

Michał MICHALAK*, Witold PIEKOSZEWSKI*, Marian SZCZEREK*

METODA I URZĄDZENIE DO WYSOKOTEMPERATUROWYCH BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI ŚRODKÓW SMAROWYCH

A NEW TEST METHOD AND TESTING DEVICE FOR A HIGH TEMPERATURE TRIBOLOGICAL INVESTIGATION OF LUBRICANT PROPERTIES

Słowa kluczowe:

smary plastyczne, badania tribologiczne, urządzenie testowe

Key words:

greases, tribological investigation, testing devices

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono urządzenie do badania tribologicznych właściwości smarów plastycznych przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach przy niskich wartościach obciążenia. Jest to urządzenie opracowane w ramach zadania III.2.2 Programu Strategicznego finansowanego ze środków UE, którego charakterystyczną cechą jest testowy węzeł tarcia w postaci

* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska.

typowego łożyska kulkowego. Omówiono rozwiązania konstrukcyjne zarówno zespołów mechanicznych, jak i systemów sterująco-pomiarowych. Przedstawiono wnioski z analizy przeprowadzonych badań weryfikacyjnych modelu urządzenia będących podstawą opracowania dokumentacji prototypu urządzenia. Omówiono procedurę prowadzenia badań.

WPROWADZENIE

Postęp technologiczny w budowie maszyn, stosowanie coraz doskonalszych materiałów, konstrukcji i środków smarowych, zwiększają popyt na stanowiska do badania procesów determinujących trwałość i niezawodność ich działania. Stanowiska te, umożliwiające niekiedy badania w zakresie właściwym dla całych laboratoriów, służą badaniu gotowych elementów maszyn, próbek materiałów, środków smarowych, wpływu warunków pracy części maszyn na ich zużycie i wielu innych parametrów zależnych od założeń konstruktorów i wymagań użytkowników.

Ocena właściwości środków smarowych oparta na różnego typu aparatach jest przedmiotem wielu przepisów normalizacyjnych [L. 1÷7]. Ze względu na różne wymagania poszczególnych norm oraz niezgodności przy definiowaniu niektórych parametrów charakteryzujących własności smaru tych środków, porównywalność wyników badań wykonywanych w różnych ośrodkach badawczych jest dalece niezadowolająca.

Niezadowolająca odtwarzalność wyników badań tribologicznych wraz z niemożnością zbudowania związków korelacyjnych dla różnych charakterystyk tribologicznych świadczy o lukach w stanie wiedzy na temat tarcia i zużycia. Wytyczenie kierunków działań zmierzających do poprawy odtwarzalności i powtarzalności jest szczególnie istotne dla poprawy jakości prognozowania charakterystyk funkcjonalnych, trwałościowych i niezawodnościowych, a także w pracach konstrukcyjnych, technologicznych oraz w procesach eksploatacji.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie opracowanego i wykonanego, stanowiska do badań tribologicznych środków smarowych, spełniającego wymogi procedur ujętych w normie ASTM D 3336 [L. 8]. Stanowisko to może być stosowane do określenia właściwości tribologicznych smarów przeznaczonych do łożysk tocznych obciążonych niewielkimi siłami i pracujących z dużymi prędkościami obrotowymi oraz w podwyższonej temperaturze.

Na świecie istnieją takie urządzenia, jednak ich wysoki koszt jest skuteczną barierą dla krajowych producentów smarów plastycznych, a przede wszystkim ośrodków badawczych zajmujących się tymi zagadnieniami.

KONCEPCJA METODYKI

Brak satysfakcjonującej powtarzalności i odtwarzalności wyników badań tribologicznych warunkowana jest wieloma czynnikami opisanymi szerzej w monografii [L. 9]. Ponadto nie ma możliwości uogólniania i przenoszenia wyników

eksperymentalnych badań tribologicznych uzyskanych jedną metodą badawczą na inne. Dlatego w istniejących metodach badań eksperymentalnych dąży się do możliwie pełnego zidentyfikowania zachodzących w styku tarciovym zjawisk tribologicznych. Dobór odpowiedniej metody badawczej do danej sytuacji tribologicznej często jest barierą trudną do pokonania. Sprostanie wymaganiu precyzyjnego odtworzenia mechanizmu zużywania występującego w rzeczywistym węźle tarcia wymaga, opierając się na dotychczasowym stanie wiedzy, określenia najistotniejszych jego cech. W wyniku prac prowadzonych w ramach I i II etapu projektu VAMAS powstało tzw. Świadcstwo Techniczne (VAMAS Technical Note No. 1) [L. 10]. Należy zaznaczyć, że celem opracowania tego świadcstwa było stworzenie wzorcowej metody badań służącej poprawie powtarzalności i porównywalności testów na urządzeniach badawczych posiadających identyczne węzły tarcia. Definiuje ona zużycie oraz system tribologiczny i występujące w nim zależności. Zaleca, dla otrzymania powtarzalnych wyników w badaniach porównawczych, utrzymanie takich samych wartości podstawowych parametrów tribologicznych.

