

Jacek GRZESIK*, **Aleksandra LANGNER****, **Stanisław NOSAL****

USZKODZENIA USZCZELNIEŃ CZOŁOWYCH POMP WIROWYCH STOSOWANYCH W LINIACH ROZLEWNICZYCH PIWA

FAILURES OF MECHANICAL SEALS FOR THE PURPOSE CENTRIFUGAL PUMPS USED IN BEER FILLING LINES

Słowa kluczowe:

pompa wirowa, uszczelnienie czołowe, uszkodzenie, trwałość, zużycie

Key-words:

centrifugal pump, mechanical seal, damage, durability, wear

Streszczenie

W pracy zanalizowano przyczyny uszkodzeń pomp wirowych pracujących w browarze ze szczególnym uwzględnieniem uszczelnień czołowych stosowanych w tych pompach. Scharakteryzowano obiekt badań, warunki jego pracy oraz przedstawiono wyniki badań. Stwierdzono, że najbardziej zawodnymi elementami pomp wirowych są łożyska i uszczelnienia. Określono niezawodność eksploatacyjną

* Kompania Piwowarska S.A.,

** Politechnika Poznańska

** Politechnika Poznańska

uszczelnień pracujących w zbliżonych warunkach. Ustalono, że uszczelnienia najczęściej ulegają uszkodzeniom wskutek drgań w wyniku, których dochodzi do przedwczesnego zużycia powierzchni roboczej pary ślizgowej lub utraty funkcji innych elementów zespołu uszczelnienia. Przyczyną uszkodzenia uszczelnień jest także zużycie ściernie powierzchni pierścieni. Dla porównania powierzchni pierścieni: prawidłowo funkcjonującego oraz uszkodzonego wykonano profilogramy chropowatości tych powierzchni.

WPROWADZENIE

Wśród maszyn i urządzeń pracujących w browarze dużą grupę stanowią pompy wirowe, które można spotkać w każdym punkcie procesu produkcji piwa. Jednym z podstawowych węzłów konstrukcyjnych pomp, wpływających zasadniczo na ich niezawodność, jest uszczelnienie. Uszczelnienia wirujących wałów należą do najbardziej zawodnych zespołów pomp. Przyjmuje się, na podstawie badań eksploatacyjnych, że przyczyną od 40% nawet do 80% awarii tych maszyn, są uszkodzenia węzłów uszczelniających. Oczywiście jest więc dążenie do podwyższenia trwałości i niezawodności uszczelnień. Aby jednak osiągnąć wymaganą niezawodność konieczne jest rozpoznanie przyczyn prowadzących do uszkodzeń. Na poprawną pracę uszczelnienia duży wpływ mają parametry eksploatacyjne, zwłaszcza temperatura i ciśnienie oraz własności medium. Nie bez znaczenia są również takie czynniki jak drgania, gwałtowne zmiany ciśnienia i zanieczyszczenia medium [1].

Celem pracy jest wytypowanie zawodnych elementów pomp, określenie przyczyn ich uszkodzeń ze szczególnym uwzględnieniem uszczelnienia czołowego.

WARUNKI PRACY USZCZELNIENÍ

W browarze pracuje pięć linii rozlewniczych charakteryzujących się różną wydajnością, służących do rozlewu piwa do butelek o pojemności 0,5 litra oraz 0,3 litra a także do puszek o pojemności 0,5 litra. Stosowane w liniach rozlewniczych pompy są ważnymi ogniwami w całym procesie rozlewu piwa. Pompy wirowe stanowią około 95% wszystkich pomp pracujących w liniach rozlewniczych. Do uszczelniania wałów pomp wirowych stosuje się uszczelnienia czołowe z płaską

powierzchnią styku, pojedyncze lub podwójne. Charakterystyczną cechą wyróżniającą uszczelnienia czołowe spośród innych rodzajów uszczelnień jest to, że proces dławienia uszczelnianego czynnika zachodzi w płasko-równoległej szczelinie. Szczelinę tę tworzą powierzchnie ślizgowe dwóch współpracujących pierścieni. O trwałości i niezawodności uszczelnienia decydują warunki tarcia w szczelinie a zwłaszcza zachowanie jej równoległości [1].

