WYKORZYSTANIE MIKROSKOPU SIŁ ATOMOWYCH W BADANIACH TOPOGRAFII POWIERZCHNI ELEMENTÓW ŁOŻYSK

Celem pracy jest zaprezentowanie możliwości zastosowania mikroskopu sił atomowych (AFM – atomic force microscope), a w szczególności mikroskopu sił atomowych NT-206, jako narzędzia wykorzystywanego w badaniach tribologicznych i mikrotribologicznych. Stosując metodę statyczną (zwaną też metodą kontaktową – contact mode), dokonano pomiarów topografii powierzchni elementów łożysk i mikrolożysk ślizgowych oraz tocznych. Przykładowe wyniki zaprezentowano w formie graficznej jako mapę topografii powierzchni, jak również pokazano profile powierzchni w wybranych przekrojach oraz obrazy badanych powierzchni w formie wykresów trójwymiarowych. Artykuł zawiera także omówienie problemów napotkanych podczas przygotowania próbek oraz przeprowadzania pomiarów topografii współpracujących powierzchni panewek, czopów łożysk ślizgowych i elementów łożysk tocznych.

Słowa kluczowe: mikroskop sił atomowych, AFM, chropowatość, topografia powierzchni.

WSTĘP

Chropowatość powierzchni jest jednym z elementów, które w istotny sposób wpływają na warunki pracy łożyska [6]. Jakość przygotowania współpracujących powierzchni, zarówno elementów tocznych, jak i bieżni w łożysku tocznym, czy panewki i czopa w łożysku ślizgowym, oddziałuje na parametry związane z procesem smarowania i zużycia [4] (np. wysokość szczeliny smarnej). Jedną z metod, pozwalającą zmierzyć wartości chropowatości powierzchni, a przez to wyznaczyć takie parametry, jak maksymalna i minimalna wartość nierówności oraz średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej R_a , czy też określić klasę chropowatości, jest wykorzystanie **mikroskopii sił atomowych.**

Mikroskop sił atomowych (AFM – *atomic force microscope*), podobnie jak **skaningowy mikroskop tunelowy** (STM – *scanning tunneling microscope*) jest typem mikroskopu, w którym skanująca sonda przemieszcza się względem próbki badanego materiału, dokonując pomiarów w kolejnych punktach odległych od siebie zależnie od pożądanej rozdzielczości. Wynalezienie obu mikroskopów w latach osiemdziesiątych XX wieku [7] okazało się przełomowym wydarzeniem w dziedzinie mikro- i nanotechnologii, gdyż pozwoliło na przeprowadzanie pomiarów właściwości powierzchni z rozdzielczościami nawet rzędu wielkości jednego atomu [8]. Przewaga mikroskopu sił atomowych nad mikroskopem tunelowym w badaniach powierzchni polega na tym, że daje on możliwość przeprowadzenia pomiarów nie tylko na materiałach przewodzących prąd elektryczny, ale również na izolatorach [14] (w mikroskopie tunelowym dokonuje się pomiaru natężenia prądu tunelowego).

Pomiary mikroskopem AFM można przeprowadzać w różnych warunkach otoczenia (pomiar mikroskopem STM wymaga wysokiej próżni), nawet w trakcie trwania reakcji chemicznych [2], a sama próbka nie wymaga specjalistycznego przygotowania. Pomiary przeprowadzone mikroskopem sił atomowych mogą dostarczyć informacji o takich wielkościach jak: chropowatość powierzchni [16], siły tarcia występujące pomiędzy ostrzem a powierzchnią próbki [13], siłach adhezji [15], lepkości [3], mikrotwardości [5]. Mikroskop AFM dokonuje również pomiarów na materiałach biologicznych [9, 15].

Wykorzystanie mikroskopu sił atomowych do badania współpracujących powierzchni eksploatowanych łożysk daje możliwość oceny wpływu zużycia powierzchni na takie parametry, jak np. chropowatość lub nośność łożyska (wpływ chropowatości na nośności opisano np. w [11]). Niektórzy producenci mikrołożysk ślizgowych, wykorzystywanych w podzespołach komputerów osobistych, stosują zabiegi takie, jak nacinanie mikrorowków na powierzchniach panewek [16] w celu osiągnięcia lepszych właściwości tribologicznych, których kształty i wymiary można także zmierzyć za pomocą mikroskopu AFM. Mikroskop sił atomowych staje się więc w tych przypadkach ważnym narzędziem pracy naukowców i projektantów, którzy w ten sposób mogą tworzyć modele, uwzględniające właściwości powierzchni oraz projektować łożyska o udoskonalonych właściwościach.

