

Marian W. SUŁEK*, **Witold SAS***,
Tomasz WASILEWSKI*, **Aneta BAŃK***, **Urszula ŻAK***

**WPLYW RODZAJU I STEŻENIA
POLIWINYLOPIROLIDONÓW NA WYBRANE
CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE
ICH WODNYCH ROZTWORÓW**

**THE EFFECT OF THE KIND AND CONCENTRATION
OF POLYVINYLPIRROLIDONE ON SELECTED
TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS IN AQUEOUS
SOLUTIONS**

Słowa kluczowe:

tarcie, tribologia, zużycie, opory ruchu, dodatki, poliwinylpirolidony, wodne roztwory poliwinylpirolidonów.

Key words:

friction, tribology, wear, motion resistance, additives, polyvinylpyrrolidones, aqueous solutions of polyvinylpyrrolidones.

* Politechnika Radomska, Katedra Chemii, ul. Chrobrego 27, 26-600 Radom, e-mail: rektorb@pr.radom.pl

Streszczenie

Związki aktywne powierzchniowo mogą być efektywnymi dodatkami modyfikującymi właściwości smarne wody. Mechanizm ich działania polega na tworzeniu filmu smarnego wzbogaconego o aktywny związek.

Wybór poliwinylpirolidonów jako dodatków był podyktowany ich obojętnością fizjologiczną oraz brakiem szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne. Badaniom poddano wodne roztwory dwóch poliwinylpirolidonów o stopniu polimeryzacji: 450 (PVP 450) i 14400 (PVP 14400). Stwierdzono istotny wpływ długości łańcucha polimerowego na właściwości fizykochemiczne (lepkość, napięcie powierzchniowe, zwilżalność stali) i tribologiczne (opory ruchu, zużycie). Pomiar wielkości tribologicznych wykonywano na tribometrze T-11, w skojarzeniu: stalowa kulka–stalowa tarcza, dla trzech obciążeń: 10, 30, 50 N. Wprowadzenie dodatków powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia (μ) względem wody nawet 2 i 1,8 razy odpowiednio dla roztworów PVP 450 i PVP 14400. Istotny wpływ ma stopień polimeryzacji dodatków na średnicę skazy (d). Wartości d dla roztworów PVP 450 są nawet 1,8 razy mniejsze niż wyznaczone dla wody, podczas gdy wartości dla roztworów PVP 14400 i wody są porównywalne.

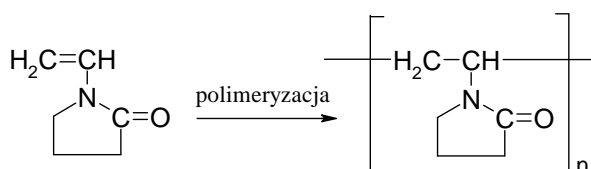
WPROWADZENIE

W wielu kierunkach zastosowań substancji smarowych, w których ważne są kryteria ekologiczne, stosowane są wodne roztwory związków wykazujące aktywność powierzchniową (związki powierzchniowo czynne – ZPC) [L. 1–3]. Tworzą one zarówno w fazie objętościowej, jak i powierzchniowej struktury micelarne i ciekłokrystaliczne. Szczególnie istotne jest powstanie trwałego filmu zbudowanego z udziałem cząsteczek ZPC, który w warunkach tarcia oddzielałby współpracujące tarciowo elementy maszyn i urządzeń. Udokumentowano, że wiele surfaktantów może pełnić rolę dodatków smarnościowych lub antykorozyjnych [L. 1–5]. Wśród nich interesującą grupą dodatków modyfikujących właściwości tribologiczne wody jako bazy są polimery [L. 6–10]. W poszukiwaniu odpowiedniego rodzaju polimeru zwrócono uwagę na poliwinylpirolidon, który jest zaliczany do nietoksycznych, rozpuszczalnych w wodzie polimerów.