Uszczelnienia czołowe pomp wirowych w liniach rozlewniczych piwa pracują w środowisku takich mediów, jak: piwo (temperatura 10°C–65°C), gorąca woda (temperatura 80°C), ług sodowy (stężenie 1,8–2,2%, temperatura 80°C), para wodna oraz dodatki chemiczne. Charakteryzując warunki pracy uszczelnień w browarze, należy zwrócić szczególną uwagę na duże drgania wytwarzane przez maszyny i urządzenia tam pracujące.

Informacje dotyczące eksploatacji pomp wirowych gromadzone są w systemie komputerowym Maximo, który umożliwia szybką analizę wprowadzonych danych. Korzystając z informacji zgromadzonych w tym systemie zebrano dane dotyczące: typu pomp, miejsca ich pracy, rodzaju i przyczyny uszkodzenia. Dane te umożliwiły przeprowadzenie analizy przyczyn uszkodzeń pomp wirowych ze szczególnym uwzględnieniem elementu uszczelnienia czołowego. Przedstawione dane dotyczą eksploatacji linii w latach 2001-2002.

ANALIZA DANYCH

W każdej z pięciu linii rozlewniczych piwa pracuje określona liczba pomp wirowych, z których jedne ulegają uszkodzeniom, inne pracują bezawaryjnie przez cały okres użytkowania - tabela 1.

Z zestawionych danych wynika, że elementy pomp ulegające uszkodzeniom to łożyska, uszczelnienia czołowe, wirniki oraz kadłuby. Jednak najbardziej zawodnymi elementami są łożyska oraz uszczelnienia wałów pomp. Tylko na jednej z pięciu linii (linia nr 6) częściej dochodziło do uszkodzenia uszczelnienia niż łożyska.

Postacie i przyczyny uszkodzeń są różnorodne. Wynika to z warunków eksploatacji oraz zróżnicowania przetłaczanych mediów. Do uszkodzenia łożyska wału dochodzi najczęściej wskutek zatarcia spowodowanego brakiem środka smarowego lub zużycia korozyjnego powstałego w wyniku długotrwałego działania atmosfery utleniającej, wilgoci, kwasów i innych substancji agresywnych. Zjawisko to jest

charakterystyczne zwłaszcza dla pomp pracujących w pasteryzatorze. Przyczyną uszkodzenia łożyska są również nadmierne luzy spowodowane przyspieszonym zużyciem czopów wałów. Na skutek zastosowania nieodpowiednich uszczelnień do łożysk pomp wnikają zanieczyszczenia znajdujące się w środowisku otaczającym węzeł łożyskowy. Są one przyczyną przyspieszonego zużycia lub zatarcia.

Tabela 1. Zestawienie danych oraz liczba uszkodzeń pomp i ich poszczególnych elementów wraz z procentowymi udziałami zsumowanych uszkodzeń w liniach rozlewniczych nr 2, 3, 4, 5, 6

Table 1. The data statement and number of pump failures and their separate components with the percentage participation summed damages in beer filling lines nr 2, 3, 4, 5,6

| Numer linii | Wydajność linii | Liczba pomp N_p | Liczba pomp uszkodzonych n_o | Liczba wszystkich uszkodzeń n_u | Liczba uszkodzeń poszczególnych elementów pomp | | | | |
|-----------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------|--------|--------|------|
| | | | | | łożysko | uszczelnienie wału | wirnik | kadłub | inne |
| 2 | 30.000 but/h | 20 | 7 | 25 | 15 | 8 | 1 | 1 | - |
| 3 | 40.000 but/h | 12 | 9 | 39 | 22 | 12 | 3 | - | 2 |
| 4 | 100.000 puszek/h | 7 | 2 | 6 | 4 | 2 | - | - | - |
| 5 | 180 kegów/h | 12 | 2 | 15 | 8 | 4 | 2 | 1 | - |
| 6 | 60.000 but/h | 19 | 6 | 29 | 11 | 15 | 2 | - | 1 |
| Całkowita liczba uszkodzeń: | | | | 114 | 60 | 41 | 8 | 2 | 3 |
| Udział uszkodzeń [%] | | | | | 52,6 | 36,0 | 7 | 1,75 | 2,6 |