1. POMIARY TOPOGRAFII POWIERZCHNI

Pomiar chropowatości powierzchni badanej próbki za pomocą mikroskopu sił atomowych może zostać przeprowadzony różnymi sposobami (nazwy trybów pracy mikroskopu oraz jego możliwości zazwyczaj różnią się w zależności od producenta urządzenia). Najczęściej wyróżniane tryby pracy AFM to:

- statyczny, nazywany też trybem kontaktowym,
- dynamiczny, bezkontaktowy,
- przerywany.

W każdym z powyższych przypadków stosuje się sondy, które dobiera się w zależnie od rodzaju badanego materiału, typu poszukiwanych wielkości i trybu pomiaru.

W pracy omówiono krótko jedynie tryb statyczny (kontaktowy), gdyż właśnie w ten sposób zostały przeprowadzone doświadczenia, których wyniki prezentowane są w dalszej części artykułu. Zasada pomiaru trybem statycznym (kontaktowym) polega na badaniu ugięcia mikrodźwigni, zakończonej ostrzem skierowanym w stronę próbki, która, przesuwając się w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią próbki, napotyka przeszkody w postaci nierówności (rys. 1).



Rys. 1. Schemat budowy systemu skanującego mikroskopu sił atomowych NT-206 [1] *Fig. 1.* A schematic diagram of the NT-206 atomic force microscope scanning system [1]

Natrafienie mikrodźwigni na nierówność powoduje jej ugięcie. Wiązka światła lasera poruszającego się razem z mikrodźwignią, odpowiednio skupionego przez układ soczewek, odbija się od lusterka znajdującego się po jej przeciwległej stronie, a następnie pada na fotodetektor. Przesunięcie plamki światła, powstałej na fotodetektorze na skutek odbicia wiązki lasera od lusterka, odpowiada ugięciu mikrodźwigni zależnego od wysokości nierówności. Sygnał sprzężenia zwrotnego jest wówczas przesyłany do układu pozycjonującego stolik z próbką lub głowicę z sondą (bądź oba te elementy jednocześnie) tak, aby mikrodźwignia wróciła do swojego (zadanego przez operatora) początkowego ugięcia, a wartość (wzdłuż osi *Z*) przesunięcia układu (czyli odsunięcia próbki od sondy, gdy jest to "górka", bądź zmniejszenia odległości między tymi elementami, kiedy sonda natrafi na "wgłębienie") zostaje zapisana jako wartość chropowatości. Badania opisane w niniejszej pracy zostały przeprowadzone na elementach łożysk zbudowanych z różnych materiałów, przeważnie twardych, np. stali, dlatego wykorzystanie trybu kontaktowego nie będzie miało istotnego wpływu na powierzchnię próbki (dokonując pomiarów na materiałach miękkich, np. polimerach, należałoby rozważyć inną metodę pomiaru, np. trybem dynamicznym bezkontaktowym, gdyż w trybie kontaktowym sonda, przesuwając się po powierzchni materiału, zagłębiałaby się w nim, powodując powstawanie na nim zarysowań, a w niektórych przypadkach mogłoby to nawet spowodować zniszczenie samej sondy).

1.1. Wykorzystana aparatura

W badaniach topografii powierzchni elementów łożysk wykorzystano mikroskop sił atomowych NT-206, wyprodukowany przez firmę MTM z Mińska (rys. 2), znajdujący się na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni. Pomiary przeprowadzono trybem statycznym (kontaktowym). Maksymalny obszar próbki w płaszczyźnie XY, na którym może zostać przeprowadzony pomiar podczas jednego skanowania, to 32 µm × 32 µm. Liczba punktów w płaszczyźnie XY, w których na danym obszarze mają zostać zmierzone wartości chropowatości, wynosiła 256×256 . Dzięki temu otrzymano obrazy o satysfakcjonującej rozdzielczości, a czas jednego procesu skanowania wyniósł około 5 minut. Zakres pomiarowy w kierunku osi Z, a zatem maksymalna wartość chropowatości, którą można zmierzyć za pomocą mikroskopu NT-206, wynosi ±1 µm. Maksymalny błąd w kierunku Z to ±3 nm. Maksymalny rozmiar próbki, który może zostać umieszczony na stoliku mikroskopu, wynosi 30 mm na 30 mm w płaszczyźnie XY o maksymalnej wysokości 8 mm w kierunku Z.