MATERIAŁY I METODYKI BADAWCZE

Materiały – poliwinylpirolidony

Poliwinylpirolidon (PVP), nazywany także powidonem, jest otrzymywany w wyniku reakcji winylpirolidonu, którą można zapisać równaniem:



Rys. 1. Schemat reakcji otrzymywania poliwinylpirolidonu

Fig. 1. Polyvinylpyrrolidone obtaining reaction scheme

W cząsteczce poliwinylpirolidonu występują polarne grupy amidowe i niepolarne etylenowe. Taka budowa determinuje jego zdolność kompleksowania ze związkami o niskiej masie cząsteczkowej (np. barwniki, witaminy) oraz surfaktantami [L. 9]. Poliwinylpirolidony nie ulegają rozpadowi na prostsze związki pod wpływem takich mikroorganizmów, jak: bakterie, pierwotniaki, glony, grzyby. Jest to korzystna właściwość, gdyż jako komponenty substancji smarowych charakteryzują się stabilnością [L. 11–13]. Dodatkowo są one nietoksyczne, a więc można je zaliczyć do dodatków ekologicznych. Wykazują dobrą adhezję do różnych materiałów, w związku z tym przewiduje się ich zastosowanie jako dodatków modyfikujących właściwości smarne wody.

Do badań wykorzystano dwa produkty handlowe firmy BASF, które charakteryzują się względnie wysoką czystością (95–100%). Zastosowane polimery różnią się masą cząsteczkową. Dla polimeru o stopniu polimeryzacji 450 (PVP 450) wynosi ona 50 000 g/mol, a o stopniu polimeryzacji 14 400 (PVP 14 400) 1 600 000 g/mol. Zarówno stopień polimeryzacji, jak i masy cząsteczkowe poszczególnych polimerów są wartościami uśrednionymi i należy liczyć się z dystrybucją polimerów.

Badania fizykochemiczne

Wyznaczono lepkość kinematyczną (ν), napięcie powierzchniowe (σ), kąt zwilżania stali (θ) wodnych roztworów dwóch poliwinylpirolidonów

o stężeniach 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 0,5, 1, 2, 3, 4, 5% wagowych. Wyniki przedstawione na **Rys. 2, 3, 4** są średnimi arytmetycznymi z trzech niezależnych serii pomiarowych.

Lepkość kinematyczna

Lepkość kinematyczną wyznaczano na podstawie normy PN-81/C-04011 z użyciem lepkościomierza kapilarnego Ubbelohde'a. Zasada pomiaru polega na określeniu czasu przepływu określonej objętości badanej cieczy przez kapilarę lepkościomierza, pod wpływem sił grawitacyjnych, w temperaturze 25°C.

Napięcie powierzchniowe

Pomiar napięcia powierzchniowego (σ) jest jednym z podstawowych kryteriów oceny aktywności powierzchniowej związków z ich roztworów. Oznaczenie wartości σ dokonano w oparciu o metodę „odrywanego pierścienia”. Metoda polega na pomiarze siły, jakiej należy użyć, by oderwać od powierzchni cieczy pierścień wykonany z cienkiego drutu platynowego. Pomiaru wykonano na aparacie TD1C firmy LAUDA.

Kąt zwilżania

Pomiarów kąta zwilżania powierzchni stali dokonywano metodą „siedzącej” kropli. Wykorzystano zestaw pomiarowy składający się z mikroskopu i kamery oraz komputera z zainstalowanym systemem akwizycji i obróbki cyfrowej obrazu MultiScanBase wersja 808. Pomiaru prowadzono w temperaturze 22°C.

Badania tribologiczne

Opory ruchu oraz zużycie elementów par ciernych wyznaczono w warunkach skoncentrowanego styku typu kulka-tarcza. Wykorzystano tribometr T-11, wyprodukowany w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Budowa aparatu oraz opis metodyki badawczej były prezentowane w literaturze [L. 11]. Badania przeprowadzono dla 3 obciążeń (10, 30, 50 N) przy prędkości liniowej 0,1 m/s. Czas tarcia wynosił 900 s, droga tarcia 90 m, temperatura 25°C. Na podstawie pomiaru siły tarcia obliczono współczynnik tarcia (μ). Punkty prezentowane na wykresach są uśrednionymi wartościami z 30 sekundowych przedziałów czasowych oraz z trzech niezależnych serii pomiarowych. Po zakończeniu eksperymentu

dokonywano pomiaru średnicy śladu zużycia kulek w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku tarcia i obliczono średnią wartość. Na wykresach przedstawiono średnie arytmetyczne z trzech niezależnych pomiarów (d).

