

XII Międzynarodowa Konferencja - Electromachining 2015



UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Produkcji
STOWARZYSZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
MECHANIKÓW POLSKICH – Koło Uczelniane UTP

85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7
tel. (0 52) 340-87-47, fax. (0 52) 340-82-45,
e-mail: tomasz.paczkowski@utp.edu.pl

Wykorzystanie profilometru optycznego w obrazowaniu uszkodzeń tribologicznych zaworów kulowych

Use of a optical profilometer for presentation of tribologic damages of ball valves

MICHAŁ PAJĄK¹
MONIKA MADEJ²
DARIUSZ OZIMINA³

W artykule opisano budowę i zasadę działania zaworu kulowego typu AH-2c oraz warunki jego użytkowania rekomendowane przez producenta. Przedstawiono również wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni kuli przed oraz po jego eksploatacji. Do badań kuli wykorzystano stykowy profilometr optyczny. Dodatkowo przeanalizowano rzeczywiste warunki eksploatacji oraz skład gazu LPG, który przepływał przez zawór podczas jego eksploatacji.

SŁOWA KLUCZOWE: tarcie, zużywanie, zawór kulowy, eksploatacja, profilometr stykowy

This article describes the construction and principles of operation of the ball valve (type AH-2c) as well as its terms of use recommended by the manufacturer. The results of studies on the geometric structure of the surface of the floating ball before and after the operation of the ball valve were presented. The contact optical profilometer was used in these studies. In addition, actual operation conditions and composition of gas (LPG) which flows through the ball valve during its operation were analyzed.

KEYWORDS: friction, wear, ball valve, maintenance, contact profilometer

Wprowadzenie

Straty ponoszone przez gospodarkę wskutek zużywania się części maszyn są bardzo duże. Wynikają one przede

wszystkich z niewłaściwych warunków eksploatacji warstw wierzchnich i smarowania ich węzłów ruchowych. Dane szacunkowe dowodzą, że około 30% wyzwalonej energii zużywana jest na pokonanie oporów tarcia [9, 10]

Tarcie jest zjawiskiem powszechnie zachodzącym w przyrodzie i technice. Obejmuje ono zespół procesów występujących w obszarze styku dwóch przemieszczających się ciał, w wyniku których powstają opory ruchu i jest zjawiskiem złożonym, charakteryzującym się wieloma czynnikami wpływającymi na jego obraz [2, 11, 13].

Podczas eksploatacji maszyn i urządzeń ulegają one zużyciu, prowadzącemu w efekcie do obniżenia trwałości, a nawet do całkowitej destrukcji elementu lub zespołu. Aby temu zapobiec i jednocześnie zmniejszyć straty ekonomiczne, inżynierowie i naukowcy stale podejmują działania, mające na celu wydłużenie okresu pracy maszyn i zwiększenie ich trwałości eksploatacyjnej [8, 15]

Opracowanie nowych materiałów i rozwój metod inżynierii powierzchni stwarzają stałą potrzebę oceny właściwości tribologicznych elementów par trących. Problematykę właściwości tribologicznych należy rozwiązywać jako kompleks określonych cech materiału: mechanicznych, chemicznych, fizykochemicznych [3].

Podstawowym celem badań tribologicznych jest badanie zjawisk zachodzących podczas tarcia, decydujących o jego charakterze i przebiegu oraz jego skutkach – oporach ruchu i zużyciu. Z punktu widzenia funkcji węzła tarcia jako obiektu badań zarówno opory ruchu, jak i zużycie, stanowią obserwowane wielkości wyjściowe – zużycie w wyniku tarcia należy zawsze do strat, a siła tarcia może być efektem zarówno pożądanym, jak i niepożądanym [15].

