

**Kasper GÓRNY\***, **Arkadiusz STACHOWIAK\***,  
**Przemysław TYCZEWSKI\***, **Wiesław ZWIERZYCKI\***

## **STANOWISKO DO BADANIA ZUŻYCIA PODCZAS PIENIENIA OLEJU STOSOWANEGO W SPRĘŻARKACH CHŁODNICZYCH**

### **THE STAND FOR WEAR TESTS DURING FOAMING OF OIL USED IN REFRIGERATION COMPRESSORS**

#### **Słowa kluczowe:**

pienie oleju, badania zużycia, sprężarka chłodnicza

#### **Key words:**

oil foaming, wear tests, refrigeration compressor

#### **Streszczenie**

W układach chłodniczych jedynym elementem narażonym na zużywanie mechaniczne węzłów tarcia jest sprężarka. Główne przyczyny uszkodzeń mechanicznych sprężarek chłodniczych związane są z obecnością czynnika chłodniczego w misce olejowej i w oleju smarowym, gromadzącego się podczas dłuższych przerw w pracy. W fazie rozruchu sprężarki następuje gwałtowne odpa-

---

\* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. (0-61) 665 2236, e-mail: kasper.gorny@gmail.com, e-mail: arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl, e-mail: przemyslaw.tyczewski@put.poznan.pl, e-mail: wieslaw.zwierzycki@put.poznan.pl.

rowanie pewnej ilości czynnika chłodniczego zgromadzonej w misce olejowej sprężarki oraz w oleju, co prowadzi do jego spienienia. Jest to zjawisko niepożądane, lecz powszechne w eksploatacji urządzeń chłodniczych.

W artykule przedstawiono stanowisko do badania zużycia podczas pienienia oleju w sprężarkach chłodniczych. Przedstawiono również wyniki badań potwierdzające negatywny wpływ zjawiska pienienia oleju smarowego zanieczyszczonego czynnikiem chłodniczym na trwałość elementów węzłów tarcia sprężarek chłodniczych.

## WPROWADZENIE

Użytkownicy urządzeń chłodniczych potrzebują coraz bardziej energooszczędnych układów chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła. Najczęściej energooszczędność uzyskuje się poprzez zmniejszanie stopnia sprężania. Jest to możliwe dzięki stosowaniu większych skraplaczy i większej ilości czynnika chłodniczego w urządzeniach chłodniczych. Kontrola stanu czynnika chłodniczego w układach chłodniczych nabiera wraz z rozwojem urządzeń chłodniczych coraz większego znaczenia w kontekście zwiększania ich niezawodności. Jedną z głównych przyczyn awarii sprężarek chłodniczych jest uszkodzenie spowodowane nadmierną ilością ciekłego czynnika chłodniczego na wlocie do sprężarki.

Dobrze zaprojektowana i wydajna sprężarka chłodnicza powinna umożliwiać sprężanie odpowiednich ilości czynnika chłodniczego, przy równoczesnym zapewnieniu wystarczającej ilości oleju smarowego w węzłach tarcia. Pojawienie się ciekłego czynnika chłodniczego w misce olejowej sprężarki może wynikać z jego złego doboru oraz z nadmiernej ilości w układzie, co zwiększa nieuniknioną migrację czynnika chłodniczego do oleju i miski olejowej.

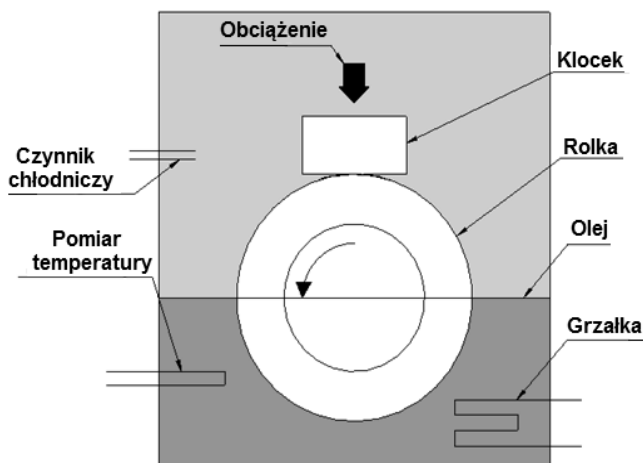
W artykule przedstawiono budowę i zasadę działania prototypowego stanowiska badawczego do określania wartości zużycia materiałów na elementy sprężarki w warunkach pienienia oleju smarowego. Stanowisko umożliwia porównanie właściwości smarnych różnych olejów w interakcji z czynnikiem chłodniczym w sytuacji pienienia oleju. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań zużycia w warunkach pienienia oleju weryfikujące poprawność jego funkcjonowania oraz świadczące o możliwości jego ilościowej oceny w warunkach laboratoryjnych.

