

ZBIGNIEW GUNIA

Charakterystyki tribologiczne wybranych stopów AL—Si, badanych w warunkach tarcia mieszanego

1. WPROWADZENIE

Spośród wielu tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych na szczególną uwagę zasługują stopy aluminiowe. Zastępowanie nimi elementów stalowych czy żeliwnych pozwala na bardzo znaczne zmniejszenie ich ciężaru własnego oraz, co równie istotne, umożliwia znaczne zwiększenie prędkości roboczych w operacjach obróbczych. Własności fizykochemiczne stopów aluminiowych zostały bardzo dobrze rozpoznane i przebadane w szerokim zakresie. Doskonałe cechy wytrzymałościowe oraz technologiczne (spawalność, lejność, kowalność i skrawalność) predysponują te materiały do wielostronnego zastosowania w technice, w szczególności wszędzie tam, gdzie istotną rolę, przy zachowaniu wysokich własności wytrzymałościowych, odgrywa zmniejszenie ciężaru urządzenia, oraz gdzie chodzi o wydajne obniżenie sił masowych ruchomych elementów urządzenia. Nie bez znaczenia jest tutaj również stosunkowo duża odporność na korozję i wysoką temperaturę niektórych ze znanych stopów aluminiowych, co dodatkowo jeszcze rozszerza zakres stosowalności ich jako materiałów konstrukcyjnych. Trudno sobie wyobrazić tak wszechstronny rozwój przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego bez użycia materia-

łów glinopochodnych o znakomitych, a przy tym różnorodnych własnościach użytkowych.

W świetle tego, wydaje się rzeczą dość zaskakującą wyraźny brak w dostępnej literaturze informacji, dotyczących własności tribologicznych wzajemnych skojarzeń ślizgowych stopów aluminiowych. Oczywiście badania tarcia i zużycia elementów, wykonanych z takich stopów, prowadzone są od dawna - znane jest powszechne wykorzystywanie tych materiałów na tłoki silników spalinowych, sprzężarek, panewki specjalnych łożysk ślizgowych itd. - niemniej jednak zawsze w skojarzeniach z innymi metalami (najczęściej stalami i żeliwami) lub tworzywami sztucznymi (ostatnio poliamidami i policzterofluoroetylenem). Dodać tu należy, iż własności tarciovo-zużyciowe niektórych odlewanych lub prasowanych stopów aluminiowych, pracujących w skojarzeniach ślizgowych ze stalami czy żeliwami, są bardzo korzystne i wręcz niezastąpione. Fakt braku zainteresowania wzajemnymi skojarzeniami trącymi stopów aluminiowych należy chyba tłumaczyć powszechnym przekonaniem, że skojarzenia takie (stosunkowo miękkie materiały jednoimienne) wykazują z gruntu złe cechy tribologiczne ze znaczną tendencją do zacierania się, szczególnie w warunkach pracy w podwyższonych temperaturach. Nieliczne informacje na temat badań tego typu dotarły przed kilku laty ze Stanów Zjednoczonych i Francji, jednakże, z uwagi na chronione ścisłą tajemnicą prace badawcze przemysłu motoryzacyjnego tych krajów, dokładniejsze wiadomości o wynikach prób nie zostały opublikowane (chodzi o firmy samochodowe "Chevrolet" i "Citroen").

W Polsce pierwsze kroki na polu badań tribologicznych wzajemnych skojarzeń ślizgowych stopów aluminiowych podjęte zostały w 1980 r. w IPBM w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pozytywne wyniki eksperymentów wstępnych zachęciły do przeprowadzenia dalszych badań podstawowych, które pozwoliły na wytypowanie kilku stopów aluminiowych, odzna-

czających się doskonałymi własnościami tribologicznymi we wzajemnych skojarzeniach ślizgowych.

Niniejsze opracowanie, stanowiące uwieńczenie pewnego etapu badań podstawowych, zawiera wyniki tych badań, ujęte graficznie w postaci charakterystyk tribologicznych zależności współczynnika tarcia μ oraz względnego zużycia masowego Z_m od nacisku jednostkowego p , prędkości ślizgania v oraz temperatury próbki T , jako zmiennych parametrów sterowanych badań.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

