

Łukasz WOJCIECHOWSKI*

**WPLYW STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY
WIERZCHNIEJ NA ZWILŻALNOŚĆ STOPU
ALUMINIUM EN-AW AlMg₂ AKTYWNYMI
I NIEAKTYWNYMI SUBSTANCJAMI
SMARUJĄCYMI**

**THE INFLUENCE OF ENERGY CONDITIONS OF
A SURFACE LAYER ON THE WETTABILITY OF EN-AW
AlMg₂ ALUMINIUM ALLOY BY ACTIVE AND INACTIVE
LUBRICATING MEDIUMS**

Słowa kluczowe:

warstwa wierzchnia, stan energetyczny, swobodna energia powierzchniowa, statyczny kąt zwilżania

Key words:

surface layer, energy conditions, free surface energy, static wetting angle

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopu aluminium na jej zwilżalność aktywnymi i nieaktyw-

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

nymi powierzchniowo substancjami smarującymi. Stan energetyczny oceniano na podstawie analizy zmian swobodnej energii powierzchniowej obliczanej (metodą zawartą w normie ASTM D5946) w oparciu o pomiary statycznego kąta zwilżania. Zwilżalność charakteryzowano na podstawie obserwacji zmian statycznego kąta zwilżania dla trzech substancji smarujących: oleju parafinowego, oleju Tranself EP (przeciwzatarciowe dodatki fosforowo-siarkowe) i oleju Total Azolla ZS100 (przeciwzużyciowy dodatek alkiloditiofosforanu cynku). Stwierdzono, że wzrost swobodnej energii powierzchniowej wpływa na zmianę zwilżalności powierzchni aluminium w przypadku smarowania olejem parafinowym (nieaktywnym powierzchniowo) i olejami z dodatkami AW/EP. Dla nieaktywnego środka smarowego wykonano także analizę zwilżalności na podstawie wykonanych pomiarów dynamicznego kąta zwilżania.

WPROWADZENIE

Aluminium i jego stopy należą do najważniejszych metali stosowanych jako materiały konstrukcyjne we współczesnej technice. Fakt ten wynika m.in. z tego, że aluminium jest trzecim pierwiastkiem pod względem udziału w budowie skorupy ziemskiej (zaraz po tlenie i krzemie) oraz drugim (po żelazie) metalem o najczęstszym zastosowaniu technicznym. Rosnąca popularność stopów aluminium jest szczególnie widoczna w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, w których to wykorzystuje się m.in. ich doskonałą odporność korozyjną, dobrą odporność na zużycie zmęczeniowe, korzystne przewodnictwo cieplne i umiarkowane koszty wytwarzania. Należy jednak pamiętać także o istotnej wadzie jaką odznaczają się materiały tego typu. Jest to stosunkowo nieduża odporność na niektóre formy zużywania tribologicznego, w tym przede wszystkim na zużywanie oraz zacieranie adhezyjne. Tradycyjnym sposobem przeciwdziałaniu tego typu formom zużywania jest stosowanie substancji smarujących o czynnych powierzchniowo dodatkach przeciwzużyciowych (AW) i przeciwzatarciowych (EP). Rozwiązanie to nie jest jednak jednoznaczne dla smarowania pary ślizgowej, w której ze stopem aluminium współpracuje stal. Skojarzenie takich materiałów jest uznawane za stosunkowo trudne do smarowania, co wynika w dużej mierze z ich skłonności do tworzenia wiązań metalicznych (co jak wiadomo jest jedną z podstaw powstawania szepień adhezyjnych). Wniosek taki może zostać sformułowany chociażby na podstawie klasyfikacji par trących we-

dług ich skłonności do szepiania zbudowanej przez L.F. Coffina [L. 1]. Zgodnie z jej założeniami aluminium i żelazo należą do pierwiastków o częściowej skłonności do szepiania, czyli wykazują skłonność do tworzenia szepień adhezyjnych, odpowiedzialnych za procesy zużywania adhezyjnego. Warunki te wynikają ze znanej w metalurgii reguły Hume-Rothery'ego, określającej czynniki niezbędne do osiągnięcia wzajemnej rozpuszczalności przez metale. Na poziomie pierwiastkowym wytyczne te dotyczą np. wielkości atomów (różnica średnicy atomów obu metali nie powinna przekraczać 15%) oraz wartościowości metali (jednakowa sprzyja powstawaniu roztworów stałych). Promień atomu żelaza (głównego składnika stali) szacowany jest na poziomie 126 pm, natomiast promień atomu glinu na poziomie 143 pm. Zachowana jest zatem tutaj relacja w różnicy wielkości atomów sugerowana regułą Hume-Rothery'ego. Także w przypadku wartościowości można mówić o wypełnieniu tej reguły, ponieważ zarówno żelazo, jak i aluminium charakteryzują się wartościowością III (a więc mają zdolność do łączenia się z innymi pierwiastkami tą samą ilością wiązań). Uzupełnieniem reguły Hume-Rothery'ego są założenia dotyczące podobieństw w budowie sieci krystalicznej i właściwości elektrochemicznych. Trudno jednak rozpatrywać je na poziomie podstawowym, ponieważ ich charakter będzie bardzo indywidualny, zależny m.in. od składu stopowego czy też zastosowanej metody obróbkowej. Warto jednak nadmienić, że typ sieci krystalicznej ma wpływ nie tylko na zdolność do tworzenia szepień adhezyjnych, ale również na to, w jaki sposób i na jakim poziomie zachodzi zużywanie metali. Najbardziej znaną weryfikację tych postulatów (potwierdzającą hipotezę) przeprowadził D. Buckley [L. 2].

