

Przemysław TYCZEWSKI*, Wiesław ZWIERZYCKI*

WPLYW RÓŻNYCH MIESZANIN OLEJ-CZYNNIK CHŁODNICZY NA POWIERZCHNIE ŚLIZGOWE SPRĘŻAREK TŁOKOWYCH

THE EFFECT OF DIFFERENT MIXTURES OF OIL AND REFRIGERANT ON THE SURFACE OF THE SLIDING PISTON COMPRESSORS

Słowa kluczowe:

R290, R134a, olej chłodniczy, badania tribologiczne

Key words:

R290, R134a, refrigerant oil, tribological tests

Streszczenie

Obecnie następuje powrót do ekologicznych czynników chłodniczych. Jest to w dużej mierze związane z obowiązującymi przepisami dotyczącymi stosowania substancji zubożającej warstwę ozonową. Celem pracy było przeprowadzenie badań dotyczących wpływu zastąpienia czynnika R134a ekologicznym propanem w mieszaninie olej-czynnik chłodniczy na powierzchnie ślizgowe sprężarek tłokowych. Badania wykonano w mieszaninach oleju mineralnego

* Politechnika Poznańska, IMRiPS, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, e-mail: przemyslaw.tyczewski@put.poznan.pl.

z czynnikami chłodniczymi R134a i R290 oraz w mieszaninach oleju syntetycznego poliestrowego z czynnikami R134a i R290. Testy przeprowadzono za pomocą maszyny tarciowej z wykorzystaniem węzła typu block-on-ring, który znajduje się w komorze symulującej wnętrze sprężarki chłodniczej. Uzyskane wyniki badań potwierdzają możliwość wykorzystania propanu jako zamiennika R134a.

WPROWADZENIE

Z uwagi na bardzo dobre właściwości termodynamiczne do roku 2009 w instalacjach chłodniczych stosowano substancje oparte na związkach chloru, jodu i fluoru z węglem [L. 1]. Wspomniane związki chemiczne mają właściwości niszczące warstwę ozonową w stratosferze. Biorąc pod uwagę obowiązujące przepisy dotyczące stosowania substancji zubożającej warstwę ozonową, obecnie poszukuje się syntetycznych czynników chłodniczych bardziej ekologicznych oraz obserwuje się powrót do naturalnych czynników (dwutlenek węgla, propan).

Zastosowanie innych czynników chłodniczych wymaga zazwyczaj zmiany konstrukcji urządzeń chłodniczych oraz oleju smarowego. Użycie nieodpowiedniego oleju do czynnika chłodniczego może spowodować przyspieszone zużycie węzłów tarcia w sprężarce chłodniczej [L. 2, 3].

W literaturze można znaleźć wiele prac dotyczących właściwości tribologicznych mieszaniny olej–czynnik chłodniczy. Badania wykonywano na różnych prototypowych maszynach tribologicznych z wykorzystaniem węzłów tarcia znajdujących się w komorach ciśnieniowych. Jako węzeł tarcia najczęściej wykorzystywano tarczę–trzcpiel, realizując ruch obrotowy [L. 2, 4–7]. Przeprowadzono niewiele badań z wykorzystaniem węzła typu płytka–kula odzwierciedlającym ruch posuwisto-zwrotny [L. 8] oraz z węzłem ślizgowym typu rolka–klocek [L. 9]. Węzeł typu rolka–klocek najbardziej odzwierciedla pracę poprzecznych łożysk ślizgowych, dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie badań z wykorzystaniem wspomnianego węzła tarcia.

