii powierzchni bogatej w informacje



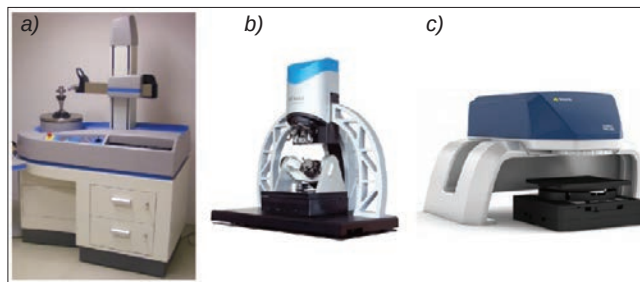
Rys. 11. Charakteryzacja powierzchni bazująca na cechach

Takie podejście do metrologii powierzchni wydaje się ciekawą tendencją z dobrymi perspektywami na przyszłość.

Analiza w skali mezo

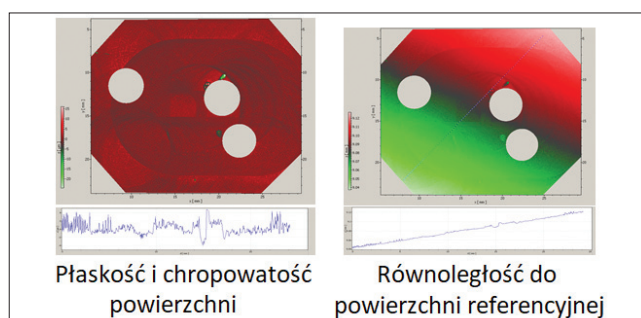
Digitalizacja w skali mezo jest połączeniem obu opisanych poprzednio. Skala mezo jest efektem wspomnianego rozwoju przyrządów pomiarowych i zwiększenia zakresów pomiarowych. Oprócz przyrządów do pomiaru odchyłek kształtu, które tradycyjnie znajdowały się w pół drogi pomiędzy metrologią związaną z cechami geometrycznymi a analizą nierówności powierzchni, w ostatnich latach pojawiły się nowe przyrządy. Z jednej strony są to konstrukcje oparte na współrzędnościowych maszynach pomiarowych, a z drugiej – na interferometrach światła białego. Obie te rozwiązania umożliwiają pomiar zarówno elementów nierówności powierzchni, jak i pewnych cech geometrycznych. Przykładowe przyrządy pracujące w skali mezo pokazano na rys. 12.

W ostatnich latach najczęstszą aplikacją w skali mezo jest jednoczesny pomiar nierówności powierzchni, odchy-



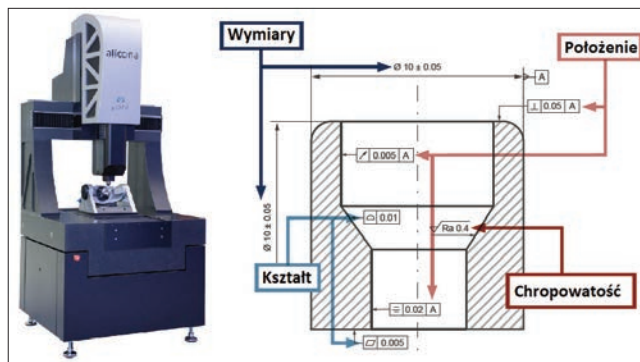
Rys. 12. Przykładowe przyrządy pomiarowe pracujące w skali mezo: a) przyrząd do pomiaru odchyłek kształtu, b) mikroskop różnicowania ogniskowego, c) skaningowy interferometr koherencyjny o dużym zakresie

łek kształtu i wybranych cech geometrycznych. Do tych celów służą najczęściej: interferometr światła białego o dużym zakresie i mikroskop różnicowania ogniskowego. Przykładowy obraz z interferometru światła białego pokazano na rys. 13.