Uszkodzenia wirników i korpusów są spowodowane oddziaływaniem dużych i nagłych zmian prędkości przepompowywanej cieczy, które prowadzą do zjawiska kawitacji oraz nadmiernego wzrostu drgań pomp. Przyczyną uszkodzenia wirników i kadłubów jest także korozja. W ciągu dwóch lat eksploatacji pomp dwukrotnie odnotowano pęknięcie wirnika na skutek korozji. Korozja doprowadziła do niewyrównoważenia wirnika, na skutek czego wystąpiły drgania wału o dużej amplitudzie, jego zgięcie oraz awarie łożysk i uszczelnień. W jednym przypadku element pękniętego wirnika doprowadził do zablokowania całej pompy i pęknięcia kadłuba.

Uszkodzenia uszczelnień znalazły się na drugim miejscu przyczyn uszkodzeń pomp. Aby przedstawić wpływ uszkodzeń uszczelnień na pracę pomp wirowych wyznaczono wskaźnik niezawodności pomp uwarunkowany działaniem uszczelnień. Ponadto wyznaczono wskaźnik niezawodności uszczelnień i współczynnik ich trwałości.

W celu określenia wskaźników niezawodności uszczelnień czołowych wybrano siedem pomp, które pracują w zbliżonych warunkach w liniach rozlewniczych nr 3, 4, 5 i 6. Pompy te przetłaczają piwo o temperaturze 65°C. Dla wymienionych linii określono czas ich użytkowania w 2001 roku – tzw. czas operacyjny. Jest to całkowity czas pracy linii rozlewniczej pomiędzy remontami kapitalnymi po odjęciu czasu przeznaczonego na remonty bieżące oraz ewentualne przestoje spowodowane drobnymi naprawami w okresie eksploatacji - tabela 2. Wymiana uszczelnień w pompach jest obligatoryjna podczas ich remontu kapitalnego i w przypadku awarii w czasie użytkowania linii.

Za niezawodnie działające uszczelnienie uznaje się takie, które nie wymaga wymiany między jednym a drugim remontem kapitalnym linii. Na podstawie zebranych danych wyznaczono trzy wskaźniki niezawodności uszczelnień czołowych stosowanych w badanych pompach:

- 1) wskaźnik niezawodności uszczelnień ψ :

$$\psi = n / N$$

gdzie: n – liczba uszczelnień działających niezawodnie przez cały okres międzynaprawczy we wszystkich pompach objętych badaniami,

N – **liczba wszystkich uszczelnień eksploatowanych we wszystkich pompach objętych badaniami w okresie międzynaprawczym;**

- 2) współczynnik trwałości uszczelnień w pompach φ :

$$\varphi = T_U / T_O$$

gdzie: T_U – czas pracy uszczelnień w danej pompie do wystąpienia uszkodzenia,

T_O – czas operacyjny dla pompy;

- 3) wskaźnik niezawodności pomp warunkowany działaniem uszczelnień r :

$$r = n_p / N_p$$

gdzie: n_p – liczba pomp ze zbioru objętego badaniami, w których uszczelnienia nie wymagały wymiany w okresie międzynaprawczym,
 N_p – liczba pomp objęta badaniami.