¹ mgr inż. Michał Pająk (m.pajak.poczta@interia.pl)

² dr hab. inż. Monika Madej (mmadej@tu.kielce.pl)

³ dr hab. inż. Dariusz Ozimina (ozimina@tu.kielce.pl)

Analiza pracy węzła tarcia wskazuje, że odporność na zużywanie oraz opory ruchu są właściwością całego systemu tribologicznego i zależą od warunków pracy, a nie tylko od indywidualnych cech materiałowych i właściwości pary tarczej. Odpowiedzią na oddziałujące wymuszenia, oprócz oporów ruchu, zużycia oraz efektów, takich jak drgania i ciepło, są natomiast zmiany systemu tribologicznego. W badaniach tribologicznych często dokonuje się dodatkowych pomiarów wielkości, charakteryzujących odpowiedź układu na oddziałujące wymuszenia: temperatury, drgania, opór elektryczny strefy styku. [5,11,15]. Do najbardziej istotnych niekontrolowanych czynników należą:

- produkty zużywania w strefie styku,
- zmiana właściwości chemicznych,
- zmiana właściwości fizycznych,
- zmiana właściwości mechanicznych,
- zmiana mikrogeometrii warstwy wierzchniej,
- zmiana rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej [10, 13].

Projektowanie maszyn i urządzeń pracujących w warunkach tarcia i związany z tym dobór materiałów oraz warstw powierzchniowych odpornych na zużywanie tribologiczne, musi opierać się na analizie systemowej przebiegu procesu zużywania. [15]

Budowa, zasada działania i warunki eksploatacji zaworu kulowego typu AH-2c

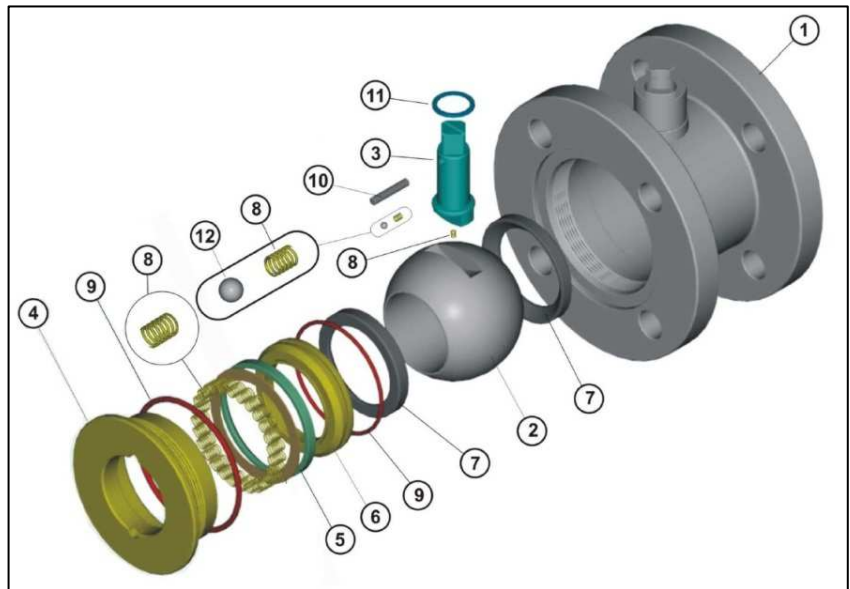
Obiektem badań opisanych w niniejszej pracy jest zawór kulowy kołnierzowy typu AH-2c o średnicy nominalnej DN 50. Producentem zaworu jest firma Broen. Zgodnie z dokumentacją, zakres temperatury pracy zaworu wynosi od - 30°C do +100°C. Dzięki zastosowanej technologii, badany zawór jest odporny na rozszerzalność cieplną i jest zabezpieczony przed nadmiernym wzrostem ciśnienia wewnątrz jego kadłuba [6].

Na rysunku 1 przedstawiono budowę badanego zaworu kulowego, a w tabeli 1 zestawiono poszczególne części zaworu wraz z materiałami z jakich zostały wykonane.

Wszystkie zawory kulowe tego typu są poddawane próbom szczelności – niedopuszczalny jest żaden objaw nieszczelności. Są one standardowo poddawane próbom ciśnieniowym polegającym na badaniu wytrzymałości obudowy, szczelności obudowy oraz szczelności zamknięcia. Zawory kulowe są wykonane w klasie szczelności zamknięcia A i w czasie eksploatacji powinny wykonać minimum 3000 przełączeń [6].

