

MONIKA KWACZ¹⁾, SERGEI CHIZHIK²⁾, ZYGMUNT RYMUZA^{3), *)}, ZBIGNIEW KUSZNIEREWICZ³⁾

Badanie właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej polimerowych elementów miniaturowego łożyska ślizgowego przy użyciu mikroskopu sił atomowych

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE LAYER OF POLYMERIC ELEMENTS OF MINIATURE SLIDE BEARING USING ATOMIC FORCE MICROSCOPE

Summary —Theoretical fundamentals of atomic force microscopy (AFM) have been presented in details. The course of force-distance curve being the base of measurements of modulus of elasticity of material surface layer, obtained using AFM method, has been analyzed (Figs. 1 and 2). The own modification of AFM method (dynamic force spectroscopy variant) was characterized. It bases on putting the testing probe in resonant vibration and further vibrating probe approach to the investigated sample surface (Fig. 3). Amplitude-distance curve (Fig. 4) consists here the analyzed function. The method described has been used to investigate the dependence of modulus of elasticity (E) on the depth of probe indentation, for various polymeric materials (ABS terpolymer, polyamides, polycarbonate, polystyrene or polyacetal) (Fig. 6). It was found that E reaches maximal value on a free surface (without a load, point indentation depth about 0 nm) independently on the type of polymer. Polycarbonate and polyacetal containing 20 wt. % of polytetrafluoroethylene showed the highest values of a modulus from all the polymers investigated. The results obtained show the necessity of taking E variability into account in calculations of friction or mechanically deformed mating surfaces. **Key words:** atomic force microscopy, resonant operating mode, polymer surface layer, modulus of elasticity.

Problematyka badania właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej polimerów pojawiła się podczas realizacji projektu badawczego „Minimalizacja strat energetycznych w fazie rozruchu polimerowych mikrowęzłów tarcia” prowadzonego w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. Wymieniona w tytule projektu faza rozruchu stanowi przejście od tarcia statycznego do kinetycznego i dotyczy tu miniaturowych łożysk ślizgowych o czopie i panewce polimerowej. W opracowanym modelu styku tarcowego w miniaturowym łożysku ślizgowym konieczne było wykorzystanie informacji o module sprężystości bardzo cienkiej warstwy wierzchniej polimeru, z którego wykonano mikroelement trący łożyska. Do tego celu postanowi-

liśmy wykorzystać m.in. mikroskop sił atomowych (AFM).

Badania warstwy wierzchniej polimeru mają istotne znaczenie, zwłaszcza w przypadku polimerów poddawanych obróbce powierzchniowej, np. radiacyjnej lub płomieniowej [1—3]. Właściwości warstwy wierzchniej odgrywają ważną rolę w procesach tribologicznych i adhezyjnych [1, 4—8]. Wspomniany mikroskop sił atomowych jest jednym z nowoczesnych, skutecznych narzędzi do badania m.in. właściwości mechanicznych, w szczególności warstwy wierzchniej polimerów w skali nanometrycznej [1, 9, 10].

OPIS KRZYWEJ SIŁA-ODLEGŁOŚĆ

Pomiary modułu sprężystości powierzchniowych warstw materiałów metodą AFM polegają na rejestracji krzywej siła-odległość [1]. Z przebiegu tej krzywej określa się siłę normalną, z jaką skanujące ostrze sondy pomiarowej oddziałuje na badaną powierzchnię w procesie skanowania. Ponadto krzywa pozwala na określenie wartości siły oddziaływań powierzchniowych (siły ad-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Zakład Mechaniki Stosowanej, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa.

²⁾ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 15 P. Brovka Street, 220072 Minsk, Belarus.

³⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa.

^{*)} e-mail: z.rymuza@mchtr.pw.edu.pl

hezji), grubości warstwy smarnej, a także lokalnych zmian właściwości sprężystych warstwy wierzchniej badanego polimeru.