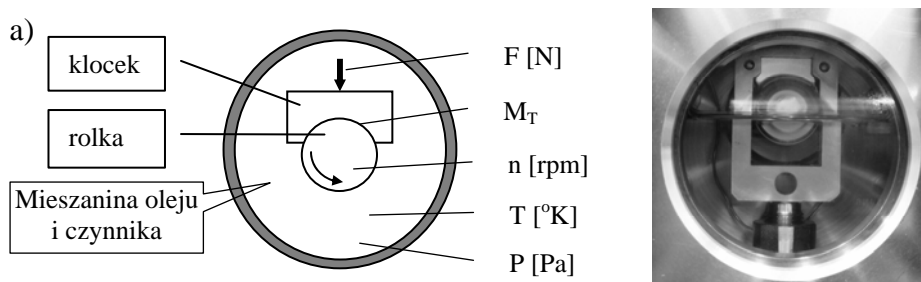
Obowiązujące przepisy dotyczące stosowania substancji zubożających warstwę ozonową wymuszają wymianę szkodliwych czynników chłodniczych na czynniki naturalne, ekologiczne, np. propan. W literaturze można spotkać stosunkowo dużo publikacji na temat zastosowania propanu jako zamiennika czynników obecnie wykorzystywanych. Natomiast nie przeprowadzono kompleksowych badań tribologicznych wykazujących zachowanie się powierzchni ślizgowych sprężarek chłodniczych w wyniku zastąpienia czynnika R134a czynnikiem naturalnym, tj. propanem.

METODYKA BADAŃ

We wcześniejszych badaniach autora dotyczących zużycia rzeczywistych sprężarek chłodniczych w kontrolowanych warunkach pracy stwierdzono, iż powierzchnie poprzecznych łożysk ślizgowych, w tłokowych sprężarkach chłodniczych najszybciej ulegają zatarciu [L. 10]. Przeprowadzono kolejne badania z wykorzystaniem prototypowego stanowiska badawczego wyposażonego w komorę wysokociśnieniową, w której umieszczono węzeł tarcia typu block-on-ring (Rys. 1).

W celu odzwierciedlenia pracy poprzecznych łożysk ślizgowych w tłokowych sprężarkach chłodniczych zastosowano węzeł tarcia typu block-on-ring.

W testach wykorzystano nieruchome próbki wklęsłe w kształcie klocka z aluminium PA6 oraz ruchome rolki z żeliwa szarego. Zastosowany węzeł w komorze wysokociśnieniowej umożliwia wykonanie badań tribologicznych w mieszaninach różnorodnych olejów i czynników chłodniczych w różnych temperaturach i ciśnieniach. Wytworzenie mieszaniny olej–czynnik w komorze pozwala na wykonanie badań w rzeczywistych warunkach pracy sprężarek chłodniczych. Konstrukcja stanowiska umożliwia zmianę siły nacisku na klocek oraz zmianę prędkości obrotowej rolki. W trakcie testu następuje rejestracja wartości momentu tarcia, prędkości obrotowej rolki, ciśnienia i temperatury w komorze.



Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) schemat komory wraz z węzłem tarcia typu block-on-ring, b) komora z węzłem modelowym

Fig. 1. Test stand: a) scheme of chamber with friction pair type block-on-ring, b) chamber with model pair

Aby ocenić wpływ różnych mieszanin olej–czynnik chłodniczy na powierzchnie ślizgowe sprężarek tłokowych, wykonano testy w mieszaninie oleju mineralnego z czynnikami R134a i R290 oraz w mieszaninie oleju syntetycznego poliestrowego z czynnikami R134a i R290. W Tabeli 1 przedstawiono warunki przeprowadzonych badań.

W celu osiągnięcia stanu ustalonego, tj. nasycenia oleju smarowego czynnikiem chłodniczym wytwarzano mieszaninę olej–czynnik chłodniczy zgodnie

z zaleceniami Hong-Gyu [L. 5] i Hoon Choa Sung [L. 11]. Do komory badawczej wypełnionej olejem wprowadzano przez jedną minutę czynnik chłodniczy pod ciśnieniem 0,5 MPa. Napełnianie powtórzono po 15 i 30 minutach. W celu uzyskania zamierzonego nasycenia przygotowaną w ten sposób mieszaninę pozostawiono na okres 20 h. Badania przeprowadzono przy temperaturze 298 K, co odpowiada warunkom rozruchu sprężarek chłodniczych.