Rys. 2. AFM NT-206 wyprodukowany przez firmę MTM z Mińska (Republika Białorusi) Fig. 2. AFM NT-206 produced by MTM from Minsk (Republic of Belarus)

Sondy wykorzystane w badaniach stanowią sylikonowe mikrodźwignie CSC38 (typ B) firmy MikroMasch [10] o długości 350 μm, szerokości 35 μm i grubości 1 μm, których współczynnik sprężystości wynosił około 1 N/m.

Obsługi mikroskopu NT-206 dokonywano za pomocą dołączonego przez producenta oprogramowania SurfaceScan, zainstalowanego na komputerze z systemem MS Windows, połączonego z mikroskopem poprzez złącze USB.

Na korpusie mikroskopu NT-206 znajduje się kamera wideo, z której obraz jest przekazywany na ekran monitora. Dodatkowo pracę ułatwiają sterowane za pomocą komputera silniki krokowe, którymi można ustawić próbkę w pożądanej pozycji w płaszczyźnie *XY*.

Kalibracja mikroskopu jest krótką czynnością i polega na skanowaniu specjalnie przygotowanego do wzorcowania elementu z nacięciami o znanej głębokości oraz szerokości i uwzględnieniu, za pomocą oprogramowania sterującego mikroskopem, ewentualnych odchyłek.

1.2. Przygotowanie próbek

Próbki wykorzystywane do pomiarów powinny być odpowiedniej wielkości tak, aby można je było umieścić na stoliku mikroskopu, dlatego często należało przycinać materiał próbek do odpowiednich rozmiarów, nie niszcząc przy tym badanej powierzchni. Ponadto często też spotykano się z sytuacją, że kształt próbki (np. duża krzywizna panewki) utrudniał lub uniemożliwiał przeprowadzenie pomiaru, gdyż nie było możliwości umieszczenia sondy w odpowiedniej pozycji oraz zbadania pożądanego obszaru (możliwość uszkodzenia sondy).

Badanie powierzchni o dużej krzywiźnie sprawiało większe trudności niż badanie płaskich próbek. Stanowi to efekt szybkiej zmiany wartości Z położenia sondy wraz ze zmianą położenia XY, w związku z czym układ dochodzi do granicy zakresu pomiarowego (w mikroskopie NT-206 w kierunku Z to $\pm 1 \ \mu$ m) i brakuje możliwości przeprowadzania przez urządzenie dalszych pomiarów.

Przykładem takim może być kulka łożyska tocznego o małej średnicy (rys. 3). Po ustawieniu próbki na stoliku należało metodą prób i błędów znaleźć jej "szczyt" (rys. 4). W celu zbadania innej części powierzchni nie było większej możliwości wykorzystania silników krokowych, tak jak ma to miejsce w przypadku płaskich próbek. Aby przesunąć próbkę względem sondy do innego obszaru, należało wyciągnąć element, obrócić go, a następnie znów umieścić w mikroskopie oraz powtórzyć procedurę poszukiwania "szczytu" tak, żeby podczas pomiarów układ nie opuścił zakresu pomiarowego. Ewentualnie można zmniejszyć obszar skanowania, czyli zmianę położenia w kierunku X i w kierunku Y, przez co w oczywisty sposób ułatwia się przeprowadzanie pomiarów próbek o dużych krzywiznach.

Stolik mikroskopu NT-206, na którym umieszcza się badane próbki, jest magnetyczny, dlatego możliwe jest stosowanie zabiegów, dzięki którym badana próbka nie przemieszcza się podczas pomiarów. Podczas opisywanych badań, wykorzystano w powyższym celu monety o właściwościach magnetycznych oraz plastelinę, na których umieszczano elementy łożysk (rys. 5).