Problematyka smarowania i zużywania skojarzenia stalowo-aluminiowego była przedmiotem badań przeprowadzonych przez grupę naukowców z Chińskiej Akademii Nauk (Instytut Fizyki Chemicznej w Lanzhou) [L. 3÷6]. W swoich pracach autorzy zwracają uwagę na fakt dużej skłonności obydwu materiałów do tworzenia roztworów stałych w konsekwencji ich stosunkowo wysokiej rozpuszczalności wzajemnej [L. 6]. Taki stan rzecz jest oczywiście doskonałym asumptem do tworzenia szepień adhezyjnych i implikacji zużywania adhezyjnego. Dlatego podjęte przez autorów badania miały wykazać, które z powszechnie stosowanych dodatków do środków smarowych są optymalne do smarowania skojarzenia stalowo-aluminiowego (w pracach tych zastosowano skojarzenie materiałów typowo łożyskowych (stal ŁH15-aluminium

AlCu4Mg1). Zgodnie z informacjami zawartymi w pracy [L. 6] do najczęściej wykorzystywanych dodatków należą związki organiczne na bazie pierwiastków: fosfor, siarka, chlor, azot, bor i tlen oraz związki metaloorganiczne, głównie dialkilotiofosforan cynku (ZDDP). Rezultaty przeprowadzonych badań są szczególnie interesujące dla ostatniego z wymienionych dodatków. Działanie przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe ZDDP ma klasyczne założenia i polega na formowaniu warstwy granicznej o małej odporności na ścinanie na powierzchni metalu. Reagując z powierzchnią metalu, dodatek istotnie wpływa na redukcję zużycia adhezyjnego, jednakże jednocześnie generuje zużycie tribochemiczne. Wzajemna reaktywność podłoża (metal) i zastosowanego dodatku wpływa na to, która z tych form zużycia będzie miała determinujący charakter. W przypadku skojarzenia stal–aluminium (na podstawie cytowanych prac) dodatek ZDDP niekorzystnie wpływa na drugi z wymienionych materiałów współpracującej pary (w przeciwieństwie do elementu stalowego). Fakt ten wynika m.in. z tego, że powstała na bazie ZDDP warstwa na powierzchni aluminium jest bardzo nietrwała i łatwo usuwalna przez produkty zużycia w skojarzeniu. Ponadto aluminium jest znacznie aktywniejsze chemicznie w stosunku do żelaza, dlatego też przebieg reakcji dodatku z powierzchnią aluminium jest na tyle gwałtowny, że może mieć korozyjny (chemicznie) charakter. W efekcie zużycie elementu aluminiowego smarowanego olejem z dodatkiem ZDDP będzie większe niż przy smarowaniu samą bazą olejową.

Jednym z podstawowych wniosków, jakie można sformułować po analizie rezultatów badań z prac [L. 3÷6] jest to, że chemiczne lub energetyczne „pobudzenie” powierzchni może być czynnikiem determinującym zużycie aluminium w warunkach smarowania z dodatkami AW i EP. Choć autorzy tych prac zauważają ten fakt, nie odnoszą go do żadnych mierzalnych wielkości charakteryzujących, chociażby stan energetyczny powierzchni. Badania te nie uwzględniają także tego, że zmiana stanu energetycznego powierzchni może wpływać na jej zwilżalność substancją smarującą, co może przekładać się na koncentrację dodatków w określonym obszarze powierzchni, powodując mniejszą lub większą interakcję pomiędzy nimi. Z badań przeprowadzonych przez B.M. Astaszkiwicza i współpracowników [L. 7] wynika, że przy tej samej chropowatości zwilżalność powierzchni (wyznaczana za pomocą statycznego kąta zwilżania) po próbie tarcia jest zawsze lepsza niż przed próbą (szlifowane próbki odniesienia). Taki stan rzeczy autorzy wyjaśniają właśnie prawdopodobnym

podwyższeniem stanu energetycznego warstwy wierzchniej (nie odnoszą tego jednak do żadnego parametru energetycznego).