Tabela 1. Warunki badań

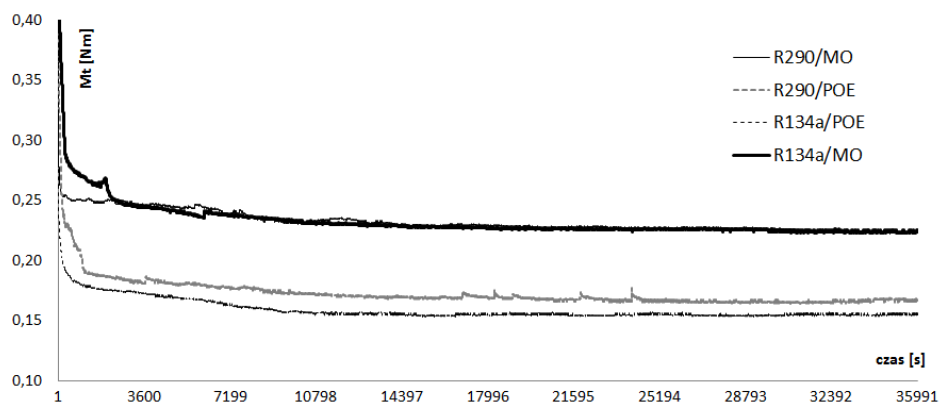
Table 1. Test conditions

Parametry testu	Zastosowane materiały badawcze
siła nacisku 120 N	materiał rolki żeliwo szare GJL-200
prędkość obrotowa 500 obr./min	materiał klocka PA6 (AlCu4MgSi)
czas testu 36000 s	olej mineralny (MO) Rensio KM 32
temperatura 298 K	olej poliestrowy (POE) Planetelf ACD 32
ciśnienie 0,022 MPa	czynniki chłodnicze: R134a oraz R290

WYNIKI I DYSKUSJA

Moment tarcia

Na **Rysunku 2** przedstawiono wykresy momentu tarcia w czasie dla badań mieszaniny: oleju smarowego PLANETELF ACD 32 (POE) z czynnikiem R290, oleju smarowego RENISO KM 32 (MO) z czynnikiem R290, oleju smarowego PLANETELF ACD 32 (POE) z czynnikiem R134a oraz oleju smarowego RENISO KM 32 (MO) z czynnikiem R134a.



Rys. 2. Zmiany momentu tarcia w czasie badania dla różnych mieszanin

Fig. 2. Changes of friction moment during test for different mixtures

Moment tarcia w początkowym okresie pracy skojarzenia badawczego przyjmował różne wartości. Po około 2200 s nastąpił powolny spadek, po czym stabilizacja miała miejsce po około 9000 s. W testach przeprowadzonych w mieszaninach R290/POE i R134a/POE moment tarcia ustabilizował się przy wartościach 0,168 Nm i 0,155 Nm, natomiast w mieszaninach R290/MO i R134a/MO stabilizacja momentu tarcia została osiągnięta na poziomie 0,227 Nm.

Wartości momentu tarcia sugerują zasadność zastępowania czynnika R134a przez ekologiczny czynnik R290 dla kryterium zmniejszenia oporów ruchu w węzłach tarcia w sprężarkach chłodniczych. Wyraźnie widać, że mieszaniny czynników R134a i R290 z olejem syntetycznym poliestrowym powodują mniejszy moment tarcia niż mieszaniny tych samych czynników z olejem mineralnym.

