

**LABORATORIA
APARATURA
BADANIA**

ISSN-1427-5519

3 / 2018

DWUMIESIĘCZNIK

**Badania trybologiczne
materiałów inżynierskich**

**Wyznaczanie przepuszczalności
par wody przez materiały opakowań**

Badania trybologiczne materiałów inżynierskich

Wojciech Pakieła, Mirosław Bonek, Katarzyna Pakieła*

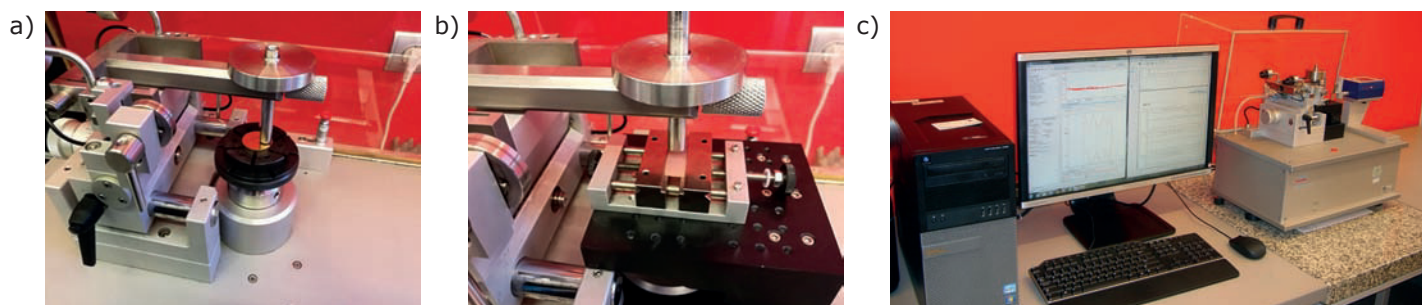
Termin trybologia (lub tribologia) najogólniej można określić jako naukę o procesach zachodzących w ruchomym styku dwóch (lub więcej) ciał stałych, obejmującą swoim zakresem zarówno problemy tarcia, smarowania, jak i zużycia ściernego. Najczęstszymi efektami zużycia trybologicznego są przede wszystkim: zmiana (nie zawsze ubytek) masy, kształtu jak również własności fizycznych współpracujących powierzchni. Po raz pierwszy termin ten został wprowadzony przez Brytyjski Komitet do spraw Tarcia, Zużycia i Smarowania w 1966 roku. Trybologia – podobnie jak tarcie – jest zjawiskiem towarzyszącym człowiekowi w każdym momencie życia. Najczęściej jednak ten rodzaj zużycia jest badany i opisywany dla podzespołów urządzeń i maszyn. Jego rodzaj i szybkość determinuje czas

eksploatacji większości urządzeń mechanicznych. Badania trybologiczne należą do podstawowej grupy badań pozwalających na prognozowanie szybkości zużycia powierzchni konkretnych części. Istnieje wiele procesów odpowiadających za tego typu zużycie. Wymienić tu można zużycie adhezyjne, zużycie z udziałem utleniania, zużycie zmęczeniowe oraz – najczęściej analizowane – zużycie ściernie. Prawidłowa analiza jednak powinna uwzględniać wszystkie aspekty występujące w danym przypadku. Obecnie istnieje bardzo wiele metod pozwalających na symulowanie zjawisk zachodzących w wyniku tarcia na styku ciał stałych. Można tu wymienić między innymi: ball/pin on disk; ball/pin on plate, rolka-klocek, disk-on-disk, pad on disk. Istnieją również zaawansowane symulatory

pozwalające na analizę między innymi skomplikowanych węzłów tarcia np. protez stomatologicznych. Należy jednak podkreślić, że przy tak zaawansowanych stanowiskach badawczych wyniki można porównywać jedynie w obrębie jednego urządzenia. Ze względu na różnorodność dostępnych testów często jest bardzo trudno porównać otrzymane wyniki badań. Nawet analiza współczynnika tarcia zarejestrowana podczas zużycia posuwisto-zwrotnego często różni się od współczynnika zarejestrowanego na tym samym urządzeniu, ale w trybie obrotowym; dodatkowo ślad wytarcia otrzymany po badaniach jest również nieco inny.