Rys. 3. Proces skanowania powierzchni kulki łożyska tocznego przy nieodpowiednim dobraniu położenia i rozmiaru obszaru skanowania
 Fig. 3. Scanning proces of rolling bearing ball surface topography of improperly selected scanning area size and position



Obszar do zeskanowania

Rys. 4. Proces skanowania powierzchni kulki łożyska tocznego przy odpowiednim dobraniu położenia i rozmiaru obszaru skanowania

Fig. 4. Scanning proces of rolling bearing ball surface topography of properly selected scanning area size and position



Rys. 5. Przykłady zastosowania magnetycznej monety i plasteliny w celu uniknięcia przesuwania się podczas pomiarów powierzchni czopa mikrołożyska ślizgowego

Fig. 5. Examples of using plasticine and magnetic coin for mounting sample on AFM plate for sample movement elimination during scanning process

Każda z próbek przed pomiarem powinna być starannie oczyszczona, odtłuszczona i osuszona. Dokonywanie pomiarów na nieodpowiednio wyczyszczonej powierzchni prowadzi do wyników obarczonych błędami grubymi. W celu przygotowania badanych powierzchni wykorzystywano alkohol etylowy, sprężone powietrze oraz czyste tkaniny.

2. WYNIKI POMIARÓW TOPOGRAFII POWIERZCHNI Elementów Łożysk

Wyniki otrzymane za pomocą mikroskopu NT-206 zaprezentowano w postaci graficznej. Wybrane zostały przykładowe wyniki pomiarów różnych elementów łożysk. W celu wizualizacji danych wykorzystano program SurfaceXplorer, dostarczony od producenta wraz z mikroskopem, który posłużył do wygenerowania map topografii powierzchni, trójwymiarowych wykresów chropowatości oraz prezentacji profilu powierzchni przez wybrany przekrój. Dodatkowo za pomocą programu SurfaceXplorer obliczono wartości parametrów chropowatości średniej arytmetycznej R_a i kwadratowej (RMS) R_q oraz sumę maksymalnej wysokości i maksymalnej głębokości odchyłki ΔZ_{max} . Wszystkie wykresy i obliczenia dla badanych powierzchni zostały przedstawione po rzutowaniu ich na płaszczyznę.

Rysunek 6 przedstawia wyniki pomiarów topografii powierzchni wałka o średnicy 4,41 mm z mikrołożyska tocznego komputerowego wentylatora.

Na rysunku 6a) chropowatość przedstawiono w formie mapy nierówności. Wartości na osiach OX i OY wyrażone są w µm, natomiast chropowatość podana jest w nm. Prezentowane na rysunku 6 wyniki, jak już wspomniano, pomijają krzywiznę powierzchni walcowej czopa łożyska, gdyż została ona zrzutowana na płaszczyznę. Na rysunku 6b) przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości w postaci trójwymiarowego wykresu. Rysunek 6c) pokazuje profil wybranego przekroju poprzecznego zaznaczonego na rysunku 6a) jako odcinek 1-2 czyli dla Y = 16µm.



Rys. 6. Topografia powierzchni czopa mikrołożyska ślizgowego: a) mapa topografii powierzchni, b) trójwymiarowy wykres nierówności, c) profil powierzchni w wybranym przekroju 1-2

Fig. 6. Sliding micro-bearing journal surface topography: a) topography map, b) three-dimensional graph of roughess, c) surface profile in selected cross-section 1-2

Obliczona średnia chropowatość R_a dla tej powierzchni wynosi $R_a = 51,3$ nm, natomiast parametr $R_q = 67,6$ nm. Suma maksymalnej i wartości bezwzględnej minimalnej chropowatości wynosi $\Delta z_{max} = 475,9$ nm.

Rysunek 7 przedstawia wyniki pomiarów chropowatości powierzchni panewki mikrołożyska ślizgowego z 2,5" komputerowego dysku twardego Samsung HM160HI. W celu zbadania tej powierzchni panewka musiała zostać odpowiednio przecięta. Na rysunku 7a) pokazano mapę topografii powierzchni. Rysunek 7b) obrazuje wartości chropowatości zbadanej powierzchni w postaci trójwymiarowego wykresu. Odcinek 1-2 na rysunku 7a) oznacza wybrany profil przekroju poprzecznego, przedstawiony na rysunku 7c).

Średnia chropowatość tej powierzchni wynosi $R_a = 31,4$ nm, a $R_q = 38,7$ nm. Suma maksymalnej wysokości i maksymalnej głębokości $\Delta Z_{max} = 265,7$ nm. Pomimo że zbadana powierzchnia charakteryzuje się względnie małą chropowatością, to dla wartości X w pobliżu zera zauważyć można wzrost wartości Z, oznaczony na wykresie 7c) jako "zbruzdowanie". Na powierzchni badanej panewki znajdowały się wykonane podczas produkcji mikrorowki. Zmierzona powierzchnia znajduje się w pobliżu takiego mikrorowka, a owo "zbruzdowanie" materiału panewki powstało podczas jego wytwarzania. Analogicznie przedstawiono wyniki pomiarów topografii powierzchni kulki o średnicy d = 4,75 mm z używanego łożyska tocznego.