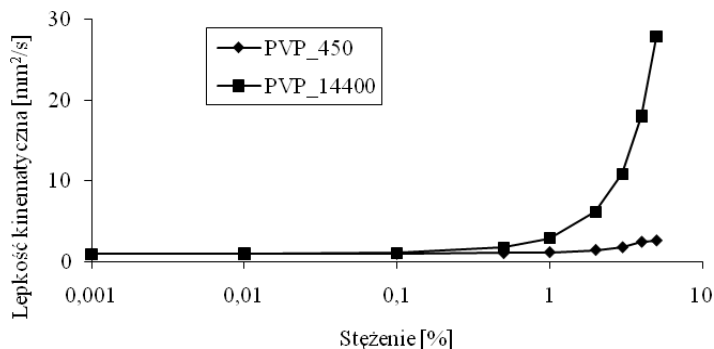
REZULTATY BADAŃ

Lepkość

Lepkość jest ważną wielkością fizykochemiczną charakteryzującą substancje smarowe. W przypadku analizy wpływu dodatków na właściwości smarne kompozycji można właściwie porównywać ze sobą tylko substancje smarowe o porównywalnych współczynnikach lepkości, gdyż działanie poszczególnych składników w strefie tarcia może być „przesłonięte” przez właściwości reologiczne roztworów.

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu stężenia dwóch poliwinylpyrrolidonów na lepkość ich wodnych roztworów. Wstępne badania wykazały, że wartości współczynników lepkości nie będą zbyt duże. Dlatego wybrano metodę wyznaczania lepkości kinematycznej (ν). Uzyskane rezultaty przedstawiono na **Rys. 2**, na którym zgodnie z przyjętymi zapisami związki oznaczono symbolami PVP 450 i PVP 14 400.

W przedziale stężeń od 10^{-3} do $10^{-1}\%$ lepkości roztworów obu związków były porównywalne między sobą i wartościami uzyskanymi



Rys. 2. Zależność lepkości kinematycznej od stężenia poliwinylpyrrolidonu w wodnych roztworach. Przyjęte oznaczenia: PVP 450 i PVP 14 400 – poliwinylpyrrolidon o stopniu polimeryzacji odpowiednio 450 i 14 400

Fig. 2. Dependence of kinematic viscosity as a function of concentration of polyvinylpyrrolidone in aqueous solutions. Where PVP 450 and PVP 14 400 are polyvinylpyrrolidones with polymerization degree suitably 450 and 14 400

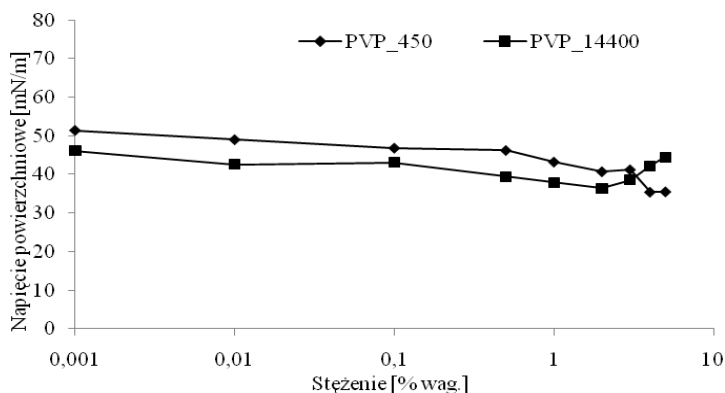
dla wody (od 1,0 do 1,1 mm²/s). Ale już przy stężeniu 0,5% roztwór PVP 14400 wykazywał ponad 1,5-krotnie wyższą wartość lepkości niż PVP 450. Przy stężeniu 5% wartość ta była ok. 11-krotnie wyższa (**Rys. 2**), co odpowiada bezwzględny wartościom dla tych polimerów, odpowiednio: 2,6 i 27,9 mm² s⁻¹. Dlatego mechanizm działania dodatków i ich wpływ na właściwości fizykochemiczne i tribologiczne może być porównywalny do stężeń rzędu kilku dziesiątych procenta. Powyżej tego stężenia należy przy interpretacji wyników uwzględnić wpływ lepkości. Z przedstawionych rezultatów (**Rys. 2**), a także danych literaturowych [**L. 14**] należy spodziewać się, że PVP 14 400 może być także modyfikatorem lepkości w stosowanym oraz wyższym zakresie stężeń.

