

Marzena M. LACHOWICZ*, **Tadeusz LEŚNIEWSKI***,
Maciej B. LACHOWICZ*, **Robert JASIONOWSKI****

PROCESY ZUŻYCIA TRIBOLOGICZNEGO, KAWITACYJNEGO I KOROZYJNEGO WYBRANYCH STOPÓW ALUMINIUM DO PRZERÓBKI PLASTYCZNEJ

PROCESSES OF TRIBOLOGICAL, CAVITATIONAL AND CORROSIONAL WEAR OF TESTED ALUMINIUM ALLOYS APPLIED IN PLASTIC WORKING

Słowa kluczowe:

stopy aluminium, kawitacja, odporność korozyjna, zużycie

Key words:

aluminium alloys, cavitation, corrosion resistance, wear

Streszczenie

Złożone procesy tribologiczne rozpatrywane są w literaturze jako suma procesów podstawowych oraz ich wzajemnego współdziałania. Z tego względu ich analiza zawsze wymaga rozpatrzenia również każdego z tych występujących

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, ul. Łukasiewicza 5, 50-372 Wrocław.

** Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Nauk Podstawowych Technicznych, Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin.

procesów indywidualnie. Celem realizowanej pracy była ocena procesów zużycia tribologicznego, kawitacyjnego oraz korozyjnego pozostająca w korelacji z mikrostrukturą trzech stopów aluminium przeznaczonych do przeróbki plastycznej – przedstawicieli serii 2000, 5000 i 7000.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się szybki rozwój stopów metali nieżelaznych, w tym stopów aluminium. Wywołane jest to rosnącym zapotrzebowaniem na stopy lekkie i związane z rozwojem technologii wytwarzania pozwalających na uzyskiwanie dla nich coraz wyższych właściwości mechanicznych, przy jednoczesnym zachowaniu ich niskiej gęstości, umożliwiającej obniżenie masy elementów z nich wytwarzanych. Jest to szczególnie istotne w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy okrętowym.

Rzadko spotyka się procesy zużycia prowadzące do niszczenia powierzchni materiałów metalicznych oparte wyłącznie na jednym mechanizmie. W praktyce spotykamy się ze zużywaniem materiału pod wpływem co najmniej dwóch procesów niszczących. Równoczesne oddziaływanie czynników klimatycznych i eksploatacyjnych sprawia, że elementy konstrukcyjne narażone są na działanie złożonego zespołu czynników niszczących, wywołujących bardzo zróżnicowane formy zużycia [L. 1]. Ich intensywność niejednokrotnie może prowadzić do niszczenia materiału w sposób patologiczny.

Przykładem takich wieloaspektowych procesów zużywania jest połączenie korozji z oddziaływaniami mechanicznymi, np. korozja naprężeniowa, zmęczeniowa czy cierna. Oddziaływanie środowiska agresywnego może towarzyszyć również kawitacji. Charakterystycznymi cechami wymienionych procesów jest obecność ośrodka ciekłego oddziałującego fizykochemicznie na materiał, występowanie oddziaływania mechanicznego działającego na powierzchnię materiału i/lub obecność w cieczy cząstek stałych generujących oddziaływanie abrazyjne lub zaburzających procesy przepływu. Źródłem oddziaływania może być inne ciało stałe (w przypadku tribokorozji) lub ośrodek ciekły (w przypadku zużycia korozyjno-kawitacyjnego) [L. 1]. Na mechanizm zużycia wpływ ma również stan powierzchni niszczonego elementu, w tym m.in. zdolność do pasywacji materiału w środowisku agresywnym [L. 2].

W literaturze złożone procesy tribologiczne rozpatrywane są jako suma procesów podstawowych oraz ich wzajemnego współdziałania [L. 1, 3, 4-6]. Z tego względu ich analiza zawsze wymaga poznania każdego z tych procesów występujących indywidualnie. Celem realizowanej pracy była ocena zużycia ściernego, kawitacyjnego oraz korozyjnego trzech stopów aluminium gatunków AW 2017A, AW 5754 oraz AW 7075 przeznaczonych do przeróbki plastycznej.