W związku z powyższym, celem prezentowanej pracy było wyjaśnienie, jak stan energetyczny warstwy wierzchniej (charakteryzowany swobodną energią powierzchniową, a generowany zgniotem powierzchniowym) stopu aluminium AlMg2 wpływa na zmianę jej zwilżalności aktywnymi i nieaktywnymi powierzchniowo substancjami smarującymi. Informacje te mogą okazać się istotne dla zidentyfikowania sposobu przygotowania aluminium w aspekcie współpracy ze standardowymi dodatkami AW i EP.

METODY BADAŃ

Do badań wykorzystano próbki wykonane ze stopu aluminium EN-AW AlMg2 przeznaczonego do obróbki plastycznej, dla których stopnie zgniotu dobrano na podstawie wykresów umocnienia. Choć stopy aluminium z tzw. grupy 5000 (EN-AW AlMg2 to zgodnie z oznaczeniem numerycznym stop 5251) nie są materiałami konstrukcyjnym zwyczajowo stosowanym w skojarzeniach ślizgowych, znane są pozycje literaturowe, w których badano ich zużycie w skojarzeniu ślizgowym ze stalami (np. stop 5056 w [L. 12] lub stop 5754 w [L. 13]). Ponadto znany jest problem zacierania obróbki plastycznej na zimno stopów aluminium (między odkształcanym elementem aluminiowym a stalową matrycą), a stop AlMg2 jest klasycznym materiałem aluminiowym do obróbki plastycznej (co też było jego podstawowym kryterium wyboru). Materiał wyjściowy nie był poddany obróbce plastycznej, a zastosowane stopnie zgniotu odpowiadały w przybliżeniu połowie odcinka proporcjonalnego wzrostu umocnienia (ok. 20%) oraz w pobliżu „nasylenia” zgniotem (ok. 40%). Próbki poddano zgniotowi na prasie o dużym nacisku, po czym – celem nadania im jednakowej chropowatości, szlifowano je ręcznie papierem ściernym o ziarnistości 500 (wyeliminowanie wpływu chropowatości na zwilżalność i energię powierzchniową).

Swobodną energię powierzchniową wyznaczano na podstawie pomiarów kąta zwilżania na powierzchni próbek. Do tego celu zastosowano goniometr PG3 firmy Fibro System AB, w którym próbki umieszczano po uprzednim czyszczeniu w acetonie i suszeniu. Na powierzchni tak przygotowanych próbek osadzano krople wody o specjalnej czystości i objętości 2 μ l.

Krople osadzono metodą tzw. kropli uwieżonej, polegającej na tym, że jest ona uwalniana z aplikatora natychmiast po tym, jak nastąpi kontakt z podłożem. Kąt zwilżania pomiędzy powierzchnią próbki a płaszczyzną styczną do powierzchni kropli mierzono po ustaleniu warunków równowagi. Za stan równowagi przyjmowano warunki, w których wielkość kąta zwilżania stabilizowała się (tj. przestawała zmniejszać się w wyniku rozplywu kropli po powierzchni). Procedurę pomiaru kąta zwilżania powtarzano 10-krotnie, po czym dla uzyskanej wartości średniej wyznaczano (za pomocą oprogramowania goniometru opartego o metodę zawartą w normie ASTM D5946) swobodną energię powierzchniową. Dla każdego rodzaju próbek wykonano 12 powtórzeń wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej.

Zwilżalność powierzchni badano w oparciu o pomiar statycznego kąta zwilżania, wykorzystując to samo oprzyrządowanie (goniometr PG3) i metodykę (2 μ l krople olejów osadzane metodą kropli uwolnionej), co w przypadku wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej. Oleje wykorzystywane do pomiarów chłodzono do temperatury $10 \pm 1^\circ\text{C}$ (celem ułatwienia obserwacji przez zwiększenie lepkości i w efekcie zmniejszenie szybkości rozplywu). Badania zwilżalności wykonano dla trzech rodzajów substancji smarujących:

- nieaktywnego powierzchniowo oleju parafinowego,
- oleju przekładniowego Tranself EP z przeciwzatarciowymi dodatkami siarkowo-fosforowymi ($< 2,5\%$ sulfonianu wapnia, $< 2,5\%$ estrów kwasu fosforowego i soli aminowych, $< 0,25\%$ fosforynu trifenylu) i alkiloditiofosforanem cynku ($< 2,5\%$);
- oleju hydraulicznego Total Azolla ZS 100 z dodatkami przeciwzużyciowymi ($< 0,6\%$ alkiloditiofosforanu cynku i $< 0,2\%$ alkilofenylu).