Aktywność powierzchniowa

Jako miarę aktywności powierzchniowej poliwinylpirolidonów z ich wodnych roztworów przyjęto napięcie powierzchniowe na granicy faz: roztwór–ciało stałe (platyna) oraz zwilżalność powierzchni stali roztworami poliwinylpirolidonu.

Napięcie powierzchniowe

Zmiany napięcia powierzchniowego (σ) w funkcji stężenia (c) przedstawiono na **Rys. 3**.



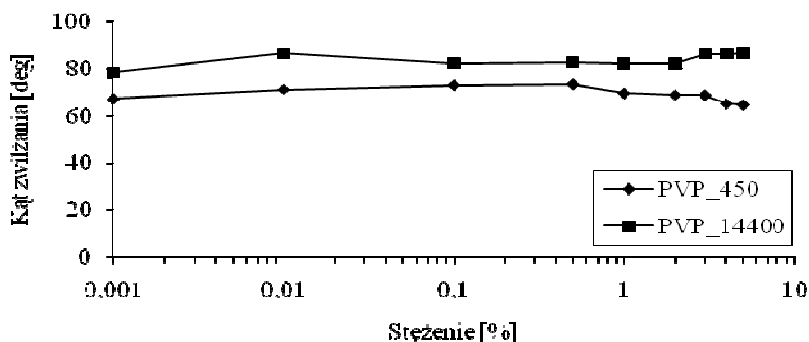
Rys. 3. Napięcia powierzchniowe wodnych roztworów poliwinylpirolidonu. Przyjęte oznaczenia: PVP 450 i PVP 14 400 – poliwinylpirolidon o stopniu polimeryzacji odpowiednio 450 i 14 400

Fig. 3. Surface tension of aqueous solution of polyvinylpyrrolidones. Where PVP 450 and PVP 14 400 are polyvinylpyrrolidones with polymerization degree suitably 450 and 14 400

Stwierdzono, że różnice między roztworami zastosowanych związków są widoczne, lecz nie przekraczają kilkunastu procent. W przedziale niższych stężeń ($\leq 3\%$) większą aktywność powierzchniową wykazują roztwory PVP 14 400. Ponieważ badane polimery zawierają identyczne monomery, uzyskane wyniki mogą być interpretowane w kategoriach wpływu stopnia polimeryzacji. Zmiany gradacji napięcia powierzchniowego dla wyższych stężeń (4 i 5%) mogą być wynikiem większej lepkości roztworów PVP 14 400 w odniesieniu do roztworów PVP 450.

Zwilżalność powierzchni stali

Powinowactwo dodatków do powierzchni może być także wyznaczone przez pomiar kąta zwilżania (θ). Większemu kątowi zwilżania odpowiada mniejsza zwilżalność i analogicznie mniejszemu kątowi większa zwilżalność. Zależność wyznaczonych kątów zwilżania w funkcji stężenia poszczególnych poliwinylpirolidonów przedstawiono na **Rys. 4**.