Podczas eksploatacji zaworu kulowego materiał uszczelnik determinuje wartość maksymalnej temperatury roboczej, od której zależy wartość maksymalnego ciśnienia roboczego (tab. 2). W badanym zaworze uszczelki wykonane były z teflonu [4].

Rzeczywisty czas eksploatacji zaworu w instalacji zależy od właściwości fizykochemicznych przepływającego przez niego czynnika. Zaworu kulowego nie stosuje się w instalacjach, przez które przepływają substancje posiadające stałe zanieczyszczenia, ponieważ mogą one spowodować mechaniczne uszkodzenie uszczelki i kuli. Zawory kulowe typu AH-2c wymienia się podczas remontu rurociągu na podstawie oceny zużycia [6].



Rys. 1. Budowa zaworu kulowego typu AH-2c [4]

Tab. 1. Zestawienie części zaworu wraz z opisem gatunków materiałów z jakich zostały wykonane [4]

Numer części z rysunku nr 1	Nazwa części	Gatunek materiału
1	Kadłub	P355N
2	Kula	X5CrNi18-10
3	Trzpień	X20Cr13
4	Wkrętka	P355NH
5	Uszczelka	PTFE
6	Obsada	X20Cr13
7	Uszczelka kuli	PTFE+C
8	Sprężyna	X10CrNi18-8
9	O-ring	FMQ; FKM; PTFE
10	Kołek walcowy	Stal w stanie "Q"
11	Uszczelka-podkładka	PTFE+C

Producent zakłada dwudziestoletni czas pracy zaworu, w przypadku gdy będzie on eksploatowany zgodnie z parametrami: temperatury roboczej i ciśnienia roboczego podanych w tabeli 2.

Tab. 2. Zależność temperatura robocza – ciśnienie robocze dla badanego zaworu kulowego [6]

t_{rob} [°C]	do 40	60	80	100
p_{rob} PTFE [MPa]	5	3,6	2,6	2

Materiały do badań i rzeczywiste warunki eksploatacji zaworu kulowego

Kula badanego zaworu jest wykonana ze stali kwasoodpornej 1.4021 (X5CrNi18-10). Skład chemiczny stali oraz jej właściwości fizyczne są zawarte w tabelach 3 i 4.

Zawór kulowy był eksploatowany przez 4 lata na instalacji propan-butan (LPG), w zakresie temperatury nie przekraczającym wartości zgodnych z jego zakresem pracy określonym w dokumentacji tj. od - 30°C do +100°C oraz ciśnieniem roboczym dla instalacji LPG (0,4-0,8 MPa).

Tab. 3. Skład chemiczny stali, z której wykonano kulę badanego zaworu kulowego

Gatunek	X5CrNi18-10
C [%]	<0,07
Si [%]	<1,0
Mn [%]	<2,0
P [%]	<0,045
S [%]	<0,015
N [%]	<0,11
Cr [%]	17,50-19,50
Mo [%]	-
Ni [%]	8,00-10,50
Cu [%]	-

Tab. 4. Właściwości fizyczne stali, z której wykonano kulę badanego zaworu kulowego

Granica plastyczności Re (Rp0.2) min.	230 [MPa]
Wytrzymałość na rozciąganie Rm	540-750 [MPa]
Wydłużenie przy zerwaniu A5 min	55 [%]
Twardość HB max.	215
Gęstość przy 20°C	7,9 [kg/dm ³]
Moduł sprężystości przy 20°C	200 [GPa]
Współczynnik rozszerzalności termicznej 20°C ÷ 200°C	16,50 [10 ⁻⁶ x K ⁻¹]
Współczynnik przewodzenia ciepła	15 [W/(m x K)]
Ciepło właściwe przy 20°C	500 [J/(kg x K)]
Opór właściwy	0,73 [Ω x mm ² /m]

Wyniki badań

Jakość gazu LPG w Polsce analizuje się obecnie zgodnie z wytycznymi opisanymi w rozporządzeniu Ministra gospodarki w sprawie metod badania jakości gazu skroplonego (LPG). Ustawodawca rekomenduje wiele wymagań jakościowych. Narzuca również cykliczność badań. Na potrzeby niniejszej pracy zestawiono te, które mogą mieć potencjalny wpływ na stopień i szybkość zużywania armatury ze względu na uszkodzenia tribologiczne i korozyjne.