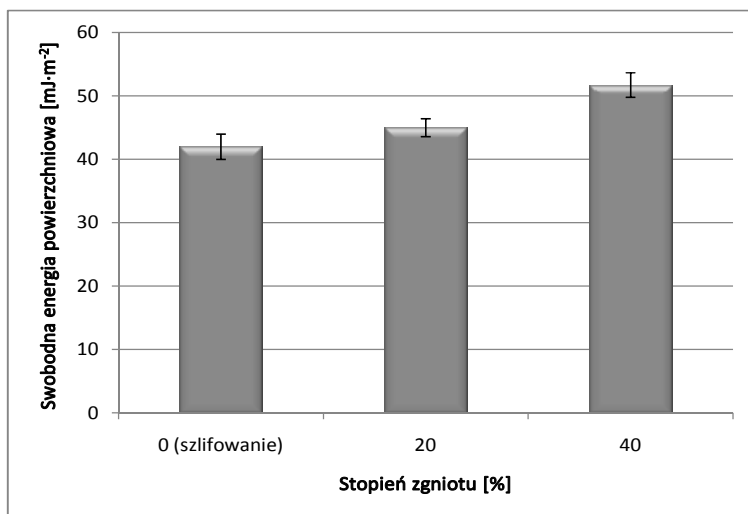
Dla każdego rodzaju próbek wykonano 30 powtórzeń pomiaru kąta zwilżania (po dziesięć pomiarów na trzech losowo wybranych próbkach z każdej z badanych grup).

Dodatkowo, dla nieaktywnej substancji smarującej (oleju parafinowego) wykonano wstępną analizę dynamiki rozplywu oleju na powierzchni każdego rodzaju próbek. Badania te przeprowadzono w oparciu o obserwację dynamicznego kąta zwilżania prowadzoną na goniometrze PG3 firmy Fibro System AB i w oparciu o inną procedurę niż dla statycznego kąta zwilżania. Na powierzchnię przygotowanych próbek (czyszczonych w acetonie i suszonych) „zrzucano” krople olejów o objętości 5 μ l i temperaturze $10 \pm 1^\circ\text{C}$ (tzw. metoda kropli uwolnionej). Bada-

ne krople zrzucano z wysokości 1 mm i obserwowano zmiany kąta zwilżania na powierzchni aluminium przez pierwsze 6 s rozplływania się po powierzchni. W pierwszej sekundzie rejestrowano 10 kątów (co 0,1 s), w dalszym czasie kąty mierzono z mniejszą częstotliwością (co 1 s).

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Na **Rys. 1** zestawiono wartości wyznaczonych, według omówionej wcześniej procedury, średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej dla poszczególnych rodzajów próbek z aluminium AlMg2. Dla każdej z nich obliczono przedziały ufności wartości średniej, dla przyjętego poziomu istotności równego 0,1.



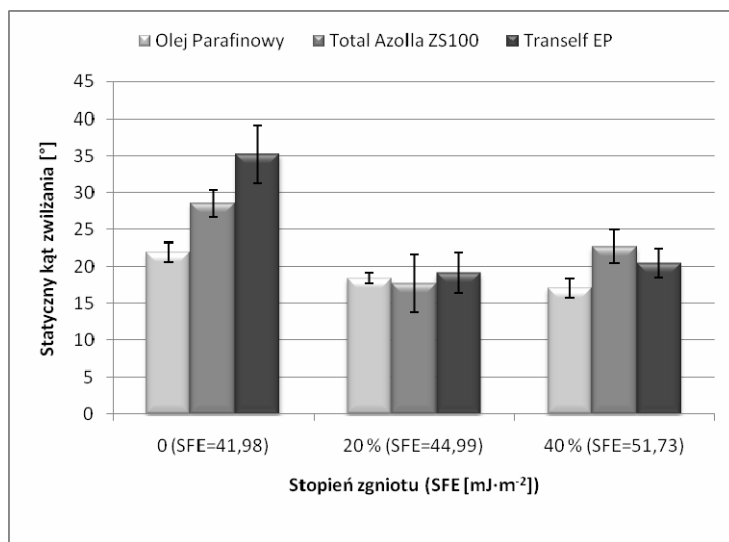
Rys. 1. Średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej aluminium AlMg2 w zależności od zastosowanej metody obróbki

Fig. 1. Average values of free surface energy of AlMg2 aluminum in depending on used treatment method