Najczęściej stosowanymi testami pozwalającymi na zbadanie odporności na ścieranie są pin/ball on disk oraz pin/ball on plate. Należy jednak pod-

kreślić, że nie zawsze można je stosować zamiennie. Pin/ball on disk jest testem, gdzie próbka wykonuje ruch obrotowy ze stałą, określoną prędkością kątową, a nieruchoma przeciw-próbka jest dociskana do badanej powierzchni ze stałym (lub zmiennym) obciążeniem (Rys. 1a). Jako przeciw-próbki zwykle stosuje się trzpienie (piny) lub kulki o określonej średnicy, najczęściej wykonane ze stali narzędziowej lub kwasoodpornej, a także ceramiczne (Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4). Rodzaj przeciw-próbki dobiera się w zależności od twardości badanego podłoża. W uzasadnionych przypadkach przeciw-próbkę wykonuje się z takiego samego materiału jak element, z którym współpracuje badany materiał w rzeczywistości (np. dla badanej tarczy hamulcowej można zastosować przeciw-próbkę w postaci klocka hamulcowego). W przypad-



Rys. 1. a) Test obrotowy ball on disk; b) test posuwisto-zwrotny ball on plate; c) urządzenie do badania odporności na ścieranie metodą ball on disk oraz pin on disk

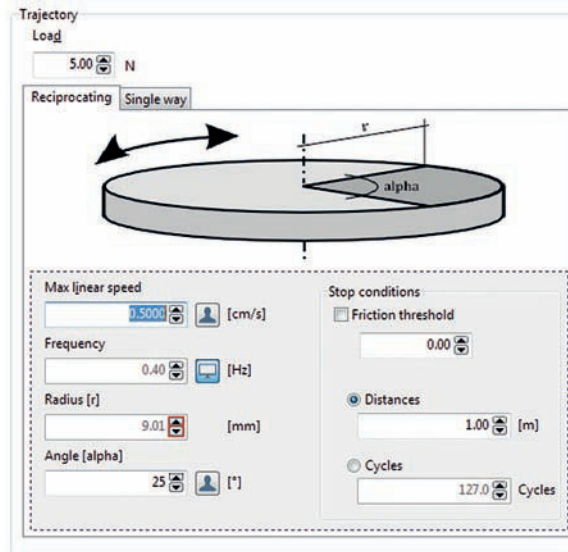


ku badania pin/ball on plate próbka wykonuje ruch posuwisto-zwrotny ze stałą prędkością liniową, a nieruchoma przeciw-próbka jest dociskana do badanej powierzchni ze stałym (lub zmiennym) obciążeniem (Rys. 1b). Dobór przeciw-próbki wygląda tu tak samo jak w przypadku testu obrotowego. Stanowisko do badań odporności na ścieranie metodami ball/pin on disk; ball/pin on plate zarówno w temperaturze pokojowej, jak i podwyższonej (w oleju) przedstawiono na rysunku 1a.

Otrzymane wyniki badań ściśle zależą od parametrów zastosowanych podczas testów. Najważniejszymi parametrami wpływającymi na rezultaty powyższych są:

- obciążenie [N],
- prędkość kątowna (i wynikająca z niej prędkość liniowa w miejscu styku przeciw-próbki z badaną próbką [m/s] – dla trybu obrotowego,
- prędkość liniowa [m/s] – dla trybu posuwisto-zwrotnego,
- promień badania [mm] – dla trybu obrotowego,
- odcinek badania [mm] – dla trybu posuwisto-zwrotnego,
- częstotliwość badania współczynnika tarcia [Hz],
- temperatura [K],
- obecność dodatkowego medium (np. olej, woda, mieszanina oleju i piasku, gaz ochronny, gaz reaktywny, wilgoć).

Dodatkowo niektóre urządzenia umożliwiają wykonanie badania wahadłowego – tryb posuwisto-zwrotny po łuku. Podczas badania odporności na ścieranie przy pomocy tego testu dodatkowym parametrem jest kąt wychylenia (rys. 2).