## STANOWISKO BADAWCZE

Pienienie oleju w urządzeniach chłodniczych jest istotnym problemem eksploatacyjnym. Prowadzenie badań tego zjawiska w rzeczywistych warunkach pracy tych urządzeń jest praktycznie niemożliwe, dlatego podjęto próbę eksperymentalnego modelowania tych ekstremalnych warunków eksploatacji w warunkach laboratoryjnych. Procedura przygotowywania mieszaniny oleju smarowego

z czynnikiem chłodniczym oraz wytwarzania piany olejowej wynika z wcześniejszych badań autorów [L. 1–3].

Przygotowywanie mieszaniny oleju smarowego z czynnikiem chłodniczym oraz realizacja zjawiska pienienia przebiegały na prototypowym stanowisku do badania zużycia z węzłem tarcia typu block-on-ring znajdującym się w komorze wysokociśnieniowej (**Rys. 1**).



**Rys. 1. Schemat komory modelowego stanowiska z węzłem tarcia typu block-on-ring**

Fig. 1. Scheme of the block-on-ring laboratory wear test

Stanowisko badawcze umożliwia przede wszystkim odzwierciedlenie warunków pracy sprężarek chłodniczych (temperatura mieszaniny, ciśnienie czynnika chłodniczego, obciążenie węzła tarcia, prędkość obrotowa rolki), wytwarzanie mieszaniny oleju smarowego z czynnikiem chłodniczym oraz realizację procesu zużywania modelowych próbek skojarzenia tarcowego w warunkach pracy sprężarek chłodniczych, w tym w warunkach pienienia oleju.

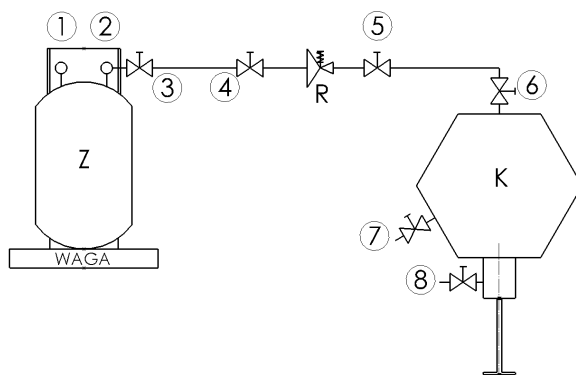
Oprogramowanie pomiarowe stanowiska umożliwia wizualizację oraz rejestrację wartości momentu tarcia, prędkości obrotowej, temperatury mieszaniny oraz ciśnienia czynnika chłodniczego w komorze. Kontrolowanie prędkości obrotowej rolki jest realizowane przez przetwornicę częstotliwości. Wartość prędkości może być ustawiona automatycznie lub ręcznie w przedziale od 0 do 3000 obr./min. Wartość obciążenia jest zadawana przez obsługującego urządzenie za pomocą odważników w przedziale od 10 do 150N co 5N.

Stanowisko pozwala na pomiar momentu tarcia w zakresie od 0 do 2 Nm. Obsługujący stanowisko badawcze może zadać czas trwania badania oraz częstotliwości rejestrowania pomiarów. Komora stanowiska umożliwia regulowanie temperatury mieszaniny oleju smarowego i czynnika chłodniczego, co ułatwia kontrolowanie składu mieszaniny.