Wymagania te dotyczą:

- geometrii węzła tarcia (w tym chropowatości powierzchni),
- materiałów elementów węzła, z wyszczególnieniem składu chemicznego, mikrostruktury, twardości,
- otoczenia (atmosfery), z podaniem jego składu chemicznego oraz względnej wilgotności,
- parametrów pracy węzła, takich jak: rodzaj ruchu, obciążenie, prędkość, temperatura i droga tarcia,
- przygotowania (czyszczenia) elementów testowych,
- mierzonych wielkości.

W nowo opracowanych metodach (szczególnie normalizowanych) powinny być również podane przykładowe dane liczbowe określające charakterystyki tarciove i życiove, będące wynikami badań materiałów przyjętych za wzorcove.

Opracowana i przedstawiona w ramach niniejszego opracowania metoda badawcza ma służyć do oceny właściwości smarów w łożyskach pracujących w warunkach niskich obciążeń, wysokich prędkości oraz podwyższonych temperatur.

Urządzenie winno posiadać testowy węzeł tarcia w postaci łożyska tocznego kulkowego, które będzie smarowane badanym smarem, zamocowanego na wrzecionie obracającym się z prędkością do 10 000 obr./min pod niewielkim obciążeniem w podwyższonej temperaturze. Przyjęto, że wynikiem badania będzie czas pracy stanowiska do wystąpienia uszkodzenia węzła (łożyska) lub przekroczenia obciążenia napędu głównego.

Przyjęto następujące kryteria zakończenia biegu badawczego:

1. Wzrost obciążenia wrzeciona o 300% wyznaczanego wzrostem mocy w warunkach ustabilizowanej temperatury łożyska testowego i prędkości.

2. Wzrost temperatury łożyska testowego o 15°K ponad temperaturę stabilną (należy pomijać wzrost pojawiający się do 30 min od osiągnięcia temperatury stabilnej).

Wymogi normy ASTM D 3336 [**L. 8**] dotyczące metody badania smarów plastycznych pracujących w podwyższonych temperaturach są następujące:

1. Prędkość obrotowa wrzeciona: 10 000^{±200} obr./min.
2. Komora grzewcza zapewniająca utrzymanie stałej temperatury 644°K przez 1,5 h.
3. Średnica osadzenia łożyska testowego i podporowego: 20,0 mm.
4. Łożysko podporowe i testowe powinny mieć zapewnioną możliwość przemieszczania poosiowego.
5. Zewnętrzne łożysko podporowe powinno być wyposażone w podkładkę sprężystą wywierającą siłę poosiową na łożysko testowe.
6. Obciążenie promieniowe wrzeciona winno odpowiadać wymogom normalizacyjnym.

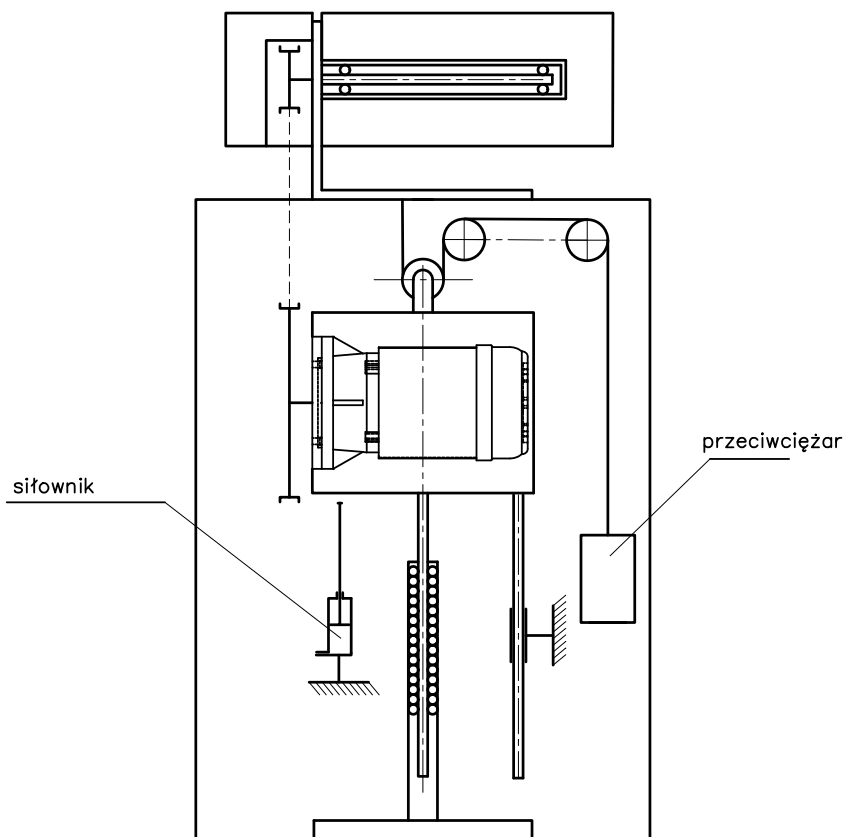
STANOWISKO BADAWCZE

Na wstępie założono, że opracowane stanowisko badawcze będzie posiadało budowę modułową zapewniającą możliwość łączenia dwóch modułów i prowadzenia testów równoległe.