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

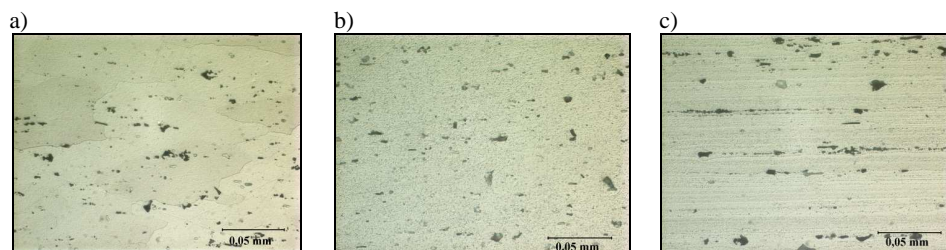
Do badań zastosowano trzy stopy, po jednym z serii 2000 (aluminium z miedzią), 5000 (aluminium z magnezem) i 7000 (aluminium z cynkiem). Wykorzystano powszechnie stosowane gatunki techniczne: AW 2017A (AlCuMg), AW 5754 (AlMg3) i AW 7075 (AlZnMgCu1,5). Ich skład chemiczny zestawiono w **Tabeli 1**. Twardość badanych materiałów wynosiła odpowiednio: 115 ± 7 HV5, 69 ± 2 HV5, 166 ± 2 HV5.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów

Table 1. Chemical constitution of tested alloys

Pierwiastek	Zawartość		
	AW 2017A	AW 5754	AW 7075
Mg	0,98	3,50	2,80
Cu	4,00	0,02	1,50
Mn	0,48	0,14	0,30
Zn	-	-	5,50
Si	0,42	0,27	0,22
Fe	0,50	0,25	0,25
Cr	0,09	0,10	0,18
Ti	(+Zr) 0,15	0,10	0,10
Al	reszta	reszta	reszta

Mikrostruktura badanych materiałów była charakterystyczna dla stopów aluminium po przeróbce plastycznej (**Rys. 1**). Składała się z ziaren roztworu stałego α z drobnodispersyjnymi wydzieleniami faz międzymetalicznych. Stop AW 2017A występował w stanie obróbki cieplnej T-4, natomiast AW 7075 w stanie T-6. Fazą umacniająca wydzieleniowo stopy serii 2000 jest faza Cu_2Al , natomiast stopy serii 7000 – faza Zn_2Mg . Stopy serii 5000 nie podlegają procesom umacniania wydzieleniowego. We wszystkich badanych stopach obserwowano fazę AlFeMnSi (ciemne w obrazie mikroskopowym). Opis mikrostruktury analizowanych stopów przedstawiono w pracy [L. 7].



Rys. 1. Mikrostruktura badanych stopów aluminium: (a) stop AW 2017A stan T-4; (b) stop AW 5754 stan H111; (c) stop AW 7075 stan T-6. Mikroskopia świetlna, stan trawiony

Fig. 1. Microstructure of tested aluminum alloys: (a) alloy AW 2017A condition T-4; (b) alloy AW 5754 condition H111; (c) alloy AW 7075 condition T-6. reflection microscopy, etch

Ocenę zużycia ściernego badanych stopów, wywołanego przez luźne i suche cząstki ścierniwa twardszego od badanego materiału, przeprowadzono w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej na stanowisku badawczym Tester T-07. Jako ścierniwo zastosowano elektrokorund o ziarnistości 90. Wskaźnik odporności na ścieranie K_b (względna odporność na ścieranie) wyznaczono na podstawie pomiarów zużycia wagowego. Określony jest on jako stosunek objętościowego zużycia próbki wzorcowej do zużycia badanego materiału zgodnie ze wzorem:

$$K_b = \frac{z_w \cdot \rho_b}{z_b \cdot \rho_w},$$

gdzie: Z_w , Z_b – zużycie wagowe odpowiednio wzorca i materiału badanego; ρ_w , ρ_b – gęstość materiału wzorca i badanego materiału. Gęstość przyjęta do analizy dla badanych stopów wyniosła: $\rho_{2017A} = 2,79 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{5754} = 2,68 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{7075} = 2,81 \text{ g/cm}^3$. Za wzorec przyjęto materiał o najniższej twardości, tj. stop AW 5754. Podczas badań próbka dociskana była z siłą $F_N = 44\text{N}$ do obracającego się z prędkością $v = \pi \cdot d \cdot n/60 = 0,3 \text{ m/s}$ (dla $n = 60 \text{ obr./min}$) krążka gumowego o średnicy $d = 50 \text{ mm}$ w czasie 10 minut.