Stanowisko badawcze z węzłem tarcia typu block-on-ring wyposażone jest w komorę wysokociśnieniową z zestawem uszczelniającym, który uniemożliwia przedostanie się powietrza do wnętrza komory oraz wyciek czynnika chłodniczego i oleju smarowego, zapewnia dokładne czyszczenie komory, a także pozwala na uzyskanie zarówno warunków zbliżonych do próżni, jak i maksymalnego ciśnienia czynnika o wartości rzędu 0,8 MPa. Uszczelnienie komory jest istotne ze względu na wysokie ciśnienie podczas nasycania mieszaniny czynnikiem chłodniczym oraz wyprowadzenie wału napędowego poza komorę. Wszystkie miejsca narażone na nieszczelność sprawdzane są podczas wytwarzania badanej mieszaniny.

## PROCEDURA BADAWCZA

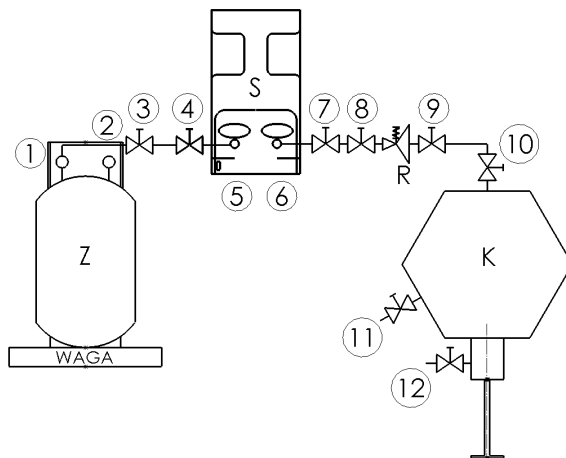
Po odpowiednim zamontowaniu próbek w uchwytach znajdujących się w komorze oraz szczelnym jej zamknięciu wytwarza się wewnątrz próżnię rzędu  $10^{-5}$  MPa. Następnie komora napełnia się olejem do wysokości połowy średnicy rolki (**Rys. 1**). W celu osiągnięcia efektu pienienia w komorze badawczej do oleju doprowadzono czynnik chłodniczy pod ciśnieniem 0,5 MPa i pozostawiano na okres 2400 sekund w celu odpowiedniego nasycenia oleju smarowego czynnikiem chłodniczym (parametry dla czynnika chłodniczego R134a; za [L. 1–3]). Na **Rysunku 2** przedstawiono schemat połączenia urządzeń w zespole zasilającym czynnikiem chłodniczym podczas wytwarzania mieszaniny oleju smarowego i czynnika chłodniczego. Podczas tej operacji zawory odcinające 1, 7 i 8 są zamknięte, natomiast zawory odcinające 2–6 pozostają otwarte. Do komory badawczej dostarczany jest czynnik chłodniczy o regulowanym przez reduktor ciśnieniu.



**Rys. 2.** Schemat połączeń urządzeń w zespole zasilającym czynnikiem chłodniczym podczas wytwarzania mieszaniny oleju smarowego i czynnika chłodniczego: K – komora badawcza, R – reduktor ciśnienia czynnika chłodniczego, Z – zbiornik czynnika chłodniczego, 1 – 8 zawory odcinające

**Fig. 2.** Scheme of devices setup in refrigerant charging system during production of lubricating oil/refrigerant mixture: K – high pressure test chamber, R – refrigerant pressure reducer, Z – refrigerant tank, 1 – 8 shut-off valves

Pianę podczas badania zużycia uzyskiwano poprzez zmniejszenie wartości ciśnienia w komorze badawczej z 0,5 MPa do 0,2 MPa dzięki odwrotnemu montażowi reduktora ciśnienia czynnika chłodniczego i skierowaniu czynnika przez stację odzysku do zbiornika. Na **Rysunku 3** przedstawiono schemat połączeń urządzeń w trakcie wytwarzania piany olejowej. Podczas tej operacji zawory odcinające 2, 11 i 12 są zamknięte, natomiast zawory odcinające 1, 3-10 pozostają otwarte.