Urządzenie składa się z:

- wrzeciona badawczego,
- pieca rurowego poziomego,
- układu napędowego,
- układu obciążającego,
- systemu sterująco-pomiarowego.

Zasadniczą część aparatu stanowiu wrzeciono badawcze (**Rys. 1**) umieszczone w tunelowym piecu elektrycznym. Wrzeciono to, wsparte na dwóch łożyskach kulkowych, z których jedno jest łożyskiem badawczym, wprawiane jest w ruch obrotowy przez silnik elektryczny asynchroniczny o obrotach znamionowych 3000 obr./min. Silnik napędu głównego zasilany jest oraz regulowany poprzez przemiennik częstotliwości. Obroty wrzeciona wynoszące 10 000 lub 20 000 obr./min, w zależności od rodzaju testu, uzyskiwane są przez multiplikującą przekładnię pasową z pasem płaskim. Dwie różne prędkości wrzeciona osiągnane są za pomocą dwóch zamiennych kół pasowych osadzanych na końcówce wrzeciona. Schemat kinematyczny układu napędowego pokazano na **Rys. 1**. Silnik napędowy jest zamocowany do płyty połączonej z pionową prowadnicą kulkową, zapewniającą swobodne przemieszczanie silnika w pionie. Oprócz tej prowadnicy zastosowano drugą prowadnicę reakcyjną, zabezpieczającą płytę silnika przed obrotem wokół osi prowadnicy kulkowej.

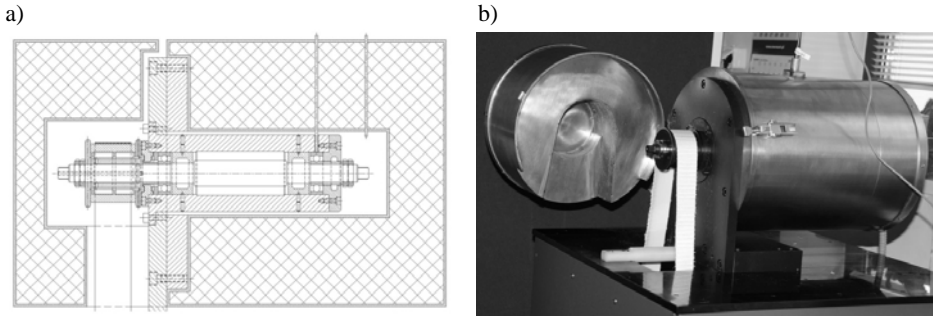


Rys. 1. Schemat układu obciążenia poprzecznego i luzowania pasa napędowego

Fig 1. The scheme of crosswise loading and loosening of the drive belt

Układ obciążający stanowiska ma za zadanie wywołać obciążenie poprzeczne i wzdłużne łożyska badawczego. Obciążenie poprzeczne wywołane jest ciężarem silnika napędowego. Ciężar silnika równoważony jest przeciwcieżarem oddziałującym przez wielokrążek. Obciążenie (wypadkowe) przenoszone jest na wrzeciono przez pas napędowy płaski. Jego wartość jest zgodna z zaleceniem normy. Samoczynne wyłączenie stanowiska po osiągnięciu jednej z zadanych wcześniej wartości granicznych (kryterium zakończenia badania) powoduje wyłączenie silnika napędowego oraz zapisanie w pamięci rejestratora danych pomiarowych z przeprowadzonego testu. Do luzowania pasa służy siłownik unoszący płytę mocującą silnika (**Rys. 1**).

Obciążenie wzdłużne łożyska wywołane jest przez podkładkę sprężystą i jest zgodne z wymogami normy. Ze względu na wysoką temperaturę panującą w komorze badawczej podczas testu podkładka ta musi być wymieniana każdorazowo na nową, przed rozpoczęciem kolejnego testu.