Obliczone wartości wskaźników niezawodności uszczelnień czołowych stosowanych w pompach wirowych linii rozlewniczych nr 3, 4, 5 i 6 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Zestawienie danych oraz wskaźników niezawodności wyznaczonych dla linii rozlewniczych nr 3, 4, 5, 6 [3]

Table 2. The data statement and reliability indexes determined for beer filling lines nr 3, 4, 5, 6

| Nr linii | Czas operacyjny linii w 2001 roku T_O [h] | Nr pompy | Liczba uszczelnień eksploatowanych w poszczególnych pompach w czasie T_O | Czas pracy uszczelnienia do uszkodzenia lub wymiany T_U [h] | | | | φ | ψ | r |
|----------|---|----------|--|---|-----|------|------|-----------|--------|------|
| | | | | | | | | | | |
| 3 | 3230 | 1 | 2 | 2580 | | 650 | | 0,5 | 0,33 | 0,57 |
| 4 | 3130 | 2 | 1 | $T_U=T_O$ | | | | 1 | | |
| | | 3 | 1 | $T_U=T_O$ | | | | 1 | | |
| 5 | 3524 | 4 | 1 | $T_U=T_O$ | | | | 1 | | |
| | | 5 | 1 | $T_U=T_O$ | | | | 1 | | |
| | | 6 | 2 | 1150 | | 2374 | | 0,5 | | |
| 6 | 4252 | 7 | 4 | 520 | 350 | 370 | 3010 | 0,25 | | |

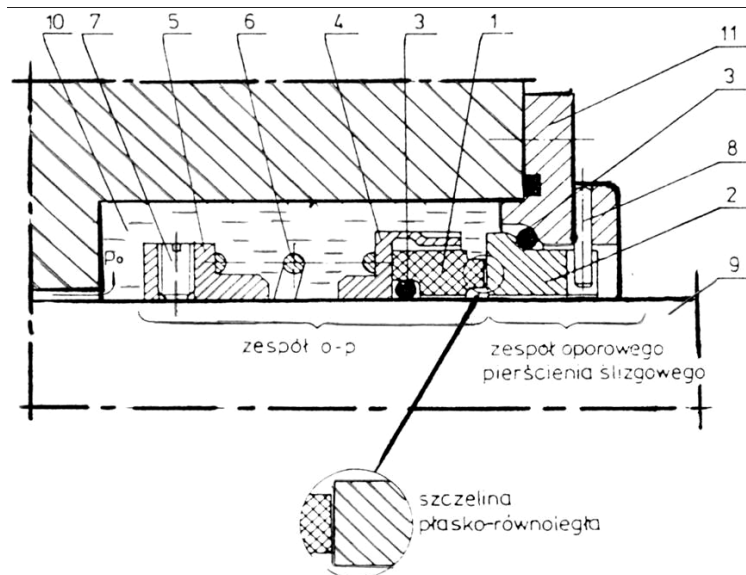
Objaśnienia: φ - współczynnik trwałości uszczelnień w pompach, ψ - wskaźnik niezawodności uszczelnień, r - wskaźnik niezawodności pomp warunkowany działaniem uszczelnień.

Z przedstawionych danych wynika, że największy problem stwarzały uszczelnienia pracujące w pompie w linii nr 6 – w ciągu roku czterokrotnie je wymieniano.

USZKODZENIA USZCZELNIEŃ CZOŁOWYCH

Uszczelnienia czołowe są stosowane w browarze, ponieważ charakteryzują się większą szczelnością i trwałością niż inne uszczelnienia pracujące w takich samych warunkach. Na jakość uszczelnienia czołowego zasadniczy wpływ mają procesy dławienia

uszczelnianego medium i procesy tribologiczne, które zachodzą w płasko-równoległej szczelinie między pierścieniami ślizgowymi 1 i 2 – rys. 1. Jeśli nastąpi nagłe rozsuniecie lub zniszczenie powierzchni roboczych to uszczelnienia czołowe w określonych warunkach mogą ulegać natychmiastowym uszkodzeniom. Te formy przedwczesnej utraty zdatności stanowią w badanym zakładzie około 60% awarii uszczelnień czołowych.

