

Przemysław Tyczewski

# Porównanie powierzchni elementów sprężarek chłodniczych pracujących w różnych warunkach eksploatacji

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.479

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W pracy przedstawiono wyniki badania zużycia rzeczywistych łożysk ślizgowych występujących w sprężarkach chłodniczych pracujących w różnych niekorzystnych warunkach pracy. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym składającym się z rzeczywistych elementów chłodniczych. Analiza zużycia polegała na porównaniu profili chropowatości powierzchni po próbach badawczych w ekstremalnych warunkach pracy z powierzchniami nowymi.

**Słowa kluczowe:** sprężarka chłodnicza, zużycie, łożysko ślizgowe

## Wstęp

Węzły ślizgowe sprężarek chłodniczych narażone są na różnego rodzaju procesy zużycia w zależności od stosowanych olejów, czynników chłodniczych [1, 2, 3] oraz warunków pracy [4]. Przyczynami mechanicznych uszkodzeń sprężarek jest brak oleju, przegrzanie sprężarki, uderzenie cieczowe, rozruch zalanej sprężarki oraz zalanie ciełym czynnikiem [5]. Niewłaściwe smarowanie spowodowane jest najczęściej stosowaniem nieodpowiednio dobranego oleju do czynnika chłodniczego, tworzy się wówczas mieszanina olej – czynnik chłodniczy o nie odpowiednich właściwościach trybologicznych.

Olej stosowany w układach chłodniczych powinien posiadać odpowiednią smarność, powinien ochładzać sprężarkę, mieć odporność na krzepnięcie w niskich temperaturach (które występują w parowniku) oraz posiadać odpowiednią mieszalność i kompatybilność z czynnikami chłodniczymi. Oleje muszą posiadać odpowiednie właściwości smarne zapewniające tworzenie się filmu olejowego na elementach trących, jak również zdolność powrotu z układu chłodniczego do sprężarki [6].

Mieszanina olej – czynnik chłodniczy cechuje się złożonymi zależnościami. W przypadku przekroczenia wzajemnej mieszalności część czynnika jest zaabsorbowana przez olej. W zależności od składu mieszaniny, temperatury i ciśnienia mieszanina oleju z czynnikiem może mieć charakter jednofazowy lub dwufazowy. Złożone zależności w przypadku mieszaniny olej – czynnik chłodniczy powodują, iż właściwości smarne i przeciwzużyciowe są dużo gorsze niż oleju czystego. Właściwości te bardzo zmieniają się w podczas zmiany temperatury oraz ciśnienia, między innymi na skutek zmiany stanu skupienia czynnika chłodniczego, który w jednym miejscu instalacji jest w stanie ciekłym w innym w stanie gazowym.

Z uwagi na zmieniające się przepisy dotyczące stosowania substancji zubożających warstwę ozonową wprowadzane są nowe czynniki chłodnicze. Czynniki chłodnicze z olejami sprężarkowymi tworzą mieszaniny powodujące przyspieszone zużycie sprężarek chłodniczych [7, 8, 9]. Ze względu na złożoność problemów obecnie nie ma ustalonych międzynarodowych norm dotyczących wymagań olejów stosowanych w sprężarkach chłodniczych. W obecnym czasie nie ma również uniwersalnego oleju do sprężarek chłodniczych. Olej należy dobierać dla odpowiedniej sprężarki i czynnika chłodniczego, zgodnie z zaleceniem producenta sprężarki.

## 1. Metodyka badań

W celu zbadania wpływu niekorzystnych warunków pracy instalacji chłodniczej na zużycie trybologiczne powierzchni elementów ruchowych sprężarki wykonano odpowiednie stanowisko badawcze (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko do badania procesów zużycia sprężarek chłodniczych