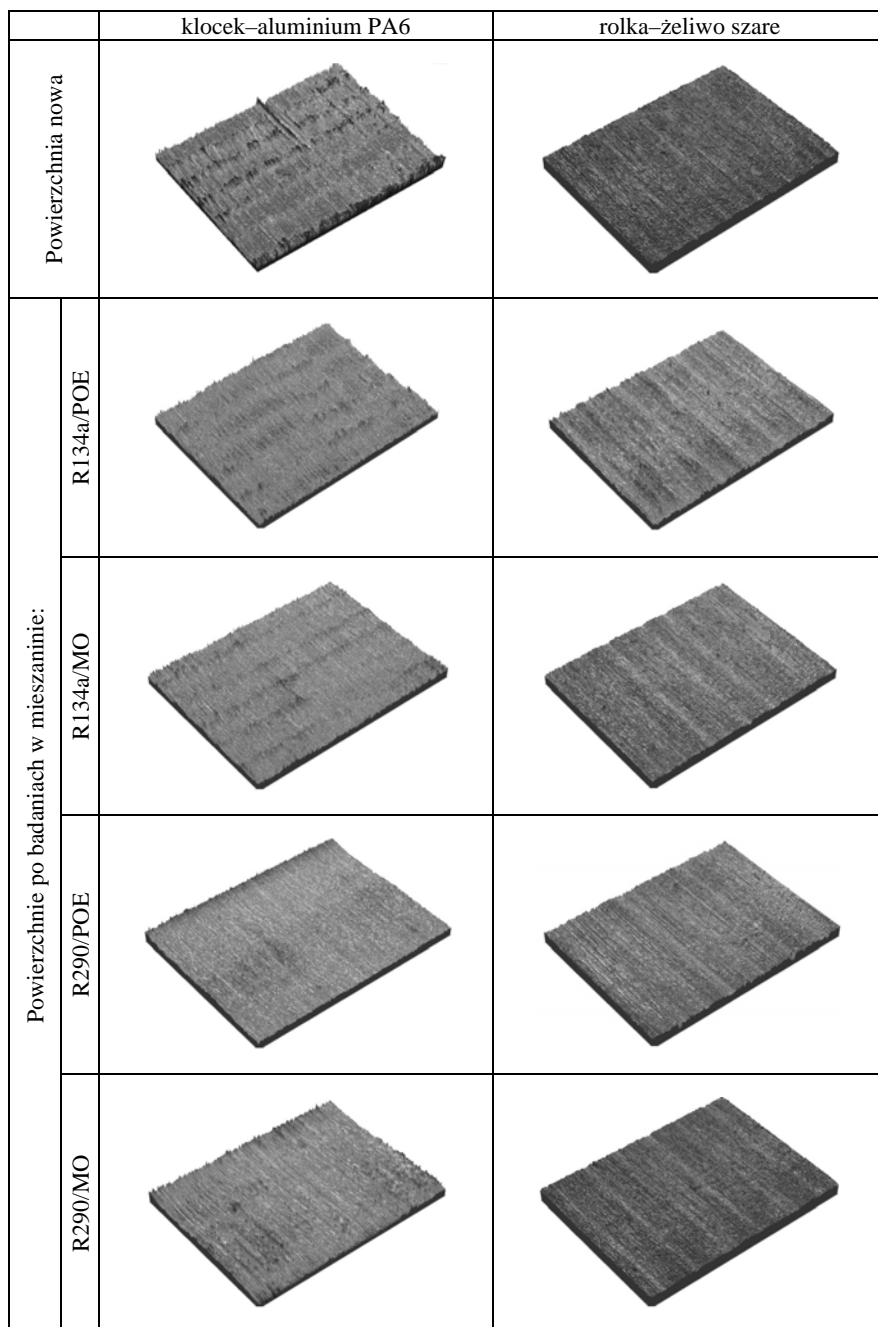
Chropowość powierzchni tarcia

Powierzchnie ślizgowe poddano pomiarom nierówności za pomocą trójwymiarowego optycznego profilometru NT1100 firmy Veeco. Uzyskane profile chropowości badanych powierzchni przedstawiono na **Rysunku 3**.