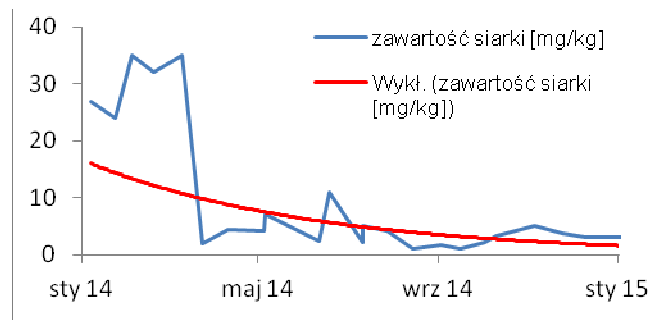
Średni skład chemiczny wybranych składników gazu LPG, (uśrednione warunki z 13 miesięcy, podczas których dokonano 24 pomiarów), który przepływał przez badany zawór kulowy przedstawiono w tabeli 5. Zestawiono go razem z parametrami granicznymi określonymi przez ustawodawcę.

Tab. 5. Średni skład wybranych składników gazu LPG przepływającego przez instalację [14]

Wymagania jakościowe	Średnie	Wymagania wg ustawodawcy
zawartość dienu	poniżej 0,1	max. 0,5 % mol
siarkowodór	brak	brak
siarka	9,2 mg/kg	max. 50 mg/kg
badania działalności korodującej na płytce miedzianej (1h w temp. 40°C)	klasa 1 w ponad 95% przypadków klasa 2 w pozostałych przypadkach	klasa 1
zawartość wody	brak	brak

Podczas eksploatacji zaworu kulowego w instalacji, jakość gazu ma wpływ na szybkość zużywania się armatury ze względu na zanieczyszczenia, które mogą spowodować uszkodzenia na poziomie chropowatości materiału. Mając na uwadze właściwości korozyjne, związki siarki są powszechnie uważane za czynniki wpływające niekorzystnie

na trwałość eksploatacyjną materiałów. Na rysunku 2 przedstawiono zmianę stężenia siarki z okresu, podczas którego dokonywano pomiarów. Ze względu na przepływające medium nie można jednoznacznie także wykluczyć pojawienia się korozji wodorowej [12].



Rys. 2. Zawartość siarki w czasie eksploatacji instalacji

W trakcie eksploatacji zaworu polepszyła się jakość gazu, ze względu na zmniejszające się stężenie siarki.

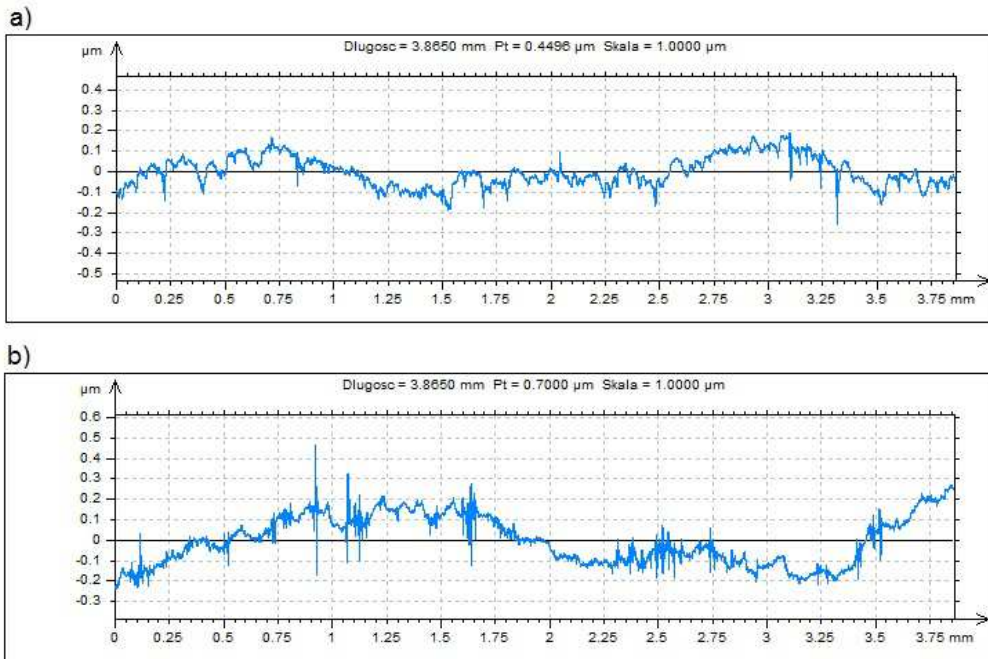
Podczas przeprowadzonych badań dokonano pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Analizę i ocenę struktury geometrycznej badanych powierzchni wykonano przy użyciu stykowego profilometru optycznego Form Talysurf PGI 1230 firmy Taylor Hobson, umożliwiające bardzo precyzyjne pomiary topografii powierzchni. Było to możliwe dzięki zainstalowanemu przetwornikowi w osi „z” - interferometru laserowego uzyskującego rozdzielczość wynoszącą 0,8 nm. Obrazy otrzymane podczas pomiarów precyzyjne oddają naturę procesów zachodzących podczas współpracy powierzchni trących w zaworach kulowych. Podczas pomiarów odcinek pomiarowy wynosił 4 mm. Badania przeprowadzono w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Analizy profili chropowatości pozwalają na precyzyjne oddanie natury procesów oraz warunków kontaktu współpracujących powierzchni [1].