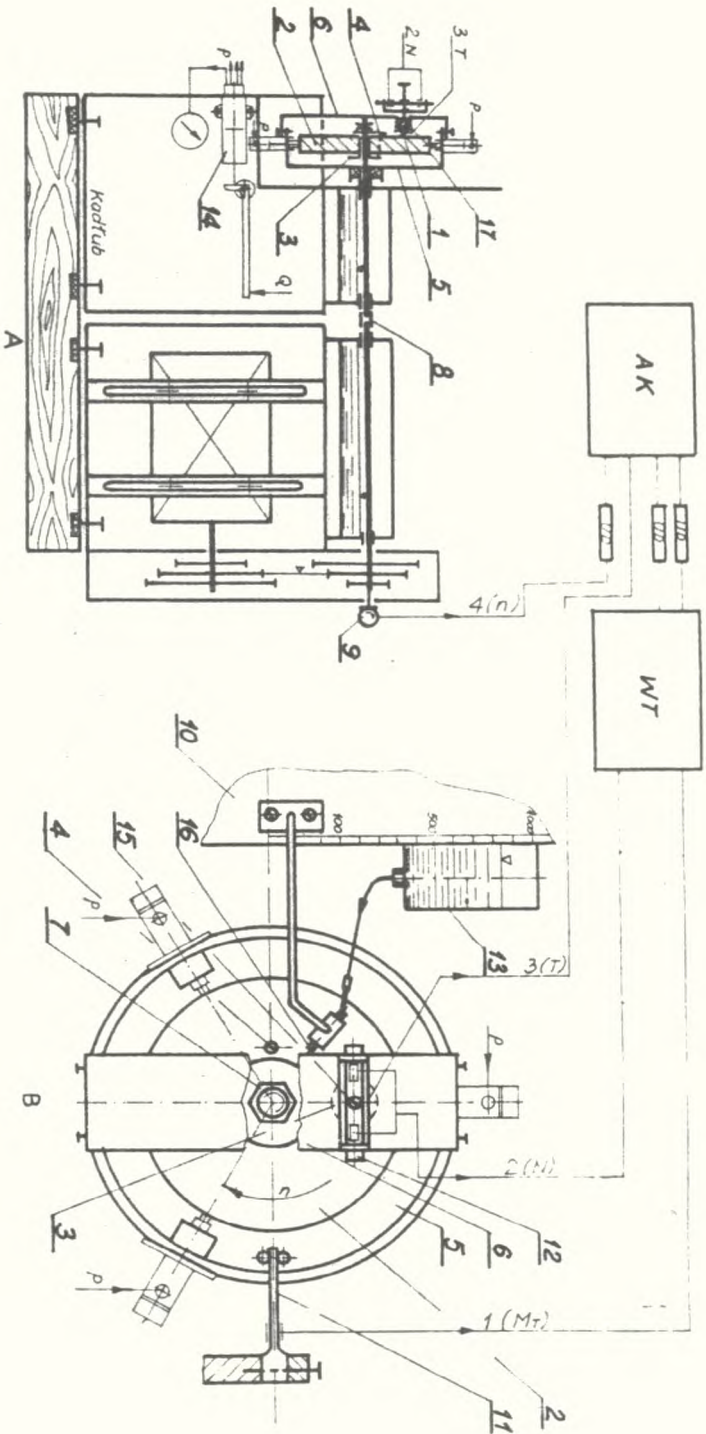
2.1. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na uniwersalnym stanowisku tribologicznym, skonstruowanym i zbudowanym w CBA Kraków, przy współpracy z IPBM AGH, (rys. 1 A). Stanowisko składa się z czterech zasadniczych zespołów:

- głowicy badawczo-pomiarowej;
- zespołu napędowego;
- dwóch niezależnie zawieszonych korpusów;
- oraz układu smarowania.

Głowica badawcza (rys. 1 B), zaprojektowana i wykonana według oryginalnej własnej koncepcji, pozwala na bardzo prostą adaptację stanowiska do wielostronnych badań w założonych warunkach i przy określonych parametrach pracy w układzie trącym typu tarcza-kołek. Dzięki zastosowaniu dwóch niezależnych systemów realizacji nacisku próbki na przeciwpróbkę w postaci tensometrycznej belki sprężynowej i układu hydraulicznego, istnieje możliwość zadawania sił nacisku w bardzo szerokim zakresie.

Regulację temperatury próbki (a pośrednio i przeciwpróbki) umożliwia specjalna spirala grzejna, umiejscowiona w ruchomym uchwycie próbki i włączona w obwód elektryczny wraz



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska tribologicznego

- 1 - próbka
- 2 - przeciwnpróbka
- 3 - piaśta p-próbki
- 5 - korpus głowicy
- 6 - przystawka czółowa

- 8 - sprzęgło podatne
- 9 - prądniczka tach.
- 10 - kadłub stanowiska
- 11 - belka tensometr. N^+
- 12 - belka tensometr. N^-

- 13 - układ smarowy
- 14 - zespół hydr.
- 15 - łożysko reg. docisk
- 16 - łożysko smarowy
- 17 - spirala grzejna

z termoregulatorem. Zmianę prędkości ślizgania uzyskuje się przez odpowiedni dobór kół pasowych i regulowanej prędkości obrotowej silnika elektrycznego.