Rys. 7. Topografia powierzchni panewki mikrołożyska ślizgowego: a) mapa topografii powierzchni, b) trójwymiarowy wykres nierówności, c) profil powierzchni w wybranym przekroju 1-2



Rysunek 8a) przedstawia mapę chropowatości z zaznaczonym profilem przekroju zobrazowanym na rysunku 8c), natomiast rysunek 8b) stanowi trójwymiarowy wykres nierówności tej powierzchni.

Wartości chropowatości średniej to: $R_a = 60,1$ nm oraz $R_q = 79,5$ nm. Suma maksymalnej odchyłki dodatniej wartości bezwzględnej odchyłki ujemnej wynosi $\Delta Z_{max} = 786,6$ nm.



Rys. 8. Topografia powierzchni kulki łożyska tocznego: a) mapa topografii powierzchni, b) trójwymiarowy wykres nierówności, c) profil powierzchni w wybranym przekroju 1-2
Fig. 8. Rolling bearing ball surface topography: a) topography map, b) three-dimensional graph of roughess, c) surface profile in selected cross-section 1-2

Rysunek 9 przedstawia wyniki pomiarów chropowatości powierzchni bieżni stożkowego łożyska tocznego 30208, którą również należało do badań odpowiednio przeciąć. Na rysunku 9a) przedstawiono mapę topografii. Rysunek 9c) obrazuje profil powierzchni zaznaczony jako odcinek 1-2 na rysunku 9a). Trójwymiarowy wykres nierówności tej powierzchni pokazany jest na rysunku 9b).

Wyznaczone wartości chropowatości średnich dla zbadanej powierzchni bieżni wynoszą $R_a = 52,0$ nm i $R_q = 66,7$ nm, natomiast suma wartości maksymalnej chropowatości dodatniej i wartości bezwzględnej chropowatości ujemnej wynosi $\Delta Z_{max} = 503,5$ nm.

Pomiary, których wyniki przedstawiono powyżej, były przeprowadzone na obszarze $32 \times 32 \ \mu m$ dla każdego z badanych elementów łożysk. Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów topografii powierzchni walcowego czopa mikrołożyska ślizgowego. Krzywizna badanej powierzchni była tu na tyle duża (średnica czopa d = 2,98 mm), że nie można było dokonać pomiaru na obszarze $32 \times 32 \ \mu m$ i dlatego obszar skanowania w tym przypadku obejmuje $16 \times 16 \ \mu m$ przy zachowaniu rozdzielczości 256×256 punktów pomiarowych.

Rysunek 10a) zawiera mapę topografii badanej powierzchni. Rysunek 10c) przedstawia profil przekroju powierzchni oznaczony na rysunku 10a) jako odcinek 1-2. Rysunek 10b) stanowi trójwymiarowy wykres chropowatości powierzchni czopa.



Rys. 9. Topografia powierzchni bieżni łożyska tocznego: a) mapa topografii powierzchni, b) trójwymiarowy wykres nierówności, c) profil powierzchni w wybranym przekroju 1-2

Fig. 9. Rolling bearing race surface topography: a) topography map, b) three-dimensional graph of roughess, c) surface profile in selected cross-section 1-2



Rys. 10. Topografia powierzchni czopa mikrołożyska ślizgowego: a) mapa topografii powierzchni, b) trójwymiarowy wykres nierówności, c) profil powierzchni w wybranym przekroju 1-2

Fig. 10. Sliding micro-bearing journal surface topography: a) topography map, b) three-dimensional graph of roughess, c) surface profile in selected cross-section 1-2

Parametry chropowatości średniej wynoszą $R_a = 13,3$ nm i $R_q = 18,0$ nm, natomiast suma wartości maksymalnej chropowatości dodatniej i wartości bezwzględnej chropowatości ujemnej wynosi $\Delta Z_{max} = 169,1$ nm.

3. WNIOSKI

Przedstawione powyżej losowo wybrane wyniki pomiarów topografii powierzchni różnych elementów łożysk mają zaprezentować możliwości wykorzystania mikroskopii sił atomowych w badaniach tribologicznych. Omówiono tu jedynie wykorzystanie metody statycznej kontaktowej, która w przypadku materiałów o dużej twardości daje satysfakcjonujące rezultaty.