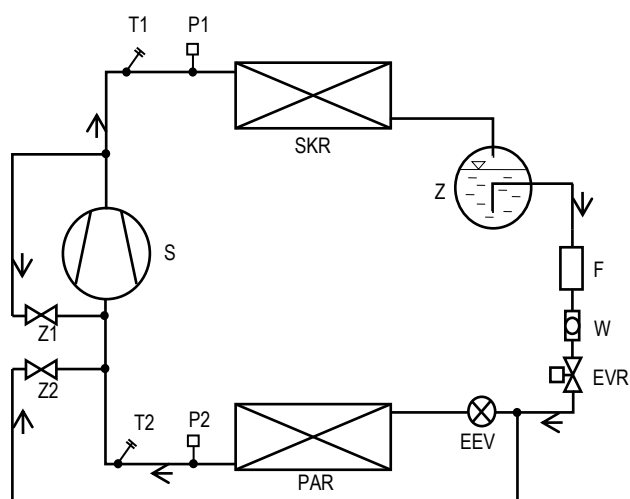


Rys. 2. Sprężarka używana do testów wraz z węzłem ślizgowym z panewką

Stanowisko składa się z rzeczywistych elementów układu chłodniczego. Zbudowane jest z sprężarki, parownika, filtra, wzier-

ników, elektronicznego zaworu rozprężnego, zaworu elektromagnetycznego i skraplacza. Za pomocą pokręteł można sterować obrotami wentylatorów na parowniku i skraplaczu, wartością przegrzania oraz stopniem otwarcia zaworu rozprężnego. Najważniejszym elementem stanowiska jest sprężarka chłodnicza znajdująca się w rozbiernym korpusie. Semihermetyczna obudowa umożliwia wymianę sprężarki w celu oceny stopnia zużycia jej elementów ruchomych. Poszczególne składowe stanowiska zostały odpowiednio dobrane, aby zapewnić jak najbardziej uniwersalną instalację dla różnych czynników chłodniczych i różnych olejów. Na rysunku 3 pokazano schemat stanowiska. Na tym stanowisku można symulować następujące niekorzystne warunki pracy instalacji:

- pracę sprężarki przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu,
- zalewanie sprężarki ciekłym czynnikiem,
- doprowadzenie gorących gazów do sprężarki,
- pracę układu z powietrzem i wilgocią,
- pracę sprężarki w różnych ilościach oleju,
- pracę sprężarki przy braku oleju,
- pracę z różnymi czynnikami chłodniczymi,
- pracę z różnymi olejami.



**Rys. 3.** Schemat stanowiska badawczego. S - sprężarka zamontowana w rozbiernej obudowie; SKR - skraplacz; PAR - parownik; Z - zbiornik czynnika chłodniczego; F - odwadniacz; W - wziernik; EVR - zawór elektromagnetyczny; EEV - elektroniczny zawór rozprężny, sterowany mikroprocesorowym sterownikiem EVD evolution; Z1 - zawór (praca gorąca); Z2 - zawór (praca mokra); T1, T2 - czujniki temperatury; P1, P2 - czujniki ciśnienia [10]

Przeprowadzając następujące badania: pracę sprężarki przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu, przy zalewaniu sprężarki ciekłym czynnikiem chłodniczym, z doprowadzeniem gorących gazów czynnika chłodniczego do korpusu sprężarki oraz przy braku oleju. Wszystkie badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (rys. 1) z zamontowaną sprężarką tłokowa Embraco Aspera NE9213GK. Do testów wykorzystano olej do sprężarek chłodniczych TOTAL PLANETELF ACD 32. Jest to olej syntetyczny poliestrowy na bazie estrów polioili (POE). Instalacja chłodnicza była napełniana czynnikiem R407C (ZEO) o składzie: 23% R32 (CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), 25% R125 (C<sub>2</sub>HF<sub>5</sub>) i 52% R134 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>). Każde badanie trwało 30 dni.

**Test pracy przy wysokiej temperaturze i wysokim ciśnieniu.** Dla zapewnienia niekorzystnych warunków pracy sprężarki przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu, na stanowisko odpowiednio ustawiono obroty wentylatorów oraz nastawiono wysokie przegrza-

nie czynnika. Uzyskano wysoką, niekorzystną temperaturę, w której pracuje sprężarka.

Badania przeprowadzono w warunkach, w których temperatura tłoczenia wynosiła 390 T, temperatura ssania 291 T, ciśnienie tłoczenia 2,74 MPa, ciśnienie ssania 0,12 MPa [11].