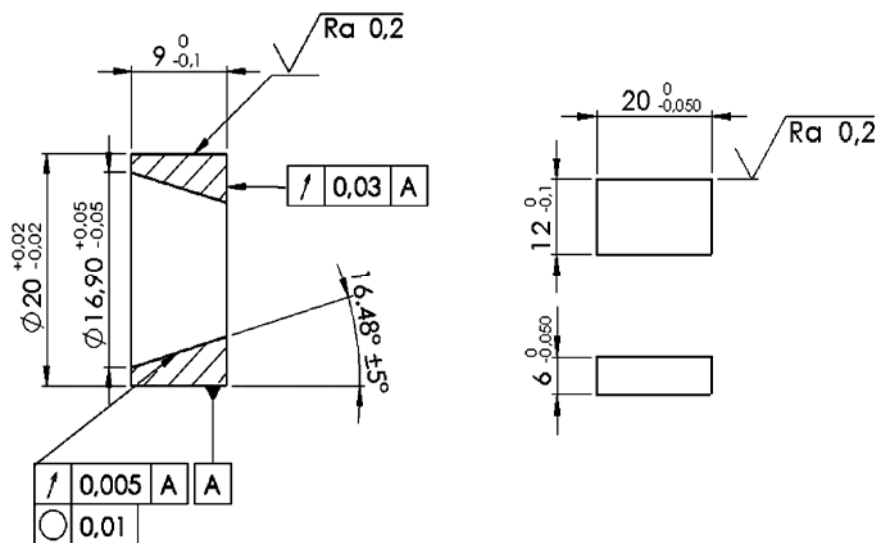


**Rys. 3. Schemat połączeń urządzeń w zespole zasilającym czynnikiem chłodniczym podczas wytwarzania piany olejowej: K – komora badawcza, S – stacja do odzysku czynnika chłodniczego, R – reduktor ciśnienia czynnika chłodniczego, Z – zbiornik czynnika chłodniczego, 1–12 – zawory odcinające**

Fig. 3. Scheme of devices setup in refrigerant charging system during production of oil/refrigerant mixture: K – high pressure chamber test, R – refrigerant pressure reducer, Z – refrigerant tank, 1 – 12 shut-off valves

Dla celów porównawczych (przypadek bez efektu pienienia) mieszaninę oleju smarowego z czynnikiem chłodniczym wytwarzano w sposób statyczny poprzez doprowadzenie czynnika chłodniczego pod ciśnieniem 0,2 MPa i pozostawienie na okres 2400 sekund celem odpowiedniego nasycenia oleju smarowego czynnikiem chłodniczym i osiągnięcia stanu ustalonego [L. 4, 5]. Nasycanie realizowano zgodnie ze schematem umieszczonym na **Rysunku 2**. Badania zużyciowe przeprowadzano przy temperaturze początku testu wynoszącej  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , co odpowiada warunkom rozruchu sprężarek chłodniczych. Wykonano po trzy próby dla każdego z wariantów – z pienieniem i bez pienienia oleju.

Badania przeprowadzono, wykorzystując nieruchome próbki w kształcie klocka z aluminium PA6 (AlCu4MgSi (A)) oraz obracające się próbki w kształcie rolki z żeliwa szarego GJL-200 (**Rys. 4**). Badania zużycia wykonywano w czasie 60 sekund przy obciążeniu 120 N i prędkości obrotowej rolki 500 obr./min. Droga tarcia wynosiła 31,42 m.



Rys. 4. Kształt i wymiary badanych próbek: próbka w kształcie rolki (z lewej) i próbka w kształcie klocka (z prawej)

Fig. 4. Block sample (left) and ring sample (right)

Parametry badań podane w **Tabeli 1** zostały wyselekcjonowane w sposób pozwalający na odzwierciedlenie ekstremalnych warunków pracy sprężarek chłodniczych i porównanie sytuacji, w których węzeł tarcia smarowany jest mieszaniną oleju smarowego i czynnika chłodniczego bez zjawiska pienienia POE/134a i ze zjawiskiem pienienia POE/134a-piana.