Rys. 2. Schemat (a) i widok (b) głowicy stanowiska badawczego

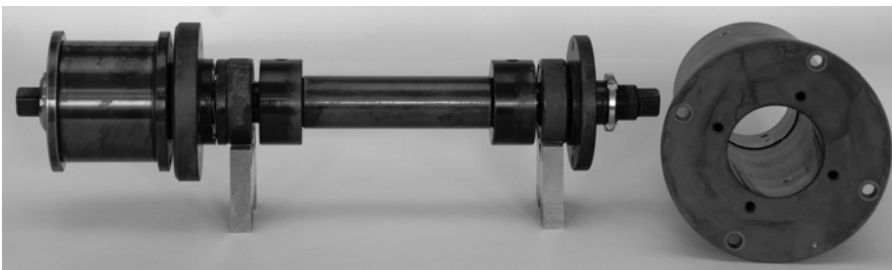
Fig. 2. The scheme (a) and the view (b) of the test rig

Piec rurowy, w którym zamontowane jest wrzeciono z łożyskiem badawczym, został zaprojektowany według następujących założeń:

- wymiary cylindrycznej komory grzewczej – $\text{Ø}120$, $L = 400$ mm,
- maksymalna temperatura testu do 673°K ,
- maksymalny czas nagrzewania komory przed testem – 1,5 godziny,
- kontrolowana temperatura pieca i jednego łożyska (dwa termoelementy typu K),
- temperatura zadawana i kontrolowana przez sterownik,
- pole tolerancji temperatury $3,0^\circ\text{K}$, tj. $\pm 1,5^\circ\text{K}$,
- dokładność pomiaru $0,01^\circ\text{K}$,
- sterownik umożliwia rejestrację temperatury podczas testu.

Piec rurowy mocowany jest do płyty nośnej wrzeciona z uchylną osłoną termiczną, jak pokazano na **Rys. 2b**. Obudowa pieca wykonana jest ze stali kwasoodpornej wysokostopowej 1H18N9.

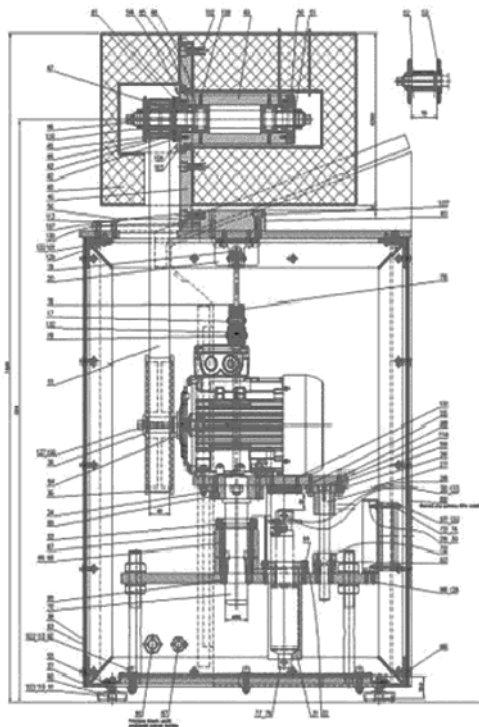
Wewnątrz pieca zamocowane jest wrzeciono z dwoma łożyskami, z których jedno jest elementem testowym. Wrzeciono, pokazane na **Rys. 3**, mocowane jest czterema wkrętami w tulei, która mocowana jest również czterema śrubami do płyty czołowej pieca.



Rys. 3. Wrzeciono stanowiska z zamontowanymi łożyskami i kołem pasowym

Fig. 3. The spindle of the test rig with mounted bearings and belt pulley

Rysunek konstrukcyjny części mechanicznej stanowiska oraz jego wygląd zewnętrzny ze zdemontowanymi płytami osłonowymi przedstawiono na **Rys. 4**.



Rys. 4. Część mechaniczna stanowiska badawczego – rysunek konstrukcyjny

Fig. 4. Mechanical part of the test rig – the design

SYSTEM POMIAROWO-STERUJĄCY URZĄDZENIA

System zasilająco-sterująco-pomiarowy zasila odbiorniki urządzenia, steruje elementami wykonawczymi stanowiska oraz rejestruje dane pomiarowe zebrane podczas biegu badawczego.

W skład systemu sterująco-pomiarowego urządzenia wchodzi obwody zasilania, sterowania oraz toru pomiarowe sprzęgnięte z rejestratorem danych pomiarowych. W skład obwodów zasilania systemu wchodzi zabezpieczenia zwarceniowe i przeciążeniowe, które przy uszkodzeniach zabezpieczają główne elementy systemu, takie jak przemiennik częstotliwości napędu głównego czy układ grzejny pieca.

Temperatura zewnętrznej bieżni łożyska podczas testu jest utrzymywana na zadanym poziomie. Pomiar realizowany jest termoelementem typu K, którego końcówka dotyka bieżni zewnętrznej łożyska testowego i umieszczona jest w specjalnym otworze w komorze grzewczej. Jako element testowy zastosowano

łożysko, określone w normie ASTM D 3334, z luzem promieniowym od 0,025 do 0,031 mm, wykonane ze stali odpornej na wysoką temperaturę. Układ pomiaru temperatury łożyska współpracuje z urządzeniem sterującym wyłączającym układ napędowym po przekroczeniu zadanej temperatury pracy łożyska o 15°K.