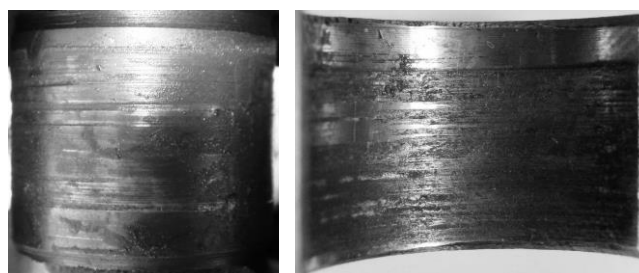
**Badanie z zalewaniem sprężarki ciekłym czynnikiem.** W celu uzyskania na stanowisku sytuacji, w której do sprężarki na stronę ssawną dostaje się czynnik chłodniczy w formie ciekłej, otworzono zawór Z2. Przez zawór nastąpił przepływ czynnika w fazie ciekłej do sprężarki powodując, że na elementy ruchome sprężarki działa mieszanina oleju i ciekłego czynnika.

Podczas testu temperatura tłoczenia wynosiła 362 T, temperatura ssania 299 T, ciśnienie tłoczenia 1,42 MPa, a ciśnienie ssania 0,54 MPa [12].

**Doprowadzenie gorących gazów do sprężarki.** Test z doprowadzeniem gorących gazów do sprężarki miał na celu stworzenie niekorzystnych warunków pracy, poprzez podniesienie temperatury pracy sprężarki. Otwarcie zaworu Z1 spowodowało wprowadzenie gorących gazów na stronę ssawną sprężarki.

Badania przeprowadzono w następujących warunkach pracy: temperatura tłoczenia wynosiła 382 T, temperatura ssania 296 T, ciśnienie tłoczenia 2,51 MPa, a ciśnienie ssania 0,19 MPa [13].

**Badanie do zatarcia sprężarki.** Na skonstruowanym stanowisku wykonano badania przy braku oleju. Po włączeniu urządzenia w trakcie kilku sekund sprężarka przestała pracować i układ wyłączył się. Okazało się, że łożysko ślizgowe sprężarki zostało zatarte. Największemu zniszczeniu uległa panewka (rys. 4) [14].



**Rys. 4.** Elementy łożyska ślizgowego sprężarki po zatarciu [14]

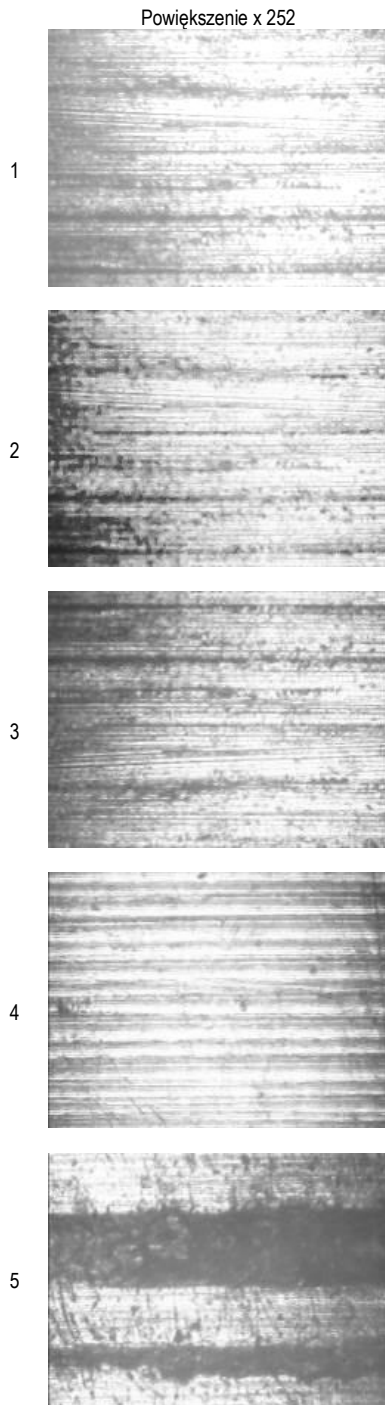
## 2. Porównanie powierzchni panewek

### 2.1. Porównanie zdjęć powierzchni

Powierzchnie panewek z łożysk ślizgowych rzeczywistych sprężarek chłodniczych poddano obserwacji za pomocą mikroskopu metalograficznego CARL ZEISS JENA. Na rysunku 5 przedstawiono powierzchnie panewek przy 120-krotnym powiększeniu.