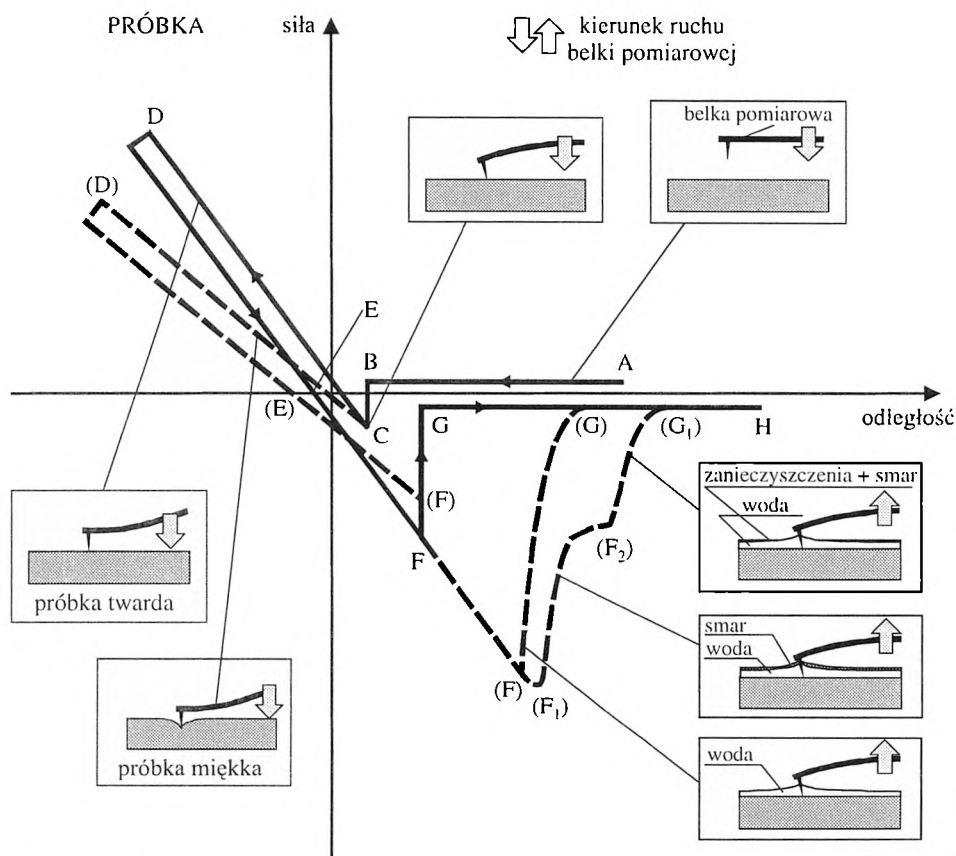
Krzywe siła–odległość otrzymywane doświadczalnie są dość złożone i powinny być analizowane w odniesieniu do konkretnej próbki. Dlatego też w niniejszej pracy przedstawimy interpretację poszczególnych fragmentów krzywej opisującej zależność siły oddziaływania pomiędzy ostrzem sondy skanującej a powierzchnią próbki w funkcji odległości ostrza sondy od tej powierzchni (rys. 1).

W celu prawidłowej rejestracji siły oddziaływania podczas zbliżania oraz podczas oddalania ostrza pomiarowego od badanej powierzchni czujnik pionowego położenia sondy i elementy optyczne systemu detekcji powinny być starannie wykalibrowane i prawidłowo ustawione.

Odcinek A-B. Początkowo urządzenie skanujące jest całkowicie odsunięte od powierzchni próbki. Belka pomiarowa, na której końcu zamocowano sferyczne ostrze,

nie ugina się. Podczas zbliżania sondy do powierzchni belka pozostaje nieugięta dopóki odległość pomiędzy ostrzem a próbką nie osiągnie takiej wartości, w której zaczynają działać przyciągające siły Van der Waalsa (punkt B). Na odcinku A-B krzywa siła–odległość nie zawiera żadnej ważnej informacji.

Odcinek B-C. W punkcie B belka pomiarowa zaczyna ugiąć się w kierunku do powierzchni próbki. Dalsze zbliżanie sondy do powierzchni powoduje wzrost wartości kąta ugięcia belki. W punkcie C ostrze sondy dotyka powierzchni próbki, a wartość kąta ugięcia belki pomiarowej jest maksymalna. W środowisku powietrza, oprócz siły Van der Waalsa i sił elektrostatycznych na ostrzu, dodatkowy wpływ na oddziaływanie ostrza i powierzchni próbki ma składowa kapilarna wynikająca z obecności zaabsorbowanej warstwy wody z wilgoci (a także występowania zanieczyszczeń lub smaru). W tym przypadku zachodzi szybsze ugięcie belki w kierunku do próbki, czyli tzw. skok do kontaktu (*jump to contact*).



Rys. 1. Zależność siły oddziaływania pomiędzy ostrzem sondy skanującej AFM a powierzchnią próbki w funkcji odległości ostrza sondy od powierzchni; linia ciągła — krzywa uzyskana w warunkach zmniejszonego ciśnienia (próżnia), linie przerywane — krzywe uzyskane w przypadku zbliżania bądź oddalania ostrza od powierzchni próbki w atmosferze powietrza w warunkach zaabsorbowanej wody (wilgoci) i/lub smaru (bądź innych zanieczyszczeń) na powierzchni próbki. Dalsze objaśnienia w tekście Fig. 1. Dependence of a power of interaction between AFM scanning probe point and sample surface as a function of the distance between the probe point and a surface. Full line — the curve obtained under decreased pressure (vacuum), dashed lines — curves obtained at bringing the point nearer to the sample surface or moving it away, at air atmosphere with absorbed water (moisture) and/or lubricant (or other impurities) on the sample surface. Further explanations in the text