Po badaniach przeprowadzonych z użyciem czynników R290 i R134a z olejem mineralnym oraz z olejem syntetycznym na powierzchniach żeliwa zaobserwowano niewielkie ślady bruzdowania. Natomiast w badaniach wpływu mieszanin z czynnikiem R134a na powierzchnie aluminiowe zauważono regularne, powtarzające się wzniesienia. Przyczyną zmiany kształtu tych powierzchni może być pierwotna geometria próbek. Z kolei na profilach chropowości uzyskanych po badaniach w mieszaninach z udziałem oleju mineralnego pojawiły się większe regularne wzniesienia i wgłębienia tworzące fałę. Prawdopodobnie jest to spowodowane większym wytarciem materiału. Obserwując profile, można sądzić, że powierzchnie po badaniach w mieszaninach z olejem syntetycznym są bardziej równomierne, o małych wzniesieniach i bez ostrych wierzchołków.

W **Tabeli 2** przedstawiono wybrane parametry chropowości: największą wysokość profilu chropowości Rz, całkowitą wysokość profilu chropowości Rt oraz średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowości Ra. Zamieszczono również wartość Rq (średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowości) będącą parametrem bardziej oddającym charakter nierówności niż parametr Ra. Ponadto w tabeli znajduje się parametr Rp (wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowości). Dodatkowo w tabeli zostały umieszczone współczynniki asymetrii i nachylenia profilu chropowości Rsk oraz Rku.

Na **Rysunku 4** przedstawiono wartości Rp, Rp/Rz, Rku i Rsk dla powierzchni nowych i po badaniach w mieszaninach olej–czynnik chłodniczy.



Rys. 3. Profile chropowości powierzchni ślizgowych uzyskane za pomocą profilometru NT1100

Fig. 3. Roughness profiles of sliding surfaces obtained with the use of profile measurement gauge NT1100

Tabela 2. Parametry chropowości uzyskane z użyciem profilometru

Table 2. Roughness parameters obtained with the use of profile measurement gauge

	Parametr	Powierzchnia nowa	Powierzchnia po badaniu w mieszaninach			
			R134a/POE	R134a/MO	R290/MO	R290/POE
Żeliwo szare	Ra [μm]	0,30	0,34	0,31	0,33	0,42
	Rq [μm]	0,40	0,43	0,41	0,46	0,61
	Rp [μm]	1,96	2,07	2,25	2,08	2,35
	Rz [μm]	4,19	3,16	5,32	4,81	9,36
	Rt [μm]	7,53	5,84	8,18	8,77	8,90
	Rp/Rz	0,37	0,49	0,42	0,43	0,29
	Rsk	-1,39	-0,43	-1,07	-1,23	-1,84
	Rku	5,93	3,44	7,26	6,45	6,66
PA6	Ra [μm]	0,30	0,24	0,23	0,29	0,36
	Rq [μm]	0,37	0,29	0,28	0,36	0,45
	Rp [μm]	1,55	1,65	1,90	2,19	2,39
	Rz [μm]	2,48	2,60	2,75	4,12	3,95
	Rt [μm]	4,40	3,22	3,29	5,12	4,50
	Rp/Rz	0,52	0,64	0,69	0,53	0,61
	Rsk	0,01	0,20	-0,05	0,36	0,08
	Rku	2,89	3,09	3,15	3,67	3,21