Badania kawitacyjne przeprowadzono w Instytucie Nauk Podstawowych Technicznych Akademii Morskiej w Szczecinie na stanowisku laboratoryjnym strugowo-uderzeniowym [L. 8]. W każdym teście odporności kawitacyjnej badano jednocześnie dwie próbki materiału o parametrze chropowatości R_a wynoszącym na początku badania $0,010 \div 0,015 \text{ }\mu\text{m}$. Próbki do badań miały kształt walców o średnicy 20 mm i wysokości 5 mm. Próbki mocowano w ramionach wirnika w płaszczyźnie pionowej, równoległe do osi strumienia wody tłoczonej pod ciśnieniem 0,06 MPa w sposób ciągły przez dyszę o średnicy 10 mm oddaloną od krawędzi próbek o 1,6 mm. Wirujące próbki uderzały o strugę wody. Natężenie przepływu wody było stałe i wynosiło $1,55 \text{ m}^3/\text{godz}$. Próbki poddawano badaniu przez 60 minut, wyjmowano z uchwytów po 1, 5, 10, 20, 30 i 60 minutach, następnie odfuszczano w myjce ultradźwiękowej przez 10 minut w temperaturze 30°C , suszono w suszarce laboratoryjnej przez 15 minut w temperaturze 120°C , ważono z dokładnością do $0,0001 \text{ g}$ i wykonywano pomiaru chropowatości przy użyciu profilografometru PGM-1C, po czym ponownie mocowano w ramionach wirnika, zachowując pierwotne położenie względem strugi wody.

Elektrochemiczne pomiary stałoprądowe służące do oceny odporności korozyjnej przeprowadzono w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej metodami obejmującymi pomiar potencjału obwodu otwartego E_o i zarejestrowanie zależności $I = f(E)$ podczas badań polaryzacyjnych w trójelektrodowym układzie pomiarowym. Zautomatyzowany

układ składał się z naczynka pomiarowego, potencjostatu ATLAS 0531 ELEKTROCHEMICAL UNIT&IMPEDANCE ANALYSER oraz sterownika komputerowego. Elektroda pomocnicza wykonana była ze stali austenitycznej, natomiast jako elektrodę odniesienia zastosowano nasyconą elektrodę Ag/AgCl. Próbki do badań elektrochemicznych były szlifowane, a następnie polerowane bezpośrednio przed pomiarem. Powierzchnia elektrody badanej (próbki) wynosiła $0,785 \text{ cm}^2$. Przed rozpoczęciem pomiaru próbki przebywały przez 30 minut w roztworze korozyjnym celem stabilizacji, po czym poddawane były polaryzacji w kierunku anodowym z szybkością $dE/dt = 1 \text{ mV/s}$. Jako roztwór korozyjny zastosowano 5% roztwór NaCl o wartości $\text{pH} = 7.5$. Wartość początkową potencjału badań potencjodynamicznych wyznaczono w oparciu o wartość E_o , przyjmując wartość o około 200 mV niższą. Wartości prądu korozji I_{corr} , potencjału korozji E_{corr} oraz oporu polaryzacji R_p wyznaczono metodą Sterna. Zużycie korozyjne wyznaczono według następującego wzoru $V_p = (M/z \cdot F \cdot \rho) \cdot I_{\text{corr}}$ [mm/rok], gdzie: M – masa molowa metalu, z – liczba elektronów uczestnicząca w reakcji elektrodowej, F – stała Faradaya, ρ – gęstość metalu. Zastosowanie następujących danych dla aluminium: $M = 27 \text{ g/mol}$, $z = 3$ dla reakcji $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$, $F = 96484,33 \text{ C/mol}$, $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$ pozwoliło na wyznaczenie współczynnika przeliczeniowego: $V_p = 0,01089 \cdot I_{\text{corr}}$ [mm/rok].