Odcinek C-D. Na odcinku tym następuje dalsze zbliżanie sondy do powierzchni próbki, czemu towarzyszy przywarcie ostrza do powierzchni i prawie liniowy wzrost ugięcia belki w kierunku przeciwnym niż na odcinku B-C (w kierunku od próbki). Na podstawie przebiegu odcinka C-D można określić moduł sprężystości pary „sonda-powierzchnia”. W przypadku małej sztywności belki pomiarowej (np. w odniesieniu do sond pracujących w kontaktowym trybie pracy skanowania) nachylenie krzywej siła-odległość na odcinku C-D odpowiada wartości modułu sprężystości samej belki pomiarowej. Natomiast gdy sztywność belki jest duża, to przebieg tego odcinka krzywej jest nieliniowy i można wówczas zbadać sprężyste właściwości powierzchni próbki. Zmiany kąta nachylenia tego odcinka krzywej wskazują na zmienną reakcję powierzchni próbki w odniesieniu do różnych sił przykładanych podczas wciskania sferycznej sondy.

Odcinek D-E. Od punktu D następuje oddalanie sondy od powierzchni próbki. W przypadku braku występowania histerezy urządzenia skanującego odcinek D-E pokrywa się z odcinkiem C-D. Jeśli oba te odcinki są proste i równoległe do siebie to nie wnoszą żadnej dodatkowej informacji, natomiast gdy są one nierównoległe, wówczas różnica odległości pomiędzy nimi daje możliwość oceny plastycznej albo lepkosprężystej deformacji próbki.

Odcinek E-F. Punkt E odpowiada położeniu belki w odległości wynikającej ze sprężystego powrotu powierzchni próbki do stanu przed obciążaniem jej ostrzem sondy. Belka nie jest więc ugięta. W miarę zbliżania się do punktu F, czyli dalszego oddalania sondy od powierzchni, belka zaczyna się ugiąć w kierunku do próbki, ponieważ na ostrze działa siła przyciągania lub adhezji. Na przebieg odcinka E-F wpływają osadzone na powierzchni warstwy zaabsorbowane. W przypadku próbki znajdującej się w warunkach zmniejszonego ciśnienia („próżni”) na ostrze sondy działają siły Van der Waalsa i, ewentualnie, siły elektrostatyczne. Jeśli jednak próbka znajduje się w atmosferze powietrza, to oprócz wymienionych sił oddziałuje również dość duża siła kapilarna wynikająca z zaabsorbowanej warstwy wody (z wilgoci), smaru lub zanieczyszczeń. Grubość przypowierzchniowej zaabsorbowanej warstwy wpływa na długość odcinka E-F, a jego nachylenie różniące się od nachylenia odcinka odpowiadającego reakcji twardej próbki wskazuje na podnoszenie się warstw zaabsorbowanych w ślad za oddalającą się sondą.

Odcinek F-G. Kiedy sprężyste oddziaływanie belki pomiarowej przekracza przyciągającą siłę pochodzącą od powierzchni próbki i znajdujących się na niej zaabsorbowanych warstw, sonda odrywa się od próbki; ma to miejsce w punkcie F zwanym „punktem oderwania”. Siła oddziaływania w punkcie F jest równa maksymalnej sile adhezji pomiędzy sondą a próbką. Siła ta dostarcza najistotniejszej informacji w analizie adhezji po-

wierzchniowych warstw materiałów. Jeśli warstwę wilgoci dodatkowo pokryje się warstwą smaru (lub zanieczyszczeń), to obserwuje się kilka punktów oderwania (punkty F_1 i F_2 na rys. 1), których położenie zależy od lepkości i grubości tych warstw. Przejście pomiędzy odcinkami E-F i F-G niekoniecznie jest ostrym skokiem. Jeśli zaabsorbowana warstwa jest dostatecznie lepka, to sonda może odchodzić od powierzchni stopniowo, a przejście między E-F i F-G staje się wtedy łagodne, tzn. krzywa jest zaokrąglona.

Odcinek G-H. Począwszy od punktu G sonda nie oddziałuje już z powierzchnią próbki, a belka pomiarowa znowu nie jest ugięta. Podobnie jak na odcinku A-B (początkowe zbliżenie sondy), dalsze oddalanie ostrza od powierzchni (odcinek G-H) nie wnosi żadnej nowej informacji.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do badań użyto następujących materiałów polimerowych:

- kopolimer akrylonitryl/butadien/styren (ABS) „Cyclocac” firmy General Electric Plastics;
- poliamid 11 (PA 11) „Rilsan” firmy Elf Stochem;
- poliamid 66 (PA 66) „Ultramid A3K” firmy BASF AG;
- polistyren (PS) wysokoudarowy modyfikowany kauczukiem butadienowym „Polistyren KM”, producent Zakłady Chemiczne Oświęcim;
- poliwęglan (PC) „Makrolon” firmy Bayer AG;
- poliacetal (POM) + 20 % mas. politetrafluoroetylen (PTFE) „Delrin AF”, producent DuPont Deutschland GmbH.