Stanowisko wyposażono w układy pomiarowo-regulacyjne, pozwalające na ciągły pomiar i rejestrację przebiegów:

- chwilowej i średniej wartości momentu tarcia M_T ,
- chwilowej i średniej wartości siły nacisku próbki na przeciwpróbkę N,
- temperatury próbki w pobliżu powierzchni tarcia,
- prędkości obrotowej przeciwpróbki.

Pomiar zużycia masowego próbek wykonywano przy pomocy wagi analitycznej, przy czym z uwagi na porównawczy charakter badań, brano pod uwagę względne zużycie masowe, jako:

$$Z_m = \frac{Z_o - Z_k}{Z_o} 100\% \quad (1)$$

gdzie: Z_o - masa początkowa próbki,

Z_k - masa końcowa próbki po przeprowadzonym doświadczeniu.

Odpowiednio zaprojektowany układ smarowania (ciągłe namazywanie przykryciem smarnym warstewki oleju na powierzchnię tarcia) zapewnia stworzenie i utrzymanie warunków tarcia mieszanego

2.2. Parametry badań

Wartości parametrów badań przyjęto w oparciu o wielostronną analizę warunków pracy typowych urządzeń technicznych, ze szczególnym uwzględnieniem silników spalinowych i sprężarek tłokowych. Przyjęte wartości mieszczą się zatem w realnym zakresie, w całym szerokim obszarze badań.

- droga tarcia $s = 100$ km (przyjmując taką drogę tarcia kierowano się przede wszystkim koniecznym okresem stabilizacji warunków badań oraz mierzalnym zużyciem masowym),

- prędkość ślizgania $v = 5 - 15$ m/s,
- nacisk jednostkowy próbki na p-próbkę $p = 0,2 - 0,8$ Mpa,
- temperatura w pobliżu powierzchni tarcia, mierzona w próbce $T = 323 - 523$ K.

Dla tak przyjętych parametrów wejściowych ustalono parametry wynikowe w postaci:

- średniego współczynnika tarcia, wynikającego bezpośrednio z momentu tarcia M_T ,
- względnego zużycia masowego Z_m .

Pomiar tych parametrów pozwala na sporządzenie charakterystyk tribologicznych w ich najogólniejszej postaci, tzn.

$\mu = f(p, v, T)$, oraz $Z_m = f(p, v, T)$.

Jako parametry zmienne sterowane przyjęto:

- nacisk jednostkowy p ,
- prędkość ślizgania v ,
- temperaturę próbki T ,

natomiast ustalone zostały na odpowiednim poziomie:

- droga tarcia s (jw.),
- chropowatość powierzchni trących partnerów ($R_a = 0,32 \mu\text{m}$),
- warunki smarowania (namazywanie filmu smarnego przy zastosowaniu oleju Selectol Specjal SAE 40W o wydatku równym 2 krople/min.).

2.3. Badane materiały

W wyniku przeprowadzonych wcześniej badań pilotażowych i kwalifikacyjnych przy zastosowaniu kilkunastu różnych stopów aluminiowych wytypowano ostatecznie skojarzenie dwóch stopów opartych na bazie Al-Si, których własności zużyciowocierne okazały się najkorzystniejsze, porównywalne w warunkach pracy stanowiska badawczego z własnościami skojarzenia silumin AK 12 - silchrom (0,5% Cr, 0,7% Fe), stosowanego m.in. w układach trących typu tłok - tuleja cylindrowa.

Skład chemiczny wybranych stopów siluminowych, oznaczonych umownie AK 3 i KA 10, przedstawiono w tabeli 1, natomiast warunki obróbki cieplnej, dającej optymalne własności mechaniczne tych stopów, podano w tabeli 2.

Cylindryczne próbki wykonane z eutektycznego stopu AK 3 oraz przeciwpróbki z nadeutektycznego KA 10 w postaci krążków, wykonane zostały w warunkach laboratoryjnych w IMN (Oddział Metali Lekkich w Skawinie) jako modyfikowane odlewy o odpowiednim składzie i własnościach. Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż skład chemiczny obu wytypowanych do badań siluminów zbliżony jest do składu dwóch produkowanych na zachodzie stopów tłokowych, stosowanych w większości samochodów firm zachodnioniemieckich (tabela 3 - chodzi tu o stopy o nazwie Mahle 124 oraz KS 292).