**Tablica 1. Parametry badań**

Table 1. Tests parameters

Lp.	1	2
Medium smarujące	POE/134a	POE/R134a-piana
Obciążenie [N]	120	120
Prędkość obrotowa [obr./min]	500	500
Ciśnienie wywierane na olej (nasykanie) [MPa]	0,2	0,5
Ciśnienie wywierane na olej (badanie) [MPa]	0,2	0,5-0,2
Czas nasykania [s]	2400	2400
Czas badania [s]	60	60

Do wytworzenia mieszanin oleju smarowego z czynnikiem chłodniczym zastosowano olej syntetyczny na bazie estrowej o lepkości 32 cSt w temperatu-

rze 40°C oraz czynnik chłodniczy z grupy HFC R134a. Podstawowe właściwości wykorzystanego oleju przedstawiono w **Tabela 2**.

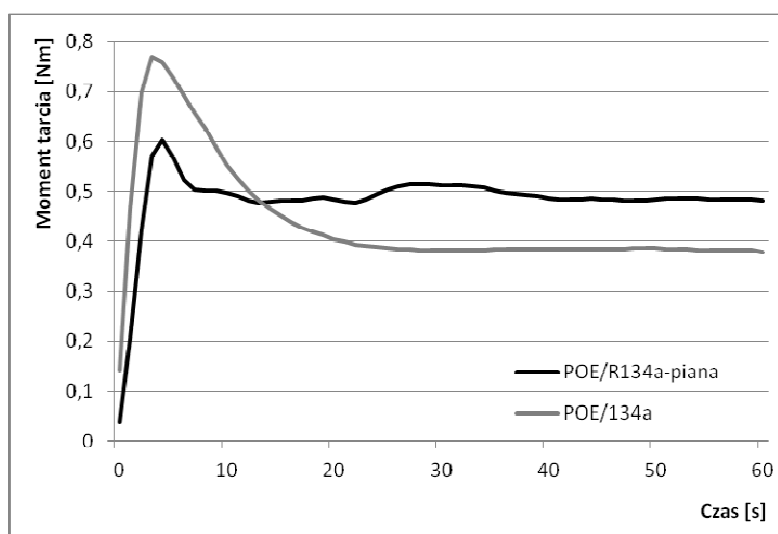
**Tabela 2. Właściwości badanego oleju smarowego**

Table 2. Properties of testing oil

Parametr	Jednostka	Norma badawcza	Olej smarowy
			Planetelf ACD 32 (POE)
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C 100°C	m <sup>2</sup> /s	ASTM D 445	34,6·10 <sup>-6</sup> 6,0·10 <sup>-6</sup>
Temperatura płynięcia	°C	ASTM D 97	- 54
Temperatura zapłonu	°C	ASTM D 92	250
Gęstość (w 15°C)	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D 287	981

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Dla każdego z biegów badawczych zarchiwizowano przebiegi w czasie wartości momentu tarcia w poszczególnych testach, co umożliwiło wyznaczenie średnich z kilku przebiegów. Na **Rysunku 5** przedstawiono wykresy przebiegu średnich wartości momentu tarcia dla mieszaniny POE/134a oraz tej samej mieszaniny w sytuacji wystąpienia pianienia oleju POE/R134a-piana.



**Rys. 5. Przebiegi średnich wartości momentu tarcia dla biegów badawczych bez pianienia oleju (POE/134a) oraz z w sytuacji wystąpienia pianienia oleju (POE/R134a-piana)**

Fig. 5. Average friction torque curves for research without oil foam (POE/134a) and with oil foam (POE/R134a-piana)

Moment tarcia w chwili rozruchu silnika przyjmował różne wartości, po czym stabilizował się po około 20 s. W testach przeprowadzonych w mieszaninie niespienionej (POE/134a) moment tarcia po ustabilizowaniu wyniósł 0,38 Nm, natomiast w sytuacji wystąpienia pienienia oleju (POE/R134a-piana) 0,48 Nm. Wynik ten potwierdza negatywny wpływ zjawiska pienienia na opory ruchu w węzłach tarcia sprężarek chłodniczych i jednocześnie potwierdza funkcjonalność stanowiska badawczego pozwalającego to zjawisko odzwierciedlić.

W **Tabeli 3** zestawiono wyniki badań w postaci ustabilizowanej wartości momentu tarcia oraz szerokości skaz powstałych na próbce w kształcie klocka.