Przedmiotem badań były wykonane z wymienionych tworzyw elementy miniaturowego łożyska ślizgowego (o średnicy nominalnej otworu łożyskowego wynoszącej 3,5 mm) na powierzchniach roboczych (trących).

Przyrządy pomiarowe

Do badań wykorzystano mikroskop sił atomowych zbudowany w Instytucie Metalopolimernych Sistem w Homlu (Białoruś).

W celu przeprowadzenia obliczeń modułu sprężystości badanych przez nas materiałów polimerowych konieczna jest znajomość wartości promienia zaokrąglenia ostrza pomiarowego sondy skanującej (R). Promień R określono w wyniku skanowania końca ostrza za pomocą siatki („szczotki”) kalibrującej TGT1 firmy NT-MDT (Rosja).

Stosowano belki (dźwignie) pomiarowe krzemowe NSC11-A produkcji NT-MDT o następującej charakterystyce: ostrze o promieniu $R = 10$ nm, sztywność belki — 3 N/m, częstotliwość rezonansowa — 65 kHz.

Metodyka pomiaru modułu sprężystości warstw powierzchniowych materiałów polimerowych

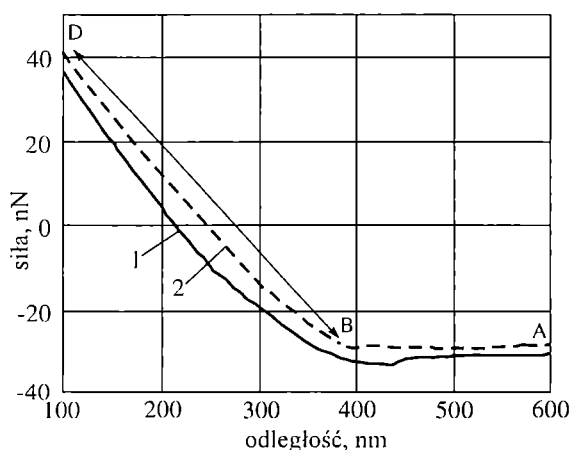
Normalizacja wartości funkcji siła-odległość

Aby znormalizować wartość funkcji siła-odległość przeprowadzono kalibrację osi odległości i osi siły. Kalibracja osi zbliżenia odpowiada kalibracji osi Z skanera, czyli urządzenia wprowadzającego sondę w ruch. Wzdłuż osi siły odkładano odpowiednią wartość ugięcia belki (Z_{defl}), którą następnie mnożono przez współczynnik kalibracji (K_1) w celu uzyskania wymiaru ugięcia w nm. Współczynnik K_1 stanowi wielkość charakteryzującą każdy indywidualny przyrząd AFM. Bezwzględna wartość siły na danym odcinku krzywej siła-odległość, w skład której to siły mogą wchodzić siła przyciągania sondy, kontaktowa siła adhezji i siła nacisku kontaktowego ostrza sondy określano wykorzystując znaną wartość sztywności belki pomiarowej (k) według wzoru:

$$F = K_1 k Z_{defl} \quad (1)$$

Sposób prowadzenia pomiaru

Piezoskaner z przymocowaną belką sondy pomiarowej zbliżano do powierzchni badanej próbki. W pewnej małej odległości od tej powierzchni ugięcie końca belki sondy przyjmowano za miarę siły oddziaływania pomiędzy ostrzem sondy a powierzchnią badanego materiału polimerowego. Kierunek ugięcia belki odpowiadał charakterowi oddziaływań kontaktowych. Początkowo obserwowano ugięcie w kierunku do powierzchni pod



Rys. 2. Odcinek krzywej siła-odległość materiału wysokoelastycznego: 1 — krzywa oddalania ostrza sondy, 2 — krzywa zbliżania ostrza sondy, \leftrightarrow — wybrany odcinek do analizy właściwości sprężystych materiału; symbole literowe odpowiadają symbolom na rys. 1

Fig. 2. Segment of the force-distance curve of high-flexible material: 1 — curve of pulling the probe point away, 2 — curve of probe point approach, \leftrightarrow — segment chosen for analysis of material elastic properties. Letter symbols correspond with those in Fig. 1

wplywem powierzchniowych sił przyciągania, a następnie od powierzchni pod wpływem oddziaływań sprężystych materiału próbki. Punkt przegięcia przyjmowano za punkt zetknięcia ostrza z powierzchnią.