Rys. 2. Tryb posuwisto zwrotny po łuku

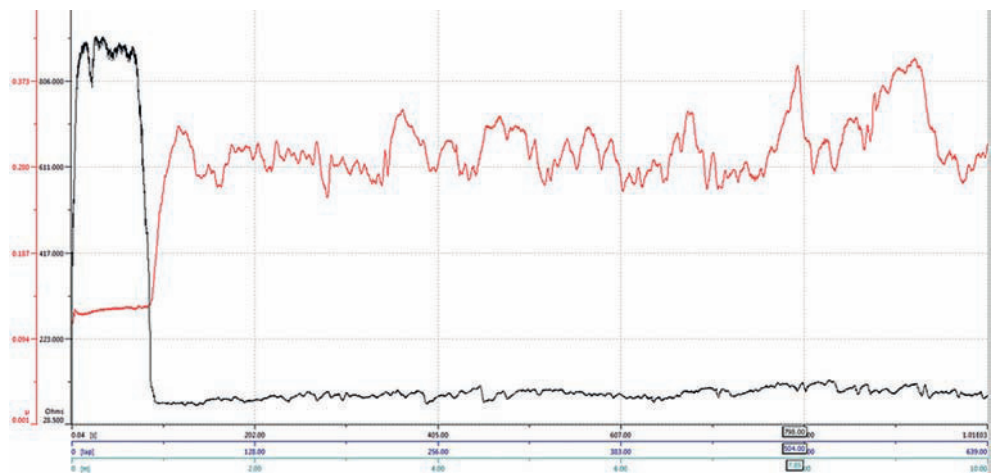
Ponieważ rodzaj i intensywność zużycia trybologicznego zależy w dużej mierze od środowiska zewnętrznego, niezwykle istotna jest możliwość zasymulowania faktycznych warunków tarcia panujących w układzie współpracujących powierzchni. Urządzenie Tribometer firmy CSM Instruments umożliwia wykonanie opisanych wyżej testów w różnych środowiskach. Możliwe jest zastosowanie między innymi olejów, smarów, mieszanin środków smarujących z kwar-

cem, sztucznej śliny i innych. Ponadto dodatkowa przystawka pozwala na podgrzanie zastosowanego medium do temperatury 150°C. Tak szerokie spektrum pozwala na badanie zarówno materiałów przewidzianych na protezy stomatologiczne (sztuczna ślina nagrzana na temperatury 36°C), jak również niektórych elementów silników spalinywych (olej nagrzany do 150°C). Ponadto alternatywne wprowadzenie gazu ochronnego pozwala na wyeliminowanie

wpływu utleniania podczas testu, natomiast zastosowanie gazu reaktywnego, np. tlenu lub wilgotnego powietrza, umożliwia określenie wpływu przyspieszonego utleniania na własności trybologiczne badanej pary trącej. Dodatkowym atrybutem urządzenia jest przystawka do badania oporności elektrycznej podczas badania odporności na ścieranie. Układ taki pozwala na dokładne wyznaczenie momentu przerywania nieprzewodzącej warstwy na przewodzącym metalu lub przewodzącej warstwy na nieprzewodzącym podłożu. Przerwanie warstwy w każdym z wymienionych przypadków skutkuje zmianą rejestrowanej oporności elektrycznej warstwy (Rys. 3).

Analiza otrzymanych wyników obejmuje bardzo wiele aspektów, do których zaliczyć można między innymi:

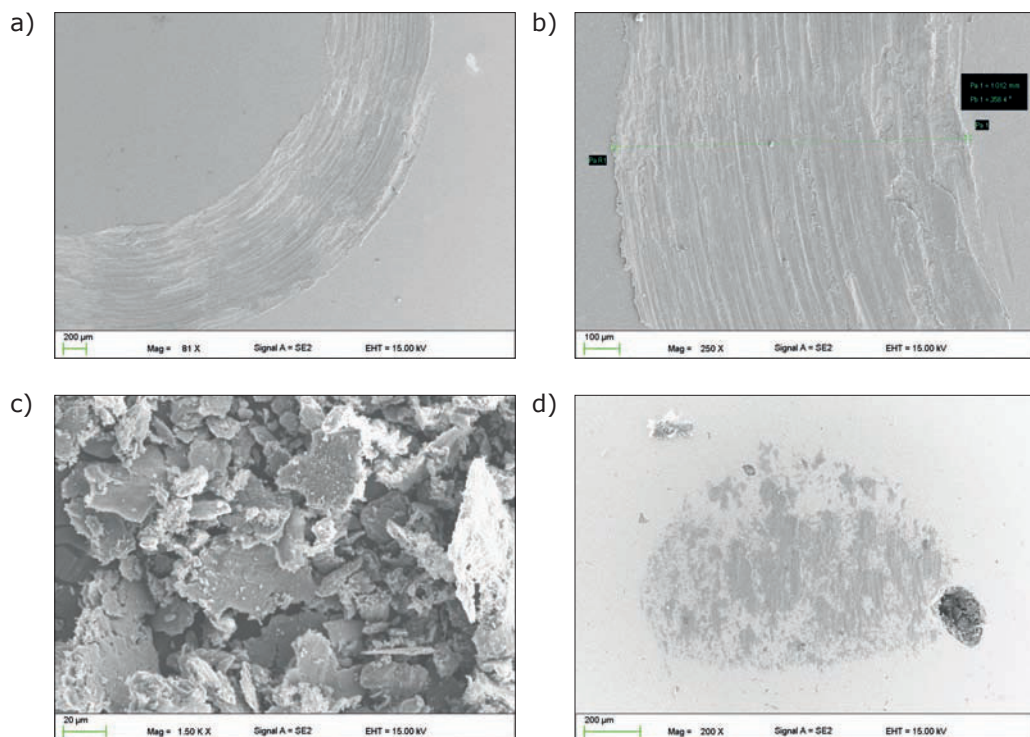
- pomiar profilu wytarcia z zastosowaniem profilometru kontaktowego lub świetlnego, mikroskopu stereoskopowego, mikroskopu konfokalnego itp.