W tabeli 6 zestawiono najważniejsze parametry struktury geometrycznej powierzchni. Wykresy i tabelę sporządzono dla badanego zaworu kulowego przed eksploatacją i po eksploatacji.

Tab. 6. Parametry struktury geometrycznej powierzchni

Parametr	Jednostka	przed eksploatacją	po eksploatacji
Rp	μm	0.0949	0.2203
Rv	μm	0.1365	0.2061
Rz	μm	0.2315	0.4264
Rc	μm	0.0855	0.1332
Rt	μm	0.4032	0.6280
Ra	μm	0.0275	0.0281
Rq	μm	0.0348	0.0370
Rsk		-0.6792	0.5142
Rku		3.7127	12.2076
RSm	mm	0.0566	0.0458
Rdq	°	0.4731	1.4755
Rdc	μm	0.0569	0.0626

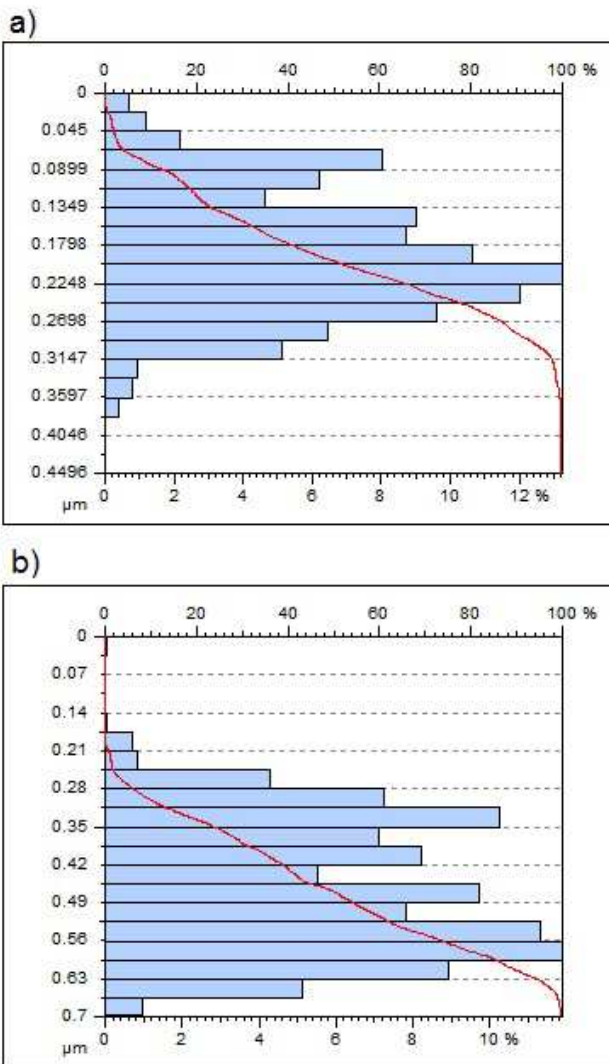
Na rysunkach 3-5 przedstawiono przykładowe profile chropowatości, rozkłady rzędnych z krzywymi nośności oraz rozkłady parametrów udziału materiałowego próbek.