Podczas zbliżania rejestrowano dwie wartości: pierwsza to wartość ugięcia belki (mierzona jako różnica położenia obu końców belki pomiarowej), a druga to położenie piezoskanera, w którym zamocowano belkę pomiarową. Do dalszych badań wybierano tę część krzywej siła-odległość, która opisuje sprężystą reakcję materiału próbki (odcinek C-D na rys. 1). Rysunek 2 przedstawia wybór odcinka krzywej do analizy materiału polimerowego.

Teoretyczne obliczanie modułu sprężystości

W celu obliczenia modułu sprężystości (E) warstwy wierzchniej materiału próbki rozpatrywano równowagę sił podczas wprowadzania w materiał próbki ostrza sondy. Równowaga ta występuje pomiędzy siłą sprężystego ugięcia belki pomiarowej i siłą sprężystej deformacji próbki. Równanie równowagi ma następującą postać [1]:

$$k \cdot Z_{defl} = P(\delta) \quad (2)$$

gdzie: $P(\delta)$ — funkcja oddziaływań sprężystych, $\delta = Z_{pos} - Z_{defl}$ — głębokość wejścia ostrza w materiał, Z_{pos} — położenie piezoskanera.

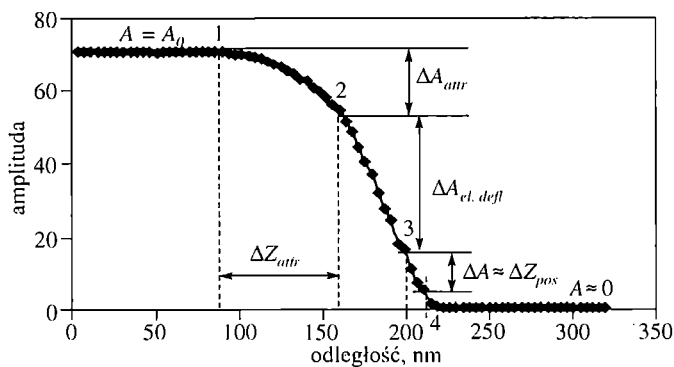
Deformację materiału sondą mikroskopu sił atomowych dobrze opisuje teoria Hertza. Na podstawie tej teorii siłę sprężystej deformacji w przypadku kontaktu sferycznego można wyrazić następująco:

$$P(\delta) = \frac{4}{3} ER^{1/2} \delta^{3/2} \quad (3)$$

Rysunek 3 przedstawia porównanie wyników teoretycznych i doświadczalnych dotyczących zależności deformacji materiału kauczukowego (głębokości wejścia ostrza sondy w materiał) od przyłożonego obciążenia w zakresie 0—40 nN, przy czym maksymalna głębokość wejścia w materiał kauczukowy wynosiła ok. 100 nm. Stwierdziliśmy, że podczas wchodzenia ostrza do połowy maksymalnej głębokości przebieg krzywej doświadczalnej pokrywa się z przebiegiem krzywej opisywanej teorią Hertza w przypadku kontaktu kula-płaszczyzna, natomiast gdy głębokości są większe, odpowiada on wartościom uzyskiwanym w odniesieniu do kontaktu stożek-płaszczyzna. Być może ta zmiana charakteru dopasowania wiąże się z właściwościami ostrza sondy, zwłaszcza z jej kształtem.

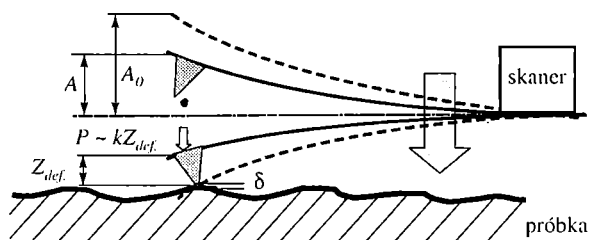
Obliczenia wskazały, że wykorzystanie zależności teorii Hertza do opisu kontaktu kula-płaszczyzna w całym zakresie wciskania nie powoduje błędów większych niż 5%. Zatem uprawnione wydaje się założenie kulistości zakończenia ostrza podczas nanoindentacji warstw powierzchniowych za pomocą AFM.