BADANIA WŁASNE

Badania tribologiczne

W pracy przeprowadzono ocenę zużycia ściernego badanych stopów, wywołanego przez luźne i suche cząstki ceramiki korundowej. Wskaźniki odporności na ścieranie K_b uzyskane jako średnia z czterech pomiarów dla każdego z badanych stopów aluminium zestawiono w **Tabeli 2**. Jako materiał wzorcowy przyjęto stop AW 5754. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że pomimo wyższej wartości twardości, oba badane stopy wykazują niższą wartość współczynnika K_b w porównaniu ze stopem wzorcowym AW 5754. Najprawdopodobniej niska wartość twardości stopu AW 5754 przyczynia się do niszczenia powierzchni stopu, w którym dominującym mechanizmem jest bruzdowanie bez ubytku masowego. Dopiero w konsekwencji wystąpienia procesów zmęczeniowych następuje odrywanie nierówności i ubytek masowy. Drugim mechanizmem wyjaśniającym ten fakt może być również mikrostruktura materiału wzorca. Stopy serii 5000 należą do stopów, w których głównymi mechanizmami umacniającymi jest umocnienie roztworowe oraz odkształceniowe. Powoduje to powstanie struktury stosunkowo jednorodnej, bez obecności twardych faz międzymetalicznych, obecnych w pozostałych stopach. Jednocześnie wyższa twardość pozostałych stopów (AW 2017A oraz 7075) i występowanie drobnodispersyjnych twardych cząstek rozproszonych w mikrostruk-

turze związanych z ich umocnieniem wydzieleniowym może powodować, że dominującym mechanizmem ich zużycia tribologicznego jest mikroskrawanie, przyczyniające się do ich wyższego ubytku masowego. Jednocześnie przedostawanie się wykruszonych w tym procesie twardych faz w obszar tarcia może dodatkowo przyspieszać ubytek powstały na powierzchni materiału. Poznanie dokładnego mechanizmu zużycia poszczególnych stopów wymaga rozszerzenia zakresu prowadzonych badań.

Tabela 2. Współczynnik odporności na ścieranie K_b , wyznaczony względem stopu wzorcowego AW 5754 wraz z wartością twardości badanych stopów

Table 2. Coefficient of abrasive wear resistance K_b , determined relatively to standard alloy AW 5754 with hardness of tested alloys

Właściwość	Badany stop		
	AW 2017A	AW 5754	AW 7075
Wskaźnik K_b	0,813	1,000	0,867
Twardość HV5	115±7	69±2	166±2

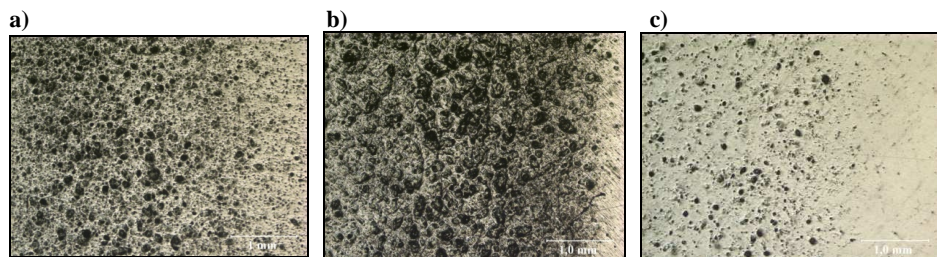
Badania kawitacyjne

Kawitacja zachodzi w urządzeniach, w których występują zmiany ciśnienia przepływającej cieczy, prowadzące do tworzenia się w sposób gwałtowny obszarów (pęcherzy) wypełnionych parą lub gazem. Najczęściej kojarzone jest ze zużyciem śrub statków, okrętów czy motorówek. Jednak zjawisko to występuje również w turbinach wodnych czy pompach wirowych. Zachodzi również tam, gdzie występuje drganie metalu w cieczy. Takie drgania powstają m.in. w chłodzonych bezpośrednio cieczą chłodzącą elementach korpusu i cylindrów silnika podczas jego pracy, prowadząc do powstawania na ich powierzchniach zewnętrznych wżerów kawitacyjnych. Pojawia się również w przypadku gwałtownej zmiany przekroju kanału, przez który przepływa ciecz. Mechaniczne oddziaływanie ośrodka ciekłego na materiał metalowy uzależnione jest od charakteru ruchu cieczy w stosunku do analizowanego ciała stałego [L.1]. W przypadku przepływu burzliwej cieczy, zawierającej drobne cząstki stałe, mamy do czynienia ze zużyciem erozyjno-kawitacyjnym, zjawiskiem o dużo większym natężeniu niszczącym niż erozja kawitacyjna [L.1].