Przeprowadzone badania pozwoliły zauważyć szereg zalet stosowania mikroskopu AFM w badaniach tribologicznych. Są to następujące zalety:

- Mikroskop sił atomowych pozwala przeprowadzić pomiary topografii powierzchni z bardzo dużymi rozdzielczościami w standardowych warunkach otoczenia. Bardziej zaawansowane mikroskopy AFM przy zastosowaniu wysokiej próżni dają możliwość prowadzenia pomiarów w celu uzyskania, np. rozkładu atomów w cząsteczce [8], jednak w badaniach tribologicznych znacznie wygodniejszy w wykorzystaniu i dający rezultaty o wystarczającej rozdzielczości jest opisany w pracy mikroskop NT-206.
- Przygotowanie próbek, poza obcięciem ich do odpowiednich rozmiarów, nie wymagało specjalistycznych zabiegów. Badany materiał należało dokładnie wyczyścić i osuszyć.
- Mikroskop AFM nie wymaga wyjątkowych warunków otoczenia oraz znacznej ilości miejsca (mikroskop NT-206 wykorzystany w badaniach ustawiony był w zwykłym pomieszczeniu biurowym, zajmując niewielką część standardowego stolika komputerowego).
- Kalibracja urządzenia jest prostą czynnością, którą można przeprowadzić w krótkim czasie, co ułatwia kontrolę i sprawdzanie dokładności otrzymywanych wyników.

Podczas badań napotkano również kilka problemów związanych z przeprowadzaniem pomiarów mikroskopem sił atomowych. Zaobserwowano następujące wady mikroskopu AFM:

- konieczność przygotowania próbek o ograniczonym rozmiarze, co wiąże się z przecinaniem większych elementów, które przy nieostrożnych zabiegach może spowodować zniszczenie powierzchni, będącej obiektem pomiarów,
- obszary skanowania są niewielkie, a pomiar czasochłonny (dokonywany punkt po punkcie),

- mikroskop NT-206 pracuje, jak już wspomniano, w standardowych warunkach otoczenia, a próbka podczas skanowania nie jest w żaden sposób izolowana, więc również zanieczyszczenia znajdujące się w powietrzu atmosferycznym mogą zaburzać pomiar. Ponadto niedokładne oczyszczenie mierzonej powierzchni uniemożliwia dokonanie pomiarów; na rysunku 11a) przedstawiony jest wynik pomiaru topografii powierzchni, na której prawdopodobnie znajdowało się mikrozanieczyszczenie (np. pyłek kurzu),
- zakres pomiarowy mikroskopu sił atomowych NT-206 w osi Z wynosi 2 μm (w mikroskopie tym sonda jest nieruchoma, a stolik przesuwa się podczas badania, a do zmiany położenia stolika zamocowanego na specjalnej "piezorurce" wykorzystane są piezoelementy, dzięki czemu otrzymuje się bardzo dużą dokładność lecz ograniczony zakres). Wiąże się z tym ograniczenie, które nie pozwala badać elementów o zbyt dużej chropowatości (rys. 11b)), ponadto badanie powierzchni, o dużej krzywiźnie (rys. 11c)) bądź ustawionej nierównolegle do płaszczyzny stolika może również sprawiać trudności,
- po zmianie położenia próbki na stoliku (np. wyjęcie w celu ponownego oczyszczenia) praktycznie bardzo trudne ustawienie jest próbki w taki sposób, aby przeprowadzić badanie dokładnie w tym samym obszarze,
- w niektórych pomiarach, pomimo że chropowatość powierzchni nie wykraczała poza zakres pomiarowy, otrzymywano jednak obrazy z błędami, w których rezultacie wykresy wyglądały tak jak na rysunku 11b); działo się tak zazwyczaj przy badaniu próbek o bardzo dużych zmianach chropowatości (wąskie, wysokie piki). W dalszych pracach zaplanowano głębsze zbadanie tego problemu i próbę jego rozwiązania poprzez stosowanie różnych zabiegów, jak np. zmiana typu sondy, zmiana szybkości skanowania, zmiana rozdzielczości lub innych parametrów,
- podczas przeprowadzania pomiarów należy zwracać uwagę na to, aby w pomieszczeniu, w którym znajduje się urządzenie, zbyt wiele czynników nie powodowało zaburzeń, np. ruch powietrza i drgania powodowane ruchem znajdujących się w pomieszczeniu osób (w celu tłumienia drgań docierających do korpusu mikroskopu zastosowano amortyzowaną podstawkę),
- mikrodźwignie zakończone są końcówkami (ostrzami), im ostrzejsza jest końcówka na końcu mikrodźwigni, tym rozdzielczość pomiarów jest większa; podczas pracy w trybie kontaktowym końcówka mikrodźwigni ulega zużyciu, przez co dokładność pomiarów się zmniejsza (wymiana mikrodźwigni w mikroskopie NT-206 jest prostą i szybką czynnością).