Rys 4. Zależność kąta zwilżania stali od stężenia poliwinylpirolidonów w wodnych roztworach. Przyjęte oznaczenia: PVP 450 i PVP 14 400 – poliwinylpirolidon o stopniu polimeryzacji odpowiednio 450 i 14 400

Fig. 4. Dependence of steel surface wettability as a function of concentration of polyvinylpyrrolidone in aqueous solutions. Where PVP 450 and PVP 14 400 are polyvinylpyrrolidones with polymerization degree suitably 450 and 14 400

Jak wynika z **Rys. 3 i 4**, gradacja zmian napięcia powierzchniowego i zwilżalności jest dla roztworów obu związków odmienna.

Roztwory badanych poliwinylpirolidonów wykazują niższe wartości napięcia powierzchniowego (σ) i kąta zwilżania (θ) względem wody

(**Rys. 3 i 4**). Wyniki te wskazują na ich aktywność powierzchniową i możliwość tworzenia filmu na powierzchni. Jednak obniżenie tych dwóch wielkości jest relatywnie niewielkie w porównaniu z innymi surfaktantami. Aktywność powierzchniowa tych związków nie może więc być jedynym kryterium decydującym o właściwościach tribologicznych jak miało to miejsce w przypadku niepolimerowych surfaktantów [**L. 1–3**].

Opory ruchu i zużycie w warunkach stałego obciążenia

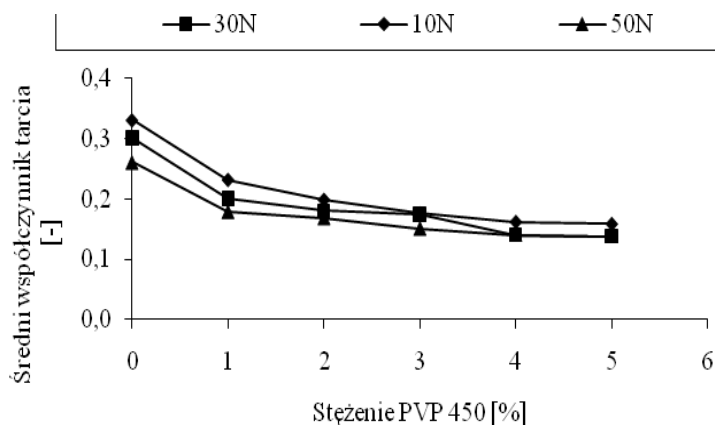
Testy przeprowadzono na tribometrze T-11 w skojarzeniu: stalowa kulka–stalowa tarcza. Mierzonymi wielkościami były: współczynnik tarcia (μ), średnica śladu zużycia kulki (d) oraz zmiany profilu powierzchni tarczy w wyniku tarcia. Jako substancje smarowe stosowano wodne roztwory poliwinylpirolidonów o stężeniach: 1, 2, 3, 4, 5%.

Na **Rys. 5** przedstawiono zależności współczynnika tarcia od stężenia poliwinylpirolidonów o średnich stopniach polimeryzacji: 450 (PVP 450) i 14 400 (PVP 14 400).

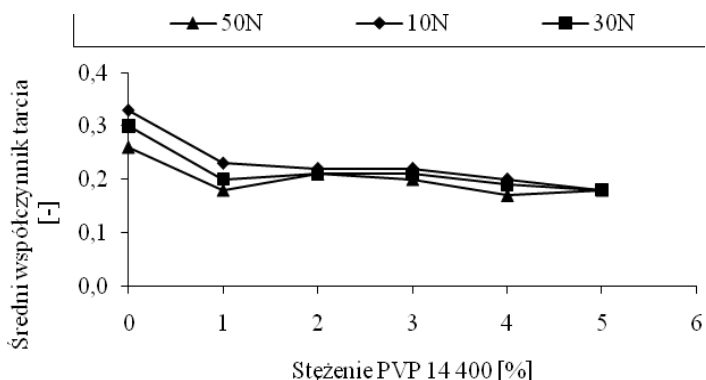
Na podstawie przedstawionych wyników (**Rys. 5a i 5b**) można stwierdzić zmniejszenie oporów ruchu wraz ze wzrostem stężenia dodatków, przy czym wyższe wartości μ obserwuje się dla roztworów długocząsteczkowego poliwinylpirolidonu. Tylko dla 1% roztworów wartości μ są równe. Dla pozostałych stężeń współczynniki tarcia dla roztworów PVP 14 400 są większe, a różnice ($\Delta\mu$) mieszczą się w przedziale od 0,02 do 0,05. Ze względu na niewielkie różnice wyniki te nie mogą być interpretowane ilościowo. Natomiast wskazują one na niewielki, ale negatywny wpływ wzrostu stopnia polimeryzacji na opory ruchu. W stosunku do wody obserwuje się istotne obniżenie oporów ruchu. Dla roztworów PVP 450 wartość μ zmniejsza się nawet 2-krotnie, a dla PVP 14 400 ok. 1,8 razy.