Na **Rysunkach 2 i 3** pokazano powierzchnię badanych próbek po 1 minucie działania na jego powierzchnię oddziaływania kawitacyjnego. Na początkowym etapie erozji kawitacyjnej dla wszystkich badanych materiałów obserwowano odkształcenie plastyczne powierzchni. Pierwsze ubytki materiału na powierzchni badanej próbki stopu AW 2017A obserwowano po 30 minutach erozji kawitacyjnej (**Rys. 2,3a**). W przypadku stopu AW 5754 ubytki materiału pojawiły się po około 20 minutach erozji, które szybko prowadziły do powsta-

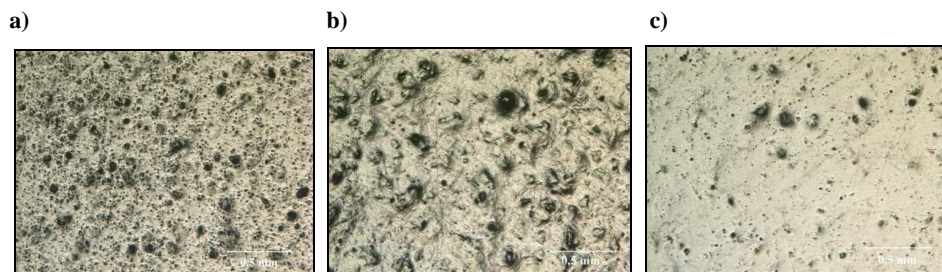
wania głębokich i rozległych kraterów. Głębokość powstałych kraterów dochodziła do 2 mm (**Rys. 2, 3b**). Na powierzchni stopu AW 7075 po 30 minutach erozji kawitacyjnej obserwowano pojedyncze ubytki materiału (**Rys. 2, 3c**).

Występująca w okresie inkubacji deformacja plastyczna wyraźnie uzależniona jest od twardości stopu. Największej deformacji plastycznej w okresie inkubacji ulegał stop AW 5754 o najniższej twardości. Podobne spostrzeżenia dotyczą wykresów utraty masy i zmiany chropowatości powierzchni z czasem (**Rys. 4**). Stop AW 5754 ulegał najszybszemu niszczeniu z czasem, zdecydowanie odbiegając w tym zakresie od pozostałych badanych stopów. Stopy AW 2017A i AW 7075 wykazywały zbliżoną utratę masy w czasie. Stop AW 7075 charakteryzował się mniejszą w porównaniu ze stopem AW 2017A zmianą chropowatości powierzchni z czasem, co należy wiązać z wyższą twardością umocnionej wydzieleniowo struktury.