Rys. 3. Współczynnik tarcia wraz z pomiarem oporności elektrycznej warstwy utlenionej na powierzchni stopu aluminium



- obserwacje śladu wytarcia (Rys. 4a, 4b) wraz z analizą składu chemicznego z zastosowaniem detektora rozproszonego promieniowania rentgenowskiego EDS,
 - pomiar wielkości otrzymanego produktu zużycia trybologicznego (proszku wytartego z podłoża) przy pomocy SEM wraz z analizą składu chemicznego EDS (Rys. 4c),
 - pomiar ubytku lub przyrostu masy próbki (zdarza się, że dochodzi do zeszlifowania przeciw-próbki na powierzchni próbki i tym samym zwiększenia masy),
 - pomiar masy przeciw-próbki,
 - pomiar kształtu przeciw-próbki w miejscu styku z badaną powierzchnią (często – ze względu na małe wymiary – badanie to ogranicza się jedynie do pomiarów obszaru zeszlifowania (lub narostu) przy pomocy mikroskopu stereoskopowego lub skaningowego) (Rys. 4d).
- Podczas badań odporności na ścieranie należy zawsze dokonać analizy możliwie maksymalnej ilości danych. Dokonanie niekompletnej analizy może doprowadzić do wyciągnięcia niekompletnych i niewłaściwych wniosków. Nietrudno jest sobie wyobrazić analizę zużycia tylko przez pomiar ubytku/przyrostu masy próbki i przeciw-próbki. Zaobserwowanie wzrostu masy próbki mogłoby zasugerować błędne pomiary przed rozpoczęciem testu. Dopiero analiza topografii i profilu powierzchni ujawniają wysoką odporność na ścieranie badanej powierzchni lub/ oraz niewłaściwy dobór przeciw-próbki (zbyt miękki materiał).



Rys. 4. Wynik badania trybologicznego – obserwacje SEM: a), b) ślad wytarcia; c) produkt zużycia trybologicznego; d) przeciw-próbka po badaniu trybologicznym

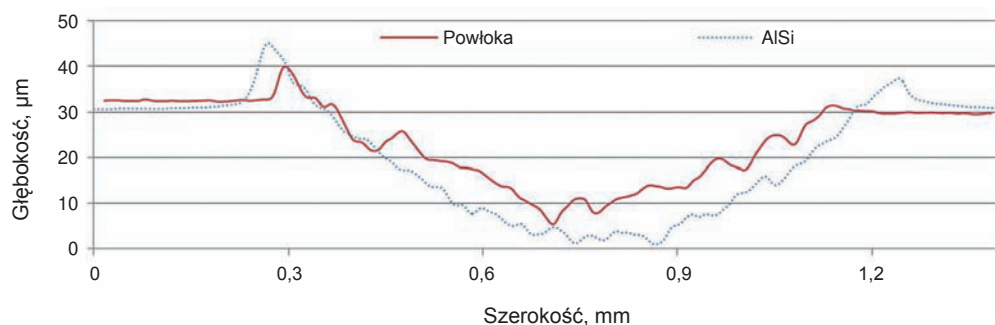
Na otrzymane rezultaty bardzo duży wpływ ma jakość przygotowanej powierzchni. Często ze względów technologicznych nie można zmieniać jej chropowatości, jednak należy pamiętać, że przy porównaniu wyników różnych materiałów zarówno chropowatość, jak i falistość powierzchni powinna być możliwie taka sama (za wyjątkiem badań dotyczących analizy wpływu chropowatości na odporność trybologiczną materiałów). Niezwykle ważnym aspektem jest również zachowanie odpowiedniej czystości badanych powierzchni. W zależności od rodzaju badanych materiałów należy zastosować odpowiednią metodę oczyszczenia, która może obejmować zastosowanie między innymi sprężonego powietrza, alkoholu, rozpuszczalników, jak