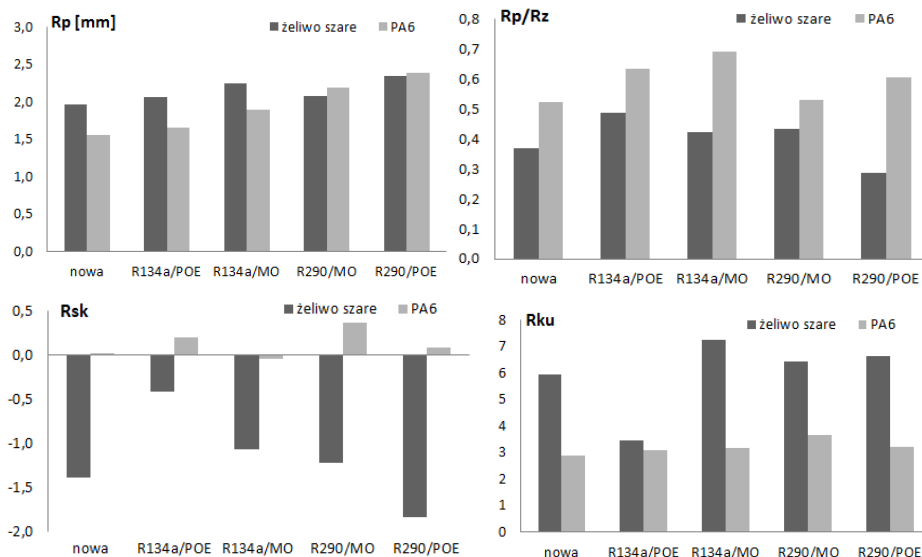
**Rys. 4. Porównanie wartości Rp, Rp/Rz, Rku i Rsk dla powierzchni nowej i po badaniach w mieszaninach R134a/POE, R134a/MO, R290/POE oraz R290/MO**

Fig. 4. Comparison of values Rp, Rp/Rz, Rku and Rsk for new surface and for surface after tests in mixtures R134a/POE, R134a/MO, R290/POE and R290/MO

Jak wynika z powyższych rysunków, wartości parametru R_p uzyskane z powierzchni po testach są większe niż dla powierzchni nowych. Większe wartości R_p wskazują na powierzchni o ostrych wierzchołkach, czyli o gorszej odporności na ścieranie. Z **Rysunku 4** wynika, że parametr R_p jest większy na powierzchniach żeliwa, natomiast większy przyrost tego parametru względem powierzchni nowej nastąpił na powierzchniach aluminiowych.

Stosunek parametrów R_p/R_z informuje o kształcie profilu. Z **Rysunku 4** można wnioskować, że powierzchnie żeliwa mają mniejsze wartości tego stosunku, natomiast powierzchnie aluminiowe – większe wartości. Wartość stosunku znacznie powyżej 0,5 sugeruje, że powierzchnia ma ostre wierzchołki. Jeśli wartość jest dużo mniejsza niż 0,5, to profil jest zaokrąglony i wówczas powierzchnia taka powinna być bardziej odporna na ścieranie. Z przeprowadzonych testów wynika, iż powierzchnie z żeliwa są bardziej odporne na ścieranie, w szczególności po badaniach w mieszaninie R290/POE.

Zgodnie z **Rysunkiem 4** współczynnik nachylenia profilu chropowatości R_{ku} jest prawie niezmienny dla powierzchni aluminium. Natomiast dla powierzchni żeliwnych ulega onb zmianie. Duże wartości współczynnika nachylenia są wyznacznikiem wysokich wierzchołków lub głębokich dolin porofilu. Parametr ten może służyć do wykrywania wad powierzchni. Zatem na podstawie omawianego rysunku można wysunąć wniosek, że powierzchnie żeliwa mogą mieć uszkodzenia.

Parametr R_{sk} zwany skośnością lub asymetrią profilu mówi o rozkładzie profilu względem linii średniej. Z uzyskanych pomiarów wynika, że większość powierzchni ma ujemną skośność, która wskazuje na koncentrację materiału w pobliżu wierzchołków profilu. Oznaczać to może, że na powierzchni mogą występować głębokie doliny, w których prawdopodobnie znajduje się smar. Obecność smaru na powierzchni jest korzystna dla łożyska. Z **Rysunku 4** wynika, że ujemne wartości R_{sk} ma głównie powierzchnia żeliwa. Powierzchnie te nadają się na łożyska, szczególnie w mieszaninie R290/POE.

Analizując uzyskane parametry chropowatości powierzchni, można założyć, iż generalnie powierzchnie aluminiowe są bardziej podatne na ścieranie w środowisku mieszaniny olej–czynnik chłodniczy. Natomiast powierzchnie żeliwne po wykonanych badaniach znacząco się nie różnią. Zasadniczo nie zauważono zmian parametrów chropowatości na skutek oddziaływania mieszanin oleju MO z czynnikami chłodniczymi R134a i R290, jak również mieszanin oleju POE z czynnikami R134a i R290, przy czym najlepsze parametry chropowatości uzyskała powierzchnia po badaniu w mieszaninie R290/POE.