Przebieg wykresów na **Rys. 1** obrazuje wyraźny wzrost swobodnej energii powierzchniowej, jaki charakteryzuje próbki zgniatane w stosunku do próbek szlifowanych. Jest on szczególnie widoczny przy porównaniu wartości swobodnej energii powierzchniowej dla próbek szlifowanych i poddanych maksymalnemu, przyjętemu zgniotowi (tj. 40%). Różnica, jaka charakteryzuje wartości średnie dla obu tych metod obróbko-

wych wynosi ok. $10 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (dla próbek szlifowanych średnia wartość swobodnej energii powierzchniowej wynosiła $41,98 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a dla próbek poddanych 40 % zgniotowi – $51,73 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Na **Rys. 2** przedstawiono zmiany statycznego kąta zwilżania w zależności od zastosowanej metody obróbkowej i będącej jej konsekwencją swobodnej energii powierzchniowej (oznaczonej na wykresie symbolem SFE) oraz rodzaju wykorzystanej substancji smarującej. Analiza zaprezentowanych wykresów wskazuje na ogólną tendencję (tj. dla wszystkich substancji smarujących) spadku wartości statycznego kąta zwilżania pomiędzy próbkami szlifowanymi a próbkami poddanymi zgniotowi 20%. Tendencja ta najbardziej zarysowuje się dla oleju Tranself EP (różnica to ok. $16,09^\circ$), natomiast najmniej dla nieaktywnego oleju parafinowego (różnica to ok. $3,52^\circ$). Dla oleju Total Azolla ZS100 spadek statycznego kąta zwilżania pomiędzy tymi samymi partiami próbek wyniósł ok. $10,77^\circ$. W tym miejscu warto zwrócić uwagę



Rys. 2. Średnie wartości statycznego kąta zwilżania w zależności od zastosowanej metody obróbkowej oraz rodzaju substancji smarującej

Fig. 2. Average values of static wetting angle depending on used treatment method and type of lubricating medium

także na znacząco inne wartości średnich kątów zwilżania dla poszczególnych substancji smarujących dla próbek szlifowanych. Dla oleju Tran-

self EP wartość tego kąta wynosiła $35,21^\circ$, dla oleju Total Azolla ZS100 – $28,46^\circ$, a dla oleju parafinowego – $21,91^\circ$. Przedstawione spostrzeżenia można wyjaśnić dwoma czynnikami: wyjściową lepkością oleju oraz wpływem dodatków olejowych na zwilżalność smarowanej powierzchni. Zgodnie z danymi producentkimi, lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C dla oleju Tranself EP wynosi $158\text{ mm}^2/\text{s}$ przy stosunkowo dużym wskaźniku lepkości $WL = 108$. Oznacza to, że olej jest stosunkowo mało podatny na zmiany temperatury i w warunkach pomiarowych (10°C) nie nastąpiło znaczące obniżenie lepkości. Dla oleju Total Azolla ZS100 lepkość kinematyczna w 40°C wynosi $97,5\text{ mm}^2/\text{s}$, przy wskaźniku lepkości $WL = 100$. Zatem zarówno sama lepkość jest niższa w stosunku do Tranself EP, jak i poprzez WL – mniejsza odporność na oddziaływanie temperaturowe. Typowy olej parafinowy, zgodnie z informacjami podanymi w pracy [L. 8], charakteryzuje się lepkością kinematyczną rzędu ok. $43\text{ mm}^2/\text{s}$ i wskaźniku lepkości $WL = 96$. Najmniejsze wartości obydwu analizowanych parametrów mogą decydować o tym, że to właśnie olej parafinowy charakteryzuje się najmniejszymi wartościami statycznego kąta zwilżania dla próbek szlifowanych.

O tym, jakie wartości przyjmuje kąt zwilżania decydują także właściwości dodatków zastosowanych do badanych olejów. Z badań przeprowadzonych przez autorów pracy [L. 9] wynika, że modyfikacja powierzchni warstwami o charakterze hydrofobowym wpływa na wzrost statycznego kąta zwilżania na tej powierzchni. Takim właśnie charakterem odznaczają się warstwy graniczne oparte na ZDDP powstające na powierzchniach metali w warunkach atmosferycznych (czyli de facto na powierzchni tlenków metali – w przypadku aluminium Al_2O_3). Takie założenie odpowiada układowi wartości statycznych kątów zwilżania dla próbek szlifowanych na **Rys. 2**. Najmniejszą wartość przyjmuje bezdodatkowy olej parafinowy, pośrednią olej Total Azolla ZS100 (dodatek alkiloditiofosforanu cynku poniżej $0,6\%$), a największą olej Tranself EP (dodatek alkiloditiofosforanu cynku poniżej $2,5\%$). Można więc założyć, że również zawartość alkiloditiofosforanu cynku ma wpływ na ostateczną wartość statycznego kąta zwilżania na analizowanej powierzchni szlifowanej.