również płuczki ultradźwiękowej. Nie oznacza to jednak, że w każdym z przypadków należy stosować wszystkie dostępne metody. Zastosowanie płuczki może doprowadzić do usunięcia wzmocnienia z powierzchni materiału kompozytowego, a tym samym spowodować obniżenie jej odporności na ścieranie, natomiast użycie niektórych rozpuszczalników lub acetonu niejednokrotnie skutkuje rozpuszczeniem części materiałów polimerowych. Metoda oczyszczania musi być zatem dobrana adekwatnie do badanego materiału. Zostawienie na powierzchni przeciw-próbki oraz próbki zanieczyszczeń (zwłaszcza tłustych) będzie miało znaczący wpływ na szybkość zużycia i rejestrowany współczynnik tarcia. Szczegółowa analiza otrzymanych wyników badań nie-

mal zawsze sprowadza się do przedstawienia wartości liczbowych. W przypadku badań trybologicznych najczęściej porównuje się ubytek/przyrost masy, wielkość płatów (proszku z wytartej powierzchni) i wymiary śladu wytarcia (wraz z odkształceniem plastycznym w postaci wypływek materiału po bokach krateru). Badaniem uzupełniającymi są obserwacje mikroskopowe i analiza składu chemicznego. Wielkościami opisującymi ślad wytarcia są przede wszystkim maksymalna głębokość i szerokość wytarcia, pole powierzchni przekroju poprzecznego oraz objętość wytarcia. Pomiary najczęściej dokonuje się przy pomocy profilometru kontaktowego lub świetlnego. Pole powierzchni przekroju poprzecznego otrzymanego wytarcia można zmierzyć przy



pomocy oprogramowania CSM Instruments lub całując pole pod krzywą profilu wytarcia. Objętość jest wynikiem iloczynu uśrednionego pola (pomiar wytarcia w minimum 6 miejscach) i promienia (w przypadku ruchu obrotowego) lub odcinka badanego (w przypadku ruchu posuwisto-zwrotnego). Typowy ślad wytarcia przedstawiono na rysunku 5.



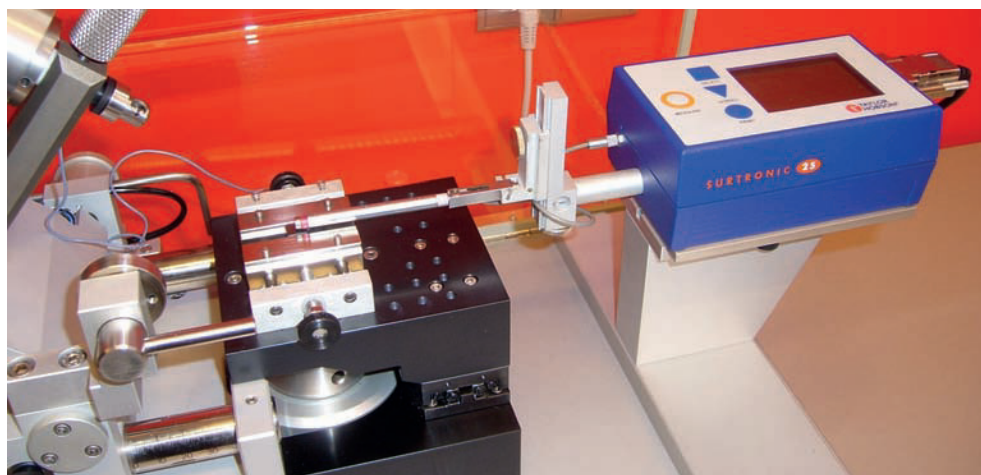
Rys. 5. Profil śladu wytarcia otrzymanego po teście odporności na ścieranie ball-on-disk