Przeziennik częstotliwości napędu głównego (pracujący w trybie wektorowym) wyposażony jest w przekładniki prądowe umieszczone w torach prądowych. Mierzone wartości skuteczne prądu retransmitowane są wyjściem analogowym w standardzie DC 0-10 V do rejestratora parametrów maszyny badawczej. Zapisany w rejestratorze komparator porównuje wartość chwilową z wartością zadaną przez użytkownika. Po przekroczeniu tej wartości przez 3 [sek] następuje zatrzymanie silnika napędu głównego oraz zakończenie rejestracji danych pomiarowych.

Funkcję sterującą pełni przełącznik programowalny. Z poziomu interfejsu użytkownik zadaje wartości nastaw, takich jak prędkość obrotowa wrzeciona badawczego, temperatura testu. Ważną funkcją sterownika jest również korekta błędów i obsługa stanów awaryjnych. Po wystąpieniu stanu awaryjnego użytkownik zmuszony jest zlokalizować i usunąć usterkę oraz zresetować błąd na sterowniku. Taki algorytm podnosi bezpieczeństwo obsługi oraz pewność badań. Obwody sterujące maszyny sprzęgnięte są bezpośrednio z elementami wykonawczymi zainstalowanymi na urządzeniu badawczym.

System pomiarowo-sterujący w pierwotnej wersji przedstawiono na **Rys. 5**. System ten zapewnia również pomiar i rejestrację:

- czasu biegu,
- temperatury pierścienia zewnętrznego łożyska testowego,
- temperatury komory grzejnej,
- poboru mocy silnika,
- prędkości obrotowej wrzeciona,
- obciążenia mechanicznego wrzeciona badawczego,
- drgań.