Dla porównania na rysunku umieszczono zdjęcia powierzchni nowej panewki. Wszystkie zaprezentowane na zdjęciach powierzchnie mają rysy poprzeczne. Najbardziej jednorodne, małe są rysy powierzchni nowej. Panewki po badaniach w trudnych warunkach mają więcej głębszych rys (ciemne miejsca przedstawiają głębsze zarysowania). Można stwierdzić, iż w przypadku powierzchni po badaniu przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu oraz zalewania ciekłym czynnikiem powierzchnie są dość podobne. Występuje szereg drobnych ubytków, ponadto jest kilka głębszych rys. Natomiast po badaniu w obecności gorących gazów występują w miarę regularnie dużo szerokich bruzd, z odkształceniami o charakterze plastycznym.

Największe zużycie stwierdzono w przypadku sprężarki zatartej. Powierzchnia posiada bardzo głębokie rysy, bruzdy oraz wyrwania materiału (rys. 4).

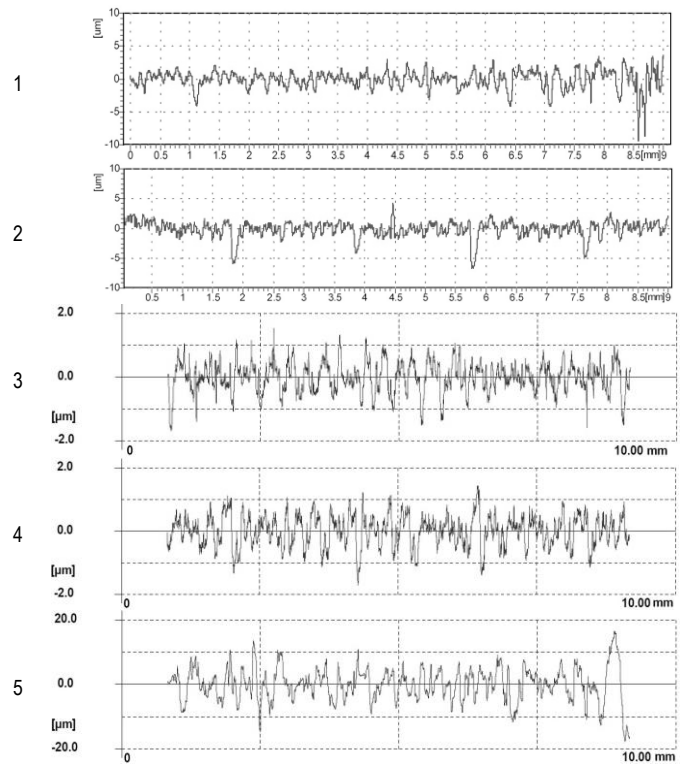


**Rys. 5.** Porównanie powierzchni, 1 – powierzchnia nowa, 2 – test przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu, 3 – badanie z zalewaniem cieplym czynnikiem, 4 – test w gorących gazach czynnika, 5 – zatarcie sprężarki

**2.2. Porównanie profili chropowatości**

Powierzchnie panewek poddano pomiarom nierówności za pomocą stykowego profilometru firmy Hommel-Etamic. Na rysunku 6 przedstawiono filtrowane (powierzchnia bez nieregularności kształtu i falistości) profile chropowatości badanych powierzchni.

Uzyskane profile chropowatości powierzchni po testach w ekstremalnych warunkach pracy porównano z profilami powierzchni panewki nowej.