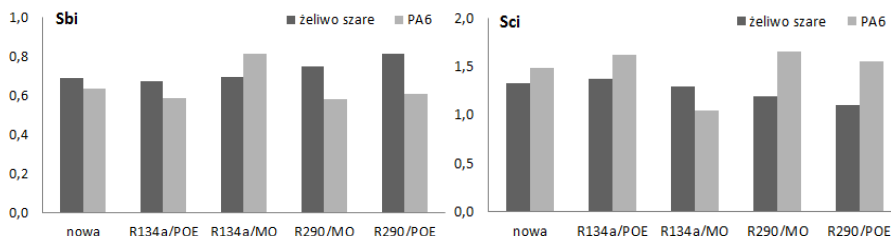
Dodatkowo oprócz standardowych parametrów chropowatości uzyskano wskaźniki powierzchni za pomocą trójwymiarowego optycznego profilometru. W **Tabeli 3** oraz na **Rysunku 5** zamieszczono wybrane parametry nośności powierzchni uzyskane z analizy trójwymiarowej, tj. wskaźnik nośności po-

wierzchni Sbi, wskaźnik utrzymania płynu przez rdzeń Sci i wskaźnik utrzymania płynu przez doliny Svi.

Tabela 3. Parametry chropowatości 3D związane z nośnością powierzchni

Table 3. Roughness parameters 3D related to surface capacity

	Parametr	Powierzchnia nowa	Powierzchnia po badaniu w mieszaninach			
			R134a/POE	R134a/MO	R290/MO	R290/POE
Żeliwo szare	Sbi	0,69	0,68	0,70	0,75	0,82
	Svi	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15
	Sci	1,33	1,37	1,30	1,19	1,10
PA6	Sbi	0,64	0,59	0,82	0,58	0,61
	Svi	0,10	0,10	0,18	0,05	0,10
	Sci	1,49	1,63	1,05	1,66	1,56



Rys. 5. Porównanie wartości parametrów Sbi, i Sci dla powierzchni nowej i po badaniach w mieszaninach R134a/POE, R134a/MO, R290/POE oraz R290/MO

Fig. 5. Comparison of values of parameters Sbi, and Sci for new surface and for surface after tests in mixtures R134a/POE, R134a/MO, R290/POE and R290/MO

Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane z analizy trójwymiarowej chropowatości powierzchni, można przyjąć, iż powierzchnie po przeprowadzonych badaniach mają porównywalne wskaźniki nośności, co oznaczać może, że powierzchnie te mogą mieć porównywalne właściwości tribologiczne.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem mieszanin olej–czynnik chłodniczy na powierzchnię żeliwa szarego i aluminium PA6.

Przeprowadzono badania z wykorzystaniem prototypowego stanowiska badawczego wyposażonego w komorę wysokociśnieniową, w której umieszczono węzeł tarcia typu block-on-ring. Węzeł ten z kolei odzwierciedla pracę poprzecznych łożysk ślizgowych sprężarek chłodniczych. Stanowisko posłużyło do symulacji rzeczywistej pracy w warunkach kontrolowanych: temperatury, ciśnienia, siły nacisku oraz prędkości obrotowej.

Badania wykonano w mieszaninach oleju mineralnego z czynnikiem R134a oraz z propanem (R290). Wykonano również testy w mieszaninach oleju syntetycznego poliestrowego z czynnikami R134a i R290.