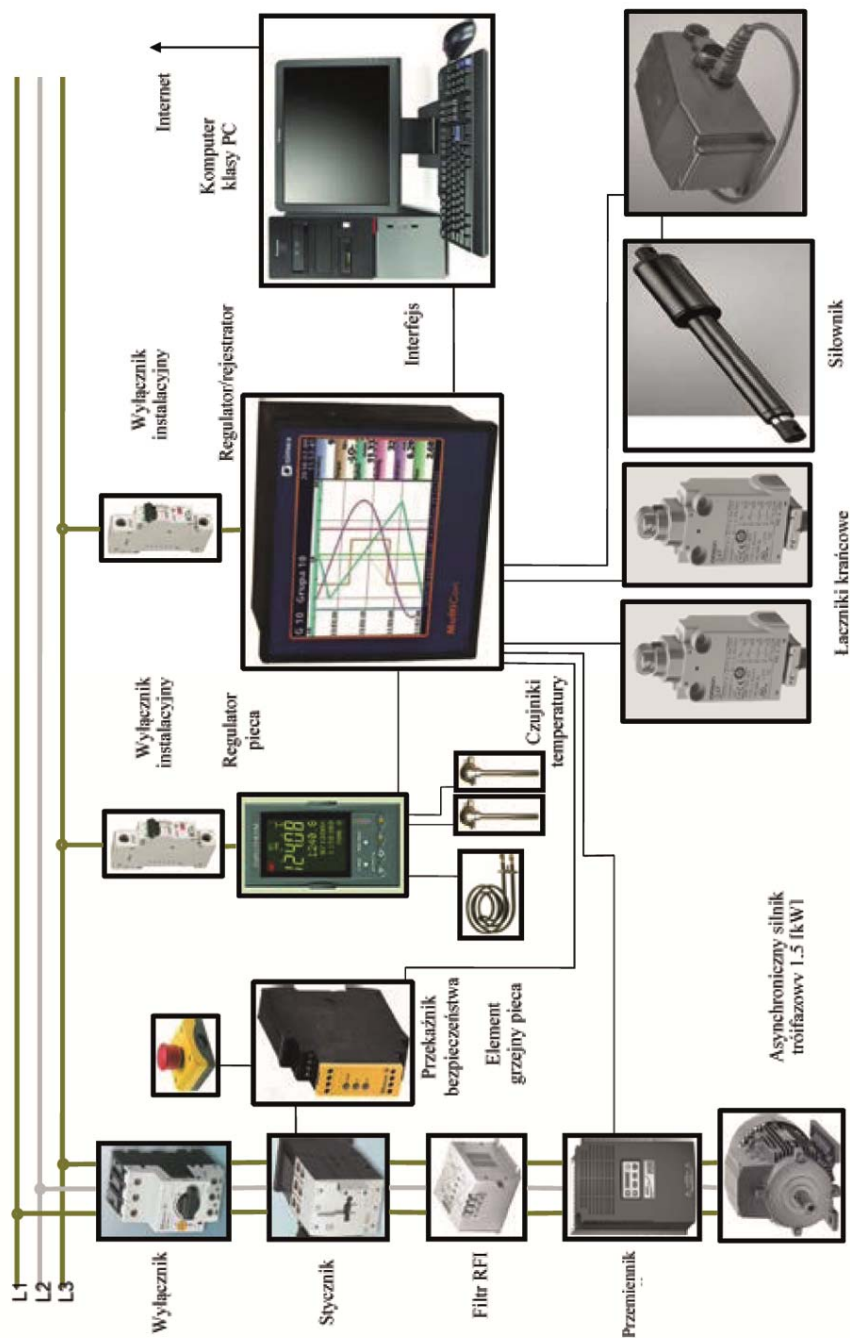
WERYFIKACJA URZĄDZENIA I METODYKI BADAWCZEJ

Badania weryfikacyjne urządzenia dotyczyły konstrukcji oraz oprogramowania.

Celem weryfikacji urządzenia było sprawdzenie poprawności działania wszystkich głównych zespołów oraz potwierdzenie słuszności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych zapewniających właściwe przeprowadzenie badań.

Ocenie weryfikacyjnej zostały poddane następujące zespoły:

1. Zespół napędowy – z uwzględnieniem poprawności doboru napędu (silnika – mocy i prędkości obrotowej oraz możliwości jej regulacji i pomiaru) oraz rozwiązań konstrukcyjnych wrzeciona uwzględniających sposób łożyskowania, a przede wszystkim sposobu przekazania napędu z silnika (sprzęgła, przekładnie) na elementy wężła tarcia.



Rys. 5. Schemat systemu sterująco-pomiarowego w wersji pierwotnej

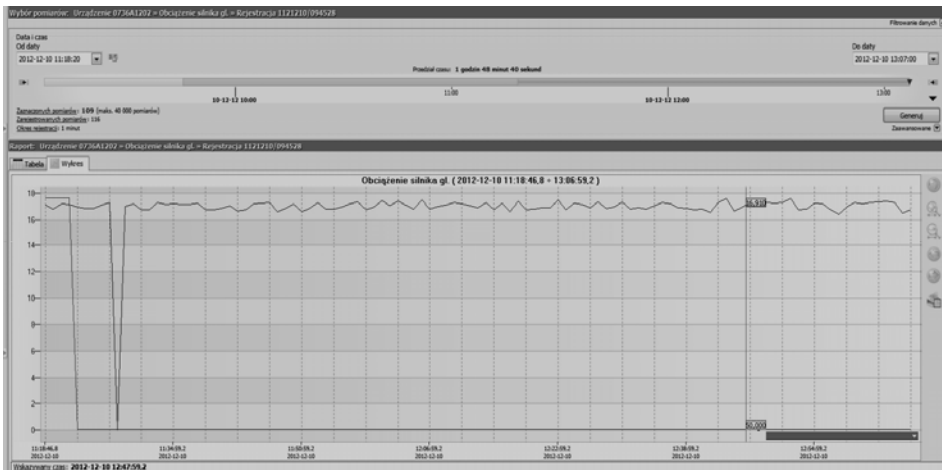
Fig. 5. The prototype of measuring-controlling system

2. Zespół węzła tarcia – z uwzględnieniem poprawności sposobu mocowania elementu testowego, jak również zapewnienia żądanej temperatury węzła tarcia, środka smarowego i innych mediów stanowiących otoczenie węzła tarcia.
3. Zespół obciążania węzła tarcia – z uwzględnieniem możliwości uzyskania założonej wartości obciążenia jak również jego zakresu i niezmienności podczas badań.
4. Oprzyrządowanie pomiarowe – pod względem poprawności umieszczenia zapewniającego właściwe odwzorowanie wielkości mierzonej, a także pod względem zapewnienia ochrony przed przeciążeniami i uszkodzeniem.

Analiza wyników badań weryfikacyjnych i funkcjonalnych części mechanicznej (maszyny badawczej) urządzenia wymagała wprowadzenia kilku zmian konstrukcyjnych.

Analiza wyników badań weryfikacyjnych i funkcjonalnych pozwoliła również na zaproponowanie szeregu zmian w systemie sterująco-pomiarowym, z których najważniejszymi były zastąpienie uniwersalnego regulatora temperatury precyzyjnym regulatorem procesowym krajowej produkcji z zabudowanymi dwoma regulatorami firmy Eurotherm 3508 oraz zastąpienie dwóch mierników (licznik czasu, tachometr) jednym wielokanałowym regulatorem MultiCon 141 firmy SIMEX.

Dzięki zastosowaniu zaawansowanego regulatora MultiCon 141 oraz dołączeniu do niego komputera wraz z oprogramowaniem uzyskano możliwość wizualizacji, rejestracji i archiwizacji wszystkich wyników i parametrów biegów badawczych. Na **Rys. 6** przedstawiono przykładową wizualizację obciążenia silnika napędowego stanowiska.