Tabela 1

Skład chemiczny badanych stopów AL-SI

Oznaczenie materiału	Skład chemiczny w %					
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Sr
AK 3	12,6	1,45	1,52	1,17	0,41	0,02
KA 10	23	1,1	1,0	1,0	0,7	0,15

Tabela 2

Warunki i parametry obróbki cieplnej badanych stopów

Oznaczenie materiału	Przesycanie		Chłodzenie w wodzie o temp. (K)	Sztuczne starzenie		Re _{0,2} Mpa	HB Mpa
	wyzarzenie (K)	czas (h)		temp. (K)	czas (h)		
AK 3	788	7	323-353	493	10	80-100	700
KA 10	753	8	323-353	493	10	100-150	1200

Tabela 3

Skład chemiczny i niektóre własności fizyczne stopów tłokowych,
produkowanych w Europie zachodniej

Rodzaj stopu	Nazwa stopu	Skład chemiczny w %						Metody przeróbki	Gęstość G/cm ³	Re _{0,2} Mpa
		Cu	Si	Mg	Fe	Mn	Ni			
Al-Si	Mahle 124	1,2	12	1	0,7	0,2	1	0, P	2,75	80-100
	Nöral 1761	1,0	17	1	0,8	0,5	3,4	0, P	2,73	80-100
	KS 282	1,1	25	1	0,7	0,2	1	0	2,70	80-100
Al-Cu	SAE 300	7	5,5	0,3	0,6	0,4	0,2	0	2,86	100-160
	LAC 10	9,5	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2	0	2,93	100-160
Al-Cu-Ni-Mg	Y	4	0,3	1,5	0,3	0,2	2,0	0, P	2,82	200-250
	RR 53	2,2	1,6	1,5	1,1	-	1,2	0	2,80	200-250
	RR 58	2,2	0,1	1,5	1,0	-	1,2	P	2,80	200-250

3. PLAN BADAŃ

Zastosowano matematyczny model badanego procesu w postaci wielomianu 2 stopnia. Przyjęto plan statyczny, zdeterminowany, wieloczynnikowy, ortogonalny, umożliwiający przeprowadzenie badań eksperymentalnych w 15 cyklach doświadczeń.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

4.1. Interpretacja statystyczna

Po stwierdzeniu adekwatności funkcji regresji do badanego procesu na poziomie istotności $\alpha = 0,10$ w całym przyjętym zakresie parametrów p, v, T , obliczono wielomiany 2 stopnia, opisujące zależności $\mu(p, v, T)$ oraz $Z_m(p, v, T)$ w postaci:

$$\mu(p, v, T) = 0,1246 - 0,1300 \left(\frac{T - 432}{355} \right) - 0,0696 \left(\frac{v - 10}{4} \right)^2 \quad (2)$$

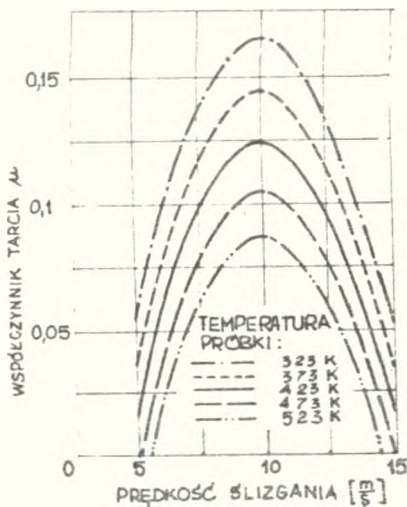
$$\begin{aligned} Z_m(p, v, T) = & 0,555 - 0,630 \left(\frac{T - 423}{355} \right) + 0,801 \left(\frac{T - 423}{355} \right)^2 + \\ & - 0,673 \left(\frac{p - 0,5}{0,25} \right) \left(\frac{v - 10}{4} \right) - 0,525 \left(\frac{p - 0,5}{0,25} \right) \\ & \left(\frac{T - 423}{355} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Zmianę wartości μ oraz Z_m w odniesieniu do zmian parametrów p, v, T przedstawiają wykresy (rys. 2, 3, 4 i 5), które są graficznym rozwiązaniem powyższych wzorów.