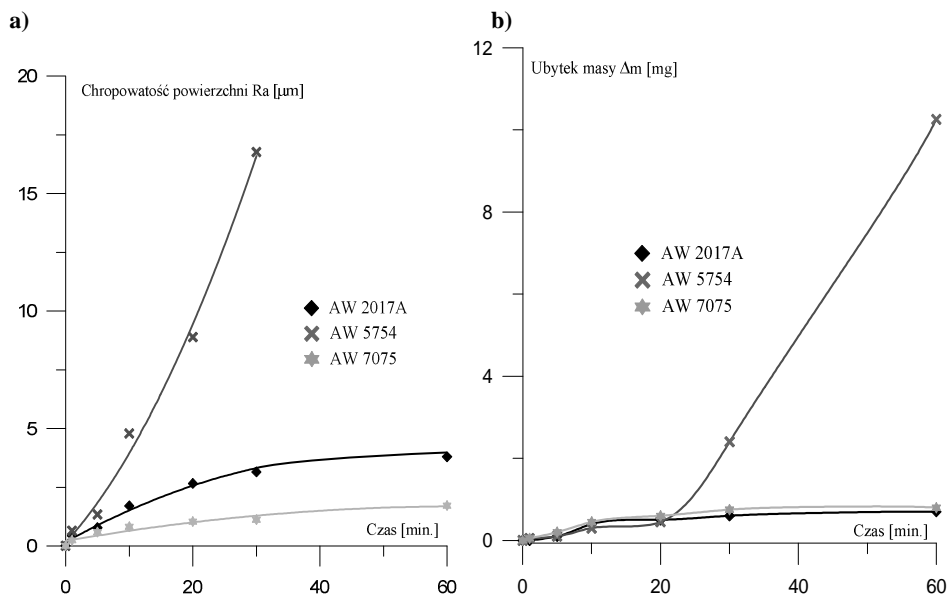
Rys. 2. Powierzchnia próbek po 1 minucie badań kawitacyjnych: a) stop AW 2017A, b) stop AW 5754, c) stop AW 7075

Fig. 2. Samples surface after 1 minute of cavitation tests: a) alloy AW 2017A, b) alloy AW 5754, c) alloy AW 7075



Rys. 3. Powierzchnia próbek po 1 minucie badań kawitacyjnych. Powiększony fragment obszaru z rysunku: a) stop AW 2017A, b) stop AW 5754, c) stop AW 7075

Fig. 3. Samples surface after 1 minute of cavitation tests. Enlarged fragment of picture: a) alloy AW 2017A, b) alloy AW 5754, c) alloy AW 7075



Rys. 4. Krzywe przedstawiające zmiany: a) chropowości powierzchni, b) ubytku masy próbek stopów aluminium: AW 2017A, AW 5754, AW 7075

Fig. 4. Curves of modifications: a) surface roughness, b) mass decrement samples of aluminum alloys: AW 2017A, AW 5754, AW 7075

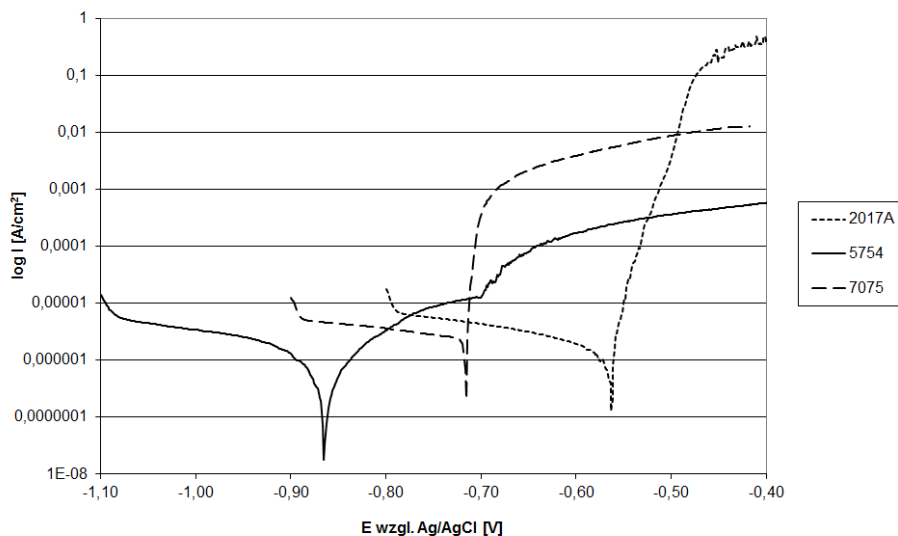
Badania elektrochemiczne

Korozja jest procesem niszczenia materiałów w wyniku reakcji chemicznej i elektrochemicznej przebiegających na granicy zetknięcia materiału metalicznego z otaczającym je środowiskiem. Fizykochemiczne oddziaływania ośrodka ciekłego na materiał metalowy może mieć charakter typowo korozyjny lub nosić cechy degradacji wodorowej [L. 1]. W pracy [L. 2] wykazano, że w przypadku zużycia tribologicznego materiału w środowisku agresywnym całkowity ubytek materiału różni się od wartości uzyskanej przez zsumowanie zużycia tarcowego zmierzonego w warunkach bez udziału korozji i zużycia korozyjnego obserwowanego przy braku tarcia. Na mechanizm zużycia wpływ ma również zdolność materiału do pasywacji.