Wyrażenie określające wartość modułu sprężystości można uzyskać uwzględniając to, że obliczenia sprężystej reakcji deformowanego materiału są prowadzone



Rys. 3. Przebieg tłumienia drgań sondy AFM w rezonansowym trybie pracy; ΔA_{attr} i ΔZ_{attr} — odpowiednio zmiana amplitudy i odległości wywołana molekularnym przyciąganiem, $\Delta A_{el.def}$ — zmiana amplitudy wywołana sprężystą reakcją materiału; pozostałe oznaczenia symboli w tekście

Fig. 3. Course of AFM probe vibration damping in resonant operating mode. ΔA_{attr} and ΔZ_{attr} — changes of amplitude and a distance, respectively, caused by molecular attraction. $\Delta A_{el.def}$ — change of amplitude caused by elastic reaction of the material. Other symbols denotations — see text



Rys. 4. Schemat działania mikroskopu sił atomowych; A_0 , A — odpowiednio początkowa amplituda drgań i amplituda wynikająca z oddziaływania ostrza i próbki, pozostałe oznaczenia symboli w tekście

Fig. 4. Scheme of atomic force microscope operation. A_0 , A — initial amplitude of vibration and amplitude resulted from point – sample interaction, respectively. Other symbols denotations — see text

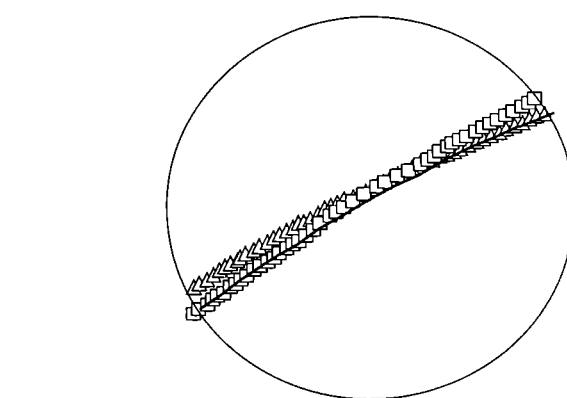
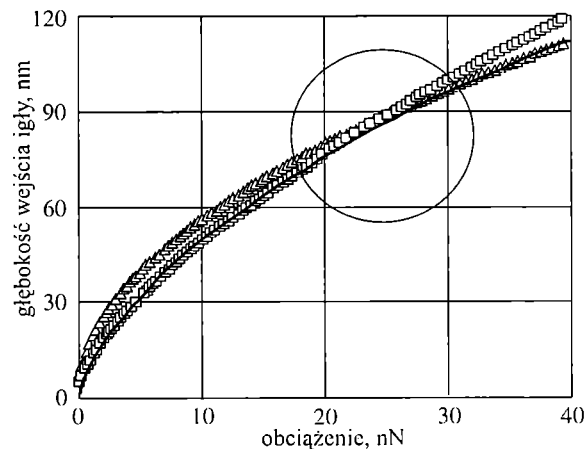
w odniesieniu do kontaktu kula-płaszczyzna lub stożek-płaszczyzna. Zatem obliczenia wartości E prowadzono według równania (4) wykorzystując równania (2) oraz (3) i zakładając, że materiał ostrza jest o wiele twardszy niż materiał próbki [11]:

$$E = \frac{3}{4} (1 - \nu^2) \frac{k}{\sqrt{R}} \frac{Z_{defl}}{(Z_{pos} - Z_{defl})^{3/2}} \quad (4)$$

gdzie: ν — współczynnik Poissona materiału próbki.

Określanie modułu sprężystości metodą dynamicznej spektroskopii sił

Zastosowana przez nas metoda dynamicznej spektroskopii sił polega na wprowadzeniu sondy pomiarowej w rezonansowy ruch drgający i następnym zbliżeniu



Rys. 5. Porównanie teoretycznej zależności obciążenie-głębokość wciśnięcia sondy w przypadku kontaktu kula-płaszczyzna (Δ) lub stożek-płaszczyzna (\square) z danymi doświadczalnymi (linia ciągła) dotyczącymi próbki kauczuku

Fig. 5. Comparison of theoretical dependence load-depth of probe indentation in cases of contacts either sphere-plane (Δ) or cone-plane (\square) with the experimental data concerning the rubber sample (full line)

niem oscylującej sondy do badanej powierzchni próbki (rys. 4). Jako analizowaną funkcję przyjmuje się tutaj krzywą amplituda-odległość (rys. 5).

Użycie tej metody eliminuje możliwość niszczenia belki pomiarowej w wyniku działania ostrza skanującego bądź złamania samej belki, które to wady występują w przypadku opisanej uprzednio w punkcie „Sposób prowadzenia pomiaru” metody bez zastosowania rezonansowego trybu pracy.

Analizując przebieg krzywej amplituda-odległość stwierdzono, że:

— na odcinku 1-2 następuje zmniejszanie amplitudy wywołane siłami molekularnego przyciągania pomiędzy ostrzem sondy a powierzchnią próbki podczas zbliżania,

— na odcinku 2-3 zachodzi zmniejszanie amplitudy wywołane sprężystą reakcją materiału,

— odcinek 3-4 nie wnosi informacji o właściwościach materiału.

