

Krzysztof FILIPOWICZ, Jacek SPAŁEK
Politechnika Śląska, Gliwice

DOŚWIADCZALNA IDENTYFIKACJA PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono stanowiska i metody stosowane w badaniach prowadzonych w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Pozwalają one na ilościowy i jakościowy opis procesów tribologicznych dla typowych węzłów tarcia maszyn oraz dla węzłów uszczelniających. Zagadnienia te są bardzo istotne z punktu widzenia trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń górniczych.

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF TRIBOLOGICAL PROCESSES

Summary. It has been presented in the elaboration stands and methods applicable in research at the Institute of Mining Mechanization of the Silesian University of Technology. They allow quantitative and qualitative description of tribological processes of typical friction and crunching systems of machines. These questions are very important from the point of view of constancy and reliability of mining machine.

1. Wprowadzenie

Trwałość i sprawność elementów węzłów konstrukcyjnych maszyn przemysłowych są głównymi kryteriami oceny technicznej na etapie ich projektowania, wytwarzania i użytkowania oraz po przeprowadzonej modernizacji bądź naprawie. W ocenie tej istotnym jest formułowanie prognozy, co do zachowania określonych cech użytkowych maszyny w założonych warunkach eksploatacyjnych i w wymaganym okresie czasu, określanym pojęciem trwałości.

W przypadku maszyn przemysłowych utrata trwałości wiąże się często z wystąpieniem zniszczenia w postaci dekohezyjnego pęknięcia objętościowego, eliminującego maszynę z procesu użytkowania. Stan taki, posiadający losowy charakter, poprzedzony jest zazwyczaj

(poza wadami materiałowymi) bardziej przewidywalnymi, postępującymi w czasie, niszczącymi procesami warstw wierzchnich elementów węzłów konstrukcyjnych. Należą do nich (w znacznej mierze) procesy zużycia, spowodowane tarciem, nazywane szerzej procesami niszczenia tribologicznego. Dotyczą one głównie takich węzłów konstrukcyjnych, jak: łożyskowania i uszczelnienia wałów, zazębienia przekładni, sprzęgła, hamulce ciernie oraz inne skojarzenia tarciove.

Ponieważ węzły te są podstawowymi dla maszyn i urządzeń przemysłowych, prognoza ich trwałości eksploatacyjnej opiera się głównie na opisie i analizie przebiegów ich zużycia tribologicznego i stanowi istotny element uporządkowanego systemu w nauce o eksploatacji obiektów technicznych [1, 9].

Wykorzystanie wiedzy tribologicznej w prognozowaniu trwałości maszyn i urządzeń przemysłowych, z natury jej złożoności opisu, bazuje głównie na wynikach badań doświadczalnych, realizowanych w ograniczonej mierze na obiektach rzeczywistych i w zmniejszonej skali na stanowiskach modelowych, nazywanych tribometrami.

2. Charakterystyka ogólna metod badań tribologicznych

Dla tribologii, jako dyscypliny nauki, eksperyment jest podstawą pozyskiwania informacji o zachodzących procesach tarcia, zużycia i smarowania. Już od najdawniejszych czasów poszukiwano opisu ich przebiegu, głównie w oparciu o uzyskiwane wyniki badań doświadczalnych.

Badania te współcześnie realizowane mają złożony i szeroki charakter. Bazują często na wiedzy z innych dziedzin nauki, a zwłaszcza z fizyki, chemii i inżynierii materiałowej. Ze względu na sposób realizacji badania tribologiczne można podzielić na:

- teoretyczne, polegające na analizach procesów tribologicznych z wykorzystaniem modeli matematycznych. Są one najczęściej inspirowane przez doświadczenie i przez nie weryfikowane,
- doświadczalne, oparte na obserwowaniu i rejestracji zachodzących procesów, pozwalających na uzyskanie wiedzy o charakterze poznawczym i użytkowym.

Ze względu na pożądany zakres wnioskowania, doświadczalne badania tribologiczne mogą być [1, 2]:

- podstawowe,

- stosowane,
- eksploatacyjne.

Badania podstawowe stanowią główne źródło informacji o procesach tribologicznych. Dotyczą one ich przebiegu i wpływu różnych czynników. Czynnikami tymi mogą być, np. forma styku, rodzaj materiałów trących i stan ich warstw wierzchnich oraz wymuszenia określone przez obciążenie, temperaturę, prędkość czy cechy środka smarowego. Zaletą tych badań jest uzyskiwanie wyników w stosunkowo krótkim czasie na małych obiektach (próbkach elementarnych), przy względnie niskich kosztach realizacji. Pozyskiwana wiedza posiada zazwyczaj uniwersalny charakter, co oznacza możliwość jej wykorzystywania w opisie poznawczym, jak i w zastosowaniach. Z tej uniwersalności i prostoty wynika jednak jedna z ich zasadniczych wad, a mianowicie są niewystarczające dla praktyki w zakresie oceny ilościowej badanych procesów analizowanych rozwiązań technicznych.

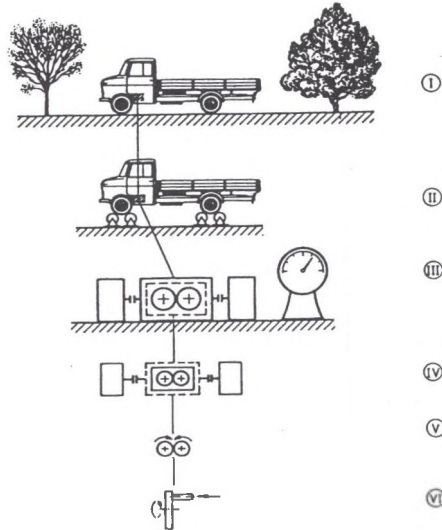
Badania stosowane dotyczą wyróżnionych właściwości konkretnych układów tribologicznych. Jednym z głównych ich celów jest określenie istotności wpływu różnorodnych cech, opisujących warunki pracy węzła tribologicznego. Uzyskane wyniki pozwalają na jakościową i ilościową ocenę badanych procesów. Badania mogą być prowadzone na konkretnych węzłach tarcia bądź na ich modelach. Badania na modelach są mniej kosztowne i można je prowadzić na stosunkowo prostych urządzeniach, lecz uzyskiwane wyniki mają charakter porównawczy i nie nadają się zazwyczaj do bezpośredniego przeniesienia na węzły konstrukcyjne maszyn i urządzeń. Są one wykorzystywane, np. do wstępnej selekcji kontaktujących się materiałów bądź środków smarowych.

Kolejnym przybliżeniem do praktyki są badania stosowane, prowadzone na węzłach tarcia. Są one kosztowniejsze niż badania na modelach i trwają zwykle dłużej, ale uzyskane wyniki mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie praktyczne.

Badania eksploatacyjne prowadzone są na rzeczywistych obiektach technicznych. Dają one pełny obraz przebiegów procesów tribologicznych w maszynach. Mogą być realizowane jako badania programowane lub wyselekcjonowane próby eksploatacyjne. W badaniach programowanych wymuszenia są realizowane według programu, będącego odwzorowaniem warunków pracy danej maszyny lub jej zespołu. Natomiast wyselekcjonowane próby eksploatacyjne prowadzi się na losowo wybranej grupie maszyn. Istotną zaletą badań eksploatacyjnych jest to, że uzyskiwane wyniki są bezpośrednio użyteczne. Wadą ich jest jednak wysoki koszt oraz znaczne trudności techniczno-organizacyjne realizacji cyklu badawczego. Dlatego prowadzi się je zazwyczaj jako badania testujące nowe maszyny bądź

jako badania rozwojowe.

Rysunek 1 jest ilustracją etapów badań tribologicznych, począwszy od eksperymentów podstawowych poprzez stosowane aż do eksploatacyjnych.



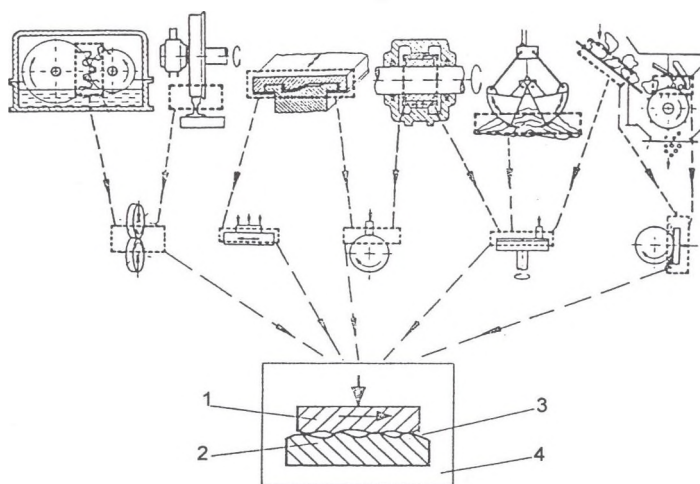
Rys. 1. Etapy badań tribologicznych na przykładzie przekładni samochodowej: I – wyselekcjonowane próby eksploatacyjne, II – badania eksploatacyjne programowane, III, IV – badania stosowane modeli węzłów i próbek elementarnych, V, VI – badania podstawowe [4]

Fig. 1. Steps of tribological examinations exemplifying on car gearbox: I - selected exploitation tests, II – programming exploitation tests, III, IV – applied examinations on models of nodes and elementary samples, V, VI – fundamental examinations [4]

3. Metodyka i stanowiska badawcze do identyfikacji procesów tribologicznych

Odpowiednio do przedstawionej na rysunku 1 systematyki badań tribologicznych istnieją różnorodne metody i stanowiska badawcze (tribometry), służące do identyfikacji procesów na poziomie podstawowym i stosowanym. Mogą być one klasyfikowane ze względu na różne kryteria [3, 4, 5,] i cechują się różnorodnymi postaciami konstrukcyjnymi. Ta różnorodność metod i stanowisk badawczych spowodowała kształtowanie, w ramach tribologii, nowej dyscypliny, zwanej tribometrią. Zasadniczym jej celem jest uporządkowanie i uogólnienie metod i stanowisk badawczych oraz doprowadzenie w wielu zagadnieniach unormowania w skali krajowej, europejskiej (normy EN) oraz światowej (normy ISO).

Generalną zasadą tworzenia systemu badań jest modelowe odwzorowanie procesów i zjawisk tribologicznych, odpowiadających rzeczywistym sytuacjom technicznym (rys. 2). Zgodnie z tą zasadą przyjmujemy modele fizyczne z podziałem na skojarzenia ślizgowe (np. łożyska ślizgowe, prowadnice), toczne (np. łożyska toczne), toczne z poślizgiem (np. koła zębate z ewolwentowym zarysem zębów).



Rys. 2. Schemat uporządkowanego systemu odwzorowania przykładowych procesów tribologicznych: 1 – próbka, 2 – przeciwpódkę, 3 – warstwa pośrednicząca (technologiczna lub eksploatacyjna), 4 – otoczenie [4]

Fig. 2. Chart of orderly system of projection as an example of tribological processes: 1 – sample, 2 – countersample, 3 – interjacent layer (technological or exploitational), 4 – enviromental [4]

3.1. Stanowisko do badań tarcia, zużycia i smarowania (tribometr AMSLER)

Przeznaczenie stanowiska

Stanowisko przeznaczone jest do badań procesów tribologicznych w warunkach tarcia suchego oraz tarcia ze smarowaniem, w skojarzeniach próbek: walec-walec, przy styku tocznym, toczno-ślizgowym i ślizgowym [6]. W szczególności stanowisko pozwala na wyznaczenie:

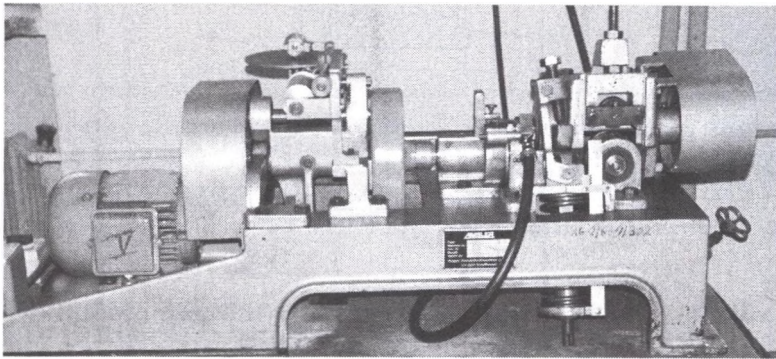
- oporów tarcia (momentu i współczynnika tarcia),
- przebiegu zużycia jako funkcji prędkości i obciążenia materiałów próbek, właściwości środka smarowego oraz rodzaju smarowania,
- obciążenia zatarcia dla określonych skojarzeń materiałowych oraz danego środka smarowego.

Charakterystyczne parametry stanowiska i warunki badawcze

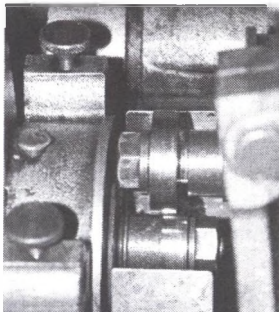
- prędkość obrotowa próbki, min^{-1} 200 lub 400,
- prędkość obrotowa przeciwpróbki, min^{-1} 180 lub 360,
- średnica zewnętrzna próbki i przeciwpróbki, mm 30÷50,
- szerokość próbki i przeciwpróbki, mm 6÷10,
- układ obciążający: sprężynowy o zakresie 0÷2000 N,
- układ pomiarowy momentu tarcia: dynamometryczny, wahadłowy,
- pomiar temperatury: ciągły,
- sposób smarowania: natryskowy, zanurzeniowy lub kropłowy.

Moment tarcia jest równoważony momentem napędowym silnika, zwiększonym przez przekładnię obiegową, z którą jest związana wahadłowa dźwignia. Na dźwignię nakłada się przeciwwagi, których ciężar jest zależny od zakresu mierzonego momentu tarcia. Na rysunku 3 przedstawiono widok ogólny, szczegół głowicy badawczej oraz stosowane próbki.

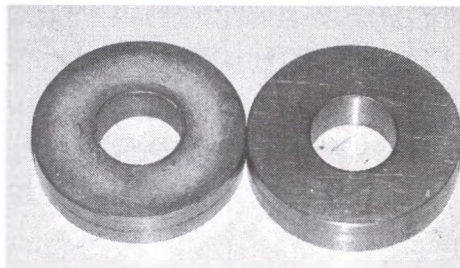
a)



b)



c)



Rys. 3. Tribometr typu AMSLER, a – widok ogólny, b – głowica badawcza, c – próbki do badań
 Fig. 3. Tribotester AMSLER, a – the general picture, b – the testing hub, c – testing samples

3.2. Stanowisko do badań tarcia, zużycia i smarowania (tribometr TIMKEN)

Przeznaczenie stanowiska

Stanowisko przeznaczone jest do badań procesów tribologicznych przy styku ślizgowym w skojarzeniach próbek: nieruchomy klocek – obrotowy pierścień [6].

W szczególności stanowisko pozwala na:

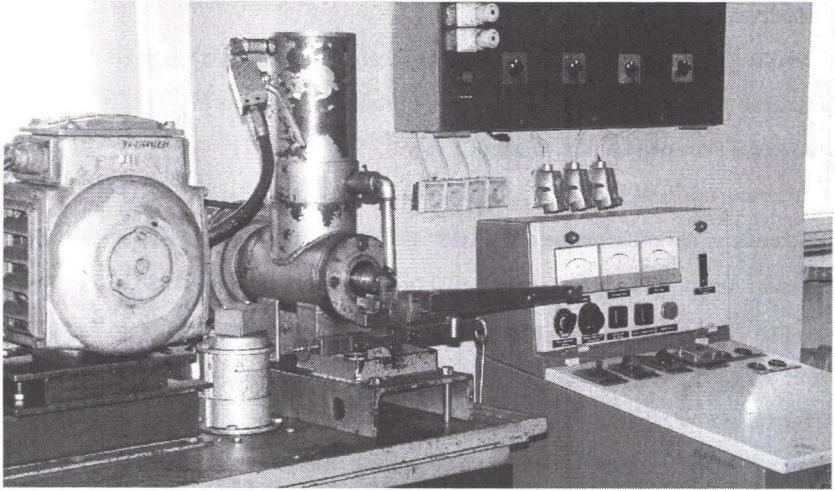
- wyznaczenie oporów tarcia ślizgowego (współczynnika tarcia) jako funkcji prędkości i obciążenia, materiałów próbek oraz rodzaju i właściwości środka smarowego,
- określenie krzywej zużycia (krzywej Lorenca) jako funkcji prędkości i obciążenia, materiałów próbek oraz rodzaju i właściwości środka smarowego,
- wyznaczenie obciążenia zatarcia, tj. granicznego stopnia zmiennego skokowo obciążenia wywołującego szepianie adhezyjno-termiczne klocka z pierścieniem dla przyjętych parametrów ruchu, materiału elementów próbnych i badanego środka smarowego (oleju lub smaru plastycznego).

Na rysunku 4 przedstawiono widok ogólny, szczegół głowicy badawczej oraz stosowane próbki.

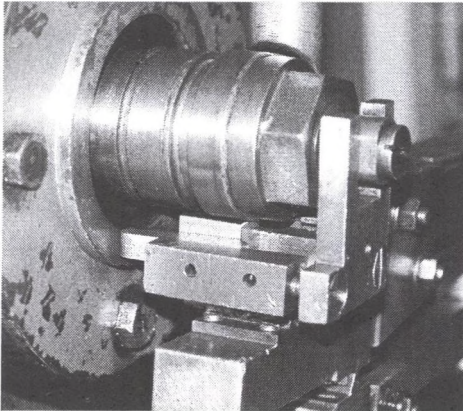
Główne parametry stanowiska i warunki badań

- Elementy próbne:
 - próbka: klocek (prostokątny) o wymiarach (w mm) 12,7x19,
 - przeciwpróbka: pierścień z otworem stożkowym; średnica zewnętrzna pierścienia $\phi 50$,
 - materiał próbek: zróżnicowany w zależności od celu badań; dla badań obciążenia zatarcia zarówno klocek, jak i pierścień wykonane są ze stali hartowanej do twardości 60-62 HRC.
- Obciążenie próbek: ciężarowe, zmienne skokowo w zakresie od 50N do 1000N.
- Prędkość obrotowa pierścienia: zmienna w sposób płynny w zakresie od 10 min^{-1} do 1000 min^{-1} .
- Smarowanie: napływowe ze zbiornika zasilanego układem pompowym; natężenie napływu oleju od kropłowego do $10 \text{ cm}^3/\text{min}$.
- Pomiar oporu tarcia: za pomocą układu dźwigniowego; zrównoważenie uzyskuje się poprzez zastosowanie zestawu odważników obciążających dźwignię pomiarową.

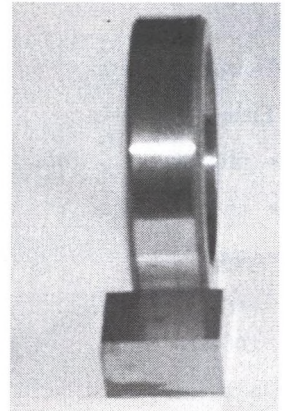
a)



b)



c)



Rys. 4. Tribometr Timken: a – widok ogólny, b – głowica badawcza, c – próbki do badań
 Fig. 4. Tribotester TIMKEN, a – the general view, b – the testing hub, c – testing samples

3.3. Stanowisko do badań pierścieni uszczelniających wały przy programowanej symulacji wymuszeń (stanowisko SBU-1)

Budowa stanowiska badawczego

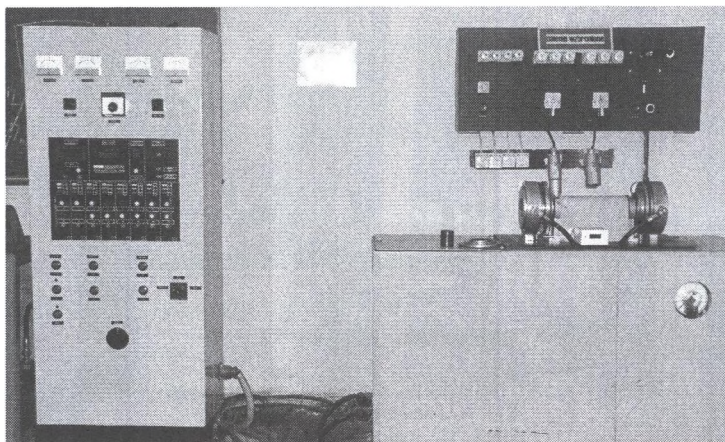
Widok ogólny stanowiska przedstawiono na rysunku 5 [6]. Składa się ono z następujących głównych zespołów:

- głowicy badawczej z zespołem napędowym i układem hydraulicznym (rys. 6),
- zespołu programująco-sterującego, zrealizowanego na elementach elektronicznych.

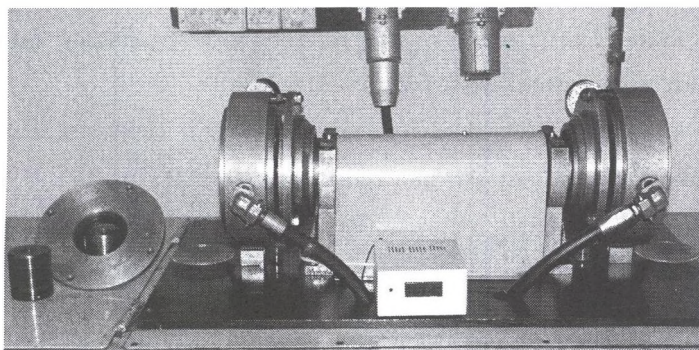
Głowice badawcze (rys. 6) są zasadniczym zespołem stanowiska, umożliwiającym badania typoszeregu pierścieni uszczelniających przy zadanych parametrach: ciśnienia i temperatury oleju, prędkości obrotowej i czasu cyklu badawczego, przy ustalonych średnicach wału i pierścienia uszczelniającego (rys. 7).

Zespół napędowy składa się z silnika prądu stałego obcowzbudnego, o mocy 17,5 kW z tyrystorowym układem regulacji prędkości obrotowej w zakresie $0\div 3000 \text{ min}^{-1}$ oraz przekładni pasowej zwiększającej o przełożeniu $u = 2$.

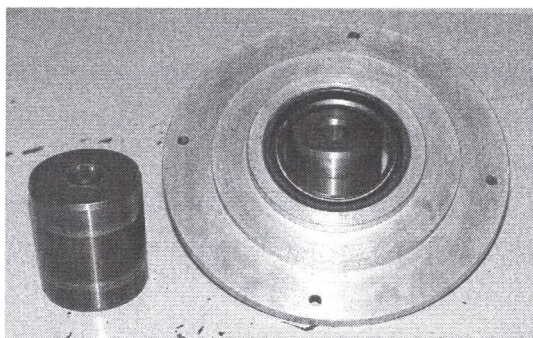
Układ hydrauliczny zapewnia zasilanie głowicy badawczej olejem, o zadanym ciśnieniu w zakresie $0\div 2 \text{ MPa}$ i temperaturze $290\div 520 \text{ K}$ (rys. 8).



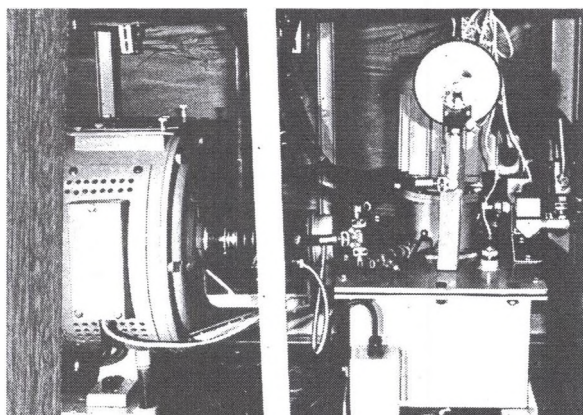
Rys. 5. Widok ogólny stanowiska SBU – 1
Fig. 5. The general picture of test stand SBU-1



Rys. 6. Widok głowicy badawczej
Fig. 6. The picture of testing hub



Rys. 7. Elementy badanego węzła: wałek, pierścień uszczelniający i pokrywa
 Fig. 7. Elements of testing node: the shaft, the sealing ring, the hood



Rys. 8. Układ napędowo-hydrauliczny
 Fig. 8. The hydraulic-drive system

Konstrukcja stanowiska badawczego zapewnia [6]:

- prowadzenie badań typoszeregu pierścieni uszczelniających, stosowanych w maszynach roboczych. Zakres średnic pierścieni uszczelniających uwarunkowany jest posiadaniem odpowiednich wymiennych wałków i pokryw,
- możliwość symulacji niedokładności technologicznych, a zwłaszcza mimośrodowości osadzania pierścieni w zakresie $0+1$ mm z dokładnością $\pm 0,01$ mm,
- możliwość prowadzenia badań w programie automatycznym lub przy sterowaniu ręcznym,
- regulację parametrów stanu oleju w granicach: ciśnienie $p = 0+2$ MPa, temperatura $T = 290+520$ K,
- prowadzenie programowanych badań jako kombinacji: mimośrodowości osadzenia pierścieni, ciśnienia i temperatury oleju, prędkości obrotowej w zakresie $0+6000$ min^{-1} oraz czasu badań każdego z ośmiu cykli w zakresie od kilku sekund do 99 godzin,
- realizację złożonego programu badań.

Stanowisko badawcze SBU-1 pozwala na zrealizowanie pełnego programu symulacji warunków pracy pierścieni uszczelniających wały, możliwych do wystąpienia w procesie eksploatacyjnym maszyn. Zasadniczą zaletą tego stanowiska jest pełna, zautomatyzowana kontrola podstawowych parametrów badawczych, jak: prędkość obrotowa, ciśnienie i temperatura cieczy roboczej, czas trwania cyklu i programu badawczego. Racjonalne wykorzystanie możliwości badawczych stanowiska pozwala na udzielenie szeregu odpowiedzi o charakterze poznawczym i użytkowym w rozwijającej się, nowej dyscyplinie naukowej – hermetologii.

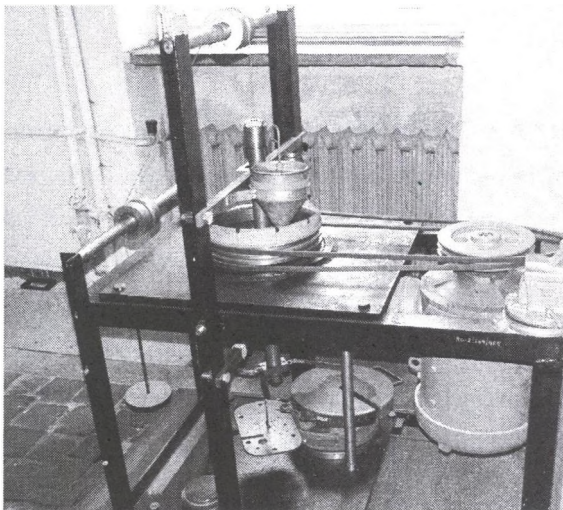
3.4. Stanowisko do badań tarcia pomiędzy pierścieniem uszczelniającym a wałem (stanowisko SBU-2)

Przeznaczenie i koncepcja stanowiska badawczego

Stanowisko służy do:

- wyznaczenia momentu tarcia M_T pomiędzy wałem a pierścieniem uszczelniającym jako funkcji wielkości nacisku promieniowego p ,
- określenia korelacji pomiędzy wyznaczonym momentem tarcia M_T a trwałością (szczelnością) pierścienia, określonej w badaniach trwałościowych na stanowisku SBU-1.

Na rysunku 9 przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego.