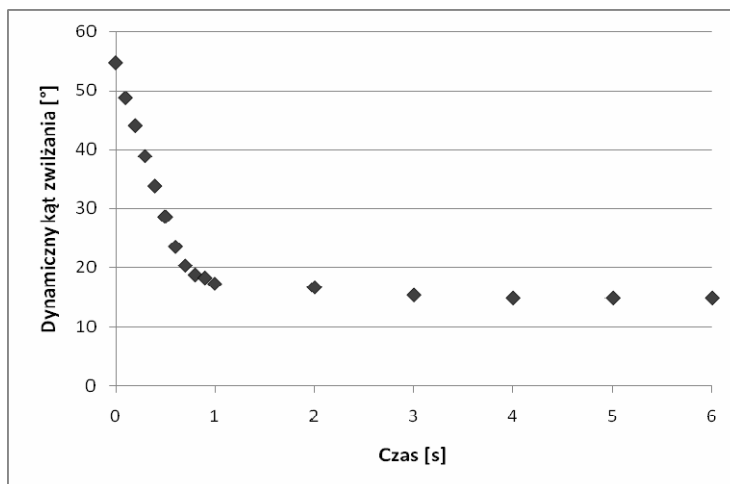
Podobna tendencja nie jest już jednak zauważalna dla pozostałych partii próbek, tj. próbek poddanych zgniotom 20 i 40%. Dla oleju parafinowego zarysowuje się tendencja spadku kąta zwilżania wraz ze wzrostem swobodnej energii powierzchniowej. Należy zatem przypuszczać, że sugerowane w pracy [L. 7] podwyższenie stanu energetycznego war-

stwy wierzchniej przekłada się na zmianę jej zwilżalności (różnica dla próbek zgniatanych powierzchniowo, choć zauważalna, jest niewielka, uwzględniając odchylenia standardowe – nieistotna statystycznie). W odmienny sposób kształtuje się natomiast zwilżalność dla olejów z dodatkami AW/EP. Jak pokazują wykresy na **Rys. 2**, początkowy (tj. pomiędzy próbkami po szlifowaniu i zgniocie 20%) spadek statycznego kąta zwilżania jest bardzo wyraźny. W przeciwieństwie jednak do nieaktywnego oleju parafinowego dalszy zgniot nie wywołał dalszego spadku wartości kąta zwilżania, ale jego niewielki wzrost (dla oleju Tranself EP o $1,37^\circ$, dla oleju Total Azolla ZS100 o $5,04^\circ$). W obydwu przypadkach ma to prawdopodobnie związek z większą aktywnością energetyczną powierzchni, która przekłada się na akcelerację wiązania dodatków olejowych z powierzchnią metalu (niezależnie od tego, że aluminium i jego stopy wykazują i tak stosunkowo dużą reaktywność powierzchniową). Taki wniosek uprawdopodobniają także wcześniejsze prace autora, w których wykazano m.in. wpływ podwyższenia stanu energetycznego warstwy wierzchniej na aktywność chemiczną [**L. 10**] i odporność na zacieranie adhezyjne [**L. 11**]. Z tribologicznego punktu widzenia bardzo przydatne mogą okazać się informacje na temat dynamiki zachowywania się substancji smarującej na powierzchni ciała stałego (szczególnie w przypadku tych form zużywania, które mają patologiczny, gwałtowny przebieg – tak jak zacieranie). Zgodnie z opisaną wcześniej metodyką dla każdej partii próbek przeprowadzono wstępne badania dynamicznego kąta zwilżania z użyciem oleju parafinowego. Otrzymałe wyniki dla poszczególnych partii zaprezentowano na **Rys. 3÷5**.

Zaprezentowane wykresy dynamicznych kątów zwilżania dla próbek poddanych różnym metodom obróbkowym (a w konsekwencji o różnej swobodnej energii powierzchniowej) mogą stanowić potwierdzenie analizy dokonanej dla pomiarów statycznych kątów zwilżania. Jak wynika z **Rys. 3÷5**, największa wartość wyjściowa kąta zwilżania dotyczyła próbek szlifowanych (**Rys. 3** – $54,8^\circ$), następnie próbek poddanych zgniotowi 20% (**Rys. 4** – $44,6^\circ$) i próbek poddanych zgniotowi 40% (**Rys. 5** – $43,6^\circ$).