ZOSTAŃ CZŁONKIEM

**Klubu
Polskich Laboratoriów
Badawczych**



www.pollab.pl

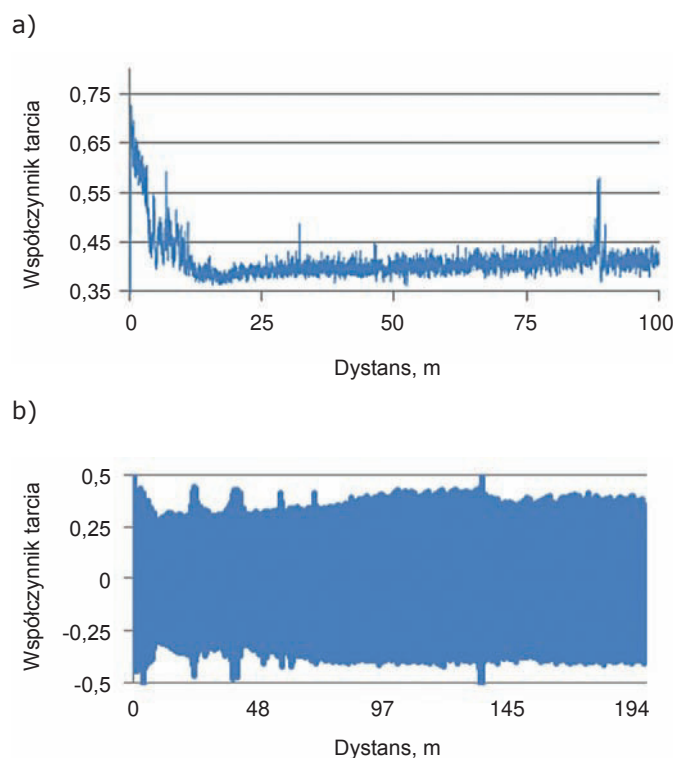


Rys. 6. Profilometr kontaktowy Surtronic 25 firmy Taylor Hobson

Pomiary z zastosowaniem profilometru kontaktowego pozwalają na zarejestrowanie i pomiar profilu wytarcia (profilu falistości i chropowatości powierzchni) na określonym odcinku pomiarowym (Rys. 6). Elementem rejestrującym topografię powierzchni jest igła diamentowa, której ruchy po zamianie na impulsy elektryczne pozwalają na rejestrowanie kształtu badanego przedmiotu i dalszą analizę. Każdorazowo przed badaniem należy sprawdzić poprawność działania profilometru przy pomocy wzorca chropowatości R_a . Przed rozpoczęciem pomiaru próbka powinna być oczyszczona (np. sprężonym powietrzem) i nieruchomo zamontowana na podłożu np. w imadle. Nie należy oczyszczać powierzchni próbki w płuczce ultradźwiękowej, ponieważ często prowadzi to do usunięcia fragmentów podłoża i przekłamania wyników. Nie jest również właściwe mechaniczne przecieranie wytarcia (np. wata

lub papierem nasączonym alkoholem oraz detergentem), ponieważ ostre krawędzie krateru będą miejscem odkładania się fragmentów włókien materiału. Zastosowanie strumienia czystej wody oraz sprę-

żonego powietrza o ciśnieniu nie przekraczającym 2 bar pozwoli na usunięcie zanieczyszczeń oraz nie dopuści do przekłamania wyników. Często pomiary profilu wytarcia realizowane są po obserwacjach



Rys. 7. Współczynnik tarcia zarejestrowany podczas trybu: a) obrotowego ball-on-disk; b) posuwisto-zwrotnego ball-on-plate

nieoczyszczonej próbki w mikroskopie skaningowym.

Bardzo wielu cennych informacji o przebiegu badania dostarcza analiza współczynnika tarcia lub/oraz siły tarcia zarejestrowanych podczas testu (Rys. 7). Prawidłowa analiza pozwala na ujawnienie między innymi przerwania warstwy (np. warstwy tlenkowej na powierzchni próbki), wykruszenia lub nadtopienia powierzchni, a także zatarcia.

Trybometr SCM Instruments to zaawansowane urządzenie badawcze pozwalające na analizę odporności na zużycie ściernie większości materiałów inżynierskich. Zastosowanie profilometru kontaktowego Surtronic 25 firmy Taylor Hobson, mikroskopu skaningowego, stereoskopowego i konfokalnego, a w niektórych wypadkach mikroskopu sił atomowych pozwala na szczegółową analizę topografii badanego materiału zarówno przed, jak i po teście odporności na ścieranie. Dostarczone informacje pozwalają na wnioskowanie o czasie życia produktu i szybkości zużywania się poszczególnych części urządzeń i maszyn, co w praktyce przyczynia się do projektowania bardziej niezawodnych i wytrzymałych konstrukcji.

* Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach