

**POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
KATEDRA KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN**



**IDENTYFIKACJA RODZAJÓW ZUŻYCIA ELEMENTÓW MASZYN  
OCENA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH SUBSTANCJI SMAROWYCH**

**ĆWICZENIE LABORATORYJNE NR 3  
Z PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN**

Opracował: dr inż. Krzysztof DRUET

GDAŃSK 2002

## **1. CEL ĆWICZENIA.**

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się studentów z podstawowymi rodzajami zużycia trybologicznego elementów maszyn oraz właściwościami użytkowymi substancji smarowych, ze szczególnym uwzględnieniem właściwości trybologicznych, a także przedstawienie sposobów ich oceny.

## **2. ZAKRES ĆWICZENIA.**

Ćwiczenie obejmuje :

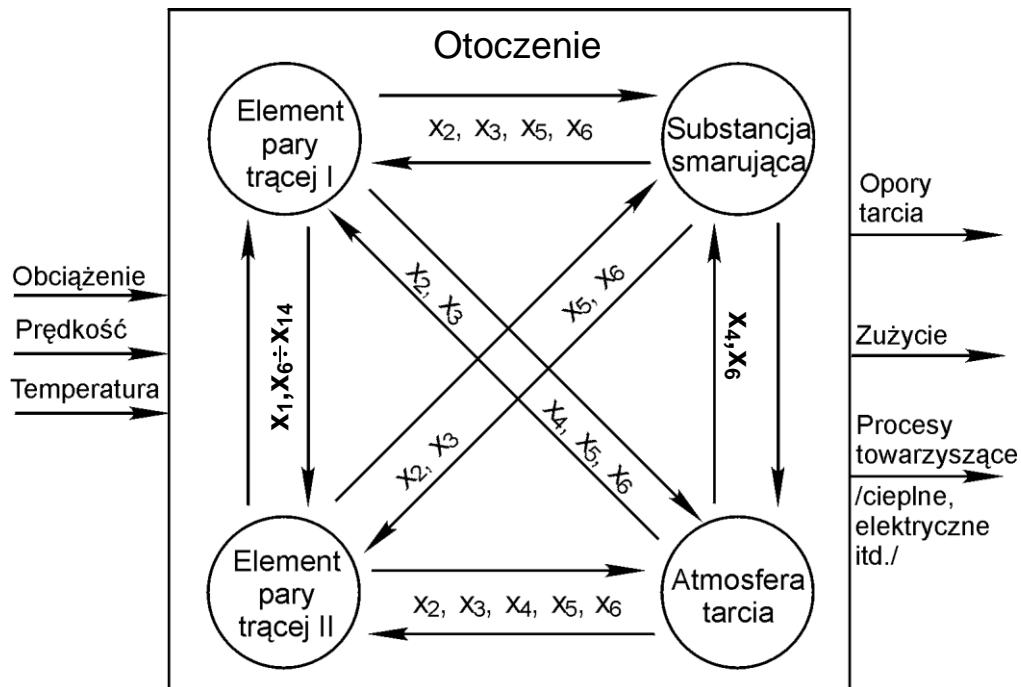
- a) rozpoznanie kilku rodzajów zużycia elementów maszyn. Wskazanie prawdopodobnych przyczyn nadmiernego zużycie (ocena roli substancji smarowej);
- b) przeprowadzenie testów wpływu oleju na proces tarcia w skojarzeniu 4-kulowym przy tarcia ślizgowym, sformułowanie wniosków z badań;
- c) zapoznanie z innymi metodami oceny trybologicznych właściwości olejów, w tym z metodami znormalizowanymi.

## **3. OPIS ĆWICZENIA.**

### **3.1. Wprowadzenie.**

Od maszyn i urządzeń użytkownik oczekuje maksymalnej sprawności, określonej niezawodności i trwałości, przy minimalnych kosztach. Decydującą rolę w spełnieniu tych oczekiwań odgrywają węzły ruchowe, w których zachodzą procesy odpowiedzialne za straty energetyczne, zużywanie się współpracujących elementów itd. Do węzłów tych doprowadza się smary, mające za zadanie : obniżenie oporów tarcia, zmniejszenie intensywności procesów destrukcji powierzchni trących, zabezpieczenie przed korozją, odprowadzenie ciepła.

Węzeł ruchowy maszyn stanowi system, który schematycznie można przedstawić, jak na rysunku 1.



**Rysunek 1.** Model węzła ruchowego maszyny jako system w stanie dynamicznym (z uwzględnieniem oddziaływań kinematyczno dynamicznych i zewnętrznych oddziaływań cieplnych). Przez  $x_1, \dots, x_{14}$  oznaczono oddziaływanie wewnątrz systemu.

Pomiędzy jego elementami zachodzą następujące oddziaływania :

- $X_1$  - adhezja – łączenie się powierzchniowych warstw 2 różnych ciał (faz) doprowadzonych do zetknięcia, wskutek przyciągania między cząsteczkowego;
- $X_2$  - adsorpcja fizyczna – zagęszczanie się substancji na powierzchni ciała pod działaniem sił przyciągania międzycząsteczkowego. Jest procesem odwracalnym;
- $X_3$  – chemisorpcja – adsorpcja zachodząca wskutek tworzenia się wiązań chemicznych. Jest zwykle procesem nieodwracalnym;
- $X_4$  – utlenianie – proces chemiczny przebiegający z oddaniem elektronów przez atom lub jon. W szczególnym przypadku – łączenie się danej substancji z tlenem;
- $X_5$  – korozja – stopniowe niszczenie tworzyw wskutek chemicznego lub elektrochemicznego oddziaływania środowiska;
- $X_6$  – dyfuzja – przenikanie cząsteczek jednej substancji w obręb drugiej przy bezpośrednim zetknięciu tych substancji;
- $X_7$  – odkształcenia sprężyste – odkształcenia zanikające po usunięciu statycznego układu sił zewnętrznych, który je wywołał;

- $X_8$  – odkształcenia plastyczne – odkształcenia, które nie zanikają po usunięciu statycznego układu sił zewnętrznych, który je wywołał;
- $X_9$  – mikroskrawanie – wykrawanie w materiale określonej mikroobjętości na skutek skrawającego działania, znajdujących się między powierzchniami tarcia lub opływających powierzchnię tarcia cząstek ścierniwa znacznie twardszego od tworzywa elementu lub też na skutek skrawającego działania nierówności twardszej powierzchni;
- $X_{10}$  – brzdowanie – wgłębianie elementu jednego z ciał współpracujących w materiał drugiego i plastyczne wyciśnięcie w nim bruzdy w czasie ruchu względnego;
- $X_{11}$  – rysowanie – tworzenie rys w ścieranym materiale, przez przesuwany się element ciała współpracującego (na skutek wykrawania i odsuwania materiału na boki);
- $X_{12}$  – odrywanie – poważanie i oddzielanie przez występy jednej powierzchni, występow drugiej powierzchni;
- $X_{13}$  – zrywanie połączeń tarciovych – rozrywanie połączeń tarciovych wytworzonych w procesie adhezji, zgrzania lub zespolenia wierzchołków nierówności dwóch powierzchni;
- $X_{14}$  – przemiany strukturalne lub fazowe – przejście substancji z jednej fazy lub struktury w drugą.

Oddziaływania te zachodzą głównie na granicach faz. Pierwsze 6 oddziaływań ( $x_1 \dots x_6$ ) występuje także w stanie statycznym, gdy nie są przyłożone do systemu zewnętrzne oddziaływania kinematyczno-dynamiczne oraz cieplne.

### **3.1.1.1. Zużycie.**

Zużyciem (trybologicznym) nazywamy ubytek objętości warstwy wierzchniej powierzchni trącej spowodowany (jedno- lub wielokrotnym) oddziaływaniem powierzchni współpracującej, bezpośrednio lub za pośrednictwem substancji stałych, ciekłych lub gazowych znajdujących się pomiędzy tymi powierzchniami. Jest ono wynikiem procesu ciągłych, niszczących zmian pierwotnego stanu masy, składu chemicznego, struktury i stanu naprężenia materiału powierzchniowej warstwy elementów maszyn, spowodowanego oddziaływaniem elementów współpracujących i środowiska.

Biorąc jako kryterium podziału, wiódący proces niszczenia, procesy zużycia można sklasyfikować wg tabeli 1.

**TABELA 1**

**Trybologiczne procesy zużycia**

Zużycie	Elementarny proces zużycia	
Ścierne	Mikroskrawanie	Dominują doraźne procesy niszczenia
Adhezyjne	Powstawanie połączeń adhezyjnych	Dominują przygotowane procesy niszczenia
Przez utlenianie	Utlenianie	
Zmęczeniowe (wykruszenie, pitting, łuszczenie)	Zmęczeniowe oddziaływanie naprężeń stykowych	
Ciarno - korozyjne	Połączony wpływ doraźnych i przygotowanych procesów niszczenia	

**ZUŻYCIE ŚCIERNE** - niszczenie powierzchni współpracujących elementów w wyniku skrawającego, bruzdzącego, rysującego oddziaływania nierówności powierzchni, cząstek ciał obcych (ścierniwa) lub produktów zużycia.

**ZUŻYCIE ADHEZYJNE** - niszczenie warstwy wierzchniej współpracujących elementów w wyniku powstawania i rozrywania połączeń adhezyjnych, mikrozgrzein i mikrospoin tworzących się między wierzchołkami nierówności współpracujących powierzchni. Pojawia się ono praktycznie przy każdej współpracy elementów w procesie tarcia, z wyjątkiem przypadków, gdy są one całkowicie oddzielone warstwą substancji smarującej.

Wyróżnić można zużycie adhezyjne (sczepianie) I rodzaju (na zimno) polegające na powstawaniu połączeń adhezyjnych między wierzchołkami przeciwległych powierzchni i ich natychmiastowym zrywaniu oraz występujące w warunkach dużych prędkości i obciążeń, a także w przypadku złego chłodzenia trących elementów, szczególnie pracujących w podwyższonej temperaturze – zużycie adhezyjne (sczepianie) II rodzaju (na gorąco), przy którym znaczny wzrost temperatury w warstwie wierzchniej metalu powoduje zgrzanie lub zespawanie doprowadzonych do stanu ciastowatego lub nadtopionych wierzchołków nierówności oddziaływujących na siebie powierzchni.

W skrajnym przypadku, może wystąpić trwałe połączenie stykających się obszarów trących powierzchni metalowych – ZRASTANIE TARCIOWE (zatarcie).

**ZUŻYCIE PRZEZ UTLENIANIE** – niszczenie warstwy wierzchniej współpracujących elementów, polegające na powstawaniu powierzchniowych ubytków materiału w wyniku tworzenia się tlenków oraz ich usuwaniu pod działaniem siły tarcia. Warunkiem występowania takiego procesu zużycia, jest szybkość tworzenia warstewek tlenków większa, niż szybkość ich ścierania z powierzchni tarcia.

Zużycie przez utlenianie, nazywane również „zużyciem normalnym”, jest uważane za jedyny dopuszczalny proces zużycia. W danych warunkach tarcia, każdy inny proces zużycia powodowałby znacznie większe ubytki materiału. Utlenianie chroni zatem trące się ciała przed intensywnym niszczeniem.

**ZUŻYCIE ZMĘCZENIOWE** - miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału spowodowane są zmęczeniem materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania naprężeń stykowych w warstwach wierzchnich współpracujących elementów. Wyróżnić można: WYKRUSZANIE – występuje przy tarciu ślizgowym, ŁUSZCZENIE – przy tarciu tocznym (lub toczno-ślizgowym) w styku suchym lub niedostatecznie smarowanym oraz PITTING – przy tarciu tocznym (lub toczno-ślizgowym) w styku smarowanym.

W procesie pittingu wyróżnić można 3 etapy :

- zmęczenie materiału i inicjacja pęknięć,
- rozwój i rozprzestrzenienie się pęknięć w wyniku rozklinowującego działania oleju,
- wrywanie przez olej cząstek metalu, które utraciły spójność z materiałem macierzystym – w efekcie na powierzchni elementu powstają charakterystyczne kratery, często w kształcie muszli.

W procesie pittingu istotne jest zatem oddziaływanie smaru – zarówno mechaniczne, polegające na rozklinowywaniu pęknięć powierzchniowych przez włączany smar, jak również związane z oddziaływaniem na powierzchnię metalu zawartych w smarze substancji o dużej zdolności do adsorpcji fizycznej i chemisorpcji, które zmniejszają energię powierzchniową i spójność metalu. Ponadto, w czasie przetaczania się elementów po sobie, silnie związane z podłożem zaadsorbowane warstwy oddziałują na spękaną warstwę wierzchnią odpowiednią składową ściskającą lub rozciągającą. Składowa rozciągająca powoduje wrywanie cząstek materiału, które utraciły lub zmniejszyły spójność z materiałem rodzimym.

**ZUŻYCIE CIERNO-KOROZYJNE** (fretting) – niszczenie warstwy wierzchniej polegające na powstawaniu miejscowych ubytków materiału w elementach poddanych działaniu drgań lub niewielkich poślizgów (nawet w skojarzeniach „nominalnie” nieruchomych), w wyniku cyklicznego oddziaływania obciążeń oraz intensywnego korozyjnego oddziaływania środowiska.

### **3.1.2. Właściwości użytkowe substancji smarowych.**

Idealna realizacja funkcji smaru miała by miejsce, gdyby smar tworzył odpowiednio wytrzymałą warstwę, rozdzielającą przemieszczające się względem siebie, dociskane do siebie powierzchnie trące, nie dopuszczające do bezpośredniego wzajemnego oddziaływania ich mikronierówności. Niestety, w szerokich przedziałach parametrów ruchu i obciążenia ciągłą warstwę smarową można uzyskać jedynie w przypadku smarowania hydrostatycznego.

Przy smarowaniu hydrodynamicznym i elasto-hydrodynamicznym nie jest możliwe tworzenie się ciągłej warstwy smarowej podczas rozruchu maszyny. Warstwa smarowa będąca w stanie przeniesić zadane obciążenie, tworzy się dopiero po przekroczeniu krytycznej prędkości względnej smarowanych powierzchni, która zależy od: obciążenia, formy i odkształcalności styku oraz lepkości oleju – uzależnionej od temperatury i ciśnienia. Poniżej prędkości krytycznej dochodzi zatem do bezpośredniego siłowego oddziaływania trących powierzchni. Bezpośrednie oddziaływanie chropowatości suchych powierzchni prowadziłoby do gwałtownego zużycia w wyniku mikroskrawania, bruzdowania, adhezji, mikrospawania, ścinania mikropołączeń. Przed bezpośrednim stykiem i łatwym łączeniem się atomów i kryształów powierzchniowych we wspólne struktury chronią w tym przypadku jedynie warstwy tlenków, zaadsorbowane cząsteczki gazów i pary wodnej. Cienkie i kruche warstewki tlenków chronią powierzchnie trące przed lawinową destrukcją jedynie przy bardzo małych obciążeniach. Obecność smaru powoduje, że na powierzchniach trących tworzą się warstwy graniczne utworzone głównie z zaadsorbowanych polarnych składników smaru, a także warstwy chemicznie zmodyfikowane w wyniku reakcji chemicznych aktywnych składników smaru.

Praktycznie we wszystkich smarowanych olejami węzłach, w mniejszym lub większym stopniu, przejściowo bądź trwale, lokalnie albo w całej strefie tarcia, występują wszystkie opisane stany.

Od smaru oczekuje się zatem realizacji następujących funkcji :

1. Tworzenie warstwy rozdzielającej trące powierzchnie dzięki odpowiedniej charakterystyce lepkościowo – temperaturowo – ciśnieniowej (istotne dla smarowania hydrodynamicznego lub elastohydrodynamicznego);
2. Tworzenie warstwy granicznej na powierzchniach tarcia dzięki zdolności do adsorpcji;
3. W sytuacjach, gdy adsorpcyjna warstwa graniczna nie jest skuteczna, tworzenie na powierzchniach tarcia warstwy chemicznie zmodyfikowanej, dzięki zdolności do wyzwalań reagenta aktywnego chemicznie po przekroczeniu lokalnej temperatury progowej.

## **WŁAŚCIWOŚCI OLEJÓW**

1. Lepkość – podstawowa właściwość oleju decydująca o nośności warstwy smarowej i o oporach ruchu. Lepkość maleje ze wzrostem temperatury, a rośnie ze wzrostem ciśnienia.
2. Wskaźnik lepkości (indeks wiskozowy) – charakteryzuje szybkość zmian lepkości oleju przy zmianach jego temperatury.
3. Piezowspółczynnik lepkości – charakteryzuje wpływ ciśnienia na lepkość.
4. Temperatura krzepnięcia.
5. Temperatura zapłonu.
6. Właściwości przeciwzużyciowe – cecha smaru zapewniająca odporność na zużycie w warunkach tarcia granicznego poprzez tworzenie na smarowanych powierzchniach warstwy zaadsorbowanych cząsteczek oleju.
7. Właściwości przeciwzatarciowe – cecha smaru umożliwiająca tworzenie na powierzchniach trących warstwy ciała stałego stanowiącego związek chemiczny. Jest on tworzony bezpośrednio z powierzchnią metalu albo przez substancję aktywną chemicznie znajdującą się w smarze (np. siarka) lub też powstającą wskutek termicznego rozkładu znajdującej się w smarze substancji chemicznie obojętnej.
8. Właściwości przeciwkorozyjne.
9. Właściwości przeciwutleniające.
10. Właściwości przeciwpieniące.
11. Właściwości przeciwemulgujące.
12. Właściwości dezaktywujące szkodliwe działanie niektórych dodatków na niektóre metale.

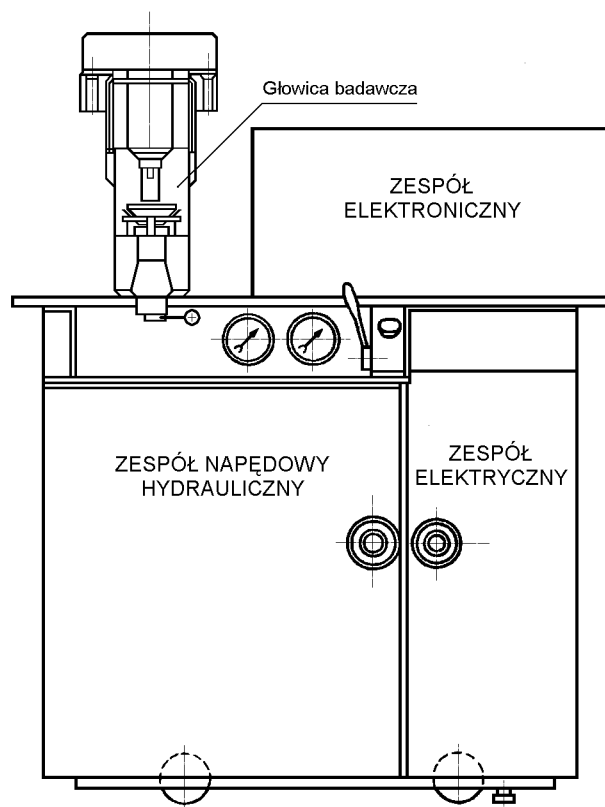


### 3.2. Badania trybologiczne właściwości olejów.

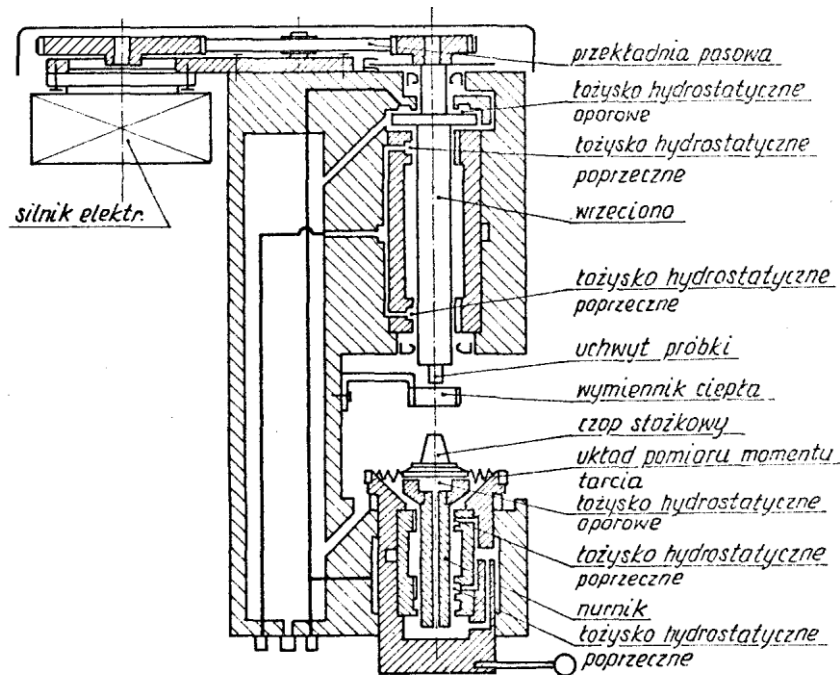
Tarcie na urządzeniach laboratoryjnych wywołuje się, a następnie bada jego przebieg i skutki, zarówno w celu poznania jakościowych lub ilościowych zależności przyczynowo-skutkowych związanych z zachodzącym procesem, jak też z uwagi na potrzebę oceny jakości tworzyw konstrukcyjnych i substancji smarowych, a także elementów lub całych zespołów maszyn – pochodzących z bieżącej produkcji albo nowo opracowywanych. Pożądanym efektem badań może być np. wyznaczenie charakterystyk trwałościowo-niezawodnościowych badanego obiektu.

Trybologiczne właściwości oleju ocenia się zwykle na podstawie jego wpływu na zużycie smarowanych elementów oraz jego zdolności do zmniejszania oporów tarcia. Stosuje się w tym celu często skojarzenia modelowe, ułatwiające uzyskanie ściśle określonych, powtarzalnych warunków badań. Szereg stosowanych metod i urządzeń badawczych znormalizowano – patrz punkt 4.

W Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej skonstruowano w celu prowadzenia badań tarcia urządzenie „TRYBOMETR PT”, (rys. 2 i 3).



Rysunek 2. Ogólny widok Trybometru PT-3AB.



**Rysunek 3.** Schemat głowicy badawczej Trybometru PT-3.

Umożliwia ono badanie skojarzeń obciążonych osiowo, w których jeden z elementów wykonuje ruch obrotowy (wiruje dzięki osadzeniu w uchwycie pionowego wrzeciona Trybometru), drugi zaś jest podparty w sposób zapewniający samonastawność układu i zabezpieczony przed obrotem przez układ mierzący opory ruchu (moment tarcia).

Badania można prowadzić przy regulowanych wymuszeniach (obciążenie, prędkość, temperatura), ze smarowaniem lub w warunkach tarcia suchego.

W prowadzonych na Trybometrze badaniach właściwości olejów często wykorzystuje się układ 4-kulowy – toczny lub ślizgowy (rys. 4). Układ toczny umożliwia prowadzenie porównawczych badań wpływu olejów na trwałość powierzchni elementów uwarunkowaną występowaniem pittingu. Układ ślizgowy umożliwia między innymi wyznaczanie wpływu olejów na:

- a) zużycie przy obciążeniu stałym lub narastającym;
- b) zależność współczynnika tarcia od nacisków;
- c) obciążenie, przy którym następuje gwałtowny wzrost współczynnika tarcia.

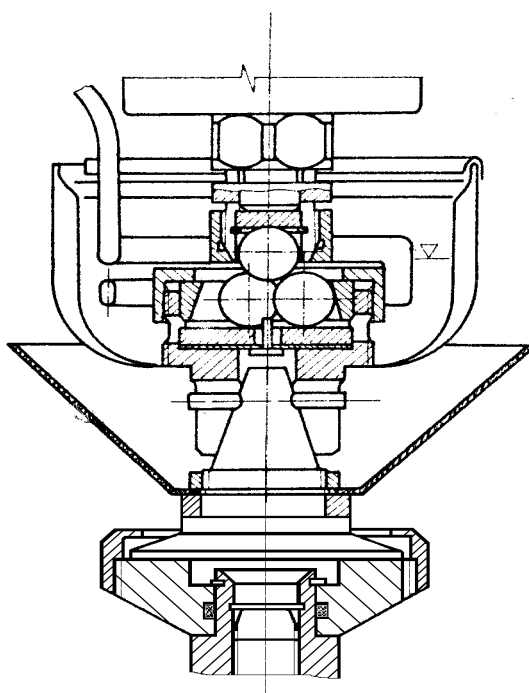
Badania prowadzone przy stałej prędkości tarcia i stałej temperaturze, obciążenie zaś narasta liniowo.

Poziom prędkości, temperatury oraz prędkości narastania obciążenia (oraz jego wartość maksymalna) są regulowane.

Rejestrowane jest obciążenie i moment tarcia. Celowe jest użycie rejestratora X-Y dla bezpośredniego uzyskania wykresów momentu tarcia w funkcji obciążenia.

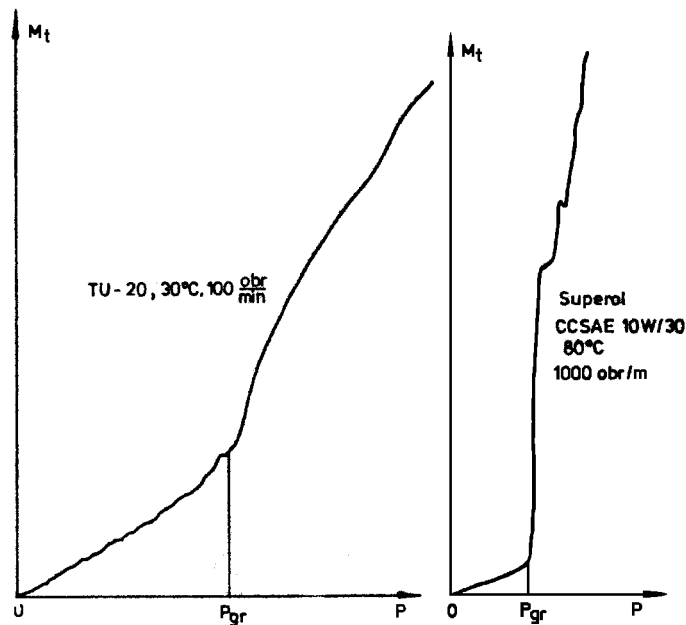
Przebieg badań jest następujący:

- 1) układ badawczy (rys. 4), w którym stosuje się kule łożyskowe o średnicy 12,7 mm. (1/2 cala) , zalać badanym olejem oraz doprowadzić do wymaganej temperatury;
- 2) włączyć rejestrator;
- 3) układ obciążyć wstępnie siłą ok. 10 N;
- 4) włączyć napęd wrzeciona z górną kulą;
- 5) uruchomić narastanie obciążenia. Do wyznaczania zużycia przyjmuje się zwykle czas narastania obciążenia z przedziału 10 – 60 minut, natomiast do oznaczania obciążenia, przy którym następuje wzrost oporów ruchu, czas ten może być krótszy, np., 5 – 60 sekund;



**Rysunek 4.** Układ 4 kulowy ślizgowy.

- 6) Gdy celem badań jest oznaczenie obciążenia, przy którym występuje gwałtowny wzrost oporów ruchu, należy w trakcie próby obserwować wykres momentu tarcia (rys. 5) i po jego gwałtownym wzroście próbę przerwać, oznaczając obciążenie, przy którym to nastąpiło. Do przerywania próby można wykorzystać wyłącznik progowy, reagujący na wielkość mierzonego momentu tarcia, wbudowany w układ sterująco – pomiarowy stanowiska.



**Rysunek 5.** Przykładowe wykresy oporów ruchu (momentu tarcia  $M_t$ ) w funkcji obciążenia  $P$  przy stałej prędkości obrotowej górnej kuli i temperaturze.

### 3.3. Zadania do wykonania przez ćwiczących.

- Zapoznać się z budową Trybometru PT-3.
- Przeprowadzić testy 4-kulowe przy tarcu ślizgowym przy narastającym obciążeniu dla kilku różnych olejów oraz bez smarowania (korzystając z pomocy prowadzącego ćwiczenie). Zinterpretować otrzymane wykresy momentu tarcia w funkcji obciążenia.
- Zapoznać się z innymi układami badawczymi stosowanymi w badaniach na Trybometrze.
- Na podstawie oględzin uszkodzonych elementów maszyn lub elementów układów badawczych – rozpoznać występujące na nich rodzaje zużycia. Określić ich prawdopodobne przyczyny oraz zaproponować sposoby zwiększenia trwałości narażonych na zużycie elementów (dyskusja z prowadzącym ćwiczenie).

### 3.4. Uwagi dotyczące zaliczenia ćwiczenia.

Warunkiem zaliczenia ćwiczenia jest przygotowanie się z wykorzystaniem instrukcji otrzymanej tydzień wcześniej, czynny udział w trakcie ćwiczenia, prawidłowe formułowanie wniosków z przeprowadzonych badań i oględzin różnych form zużycia elementów maszyn.

Po ćwiczeniu nie będzie wykonywane żadne sprawozdanie.

W przypadku otrzymania oceny negatywnej student będzie miał jeszcze możliwość odbycia pod koniec semestru kolokwium zaliczającego.

### 4. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA (nie wymagana do realizacji ćwiczenia).

1. Bowden F.P., Tabor D. : Wprowadzenie do trybologii. Warszawa WN-T 1980.
2. Hebda M., Wachal A. : Trybologia. Warszawa WN-T 1980.
3. Łuczak A., Mazur T. : Fizyczne starzenie elementów maszyn. Warszawa WN-T 1981
4. PN-87/C – 04048. Przetwory naftowe. Badania właściwości przeciwzużyciowych cieczy hydraulicznych z pomocą pompy łopatkowej /próba Vickersa/.
5. PN-87/C – 04073. Badania własności smarnych olejów i smarów metodą Tinkena.
6. PN-76/C – 04147. Badanie własności smarnych olejów i smarów.
7. PN-78/C – 04169. Badanie zdolności olejów smarowych do przenoszenia do przenoszenia obciążeń na stanowisku badawczym FZ6.
8. PN-83/H – 04302. Badania wytrzymałościowe metali. Próba tarcia w układzie : 3 wałeczki – stożek.
9. PN-80/H – 04324. Metale. Badanie na zmęczenie stykowe.
10. PN-91/H – 04328. Badania wytrzymałościowe metali. Próba tarcia w obecności warstwy ścierniej.
11. PN-79/H – 04329. Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia przy wzrastającym nacisku jednostkowym na maszynie typu Amsler.
12. PN-82/H – 04332. Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera.
13. PN-73/M – 04250. Warstwa wierzchnia. Nazwy i określenia.