**Rys. 6.** Profile chropowatości panewek, 1 – powierzchnia nowa, 2 – test przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu, 3 – badanie z zalewaniem cieplym czynnikiem, 4 – test w gorących gazach czynnika, 5 – zatarcie sprężarki

W tabeli 1 przedstawiono wybrane parametry chropowatości powierzchni panewek. Uwzględniono w niej największą wysokość profilu chropowatości Rz, całkowitą wysokość profilu chropowatości Rt oraz średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości Ra, która jest powszechnie stosowana w Europie i USA. Zamieszczono również wartość Rq (średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości) będąca parametrem bardziej oddającym charakter nierówności niż parametr Ra.

**Tab. 1.** Parametry chropowatości panewek

Warunki pracy sprężarki	Parametry chropowatości PANEWEK								
	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Rp/Rz	Rsk	Mr1	Mr2
1 sprężarka nowa	13,1	1,02	1,31	7,29	2,75	0,38	-0,8	5,25	89,2
2 wysoka temp. i ciśnienie	10,8	0,95	1,32	7,44	2,75	0,37	-1,1	3,99	86,3
3 zalewanie cieplym czynnikiem	3,44	0,39	0,50	2,70	1,28	0,48	-0,3	3,80	85,1
4 gorące pary czynnika	4,02	0,40	0,51	2,81	1,40	0,49	-0,1	3,98	85,9
5 brak oleju	37,0	4,17	5,62	26,7	12,7	0,48	-0,2	11,4	80,1
Różnica parametrów w odniesieniu do nowej powierzchni (np. Rtn-Rt)									
2 wysoka temp. i ciśnienie	2,3	0,1	0,0	-0,2	0,0	0,0	0,4	1,3	2,9
3 zalewanie cieplym czynnikiem	9,6	0,6	0,8	4,6	1,5	-0,1	-0,4	1,5	4,1
4 gorące pary czynnika	9,1	0,6	0,8	4,5	1,4	-0,1	-0,6	1,3	3,3
5 brak oleju	-24	-3,2	-4,3	-19	-10	-0,1	-0,6	-6,2	9,1
procentowa różnica w odniesieniu do nowej powierzchni (np. Rtn 100%)									
2 wysoka temp. i ciśnienie	-17	-7	1	2	0	-3	49	-24	-3
3 zalewanie cieplym czynnikiem	-74	-62	-62	-63	-53	26	-55	-24	-4
4 gorące pary czynnika	-69	-61	-61	-61	-49	29	-83	-24	-4
5 brak oleju	183	309	329	267	362	26	-78	117	-10

W tabeli tej znajduje się również parametr Rp (wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości), który pozwala na wnioskowanie o odporności na ścieranie badanych powierzchni. Ponadto w tabeli jest współczynnik asymetrii profilu chropowatości Rsk. Wszystkie wartości parametrów odniesiono do parametrów nowej powierzchni w formie różnicy oraz w ujęciu procentowym.

Małe wartości Rp charakteryzują powierzchnię o szerokich wzniesieniach i wąskich wgłębieniach. Duże wartości Rp wskazują na powierzchnię o ostrych wierzchołkach czyli o gorszej odporności na ścieranie.

Stosunek Rp/Rz informuje o kształcie profilu. Wartość stosunku znacznie powyżej 0,5 sugeruje, że powierzchnia ma ostre wierzchołki. Jeśli wartość jest dużo mniejsza niż 0,5 to profil jest zaokrąglony, zatem więc powierzchnia taka powinna być odporna na ścieranie. Zatem powierzchnie po badaniu z gorącymi gazami oraz zalewaniem cieplem czynnikiem mają najlepszy stosunek Rp/Rz.

Powierzchnia przy teście w wysokiej temperaturze i ciśnieniu jest porównywalna z powierzchnią nową. Większe nierówności uzyskano przy badaniu z cieplem i gorącym czynnikiem. Powierzchnie te są bardzo podobne do siebie. Największe wskaźniki chropowatości występują na powierzchni po zatarciu.