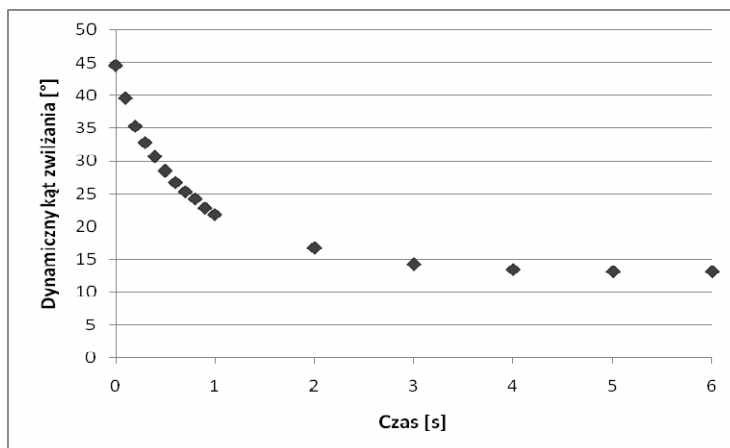
Taki stan rzeczy odpowiada właściwie przebiegowi zmian statycznego kąta zwilżania dla oleju parafinowego (**Rys. 2**) – zatem i jego wyjaśnienie będzie miało ten sam charakter. Warto także zauważyć, że o większej zwilżalności powierzchni zgniatanych świadczyć może większy czas potrzebny na ustabilizowanie się kąta zwilżania dla tych powierzchni w stosunku do próbek szlifowanych. Kropla oleju

parafinowego stabilizowała się na poziomie kąta zwilżania ok. 15° już w 2 s pomiaru. W przypadku próbek zgniatanych czas ten był dłuższy i wynosił 4 s, a zmierzone kąty równowagowe osiągały wartości ok. $13,5^\circ$ (zgniot 20%) i $12,5^\circ$ (zgniot 40%).



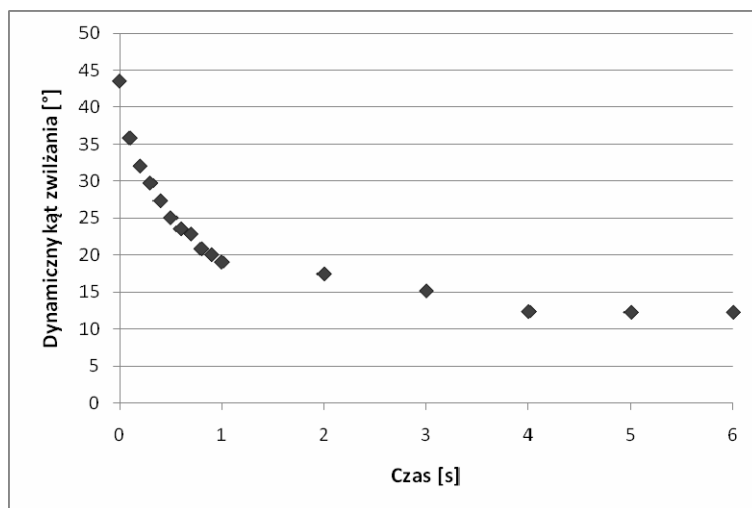
Rys. 3. Przykładowe wartości dynamicznego kąta zwilżania oleju parafinowego na powierzchni próbek szlifowanych

Fig. 3. Example of dynamic wetting angle values of paraffin oil on surface of grinded specimens



Rys. 4. Przykładowe wartości dynamicznego kąta zwilżania oleju parafinowego na powierzchni próbek poddanych zgniotowi 20%

Fig. 4. Example of dynamic wetting angle values of paraffin oil on surface of 20% work hardened specimens



Rys. 5. Przykładowe wartości dynamicznego kąta zwilżania oleju parafinowego na powierzchni próbek poddanych zgniotowi 40%

Fig. 5. Example of dynamic wetting angle values of paraffin oil on surface of 40% work hardened specimens

Przeprowadzone badania dynamicznego kąta zwilżania przeprowadzono tylko dla nieaktywnej powierzchniowo oleju parafinowego (stąd dość przewidywalny przebieg wykresów). Dla olejów uszlachetnionych dodatkami AW/EP przebieg zmian dynamicznego kąta zwilżania może mieć nieco inny charakter.

PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że akumulacja energii w warstwie wierzchniej stopu aluminium AlMg2 (potwierdzona analizą swobodnej energii powierzchniowej) przekłada się na wzrost jej zwilżalności. Wniosek ten można sformułować szczególnie dla obojętnego w stosunku do powierzchni metalu oleju parafinowego, dla którego wielkość kąta zwilżania zmniejszała się wraz ze wzrostem swobodnej energii powierzchniowej. Dla olejów „wyposażonych“ w dodatki o charakterze przeciwwzyciowym i przeciwwzatarciowym widoczna jest wyraźna poprawa zwilżalności po poddaniu smarowanej powierzchni średniemu zgniotowi (20%) oraz niewielki jej wzrost po osiągnięciu maksymalnego umocnienia (40%). Ma to związek z prawdopodobną aktywacją energetyczną powierzchni i jej interakcji

z dodatkami AW/EP. Przeprowadzone pomiary dynamicznego kąta zwilżania pokazują możliwość uzyskania informacji o dynamice rozplływania się oleju na współpracującej powierzchni. Dane te mogą być szczególnie przydatne w badania eksperymentalnych dotyczących skojarzeń o trudno dostępnych węzłach wymagających smarowania. W dalszym etapie badań należałoby wykonać pomiary dynamicznego kąta zwilżania dla olejów uszlachetnionych dodatkami, celem sprawdzenia ich rozplływalności na powierzchni metalu. Dodatkowym parametrem, jaki powinien zostać zbadany jest dynamika zmian objętości analizowanej kropli oleju, co może się przyczynić do weryfikacji postawionych w tym artykule wniosków. Analiza zmian objętości kropli daje bowiem informacje na temat adsorpcji oleju na powierzchni metalu (a więc zjawiska zależnego i od stanu energetycznego warstwy wierzchniej i od reaktywności dodatków zastosowanych w olejach). Kompleksowa ocena interakcji dodatków olejowych z charakterystyką energetyczną powierzchni (w tym przypadku stopu aluminium) może się przyczynić do wyznaczania optymalnych warunków ich współpracy (np. pomiędzy powierzchnią aluminium a standardowymi dodatkami typu ZDDP).

LITERATURA

1. Coffin L.F.: Some metallurgical aspects of friction and wear, in *Friction and Wear*, Elsevier, New York 1959.
2. Buckley D.: *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1981.
3. Yong W., Qunji X.: Friction and wear characteristics of P-containing antiwear and extreme pressure additives in the sliding of steel against aluminium alloy, *Wear*, vol. 188, 1995.
4. Yong W., Qunji X.: Effect of antiwear and extreme pressure additives on the wear of aluminium alloy in lubricated aluminium-on-steel contact, *Tribology International*, vol. 28, 1995.
5. Yong W.: Tribological behavior of lubricating oil additives in lubricated aluminum-on-steel contact, *Wear*, vol. 196, 1996.
6. Yong W., Qunji X., Lili C.: Friction and wear characteristics of ZDDP in the sliding of steel against aluminum alloy; *Tribology International*, vol. 30, 1997.
7. Astaškevič B.M., Larin T.V., Zijaev D.I.: Vlijanie trenija na smačivaemost' poverchnostej, *Problemy Trenija i Iznaš*, nr 11/1977.

8. Peng D.X., Kang Y., Hwang R.M., Shyr S.S., Chang Y.P.: Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin, *Tribology International*, vol. 36, 2009.
9. Piwoński I., Kisielewska A.: The effectiveness of the ZDDP tribofilms in lubrication of sol-gel titania in technical dry friction conditions, *Tribology Letters*, vol. 39, 2009.
10. Wojciechowski Ł.: Zmiana aktywności chemicznej warstwy wierzchniej stali 45 wskutek nagniatania naporowego, *Tribologia*, nr 3/2007.
11. Wojciechowski Ł.: Nosal S.: The preparation of surface layer of non-alloyed steel to cooperation with lubricating medium, *Journal of KONES*, nr 1/2009.
12. Ghazali M.J., Rainforth W.M., Jones H.: The wear of wrought aluminium alloys under dry sliding conditions, *Tribology International*, vol. 40, 2007.
13. Godja N., Kiss N., Löcker C., Schindel A., Gavrilovic A., Wosik J., Mann R., Wendrinsky J., Merstallinger A., Neuer G.E.: Preparation and characterization of spark-anodized Al-alloys: physical, chemical and tribological properties, *Tribology International*, vol. 43, 2010.

Recenzent:
Ryszard MARCZAK

Summary

The influence of energy conditions of an aluminium alloy surface layer on its wettability by surface active and non-active lubricating mediums is presented in this article. Energy conditions were estimated based on the analysis of free surface energy changes calculated (by ASTM D5946 method) upon static wetting angle measurement. Wettability was characterised by the observation of static wetting angle for three lubricating mediums: paraffin oil, Tranself EP oil (EP phosphorus-sulphur additives), and Total Azolla ZS100 oil (AW zinc alkyldithiophosphate additive). It was found that the increase of free surface energy influences the improvement of wettability of the aluminium surface by inactive (paraffin oil) and active (with AW/EP additives) lubricating mediums. The analysis of wettability by inactive lubricating medium based on dynamic wetting angle observation was also carried out.