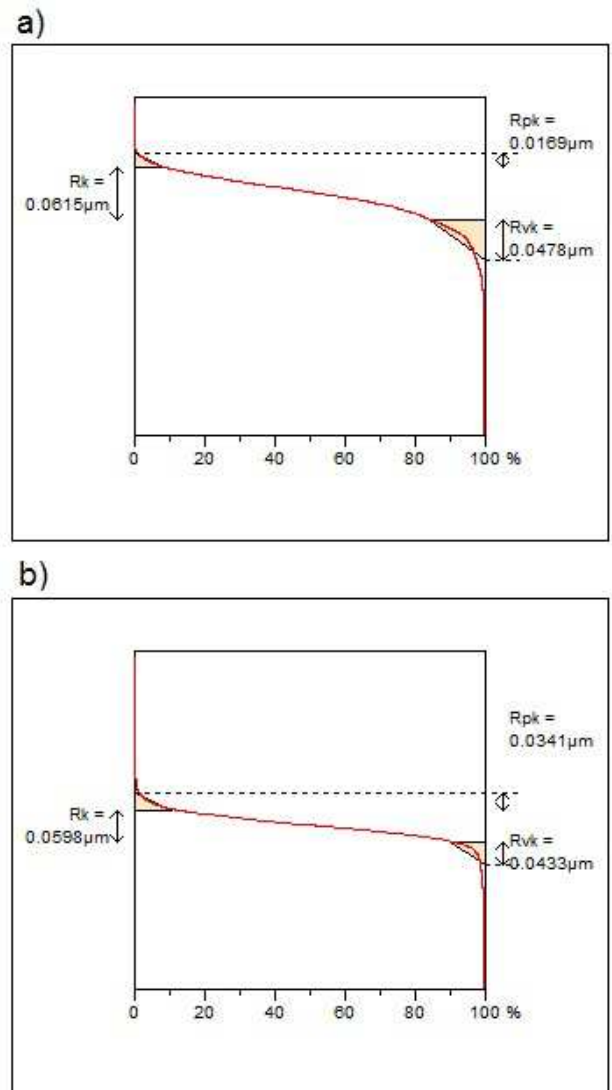
Rys. 3. Profil chropowatości: a) przed, b) po eksploatacji

wartości. Jego wartość przed eksploatacją stanowi 97,86% wartości po eksploatacji.

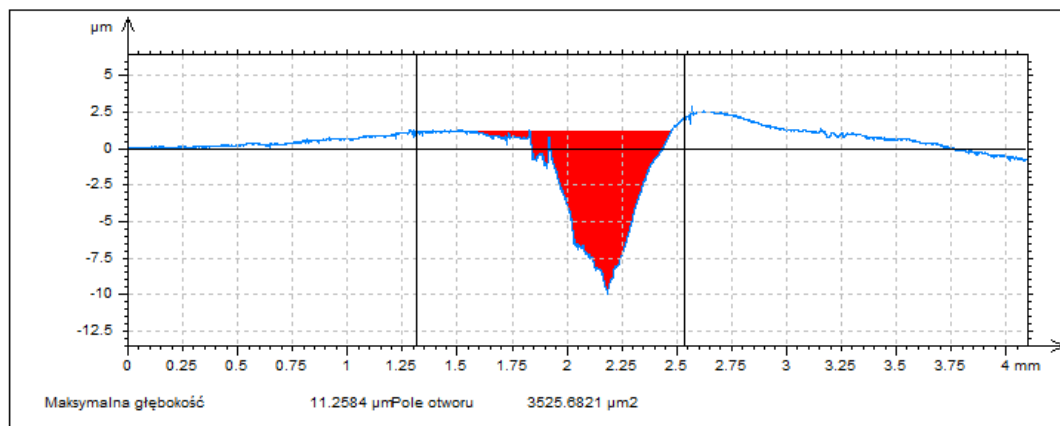
Analizując poszczególne parametry struktury geometrycznej posłużono się parametrami amplitudowymi powierzchni (tab. 6). Parametr Rp określa maksymalną wysokość piku profilu chropowatości. W przypadku badanej kuli jego wartość jest ponad dwa razy większa po eksploatacji niż przed eksploatacją. Kolejny parametr Rz, który zdefiniowany jest jako uśredniona miara maksymalnej chropowatości powierzchni, przyjmuje wartości przed eksploatacją około 2 razy mniejsze niż po eksploatacji. Następnym zbadanym parametrem jest Ra, który zdefiniowany jest jako odchylenie średnie arytmetyczne profilu chropowatości.