Rys. 13. Obraz odchyłek i nierówności na powierzchni frezowanej uzyskany za pomocą interferometru światła białego o dużym zakresie [14]

Ciekawą propozycją urządzenia działającego w skali mezo jest również mikroskop różnicowania ogniskowego skonstruowany w koncepcji współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Został on przygotowany docelowo do pomiarów multisensorycznych i umożliwia przejście z trzech osi do pięciu. Wygląd maszyny i jej możliwości pomiarowe przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Mikroskop różnicowania ogniskowego w konwencji współrzędnościowej maszyny pomiarowej i jego możliwości pomiarowe

Urządzenie ma maksymalny dopuszczalny błąd długości na poziomie $0,8 + L/600$, co jest bardzo dobrym wynikiem dla takiej konstrukcji maszyny z ruchomym portalem.

Podsumowanie

Zgodnie ze strategią Przemysłu 4.0 metrologia ma się stać w pełni integralną częścią produkcji, nawet jeśli nie wszystkie systemy pomiarowe będą fizycznie wbudowane w ten proces. Zasadniczą rolę będzie odgrywać automatyzacja, przez co kontrola gotowego wyrobu stanie się zjawiskiem coraz rzadszym.

Kontrola czynna, realizowana w trakcie procesu produkcji za pomocą nowej generacji inteligentnych czujników, często zintegrowanych z liniami produkcyjnymi i urządzeniami wytwórczymi, pozwalającymi na bieżącą ingerencję sztucznej inteligencji w proces, jest wyzwaniem nie tylko dla metrologii, lecz także sensoryki i bardziej ogólnie – mechatroniki. Krokami do tego celu są automatyczna kalibracja urządzeń pomiarowych oraz prace zmierzające do uproszczenia interfejsów oprogramowania i możliwości transferu danych pomiędzy aplikacjami. Ma to kluczowe znaczenie przy tworzeniu inteligentnych fabryk zgodnie z podejściem zaczerpniętym z Przemysłu 4.0.

Metrologia długości i kąta w różnych skalach pozwala na digitalizację wykonanych elementów, dzięki czemu wpisuje się w filozofię *big data*. Coraz częściej obserwuje się sytuacje, w których wytwarzany element jest analizowany na podstawie mapy odchyłek, a jego jakość jest postrzegana holistycznie w różnych skalach. Ta tendencja niewątpliwie będzie się rozwijała w najbliższych latach.

Publikacja tego artykułu została sfinansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu 02/22/DSPB/1432.

LITERATURA

1. <http://www.dlahandlu.pl/technologie-i-wyposazenie/deloitte-polska-nie-jest-jeszcze-gotowa-na-czwarta-rewolucje-przemyslowa,68401.html>.
2. Panek M. „Analiza dokładności odtwarzania kształtów swobodnych w inżynierii odwrotnej”. Poznań: Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, 2017.
3. <https://www.polytec.com/int/surface-metrology/products/large-area-measuring-systems/tms-100-topmap-metrolab/> (dostęp: 10.07.2018).
4. Wieczorowski M., Pawlus P., Mathia T. “Scale issue in length metrology”. *Proceedings of XIII International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique*. Bielsko-Biała, 2018.
5. Brown C.A., Charles P.D. “Fractal analysis of topographic data by the patchwork method”. *Wear*. 161 (1993): s. 61–67.
6. ASME B46.1-2003, Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay.
7. Ratajczyk E. „Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. II. Tomografy i ich parametry, przykłady zastosowań”. *Mechanik*. 3 (2011): s. 226–231.
8. Gapiński B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsadna L., Dybała B., Ziolkowski G. “Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D”. *Procedia Engineering*. 69 (2014): s. 255–262.
9. <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/cube-r-automated-quality-control> (dostęp: 13.07.2018).
10. PN-EN ISO 25178-2 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, 2014.
11. LeGoïc G., Bigerelle M., Samper S., Favrelière H., Pillet M. “Multiscale roughness analysis of engineering surfaces: A comparison of methods for the investigation of functional correlations”. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 66–67 (2016): s. 437–457.
12. Marteau J., Wieczorowski M., Xia Y., Bigerelle M. “Multiscale assessment of the accuracy of surface replication”. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2, 2 (2014) 044002.
13. Senin N., Leach R. “Information-rich surface metrology”. *Commercial Micro Manufacturing International*. 11, 4 (2018): s. 26–39.
14. Wieczorowski M. „Pomiary nierówności powierzchni: metody i aplikacje”. *Materiały Surface Forum*, Spała, 2018. ■