Analizowane krzywe polaryzacyjne wskazują, że w badanym roztworze zawierającym jony chlorków stopy aluminium nie ulegają pasywacji. Obserwacje te dotyczą wszystkich trzech badanych stopów. Najwyższą wartość oporu polaryzacji R_p odpowiadającą za szybkość korozji wykazywał stop AW 5754. Charakteryzował się on również najmniejszymi zmianami wartości prądu korozji ze zmianą potencjału w zakresie anodowym. W zakresie katodowym krzywych polaryzacyjnych wszystkie badane stopy wykazywały zbliżony przebieg i wartości prądów (Rys. 5, Tabela 3).

Stop AW 2017A wykazuje pośrednią wartość oporu polaryzacji R_p w grupie badanych stopów. Mimo niskiej wartości zużycia V_p , wynikającego z niskiej wartości prądu korozyjnego przy potencjale korozyjnym, stop ten wykazuje bardzo niekorzystny przebieg w zakresie krzywych anodowych. Przejawia się to gwałtownym wzrostem gęstości prądu wraz z potencjałem. Ponadto w pracy [L. 9] wykazano bardzo silny wpływ mikrostruktury na odporność na korozję elektrochemiczną tych stopów, w szczególności jej skłonności do korozji międzykrystalicznej.

Najgorszą odporność na korozję elektrochemiczną wykazuje stop z cynkiem AW 7075. Przejawiało się to najwyższą wartością oporu polaryzacji R_p oraz zużycia korozyjnego V_p . W pracy [L.7] wykazano, że rozrost faz umacniających ten stop wydzieleniowo prowadzi do kolejnego pogorszenia jego odporności na korozję.



Rys. 5. Przykładowe krzywe potencjodynamiczne uzyskane dla badanych stopów

Fig. 5. Examples of potential-dynamic curves for tested alloys

Tabela 3. Średnie parametry elektrochemiczne uzyskane dla badanych stopów

Table 3. Average electrochemical parameters for tested alloys

PARAMETR	E_o ($I=0$) [mV]	E_{corr} [mV]	I_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	R_p [$\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$]	V_p [$\mu\text{m}/\text{rok}$]
AW 2017A	-589	-569	0,95	7,12	10,35
AW 5754	-907	-851	4,75	24,22	51,73
AW 7075	-723	-718	7,49	1,08	81,57

WNIOSKI

W przypadku stopów aluminium zużycie kawitacyjne uzależnione jest wyraźnie od twardości badanych stopów. Stopy z grupy umacnianych wydzieleniowo, a tym samym o wyższej twardości, wykazywały mniejsze zniszczenia po 5 minutach oddziaływania strugi wody na ich powierzchnię, co przedstawiają krzywe erozyjne (**Rys. 6b**). Stop AW 5754 po 10 minutach oddziaływań kawitacyjnych ulega przyspieszonemu niszczeniu, wyraźnie wzrasta chropowatość powierzchni w porównaniu ze stopami umacnianymi wydzieleniowo (AW 2017A i AW 7075).