Fig. 11. Some measurements results and spurious erros caued by: a) speck, b) contamination and large values of roughness, c) investigated surface was out of microscope Z range

Zaobserwowane podczas pomiarów mikroskopem AFM NT-206 wady i zalety pozwalają na zdobycie doświadczenia, które w przyszłości zostanie wykorzystane podczas prowadzenia badań związanych z wpływem chropowatości powierzchni na właściwości tribologiczne łożysk. Dostarczone wraz z mikroskopem oprogramowanie w dużym stopniu ułatwia analizę otrzymanych wyników.

Oprócz przedstawionych powyżej wykresów, wygenerowanych za pomocą programu SurfaceXplorer, istnieje możliwość wyznaczania innych istotnych wielkości.

Przykładowo rysunek 12a) przedstawia funkcję rozkładu wysokości chropowatości dla obszaru powierzchni czopa mikrołożyska ślizgowego, którego wyniki pomiarów topografii powierzchni przedstawione są na rysunkach 6a), 6b) i 6c). Na rysunku 12b) przedstawiono rozkład, który mówi o orientacji nierówności (wzniesień i zagłębień) w stosunku do normalnej (prostopadłej do linii średniej) do badanej powierzchni tej samej próbki. Rysunek 12c) przedstawia rozkład kąta nachylenia nierówności w stosunku do normalnej do powierzchni owej próbki.

Wartość wysokości chropowatości oraz jej ułożenie mogą mieć wpływ na właściwości tribologiczne łożyska [6,17], dlatego informacje takie, jak w przykładach przedstawionych powyżej, mogą mieć istotne znaczenie przy projektowaniu łożysk i tworzeniu dla nich poprawnych matematycznych modeli teorii smarowania. Uwzględnienie chropowatości w równaniu Reynoldsa metodami stochastycznymi przedstawiono np. w pracy [12].



Rys. 12. Rozkłady niektórych wielkości określających właściwości chropowatości powierzchni: a) rozkład wysokości chropowatości i krzywa względem powierzchni nośnej; b) orientacja w stosunku do normalnej do powierzchni; maksimum dla 290°±2°; c) rozkład kąta nachylenia do normalnej; wartość średnia to 1,49°±0,50°, maksimum dla 1,50°±0,50°

Fig. 12. Distrubution functions of: a) heigth with the bearing ratio curve; b) orentation of normal; most frequent $290^{\circ}\pm 2^{\circ}$; c) tilt angles; average $1,49^{\circ}\pm 0,50^{\circ}$; most frequent $290^{\circ}\pm 2^{\circ}$

PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było zaprezentowanie możliwości zastosowania mikroskopii sił atomowych w badaniach tribologicznych. Przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości powierzchni, przeprowadzone na mikroskopie sił atomowych NT-206, znajdującym się na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni. Badaniom poddano elementy łożysk oraz mikrołożysk ślizgowych i tocznych. Wykorzystano metodę statyczną (kontaktową). Za pomocą dołączonego przez producenta mikroskopu oprogramowania przedstawiono wyniki pomiarów w różnych formach. Dodatkowo zaprezentowano możliwość wykorzystania tego oprogramowania w celu wyznaczania takich wartości, jak np. wartość średniej chropowatości czy różne parametry ułożenia nierówności. Opisano wady, zalety oraz problemy napotkane podczas prowadzenia pomiarów topografii powierzchni przy użyciu mikroskopu AFM. Przeprowadzone doświadczenia stały się dla autora wstępem do prowadzenia dalszych badań tribologicznych z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych i mikroskopu NT-206. Kolejnym etapem w pracy autora będzie wykorzystanie innych trybów pracy (bezkontaktowych) do pomiarów topografii powierzchni. W przyszłości planowane jest wykorzystanie mikroskopu NT-206 do pomiarów takich wielkości, jak: lepkość smarów (dzięki specjalnie przygotowanemu przez producenta elementowi do pomiaru lepkości), siły adhezji, mikrotwardość, siły tarcia występujące między ostrzem mikrodźwigni a powierzchnią próbki (czterosegmentowy fotodetektor pozwala na wykorzystanie mikroskopu NT-206 jako FFM (*friction force microscope*).