Obserwując uzyskane wyniki z analizy dwu- i trójwymiarowej chropowości powierzchni, można przyjąć, iż powierzchnie po badaniach mają porównywalne parametry, szczególnie wskaźniki nośności. Analizując uzyskane parametry chropowości, można założyć, iż powierzchnie aluminiowe są bardziej podatne na ścieranie w środowisku mieszaniny olej–czynnik chłodniczy. Powierzchnie po badaniach zasadniczo nie różnią się między sobą. Nie stwierdzono istotnych zmian parametrów chropowości na skutek oddziaływania mieszanin składających się z oleju mineralnego (MO), syntetycznego poliestrowego (POE) oraz czynników chłodniczych R134a i R290.

Z uwagi na obowiązujące przepisy dotyczące stosowania substancji zubożającej warstwę ozonową obecnie następuje powrót do czynników ekologicznych, między innymi propanu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono możliwość zmiany czynnika R134a na propan. Powierzchnie ślizgowe nie wykazują istotnych zmian w następstwie zastąpienia czynnika R134a przez R290, zatem przeprowadzone badania tribologiczne potwierdzają, iż zamiennikiem czynnika R134a może być ekologiczny propan.

Z uwagi na właściwości wybuchowe propanu czynnik ten, zgodnie z przepisami bezpieczeństwa, można stosować bez żadnych ograniczeń w hermetycznych agregatach chłodniczych o napełnieniu do 150 g propanu. Reasumując, należy uznać, iż w małych instalacjach chłodniczych propan jest odpowiednim zamiennikiem czynnika R134a.

LITERATURA

1. Grzebielac A., Pluta Z., Ruciński A., Rusowicz A.: Czynniki chłodnicze i nośniki energii. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009.
2. Suh A.Y., Patel J.J., Polycarpou A.A., Conry T.F.: Scuffing of cast iron and Al390-T6 materials used in compressor applications, *Wear*, 260(7–8), 2006, pp. 735–744.
3. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W.: Specification of lubricating oil operation in refrigeration compressors, *Tribologia*, 3/2010, s. 63–73.
4. De Mello J.D.B., Binderb R., Demasc N.G., Polycarpou A.A., Effect of the actual environment present in hermetic compressors on the tribological behaviour of a Si-rich multifunctional DLC coating, *Wear* 267 (2009) pp. 907–915.
5. Hong-Gyu Jeon, Se-Doo Oh, Young-Ze Lee: Friction and wear of the lubricated vane and roller materials in a carbon dioxide refrigerant, *Wear*, 267(5–8), 2009, pp. 1252–1256.
6. Cannaday M.L., Polycarpou A.A.: Advantages of CO₂ compared to R410a refrigerant of tribologically tested Aluminum 390-T6 surfaces, *Tribology Letters*, 21(3), 2006, pp. 185–192.

7. Demas G.N, Polycarpou A.A.: Tribological investigation of cast iron air-conditioning compressor surfaces in CO₂ refrigerant, *Tribology Letters*, 22(3), 2006, pp. 271–278.
8. Garland N.P., Hadfield M.: Tribological analysis of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor, *Tribology International*, 38(8), 2005, pp. 732–739.
9. Birol Y., Birol F.: Sliding wear behaviour of thixoformed AlSiCuFe alloys, *Wear*, 265(11–12), 2008, pp. 1902–1908.
10. Tyczewski P.: Brak oleju przyczyną uszkodzenia samochodowej sprężarki chłodniczej, *Logistyka* 3/2014, s. 6458–6462.
11. Hoon Choa Sung: Tribological characteristics of various surface coatings for rotary compressor vane, *Wear*, 221(2), 1998, pp. 77–85.

Summary

Due to valid regulations concerning the application of substances weakening the ozone layer, at present, there is reversion to ecological refrigerants. The purpose of the work was testing the influence of substituting the refrigerant R134a with ecological propane in the mixture of oil and refrigerant on sliding surfaces of piston compressors. The tests were carried out in mixtures of mineral oil with refrigerants R134a and R290 and in mixtures of synthetic polyester oil with refrigerants R134a and R290. The tests were performed with the use of a friction machine using a pair type block-on-ring, which was situated in the chamber simulating the inside of the refrigerating compressor. The results obtained from the performed tests confirm the possibility of using propane instead of R134a.