Odmienne zachowanie obserwowano w przypadku zużycia ściernego stopów. Stwierdzono, że pomimo wyższej wartości twardości stopy AW 2017A oraz AW 7075 wykazują niższą odporność na zużycie tribologiczne w porównaniu ze stopem wzorcowym AW 5754. Niska wartość twardości charakteryzująca stop AW 5754 prowadzi najprawdopodobniej do niszczenia powierzchni materiału, w którym dominującym mechanizmem jest bruzdowanie bez ubytku masowego. Skłonność do ulegania znacznemu odkształceniu plastycznemu powierzchni dla tego stopu potwierdzają również zrealizowane badania kawitacyjne. Prawdopodobnie dopiero w momencie wystąpienia mechanizmów zmęczenia następuje odrywanie nierówności i powstanie ubytku masowego. Drugim mechanizmem wpływającym na to zjawisko jest prawdopodobnie również mikrostruktura materiału wzorca, charakteryzująca się jednorodnością i brakiem twardych faz międzymetalicznych, występujących w pozostałych stopach. Wyższa twardość pozostałych stopów (AW 2017A oraz 7075), związana z obecnością drobnodispersyjnych twardych cząstek rozproszonych w mikrostrukturze może powodować, że dominującym mechanizmem ich zużycia tribologicznego staje się mikroskrwanie, przyczyniające się do ich wyższego ubytku masowego. Jednocześnie przedostawanie się wykruszonych w procesie zużycia tribologicznego tych twardych faz w obszar tarcia może dodatkowo przyspieszać ubytki na powierzchni materiału. Poznanie dokładnego mechanizmu zużycia poszczególnych stopów wymaga jednak rozszerzenia zakresu prowadzonych badań przewidzianego na dalszym ich etapie.

Badania elektrochemiczne wykazały, że najkorzystniejsze właściwości elektrochemiczne wykazuje stop AW 5754, natomiast najgorsze – stop AW 7075. Stop AW 2017A charakteryzują co prawda stosunkowo korzystne parametry elektrochemiczne w okolicach potencjałów korozyjnego, jednak gwałtowny wzrost krzywych anodowych świadczy o tym, że niszczenie korozyjne będzie następowało dynamicznie w przypadku wysokiej wartości nad napięć. Ponadto stopy serii 2000 wykazują dużą tendencję do występowania korozji międzykrystalicznej [**L. 9**]. Towarzysząca temu utrata spójności pomiędzy ziarnami prawdopodobnie w znacznym stopniu przyczyni się do ubytków w powierzchni materiału w sytuacji współdziałania oddziaływań mechanicznych.

LITERATURA

1. Chmiel J., Górnicki K.: Zjawiska zużycia w transporcie ładunków płynnych, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, Vol. 77, No. 5, 2005 (in Polish), pp. 193–202.
2. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Weryfikacja modelu obliczeniowego dla używania korozyjno-mechanicznego, *Eksploatacja i Niezawodność*, No. 4, 2009 (in Polish), pp. 28–36.
3. Tyczewski P.: Złożone warunki zużycia mechaniczno-ściernego-korozyjnego występujące w cukrowniach, *MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, No. 11c, 2009, (in Polish), pp. 191–198.
4. Tyczewski P.: Analiza zużycia mechaniczno-ściernego-korozyjnego występującego w cukrowniach, *Inżynieria Rolnicza*, Vol. 93, No. 5, 2007, (in Polish), pp. 409–414.
5. Elleuch K., Mezlini S., Guermazi N., Kapsa Ph.: Abrasive wear of aluminium alloys rubbed against sand, *Wear*, Vol. 261, No. 11–12, 2006, pp. 1316–1321.
6. Zum Gahr K.-H.: Wear by hard particles, *Tribology International*, Vol. 31, No. 10, 1998, pp. 587–596.
7. Podrez-Radziszewska M., Haimann K.: Badania porównawcze odporności na korozję elektrochemiczną wybranych stopów aluminium z serii 2xxx, 5xxx i 7xxx, *Ochrona przed korozją*, No. 7, 2011 (in Polish), pp. 440–443.
8. Jasionowski R., Podrez-Radziszewska M., Zasada D.: Cavitation erosion resistance of the chosen aluminium alloys, *Manufacturing Technology*, Vol. 11, No. 11, 2011, pp. 22–28.
9. Kuźnicka B., Podrez-Radziszewska M.: Correlation between microstructural evolution in heat affected zone and corrosion behaviour of Al-Cu alloy, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 53, No. 3, 2008, pp. 933–938.

Summary

Complex tribological processes in publications are considered as the sum of basic processes and reciprocal interactions. This produces problems with the analyses of results, because each occurring process must be analysed separately. The aim of the presented article was the estimation of wear processes, including tribological, cavitation and corrosional. Wear processes were investigated by comparing the microstructure of three used aluminium alloys, series 2000, 5000 and 7000, applied in plastic working.