Rys. 4. Rozkład rzędnych i krzywa nośności próbki: a) przed eksploatacją, b) po eksploatacji



Rys. 5. Rozkład parametrów udziału materiałowego próbki: a) przed eksploatacją, b) po eksploatacji



Rys. 6. Profil chropowości dla rysy powstałej w wyniku nieprawidłowej eksploatacji badanego zaworu kulowego.

Podczas wykonywania badań określono również parametr R_q , który jest uważany za bardziej wiarygodny niż R_a . R_q został zdefiniowany jako średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowości (odpowiednik odchylenia standardowego). Jego wartość przed eksploatacją stanowi 94,05% wartości po eksploatacji. Kolejnym istotnym parametrem jest R_{sk} który, określa formę skośności badanego profilu. Może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Ujemna skośność wskazuje na koncentracje materiału w pobliżu wierzchołków profilu (powierzchnia przybliżona do kształtu płaskowyzu). Ujemna wartość wskazuje również, że badana powierzchnia może być uznana za dobrą powierzchnie eksploatacyjną. W przypadku pomiarów badanej kuli wartość przed eksploatacją jest ujemna, natomiast po eksploatacji dodatnia. Kolejnym omówionym parametrem jest R_{ku} , który dobrze nadaje się do wykrywania wad powierzchni. W przypadku, gdy powierzchnia zawiera wysokie wierzchołki lub głębokie doliny to R_{ku} osiąga bardzo duże wartości, przekraczające 20. W przypadku badanej kuli przyjmował wartości: przed eksploatacją – 3,71 a po eksploatacji 12,21. Świadczy to o tym, że zawór w badanym miejscu nie posiadał znaczących wad powierzchni. Jest to potwierdzone przez okoliczności usunięcia badanego zaworu z instalacji (zawór wykazywał niewielką nieszczelność ze względu na głęboką rysę powstałą prawdopodobnie w wyniku nieprawidłowej eksploatacji). Kolejny opisany parametr R_{sm} określa średnią wartość szerokości elementów profilu wewnątrz odcinka elementarnego. W przypadku badanej kuli przyjmuje on wartości większe przed eksploatacją niż po eksploatacji. Ostatnim godnym uwagi parametrem jest R_c , który określa średnią wysokość elementów profili chropowości. Wartość przed eksploatacją stanowi 64,19% wartości po eksploatacji.

Powyższe porównania i interpretacja parametrów ma swoje odzwierciedlenie również podczas analizy zestawionych profili chropowości (rys. 3). Profil chropowości przed eksploatacją jest bardziej spłaszczony. Posiada również mniejszą liczbę wierzchołków, które mają parametry znacząco odbiegające od średnich wartości. Potwierdza to również analiza rozkładu rzędnych i krzywych nośności próbek (rys. 4) [7,16].

Podczas analizy rozkładów parametrów udziału materiałowego próbek (rys. 5) na uwagę zasługuje znacząca różnica wartości parametru R_{pk} – jest on ponad dwa razy większy po eksploatacji niż przed nią. Parametr R_{pk} określa średnią wysokość wzniesień wystających ponad profil rdzenia chropowości – jest on średnią wysokością górnej części profilu powierzchni tj. wzniesień profilu wystających ponad jego rdzeń [16].

w pozycji półotwartej).