Wielkość zużycia była określona za pomocą zmierzonej średnicy śladu zużycia kulki (d). Wartość d dla różnych stężeń i obciążeń przedstawiono na **Rys. 6**.

a)



b)



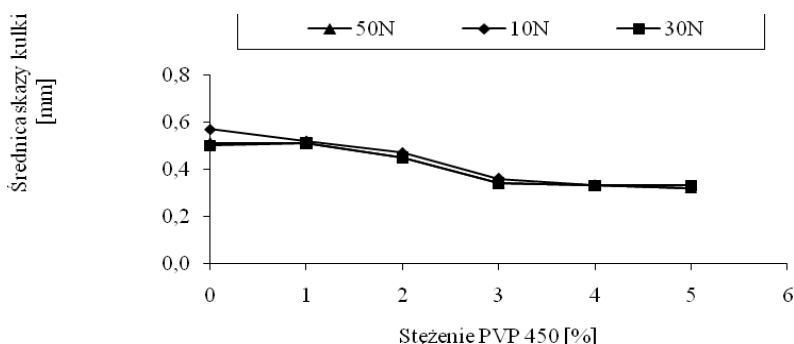
Rys. 5. Zależność średniego współczynnika tarcia od stężenia poliwinylpirolidonów w wodnych roztworach. Przyjęte oznaczenia: PVP 450 (Rys. 5a) i PVP 14 400 (Rys 5b) – poliwinylpirolidon o stopniu polimeryzacji odpowiednio 450 i 14 400

Fig. 5. Dependence of the friction coefficient as a function of concentration of polyvinylpyrrolidone in aqueous solutions. Where PVP 450 and PVP 14 400 are polyvinylpyrrolidones with polymerization degree suitably 450 and 14 400

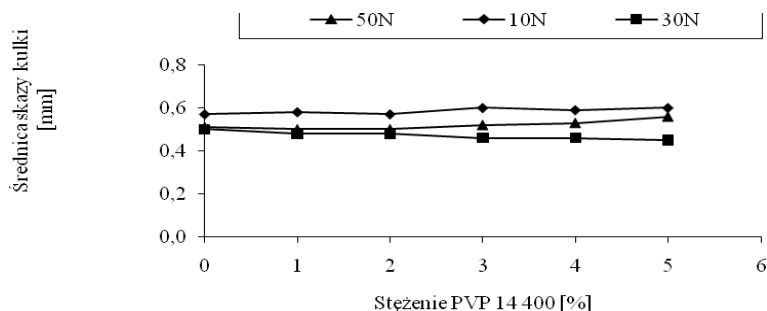
Zużycie obserwowane dla roztworów poliwinylpirolodonów o różnym stopniu polimeryzacji różni się znacząco. Wraz ze wzrostem stężenia PVP 450 w wodzie średnica śladu zużycia zmniejsza się (**Rys. 6a**) i dla 5% roztworów jest ona ok. 1,8 razy mniejsza niż dla wody ($P = 10N$). Wpływ obciążenia dla tych roztworów, przy zadanym stęże-

niu tego polimeru, jest pomijalnie mały, gdyż różnice nie przekraczają wartości błędu eksperymentalnego. Odmiennie zachowują się roztwory z dodatkiem PVP 14400 (**Rys. 6b**). Przy zadanym obciążeniu wartości d są dla poszczególnych stężeń porównywalne z wartościami wyznaczonymi dla wody. Wpływ obciążenia nie jest jednoznaczny bowiem najniższe wartości średnicy skazy otrzymano dla $P = 30$ N.