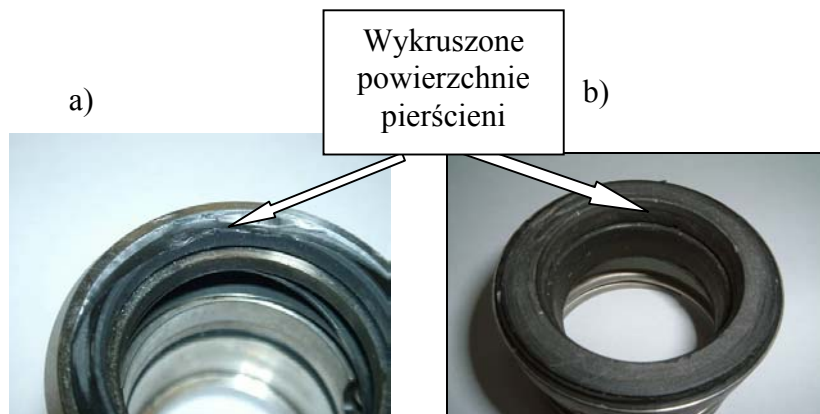


Rys. 1. Uszczelnienie czołowe typu wewnętrzne: 1 – pierścień ślizgowy osiowo-przesuwny (o-p), 2 – oporowy pierścień ślizgowy, 3 – uszczelnienie pomocnicze pierścienia oporowego oraz o-p, 4 – oprawa pierścienia ślizgowego, 5 – tulejka osadcza, 6 – sprężyna, 7 – wkręt, 8 – kolek zabezpieczający pierścień oporowy przed obrotem, 9 – wał, 10 – dławnica, 11 – pokrywa dławnicy [2]

Fig. 1. Internal mechanical seal: 1 – rotating seal ring, 2 – stationary seal ring, 3 – elastomer, 4 – housing of seal 5 – sleeve, 6 – spring, 7 – screw, 8 – pin, 9 – shaft, 10 – stuffing – box, 11 – lid of stuffing – box

Przyczyny uszkodzeń uszczelnień są różnorodne, jednak najczęściej tracą zdolność spełniania swej funkcji w wyniku drgań emitowanych przez urządzenia, w których są zainstalowane. Wpływ drgań objawia się w postaci przedwczesnego zużycia powierzchni roboczej pary ślizgowej, zwiększonej nieszczelności lub utraty funkcji innych elementów zespołu uszczelnienia – uszczelnień pomocniczych (O-ringów), mieszek,

sprężyn, uchwytów i opraw. W wyniku drgań na powierzchni pierścienia uszczelnienia pracującego w pompie przetłaczającej gorące piwo pojawiły się wykruszenia - rys. 2.



Rys. 2. Uszkodzone powierzchnie ślizgowe pierścieni uszczelnień pracujących w pompach przetłaczających: a) piwo, b) lug sodowy

Fig. 2. Failure of rotating seal ring surface mechanical seals working in: a) beer pump, b) soda lye pump

Duże drgania przyczyniają się także do utraty współosiowości uszczelnienia i wału, prowadzą do deformacji lub pęknięcia mieszkań metalowych i gumowych. Ponadto dochodzi do uszkodzenia sprężyn lub zablokowania pierścieni.

Przyczyną uszkodzeń uszczelnień są również zanieczyszczenia w postaci cząstek stałych zawartych w przetłaczanym medium, które zainkludowane w klinowych szczelinach między O-ringiem i wałem powodują zużycie ściernie powierzchni wału. Z kolei O-ringi ulegają uszkodzeniom na skutek zużycia ściernego, rozerwania, złuszczenia, spęczenie lub pokruszenia.

Negatywny wpływ na pracę uszczelnień mają również nagłe skoki temperatury występujące najczęściej przy przetłaczaniu piwa od 10°C do 65°C, które są przyczyną pęknięcia pierścieni ceramicznych. Pod wpływem czynników termicznych dochodzi również do deformacji szczeliny lub wzrostu obciążenia powierzchni styku pierścieni i ich zatarcia.