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano poniższe wnioski:

1. Z przeprowadzonych badań wynika, że przyczyną nieszczelności zaworu było powstanie na powierzchni kuli głębokiej rysy wskazującej na nieprawidłową jego eksploatację. Jej pozostała powierzchnia, która została poddana badaniom struktury geometrycznej powierzchni nie wykazuje znaczących wad powierzchni.
2. W obszarze powierzchni kuli, który był poddany nieprawidłowej eksploatacji, najgłębsza rysa jest ponad rząd wielkości większa niż najgłębsze wgłębienia na pozostałych obszarach jej powierzchni. Dyskwalifikuje to zawór do dalszej pracy w instalacji. Powstanie tak głębokiej rysy dodatkowo może wpłynąć na parametry falistości kuli w obrębie jej powstania, czego skutkiem jest brak szczelności.
3. Biorąc pod uwagę powierzchnie kuli po prawidłowej eksploatacji i pomijając obszary niewłaściwej eksploatacji, należy zaznaczyć, że pomimo braku jej znaczących wad, zmienił się charakter profilu, z „płaskowyzu” stał się powierzchnią, która ma gorsze parametry eksploatacyjne – znaczna ilość wąskich i wysokich wierzchołków. Stało się to w dość krótkim czasie w porównaniu z założeniami producenta, pomimo pracy w warunkach temperatury i ciśnienia nie przekraczających wartości określonych w dokumentacji.
4. Mając na uwadze to, że zmiana struktury geometrycznej powierzchni kuli zaworu nastąpiła w dość szybkim czasie, warto przeanalizować w kolejnych badaniach jak duży wpływ na to miał skład gazu LPG. Na podstawie wyników zawartych w niniejszej pracy warto również rozważyć zastosowanie przeciwzyciowych powłok, których celem byłoby zwiększenie trwałości eksploatacyjnej zaworu.

LITERATURA

1. Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistości i chropowości, WNT, Warszawa 2008.
2. Bhushan B., Introduction to Tribology, John Wiley & Sons Inc., New York 2002.
3. Burakowski T., Areologia. Podstawy teoretyczne, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, 2013.

Na uwagę również zasługuje fakt zaobserwowania skazy – rysy z obszaru którego profil chropowości przedstawiono na rysunku 6. Przedmiotowa rysa prawdopodobnie powstała w wyniku niewłaściwej eksploatacji zaworu kulowego (przypuszczalnie wskutek pracy zaworu

4. Dokumentacja techniczna kurka kulowego AH-2c.
5. Gawlik J., Zębala W., Matras A., Technologiczne i tribologiczne aspekty obróbki precyzyjnej, *Tribologia*, 4, 2011, 79-88.
6. Instrukcja obsługi kurków kulowych typu AH-2c.
7. Liubimow V., Stachowicz F., Wybrane zagadnienia fizyki kształtowania struktur geometrycznych powierzchni, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010.
8. Madej M., Właściwości powłok diamentopodobnych, *Inżynieria Maszyn*, 4, 2011, 35-42.
9. Marzec S., Pytko S., *Tribologia procesów skrawania metali. Nowe ciecze chłodząco-smarujące*, Wyd. ITeE, Radom 1999.
10. Ozimina D., *Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie*, Monografia 33, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2002.
11. Ozimina D., Madej M., Styp-Rekowski M., *Antiwear additives as retarding agents of elements with ceramic coatings wear*, *Industrial Lubrication and Tribology*, 5, 2010, 275-278. {10}.
12. Pająk M., Czy możliwy jest bezpieczny rozładunek wodoru podczas akcji. Materiały VIII Konferencji Naukowo-szkoleniowej, Spała 2011.
13. Pytko S., Pytko P., *Tribologia dla przemysłu i człowieka*, *Tribologia*, 5, 2012, 115-136.
14. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie metod badania jakości gazu skroplonego (LPG) z dnia 23 marca 2007 r. (Dz.U. Nr 59, poz. 399).
15. Stachowiak A., Zwierzycki W. *Tribocorrosion modeling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type*, *Tribology International* 09/2011; 44(10):1216-1224.
16. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J., *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko*. Wydawn. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.