a)



b)



Rys 6. Zależność średnicy skazy kulki od stężenia poliwinylpyrrolidonów w wodnych roztworach. Przyjęte oznaczenia: PVP 450 (Rys. 6a) i PVP 14 400 (Rys. 6b) – poliwinylpyrrolidon o stopniu polimeryzacji odpowiednio 450 i 14 400

Fig. 6. Dependence of the wear scar diameter as a function of concentration of polyvinylpyrrolidone in aqueous solutions. Where PVP 450 and PVP 14 400 are polyvinylpyrrolidones with polymerization degree suitably 450 and 14 400

Z danych przedstawionych na **Rys. 6** wynika jednoznacznie, że zużycie w obecności długołańcuchowego polimeru jest większe niż dla krótkołańcuchowego i rośnie wraz ze wzrostem stężenia.

PODSUMOWANIE

Przedmiotem badań fizykochemicznych i tribologicznych były dwa rodzaje poliwinylpirolidonów o stopniu polimeryzacji: 450 (PVP 450) i 14400 (PVP 14400). Stwierdzono istotny wpływ stopnia polimeryzacji na wyznaczone wielkości. Szczególnie istotny jest wpływ rodzaju związku na lepkość (ν). Dla roztworów o stężeniu 5% stwierdzono ponad 10 krotnie wyższą wartość ν dla długołańcuchowych polimerów. Będące przedmiotem badań poliwinylpirolidony można zakwalifikować do aktywnych powierzchniowo związków. Jednak zmiany napięcia powierzchniowego i zwilżalności powierzchni stali przez ich wodne roztwory względem wody nie są tak duże, jak w przypadku roztworów niepolimeryzowanych surfaktantów.

Szczególnie istotne było określenie wpływu rodzaju i stężenia poliwinylpirolidonów na charakterystyki tribologiczne ich wodnych roztworów. Stwierdzono istotne, nawet ok. 2-krotne, obniżenie współczynnika tarcia (μ) względem wody. Przy czym wyższe wartości μ obserwowano dla roztworów PVP 14400. Szczególnie negatywnie na zużycie wpływa wzrost stopnia polimeryzacji dodatków. Wartości średnicy skazy (d) dla roztworów poliwinylpirolidonów o krótszych łańcuchach są nawet 1,8 razy mniejsze niż dla wody, podczas gdy dla roztworów polimerów o dłuższych łańcuchach wartości d są porównywalne z wartościami uzyskanymi dla wody.

Analiza uzyskanych rezultatów wskazuje jednoznacznie na negatywny wpływ wzrostu stopnia polimeryzacji poliwinylpirolidonów na opory ruchu, a szczególnie zużycie. Na tym etapie prac żaden ze stosowanych dodatków nie został definitywnie wykluczony. Testy tribologiczne zostaną rozszerzone na inne warunki tarcia.