**Tabela 3. Zestawienie wyników badań**

Table 3. Summary of test results

Lp.	1	2
Medium smarujące	POE/134a	POE/R134a-piana
Moment tarcia [Nm]	0,38	0,48
Szerokość skazy [mm]	1,55	3,55
Ciśnienie wywierane na olej (nasykanie) [MPa]	0,2	0,5
Ciśnienie wywierane na olej (badanie) [MPa]	0,2	0,5-0,2
Czas nasykania [s]	2400	2400
Czas badania [s]	60	60

Na podstawie analizy obrazów poprzecznych kształtów zużycia poszczególnych próbek określono, iż szerokość śladu dla testu z POE/134a wynosiła średnio 1,55 mm, natomiast dla testu z POE/R134a-piana średnio 3,55 mm. Wynik ten również potwierdza negatywny wpływ zjawiska pienienia na współpracę węzłów tarcia sprężarek chłodniczych. Dowodzi również, iż na stanowisku badawczym możliwa jest ilościowa ocena zużycia podczas pienienia w warunkach laboratoryjnych.

## PODSUMOWANIE

Celem poprawy niezawodności urządzeń chłodniczych zaleca się kontrolowanie stanu czynnika chłodniczego w układzie. Szczególnie należy unikać jego nadmiernej ilości, ponieważ podczas pracy sprężarki może on gwałtownie odparowywać, powodując zjawisko zwane pienieniem oleju.

W artykule przedstawiono budowę i zasadę działania oraz zweryfikowano funkcjonalność stanowiska do badania zużycia w ekstremalnych warunkach pracy sprężarki chłodniczej, które powodują pienienie oleju. Badania przepro-



wadzono dla mieszaniny oleju poliestrowego oraz czynnika chłodniczego R134a.

Dla testów, w których inicjowano pienienie oleju, pomiar momentu tarcia był średnio o ponad 25% wyższy niż w przypadku testów bez pienienia oleju. Również szerokość śladu zużycia badanych próbek w kształcie klocka była ponaddwukrotnie większa w sytuacji występowania pienienia. Takie rezultaty badań świadczą zarówno o negatywnym wpływie zjawiska pienienia oleju w sprężarkach chłodniczych, jak i o czułości na to zjawisko skonstruowanego stanowiska badawczego.

## LITERATURA

1. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Specyficzne właściwości oleju sprężarkowego w układach chłodniczych, *Inżynieria Rolnicza*, Z 1 (141), T. 1, 2013, s. 65–74.
2. Górny K., Stachowiak A., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Plan modelowych badań zużywania elementów sprężarek chłodniczych, *Materiały konferencyjne XLIV Dni Chłodnictwa*, Poznań 2012.
3. Górny K., Stachowiak A., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Tribologiczne badania olejów do sprężarek chłodniczych w mieszaninie z czynnikiem chłodniczym R134a, *Materiały konferencyjne XLIV Dni Chłodnictwa*, Poznań 2013.
4. Leung M., Jotshi C. K., Goswami D. Y., Shah D. O., Gregory A.: Measurements of absorption rates of HFC single and blended refrigerants in POE oils. *HVAC&R Research*, vol. 2, 1998, s. 141–151.
5. Castro H.O.S., Gasche J.L., Conti W.P.: Foam Flow of Oil-Refrigerant R134A Mixture in a Small Diameter Tube, *International Refrigeration and Air Conditioning*, R171, 2004, p. 1–9.

## Summary

**The only element of refrigeration systems exposed to mechanical wear of friction is the refrigeration compressor. The main reasons for refrigeration compressor mechanical failures are related to the presence of refrigerant in the lubricating oil accumulating during long cessation periods and the rapid evaporation of a certain amount of refrigerant accumulated in the crankcase of the compressor during the start-up stage. It leads to foaming of the oil. This is an undesirable but common phenomenon in the exploitation of refrigeration compressors.**

The article presents the study of wear during the foaming of oil in refrigeration compressors. It also presents the results of studies demonstrating the negative effect of the foaming of lubricating oil contaminated with refrigerant on the durability of friction joints in refrigeration compressors.