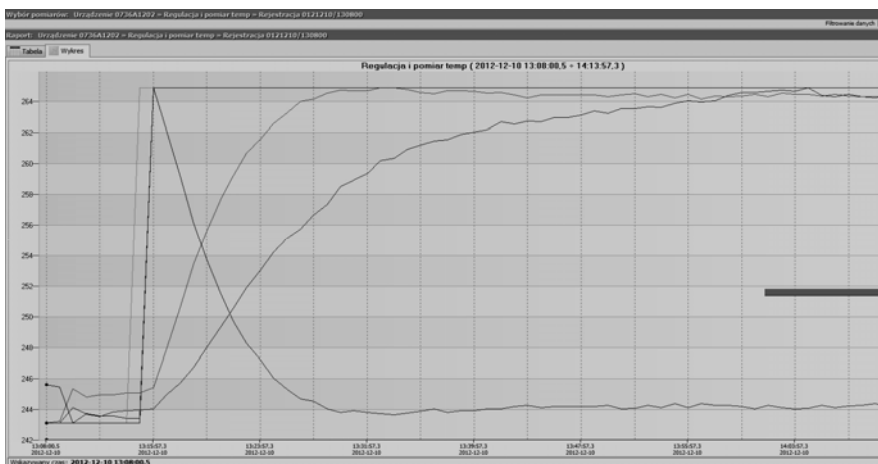


Rys. 6. Widok ekranu monitora przedstawiający obciążenie silnika napędowego stanowiska badawczego

Fig. 6. Screenshot showing the loading of the test rig engine

PROCEDURA BADAWCZA

Szczegółowa procedura badania tribologicznych właściwości środków smarowych w podwyższonych temperaturach obejmuje następujące działania. Należy zmontować zespół wrzeciona badawczego w tulei po napełnieniu łożyska badawczego badanym smarem plastycznym. Zmontowaną z wrzecionem tuleję badawczą należy zamocować w komorze pieca, zainstalować czujniki termoelektryczne do układu regulacji temperatury oraz oprzyrządkowanie pomiaru i rejestracji temperatury łożyska badawczego, a następnie nałożyć pas napędowy. Po sprawdzeniu stanu połączeń elektrycznych pomiędzy modułem sterująco-pomiarowym a urządzeniem badawczym należy przygotować urządzenie do biegu badawczego, zgodnie z instrukcją obsługi wprowadzając z pulpitu sterującego parametry testu i wartości progowe jego zakończenia. Należy uruchomić maszynę badawczą, mając na uwadze to, że w chwili naciśnięcia przycisku „BIEG BADAWCZY” następuje załączenie grzania komorowy i silnika elektrycznego oraz rejestracja i kontrola temperatury komory badawczej, zewnętrznego pierścienia łożyska badawczego, obciążenia silnika elektrycznego, obciążenia wrzeciona oraz czasu biegu badawczego. Przykładowy obraz zarejestrowany podczas badań przedstawiający zaprogramowaną i rzeczywistą temperaturę łożyska testowego i komory badawczej przedstawiono na **Rys. 7**.



Rys. 7. Widok ekranu monitora przedstawiający temperaturę nastawioną i rzeczywistą łożyska testowego i komory badawczej stanowiska badawczego

Fig. 7. Screenshot showing set and measured temperature of investigated bearing and test chamber

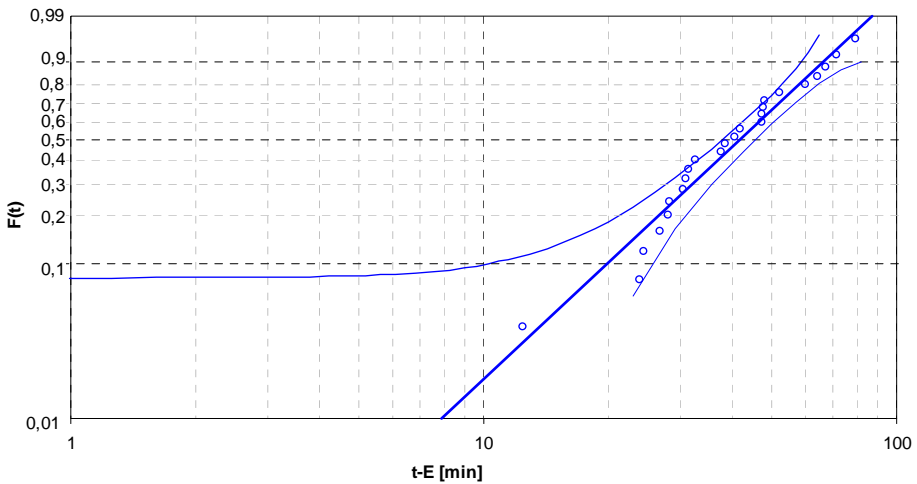
Badania prowadzone są do chwili:

- przekroczenia o 300% wartości obciążenia silnika elektrycznego,
- przekroczenia o 15°C temperatury na zewnętrznym pierścieniu łożyska badawczego,

- przekroczenia założonej amplitudy drgań wrzeciona badawczego – opcja,
- osiągnięcia założonego czasu biegu badawczego.