Do wyznaczenia wartości E wykorzystano odcinek 2-3 krzywej amplituda-odległość. W tym celu na podstawie zależności geometrycznych przedstawionych na rys. 4 amplitudę (A) zmniejszoną w wyniku sprężystego oddziaływania ostrza i próbki wyraża się jako:

$$A = \delta + Z_{pos} \quad (5)$$

lub

$$A = A_0 - Z_{defl} \quad (6)$$

gdzie: A_0 — początkowa amplituda drgań wyjściowych, δ — sprężysta deformacja próbki w punkcie kontaktu, Z_{defl} — pozorne ugięcie belki przy ograniczeniu amplitudy swobodnych drgań, Z_{pos} — położenie punktu zamocowania sondy w odniesieniu do układu osi wybranego tak, że $Z_{pos} = 0$ gdy $A = A_0$.

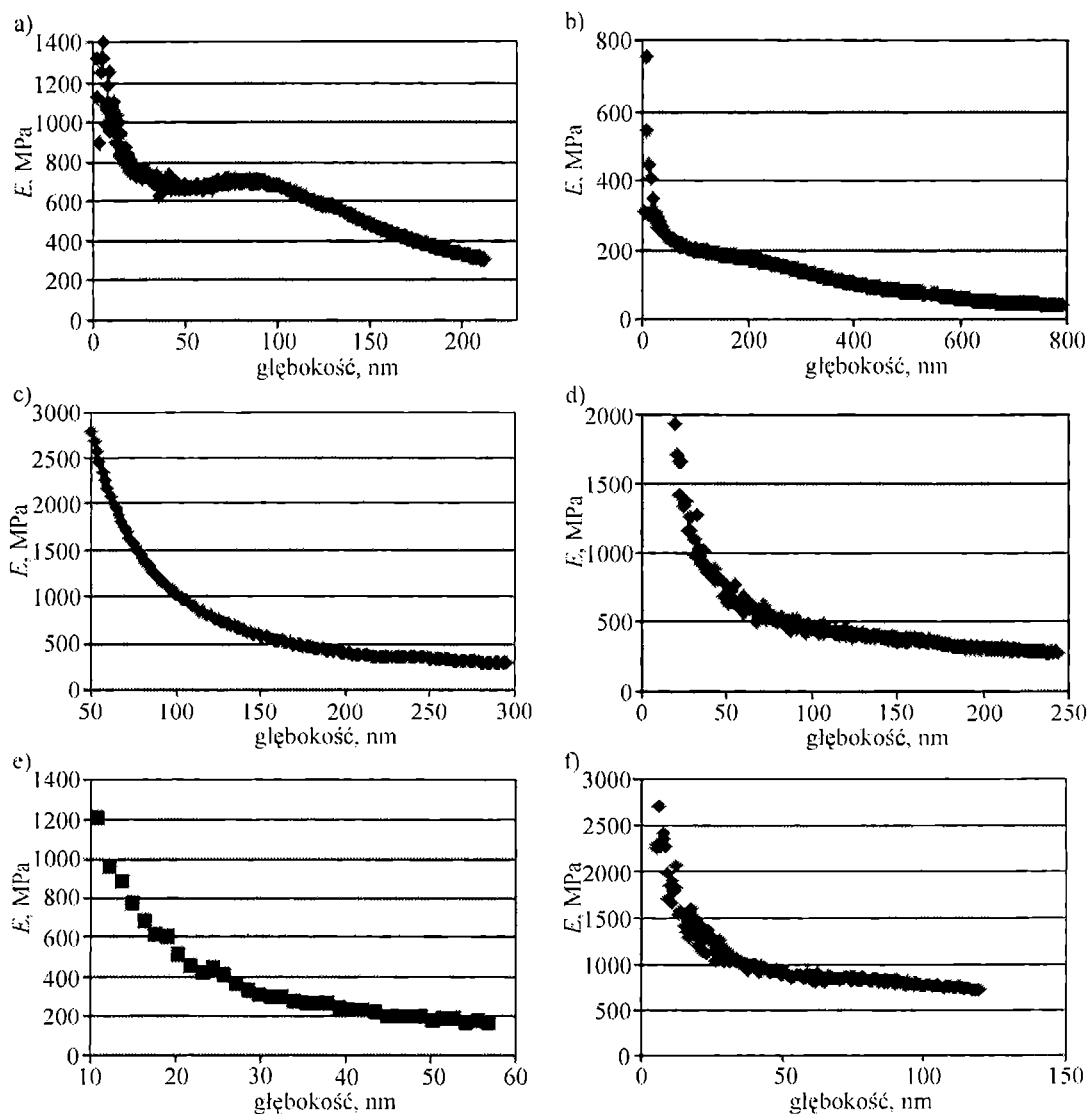
Następnie do równania (2) opisującego równowagę quasistatyczną układu ostrze sondy-próbka wstawia się