LITERATURA

- 1. *Atomic force microscope NT-206: Operating manual.* Minsk: A.V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer, 2010.
- Beaulieu L.Y., Rutenberg A.D., Dahn J.R., Measuring Thickness Changes in Thin Films Due to Chemical Reaction by Monitoring the Surface Roughness with In Situ Atomic Force Microscopy, Microsc. & Microanal., 8, 2002, 422–428.
- 3. Biswas S., Hirtz M., Lenhert S., Fuchs H., *Measurement of DPN-Ink Viscosity using an AFM Cantilever*, Nanotech, 2010, Vol. 2, Chapter 4: NanoFab: Manufacture, Instrumentation, 231–234.
- 4. Chen H., Chen D., Wang J., Li Y., *Calculated journal bearing lubrication of non-Newtonian medium with surface roughness effects*, Front. Mech. Eng., China, 2006, 3, 270–275.
- Chowdhury S., Laugier M.T., The use of non-contact AFM with nanoindentation techniques for measuring mechanical properties of carbon nitride thin films, Applied Surface Science, 2004, Vol. 233, Issues 1-4, 219–226.
- 6. Dymarski C., Litwin W., *Wpływ chropowatości na pracę hydrodynamicznego łożyska smarowanego wodą z polimerową panwią*, Tribologia, 2007, nr 1, 37–48.
- Goldstein H., *Invention: a beautiful noise.*, Journal IEEE Spectrum, IEEE Press Piscataway, USA 2004, Vol. 41, Issue 5, 50–52.
- 8. Gross L., Mohn F., Moll N., Liljeroth P., Meyer G., *The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy*, Science 28, 2009, Vol. 325, No. 5944, 1110–1114.
- 9. Hori K., Takahashi T., Okada T., *The measurement of exonuclease activities by atomic force microscopy*, European Biophysics Journal, 1997, Vol. 27, No. 1, 63–68.
- 10. http://www.spmtips.com.
- 11. Krause H., Wierzcholski K., The influence of sleeve surface roughness on the load-carrying capacity of journal bearings in a magnetic field, Wear, 1982, Vol. 80, Issue 1, 59–70.
- 12. Kung K.Y., Hsu C.H., Chen P.C., Lin J.R., *Effects of Surface Roughness on Dynamic Squeeze Behavior of Partial Journal Bearings with Finite Width.*, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, 2004, No. 25, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA.
- 13. Linmao Q., Fang T., Xudong X., *Tribological Properties of Self-Assembled Monolayers and Their Substrates Under Various Humid Environments*, Tribology Letters, 2003, Vol. 15, No. 3, 169–176.
- 14. Pethica J.B., Edgell R., The Insulator Uncovered., Nature, 2001, Vol. 414, No. 6859, 27–29.

- 15. Sirghi L., Ponti J., Broggi F., Rossi F., *Probing elasticity and adhesion of live cells by atomic force microscopy indentation*, European Biophysics Journal, 2008, Vol. 37, fascicolo 6, 935–945.
- 16. Wierzcholski K., Miszczak A., Khudoley A., *Measurement of Unused Microbearing Grooved Surfaces for Computer Ventilator.*, Tribologia, 2011, nr 3 (237), 143–153.
- 17. Zhang W.M., Meng G., Peng Z.K., Random surface roughness effect on slider microbearing lubrication., Micro & Nano Letters, 2010, Vol. 5, Issue 5, 347–350.

APPLICATION OF AN ATOMIC FORCE MICROSCOPE IN TOPOGRAPHY MEASUREMENTS OF BEARINGS SURFACES

Summary

The aim of this work is to present possibilities of using atomic force microscope (AFM), specially Atomic Force Microscope NT-206, as a useful tool for conducting tribological and micro-tribological researches. Using static (contact) mode, measurements of rolling and sliding bearings and micro-bearings surfaces topography has been made. Examples of obtained data were presented as a topography maps, profile graphs through selected cross-sections and 3D diagrams of surface roughness. This paper also describes some problems met during samples preparation and proceeding of measurements of bearings surfaces topography.

Keywords: atomic force microscope, AFM, surface roughness, surface topography.