Rys. 9. Widok ogólny stanowiska typu SBU-2
Fig. 9. The general picture of test stand SBU-2

Koncepcja stanowiska opiera się na następujących założeniach:

- rozwiązanie konstrukcyjne wężła uszczelniającego powinno pozwalać na określenie momentu tarcia dla możliwie szerokiego zakresu postaci konstrukcyjnych i wielkości średnic wewnętrznych; mogą zawierać się one w granicach od 40 do 200 mm, określenie momentu tarcia winno być możliwe dla zakresu prędkości obrotowych, odpowiadających większości praktycznych przypadków; przyjmuje się bezstopniową regulację prędkości obrotowej, poprzez zastosowanie silnika prądu stałego; umożliwia to zmiany prędkości w zakresie od 0 do 1500 min^{-1} ,
- sposób wywołania nacisków pomiędzy wargą pierścienia a czopem winien gwarantować jednoznaczne ich określenie; przewiduje się oryginalny sposób realizacji tego warunku, poprzez zastosowanie czopa stożkowego obciążonego osiowo odpowiednimi ciężarkami, umożliwiającymi uzyskanie nacisku w zakresie od 0 do 0,05 MPa; nacisk uzyskany poprzez obciążenie czopa stożkowego w praktyce symuluje pasowanie pierścienia na wale,
- sposób określenia momentu tarcia powinien gwarantować dokładność pomiarów; uzyskuje się to poprzez zastosowanie czujników tensometrycznych, układów fotooptycznych i układów rejestrujących, a w następnych etapach zostanie wykorzystana komputerowa rejestracja wielkości mierzonych i ich analiza analogowo-cyfrowa.

4. Podsumowanie

Eksperyment stanowi podstawową metodę identyfikacji procesów tribologicznych, a więc związanych z opisem jakościowym, a zwłaszcza ilościowym tarcia, zużycia i smarowania. Dotyczy to zarówno poziomu badań podstawowych, stosowanych, jak i eksploatacyjnych. Ta metoda identyfikacji opiera się na uporządkowanym systemie modelowego odwzorowania procesów i zjawisk tribologicznych, odpowiadających rzeczywistym sytuacjom technicznym. Bazę tego systemu stanowi zespół stanowisk badawczych, zwanych tribometrami i przypisanych im odpowiednich metodyk prowadzenia eksperymentu.

Elementy wykonawcze tribometrów, zwane zazwyczaj głowicami badawczymi, stanowią różnorodne postaci skojarzeń kinematycznych elementów próbnych, odpowiadające realizacji głównych rodzajów ruchu w warunkach tarcia ślizgowego, tocznego oraz tocznego z poślizgiem, przy styku suchym lub ze smarowaniem.

Przedstawione stanowiska badawcze, stosowane w badaniach prowadzonych w Zakładzie

Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Instytutu Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, pozwalają na ilościowy i jakościowy opis procesów tribologicznych zarówno dla typowych węzłów tarcia maszyn, jak i dla węzłów uszczelniających, bardzo istotnych z punktu widzenia trwałości i niezawodności. Uzyskane wyniki tych badań, przy zastosowaniu metod podobieństwa fizycznego [8], mogą być wykorzystywane w prognozowaniu trwałości elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń.

LITERATURA

1. Leszek W., Wojciechowicz B., Zwierzycki W.: Metodologia generowania i realizacji programów badawczych w nauce o eksploatacji obiektów technicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Wydawnictwo ITE, Poznań – Radom 2004.
2. Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993.
3. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i Tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
4. Jünemann H. i in.: Tribometrie. Expert – Verlag, Renningen-Malmsheim 1997.
5. Czichos H., Habig K.H.: Tribologie Handbuch. Reibung und Verschleiss. Vieweg-Verlag, Braunschweig – Wiesbaden 1992.
6. Dokumentacja techniczna tribometrów: AMSLER i TIMKEN oraz stanowisk do badań uszczelnień SBU-1 i SBU-2.
7. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
8. Muller L.: Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli. Biblioteka Naukowa Inżyniera. PWN, Warszawa 1983.
9. Gierek A.: Zużycie tribologiczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Senatorski