LITERATURA

1. Sułek M.W., Bąk A., The Effect of Liquid Crystalline Structures on Antiseizure Properties of Aqueous Solutions of Ethoxylated Alcohols, *Int. J. Mol. Sci.* 11, 2010, 189–205.
2. Sułek M.W., Wasilewski T., Influence of critical micelle concentration (cmc) on tribological properties of aqueous solutions of alkyl polyglucosides, *Tribology Transaction*, 52, 2009, 12–20.
3. Sułek M.W., Aqueous solutions of oxyethylated fatty alcohols as model lubricating substances, rozdział w książce pt. *Surfactants in Tribology*, Ed. Biresaw G., Mittal K.L., Wyd. CRC (Taylor & Francis), New York, 2008, 355–388.
4. Margielewski L., Stanecka R., Partyka S., Płaza S., The adsorption of zinc dialkyldithiophosphates on partially stabilized zirconia from hydrocarbon solution, *Tribology Letters*, 21, 2006, 17–22.
5. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G., Wesołowski R.W., Stanecka R., Tribological performance of some polyoxyethylene ditihiophosphate derivatives water solutions, *Wear*, 249, 2001, 1077–1089
6. Hartung W., Rossi A., Lee S., Spencer N.D., Aqueous Lubrication of SiC and Si₃N₄ Ceramics Aided by a Brush-like Copolymer Additive, *Poly(L-lysine)-graft-poly(ethylene glycol)*, *Tribol. Lett.* 34/2009, 201–210.
7. Hartung W., Drobek T., Lee S., Zürcher S., Spencer N.D., „The Influence of Anchoring-Group Structure on the Lubricating Properties of Brush-Forming Graft Copolymers in an Aqueous Medium, *Tribol. Lett.* 31/2008, 119–128.
8. Perrino C., Lee S., Spencer N.D., “End-grafted Sugar Chains as Aqueous Lubricant Additives: Synthesis and Macrotribological Tests of Poly(L-lysine)-graft-Dextran (PLL-g-dex) Copolymers”, *Tribol. Lett.* 33/2009, 83–96.
9. Tyliszczak B. Pielichowski K., Charakterystyka matryc hydrożelowych – zastosowania biomedyczne superabsorbentów polimerowych, *Czasopismo Techniczne Chemia*, 1, 2007, 159–167.
10. Knappe P., Bienert R., Weidner S., Thunemann A.F., 2010: Characterization of poly(N-vinyl-2-pyrrolidone)s with broad size distributions. *Polymer*, Vol. 51, No. 8, 1723–1727, 2010.
11. Piekoszewski W., Szczerek M., Wulczyński J.: Urządzenie typu trzpień–tarcza do badań tribologicznych w podwyższonych temperaturach, *Tribologia*, 5–6, 1997, 826–832.
12. Ruyin M., Dangsheng X., Feng M., Jinfeng Z., Yan P. Friction properties of novel PVP/PVA blend hydrogels as artificial cartilage, *Journal of Biomedical Material Research Part A*, pp. 1016–1019, 2009.

13. Ping Z., Nguyen Q.T., Neel J., Investigation of poly (vinyl alcohol (/poly (N-vinyl-2-pyrrolidone) blends. III. Permaton properties of polymer blend membranes. *Macromol chem. Phys* 195, 1994, 2107–2116.
14. Fischer F., Bauer S., Ein Tausendssassa in der Chemie – Polyvinylpyrrolidon. *Chemie in Unserer Zeit*. 43, 6, 376–383.

Recenzent:
Stanisław PŁAZA

Summary

The subject of the physicochemical and tribological studies were two kinds of polyvinylpyrrolidones with the degrees of polymerization of 450 (PVP 450) and 14,400 (PVP 14,400). A significant effect of the degree of polymerization on the quantities determined was found. The effect of the kind of compound on viscosity (ν) is particularly important. The ν value for long-chain polymers was over 10 times higher. The polyvinylpyrrolidones studied can be classified as surface-active compounds. However, changes in the surface tension and wettability of steel surfaces by their aqueous solutions relative to water are not as big as in the case of solutions of non-polymer surfactants.

The determination of the kind and concentration of polyvinylpyrrolidones on tribological characteristics of their aqueous solutions was particularly important. A significant, about twofold, decrease in the coefficient of friction (μ), relative to water, was found with higher μ values being observed for the PVP 14,400 solutions. An increase in the degree of polymerization affects wear particularly negatively. Wear scar diameter values (d) are even 1.8 times lower for shorter-chain polyvinylpyrrolidone solutions than for water; whereas, in the case of longer-chain polymer solutions, the d values are comparable with those obtained for water.

The analysis of the results obtained unequivocally indicates that an increase in the degree of polymerization of polyvinylpyrrolidones has a negative effect on motion resistance and, particularly, on wear. At this stage of research, neither of the additives used has been definitely excluded. Tribological tests will be extended to other friction conditions.