za Z_{defl} i δ wyrażenia $A_0 - A$ i $A - Z_{pos}$ wyznaczone odpowiednio z równań (6) i (5). Założyliśmy, że w tym przypadku słuszna jest teoria Hertza [równanie (2)], zatem z równania równowagi można wyznaczyć moduł sprężystości E w punkcie dynamicznego wgłębiania (indentacji) materiału jako:

$$E = \frac{3k(A_0 - A)}{4\sqrt{R}(A - Z_{pos})^{3/2}} \quad (7)$$

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki pomiarów modułu sprężystości powierzchniowych warstw różnych materiałów polimerowych w funkcji głębokości wnikania ostrza ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Zależność modułu sprężystości (E) różnych materiałów polimerowych od głębokości wnikania ostrza: a) terpolimer ABS, b) poliamid 66, c) poliwęglan, d) poliamid 11, e) polistyren, f) poliactal + 20 % mas. politetrafluoroetyleny
 Fig. 6. Dependence of modulus of elasticity (E) of various polymeric materials on the depth of point indentation: a) ABS terpolymer, b) 66 polyamide, c) polycarbonate, d) 11 polyamide, e) polystyrene, f) polyacetal + 20 wt. % of polytetrafluoroethylene

Jak wynika z tego rysunku, niezależnie od rodzaju polimeru moduł sprężystości przybiera największe wartości zawsze na powierzchni swobodnej (bez obciążenia, głębokość wnikania ostrza ok. 0 nm), a maleje ze wzrostem głębokości wciskania ostrza. Mianowicie, już w przypadku głębokości kilkudziesięciu nanometrów E maleje prawie dwukrotnie w stosunku do wartości E na powierzchni swobodnej. Spośród badanych materiałów największymi wartościami E na powierzchni swobodnej charakteryzował się PC (rys. 6c) oraz POM + 20 % mas. PTFE (rys. 6f), a najmniejszymi PA 66 (rys. 6b). W tym ostatnim przypadku moduł sprężystości malał powoli i maksymalna głębokość wnikania ostrza w materiał przekraczała 800 nm, podczas gdy w przypadku ABS (rys. 6a) i PA 11 (rys. 6d), które wykazywały ponad dwukrotnie większą wyjściową wartość E maksymalna głębokość wnikania wynosiła ok. 230—250 nm.

Zatem nasze badania wykazały konieczność uwzględniania zmienności modułu sprężystości w obliczeniach tarcia i właściwości mechanicznych odkształcanych współpracujących powierzchni.

PODSUMOWANIE

Przy użyciu mikroskopu sił atomowych (AFM) możliwe jest wyznaczenie metodą spektroskopii sił modułu sprężystości cienkiej (grubości kilkaset nanometrów) warstwy polimeru. Właściwości mechaniczne takiej warstwy odgrywają decydującą rolę w procesie współpracy tarciowej w miniaturowym łożysku ślizgowym polimer-polimer.

Opracowana przez nas modyfikacja metody AFM oraz uzyskiwane tą zmodyfikowaną metodą wyniki doświadczalne mogą dostarczać istotnych informacji o charakterze triboinżynierskim w budowie polimerowych, miniaturowych węzłów tarcia, w tym polimerowych mikrosystemów elektromechanicznych (MEMS — *Micro Electro Mechanical Systems* [12]).

LITERATURA

1. Żenkiewicz M.: „Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”, WNT, Warszawa 2000.
2. Żenkiewicz M.: *Polimery* 2003, 48, 665.
3. Żenkiewicz M.: *Polimery* 2000, 45, 81.
4. Bieliński D.: *Polimery* 2001, 46, 684.
5. Bieliński D., Głab P., Ślusarski L.: *Polimery* 2001, 46, 494.
6. Kuczmaszewski J.: *Polimery* 2001, 46, 792.
7. Gancarz I., Pięłowski J.: *Polimery* 2001, 46, 622.
8. Bryjak M.: *Polimery* 2001, 46, 785.
9. Kaczmarek H., Czajka R., Nowicki M., Ołdak D.: *Polimery* 2002, 47, 775.
10. Kaczmarek H., Czajka R., Nowicki M., Wiśniewski M.: *Polimery* 2003, 48, 91.
11. Tsukruk V. V., Sidorenko A., Gorbunov V. V., Chizhik S. A.: *Langmuir* 2001, 17, 6715.
12. Gardner J. W., Varadan V. K., Awadelkarim O. O.: *Microsensors MEMS and Smart Devices*, J. Willey, Chichester 2001.

Otrzymano 21 X 2003 r.