Korozja występuje najczęściej w pompach pracujących w pasteryzatorach. Oddziaływanie wody o wysokiej temperaturze

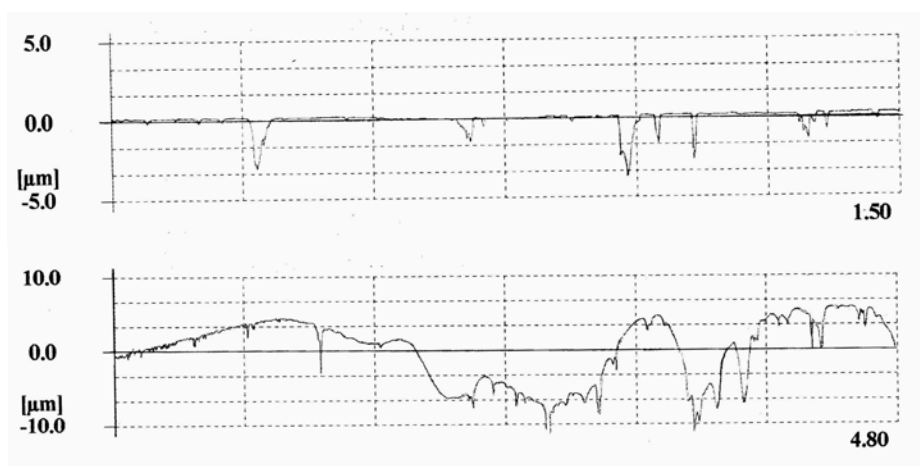
przyczynia się w dużym stopniu do uszkodzeń elementów pomocniczych uszczelnień. Korozja sprężyn, uchwytów i opraw często jest przyczyną zmiany położenia pierścieni i zmniejszenia docisku na powierzchni uszczelniającej co może prowadzić do wnikania zanieczyszczeń w przestrzeń uszczelniającą i zużycia ściernego.

Uszkodzenia o charakterze tribologicznym

Pierścienie ślizgowe uszczelnienia stanowią system, w którym zachodzą złożone zjawiska tribologiczne i hydrodynamiczne. Uszczelnienie może stracić zdolność spełniania swej funkcji na skutek zużycia: ściernego (jeśli produkty zużycia lub zanieczyszczenia przedostaną się do szczeliny), adhezyjnego, zmęczeniowego w formie złuszczenia i zużycia wynikającego z erozyjnego działania cieczy uszczelniającej. Podczas pracy uszczelnienia może wystąpić zarówno jeden rodzaj zużycia jak i kilka jednocześnie.

Ślady na powierzchni czołowej pierścieni ślizgowych świadczą o warunkach ich współpracy. Jeżeli uszczelnienie było prawidłowo eksploatowane, to ślad zużycia na powierzchni pierścienia oporowego jest równomierny. Posiada on tę samą szerokość co pierścień ślizgowy. W przypadku zbyt szerokiego śladu zużycia na pierścieniu oporowym, przyczyn tego zjawiska należy dopatrywać się w złym stanie technicznym maszyny, która może być niewyrównowazona dynamicznie, posiadać skrzywiony wał lub zużyte łożysko. Jeżeli na pierścieniu oporowym jest dostrzegalny mimośrodowy ślad zużycia, oznacza to niewłaściwy montaż - uszczelnienie nie zostało scentrowane na wale. Przyczyną takiego śladu zużycia może być także zły stan techniczny maszyny (brak współosiowości wału i przestrzeni w korpusie, w której jest osadzone uszczelnienie). Niewłaściwy docisk pierścienia ślizgowego do pierścienia oporowego przyczynia się do wciskania w ich powierzchnie ziaren ściernych. Ziarna te zostają zainkludowane w miękką powierzchnię pierścienia węglowego, która następnie przy zetknięciu się z powierzchnią współpracującą działa jak tarcza szlifierska, doprowadzając do jej ścierania i zużycia. W browarze zjawisko zużycia ściernego pierścieni najczęściej występuje w uszczelnieniach pomp przetłaczających gorącą wodę o temp. 80°C, która może zawierać drobne cząstki zanieczyszczeń. W przypadku dużych zanieczyszczeń możliwe jest wykruszanie części powierzchni pierścienia ślizgowego.