Po zakończeniu testu w karcie badania należy odnotować czas pracy urządzenia. Testy powtórzyć przynajmniej 3 razy. Na podstawie wyników badania należy obliczyć trwałość L_{10} , L_{50} i L_{90} z rozkładu Weibulla, wykorzystując specjalnie opracowany program obliczeniowy.

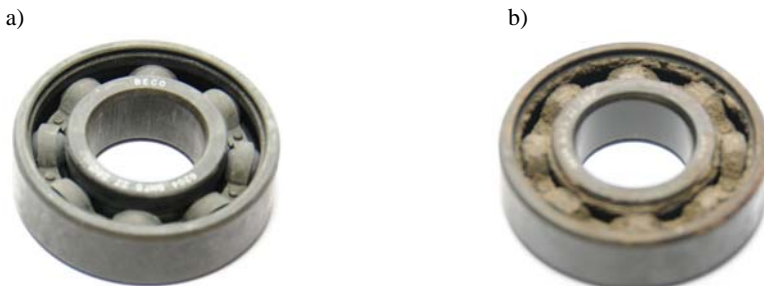
Uzyskane, przykładowe wyniki badań wpływu smaru plastycznego na pitting elementów testowych (powierzchniową trwałość zmęczeniową) przedstawiono na **Rys. 8**.



Rys. 8. Rozkład Weibulla wpływu smaru plastycznego na pitting

Fig. 8. The Weibull's distribution of grease influence on pitting

Widok elementów użytych w badaniach weryfikacyjnych przedstawiono na **Rys. 9**.



Rys. 9. Łożyska po badaniach: a) podporowe, b) badawcze

Fig. 9. Bearings after test: a) supporting bearing, b) test sample

PODSUMOWANIE

W opracowaniu przedstawiono koncepcję rozwiązania, założenia konstrukcyjne, opis części mechanicznej oraz systemu sterująco-pomiarowego urządzenia do badania wpływu smaru plastycznego na pitting elementów stalowych testowych łożysk tocznych. Skomputeryzowany system sterująco-pomiarowy pozwala na monitoring mierzonych wielkości, ich późniejszą archiwizację i kontrolę, a przez to automatyzację procesu badawczego. Na podstawie opracowanej dokumentacji wykonano fizyczny model urządzenia oraz opracowano procedury badawcze uwzględniające wymogi normy ASTM D 3336. Opracowany model poddano badaniom weryfikacyjnym mającym na celu sprawdzenie poprawności działania zespołów mechanicznych i układu sterująco-pomiarowego; zwerifikowano i zmodyfikowano także procedury badawcze.

Stanowisko to ma unikatowe cechy: możliwość badania smarów plastycznych w temperaturze do 500°K, możliwość badania wpływu smarów plastycznych na powierzchniową trwałość zmęczeniową łożysk tocznych, opcjonalnie pomiar i analizę drgań głowicy badawczej, pomiar mocy tarcia, komputerową rejestrację mierzonych wielkości oraz monitoring przez Internet.

Praca realizowana w ramach Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” nr POIG.01.01.02-14-034/09-00.

LITERATURA

1. PN-76/C-04147 Przetwory naftowe. Badanie własności smarnych olejów i smarów.
2. PN-88/C-04185 Badania trwałości użytkowej smarów plastycznych na stanowisku badawczym SKF R2F.
3. PN-C- 96160 Przetwory naftowe. Badanie trwałości użytkowej smarów plastycznych w wysokiej temperaturze.
4. ASTM D 1478-80 Standard test method for low-temperature torque ball bearing greases.
5. ASTM D 2266-67 Standard method of test for wear preventive characteristics of lubricating grease (four-ball method).
6. ASTM D 2596-82 Standard method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating grease (four-ball method).
7. ASTM D 2783-82 Standard method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (four-ball method).
8. ASTM D 3336-75(81) Standard test method for performance characteristics of lubricating greases in ball bearings at elevated temperatures.
9. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE, Radom 1996.
10. VAMAS-TWA-1-project no. 4 – “Interlaboratory wear testing of inorganic coatings”.

Summary

The paper presents a testing device for the tribological investigation of the properties of greases designated to work under the conditions of elevated temperatures and low loads. The device was developed in the framework of the Strategic Programme financed by EU, Task II.2.2. The tribotester uses a commercial ball bearing as a test friction joint. In the paper, the mechanical construction and the control and measurement systems are discussed. The authors present the conclusions from conducted verification tests, which led to the development of the technical documentation of the device prototype. The test procedure is also presented.