Parametr Rsk zwany skośnością lub asymetrią profilu mówi o rozkładzie profilu względem linii średniej. Z uzyskanych pomiarów wynika, że powierzchnia ma ujemną skośność wskazującą na koncentrację materiału w pobliżu wierzchołków profilu. Zatem powierzchnia może charakteryzować się głębokimi dolinami, w których prawdopodobnie może znajdować się środek smarny, co może powodować, że powierzchnie te korzystnie wpływają na trwałość. Z tabeli 1 wynika, że wszystkie powierzchnie mają ujemny wskaźnik Rsk.

## Podsumowanie

Obserwując uzyskane dane z profilu oraz wskaźników chropowatości można stwierdzić, że najbardziej płaska jednorodna powierzchnia jest po badaniu przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Jest ona porównywalna z powierzchnią nową a więc można stwierdzić że uzyskane parametry przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu nie wpływają na zwiększone zużycie.

Oddziaływanie ciepłego czynnika oraz gorących gazów na powierzchnie bardzo podobnie pogarszają stan powierzchni panewek. Natomiast praca sprężarki bez oleju spowodowała katastrofalne zniszczenie materiału.

Powierzchnie po teście przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu jest porównywalny z powierzchnią nową. Większe nierówności mają powierzchnie uzyskane po badaniu gorącymi gazami oraz zalewaniem czynnika które są bardzo podobne.

## Bibliografia:

1. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W., Characteristics of stands for wear tests of materials for refrigeration compressors elements, *Tribologia*, 3/2010, s. 75-84
2. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W., Ocena wpływu mieszanin olejów sprężarkowych i czynników chłodniczych na trwałość

węzłów tarcia w sprężarkach chłodniczych, *Tribologia*, 4/2010, s. 117-128

3. De Mello J.D.B., Binder 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) 907-915
4. Tyczewski P., Porównanie zużycia węzłów tarcia sprężarek chłodniczych pracujących w niekorzystnych warunkach eksploatacyjnych, *Tribologia* 3/2012, s. 217-223
5. Tyczewski P., Analiza przyczyn uszkodzeń sprężarek chłodniczych, *Logistyka*, 3/2011, s. 2871-2875
6. Bonca, Butrymowicz D., Targański W., Flajduk T., Poradnik – Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i użytkowe. IPPU MASTA, Gdańsk 2004
7. 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 (2009) 1252-1256
8. Górny K., Tyczewski P., Zwierzycki W., Specification of lubricating oil operation in refrigeration compressors, *Tribologia*, 3/2010, s. 63-73
9. Allison Y. Suh, Jayesh J. Patel, Andreas A. Polycarpou, Thomas F. Conry: Scuffing of cast iron and Al390-T6 materials used in compressor applications, *Wear*, 260 (7-8), 2006, s. 735-744
10. Tyczewski P., Stanowisko do badania uszkodzeń sprężarek chłodniczych, *Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems*, 4/2011, s. 175-183
11. Tyczewski P., Analiza zużycia węzłów tarcia sprężarek chłodniczych pracujących w wysokiej temperaturze i ciśnieniu, *Postępy Nauki i Techniki*, 11/2011, s. 89-97
12. Tyczewski P., Analiza zużycia węzłów tarcia sprężarek chłodniczych pracujących w mieszaninie oleju i ciepłego czynnika chłodniczego, *Logistyka* 06/2011, s. 3817-3823
13. Tyczewski P., Analiza zużycia węzłów tarcia sprężarek chłodniczych pracujących w obecności gorących gazów czynnika chłodniczego, *Logistyka* 06/2011, s. 3825-3830
14. Tyczewski P., Brak oleju przyczyną uszkodzenia samochodowej sprężarki chłodniczej, *Logistyka* 3/2014, s. 6458-6462

## Comparison of the surface of refrigeration compressor components operating under different operating conditions

The paper presents the results of testing the consumption of real plain bearings occurring in refrigeration compressors operating in various unfavorable working conditions. The tests were carried out on a test stand consisting of real refrigeration elements. Consumption analysis consisted in the comparison of surface roughness profiles after research trials under extreme operating conditions with new surfaces and working under normal conditions.

**Keywords:** refrigeration compressor, wear.

## Autor:

dr inż. **Przemysław Tyczewski** – Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, przemyslaw.tyczewski@put.poznan.pl