W celu porównania stanu powierzchni pierścieni ślizgowych uszczelnień: prawidłowo funkcjonującego oraz uszkodzonego, wykonano profilogramy - rys. 3. Do badań użyto profilografometru T8000 HOMMELWERKE z czujnikiem typu TK100. Badane pierścienie były wykonane z różnych materiałów i pracowały w odmiennych warunkach. Pierwszy z pierścieni, wykonany z węgliku wolframu, pracował w uszczelnieniu zamontowanym w pompie przetłaczającej piwo. Wycofany został z eksploatacji na skutek pęknięcia powierzchni współpracującej ze sprężyną. Powierzchnia ślizgowa pierścienia pozostała nieuszkodzona zachowując małą chropowatość ($R_a=0,25\mu\text{m}$). Drugi pierścień, wykonany z węgliku krzemu, pracował w uszczelnieniu zamontowanym w pompie przetłaczającej gorącą wodę. Jego powierzchnia uległa uszkodzeniu wskutek zużycia ściernego w wyniku oddziaływania drobnych zanieczyszczeń zawartych w wodzie. Profilogram jednoznacznie to potwierdza. Chropowatość powierzchni wynosiła $R_a=1,22\mu\text{m}$.



Rys. 3 Profilogram powierzchni pierścieni ślizgowych: a) nieuszkodzonego wykonanego z węgliku krzemu stosowanego w pompie piwa b) wykonanego z węgliku wolframu uszkodzonego wskutek ścierania ziarnami ściernymi zawartymi w przepompowywanej wodzie.

Fig. 3. Profilogram of sliding face seal: a) undamaged, working in beer pump (silicon carbide), b) damage by wear due to particle include in water (wolfram carbide)

Wykonane pomiary chropowatości potwierdziły niszczący wpływ zanieczyszczeń zawartych w wodzie na powierzchnię pierścieni ślizgowych uszczelnienia czołowego. Takie uszczelnienie nie spełnia prawidłowo swojej funkcji.

PODSUMOWANIE

Z powyższej analizy wynika, że duży problem stanowią uszkodzenia łożysk i uszczelnień czołowych pomp wirowych. Najczęstszą przyczyną uszkodzenia łożyska jest zatarcie powstałe z braku smarowania, natomiast uszczelnienia uszkadzają się zwłaszcza w wyniku drgań emitowanych przez urządzenia, w których są zainstalowane. Drgania prowadzą do przedwczesnego zużycia powierzchni uszczelniających, nadmiernych wycieków i uszkodzeń elementów pomocniczych uszczelnień. Na jakość powierzchni pierścieni ślizgowych wpływ mają także zanieczyszczenia zawarte w przetłaczanym medium, co pokazały pomiary chropowatości.

LITERATURA

Czachórska E., Furmaniak K., Zagadnienia podobieństwa mechanicznego w badaniach niezawodności uszczelnień czołowych. Materiały XXIII Jesiennej Szkoły Tribologicznej. Zielona Góra – Lubiatów wrzesień 1999 r.

Gawliński M. Uszczelnienia czołowe - konstruowanie i eksploatacja. Sterowanie i Napęd Hydrauliczny, nr 5, 1998, s. 11-22.

Grzesik J. Langner A. Nosal S. Analiza niezawodności uszczelnień czołowych pomp wirowych stosowanych w browarnictwie. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. MRiT, nr 56, 2003 (w druku).

**Recenzent:
Jan BURCAN**

Summary

The article is an analysis of damage to centrifugal pumps used in brewery industry, in particular considering mechanical seals. The object of research its working conditions were characterized as well as the results of the survey were presented. It turned out that the most unreliable pump parts are bearings and seals. Operating durability of seals were described as well. It was established, that in most cases, seals suffer damage due to vibrations. Reasons of the damage mechanical seals is also wear of sliding face. The wear profilogram and undamaged surface was performed for comparing.