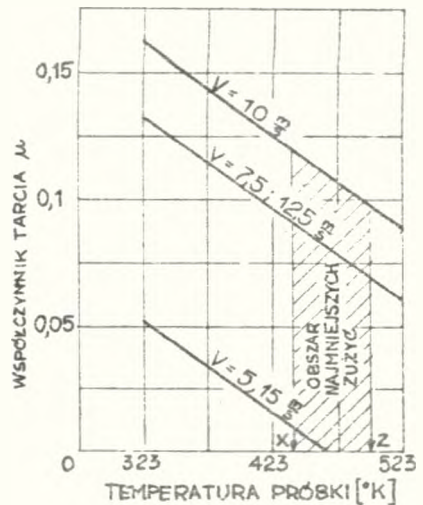
4.2. Omówienie wyników badań - interpretacja fizyczna

Przebieg charakterystyki $\mu = f(v)$, pokazany na rys. 2, wykazuje, że wartość średniego współczynnika tarcia osiąga maksimum dla średniej, przyjętej prędkości ślizgania, tzn. $v = 10 \text{ m/s}$, i następnie parabolicznie maleje w kierunku mniejszej i większej prędkości. Tłumaczyć to należy pojawianiem się drgań samowzbudnych w przypadku obu skrajnych wartości v , które to drgania, co jest powszechnie stwierdzone, obniżają opory ruchu. Drgania samowzbudne notowano w trakcie badań dla wszystkich wartości nacisków. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż wielkość nacisku jednostkowego próbki na przeciwpróbkę nie ma istotnego wpływu na przebieg zmian funkcji $\mu(p, v, T)$, co wynika z (2).

Charakterystyka $\mu = f(T)$, przedstawiona na rys. 3, odzwierciedla dodatni wpływ wzrostu temperatury na wartość współczynnika tarcia, powodując jej wyraźne obniżenie się.



Rys. 2. Charakterystyki $\mu(v)$ przy ustalonych wartościach temperatury próbki T



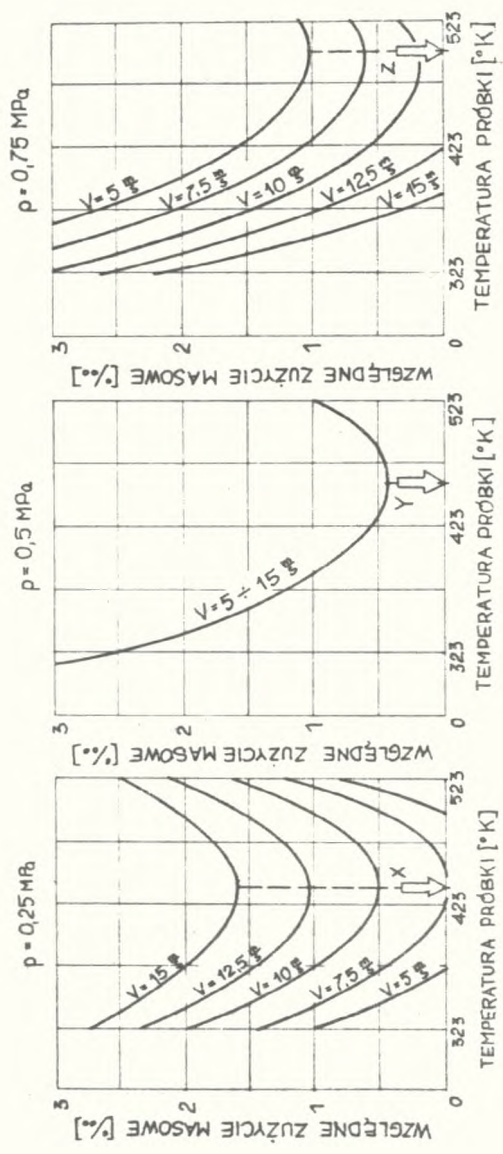
Rys. 3. Charakterystyki $\mu(T)$ przy ustalonych wartościach prędkości ślizgania v

Można to wyjaśnić polepszającymi się, wraz ze wzrostem temperatury, własnościami smarnymi stosowanego oleju, przy czym należy w tym miejscu zaznaczyć, że olej uzyskiwał temperaturę równą średniej temperaturze przeciwpróbki, tzn. odpowiednio w granicach ok. 300 - 360 K dla całego zakresu stosowanych temperatur próbki. Na rys. 4 przedstawione są charakterystyki $Z_m(T)$ dla 3 przyjętych wartości nacisku jednostkowego p . Jak widać, zużycie maleje wraz ze wzrostem temperatury do pewnej wartości minimalnej, różnej dla poszczególnych nacisków i po jej przekroczeniu ponownie wzrasta. Tłumaczyć to należy, jak się wydaje, z jednej strony zmieniającymi się warunkami smarowania, z drugiej zaś negatywnym oddziaływaniem drgań samowzbudnych i przyspieszonego procesu utleniania, szczególnie w wysokich temperaturach. Zauważyć można również, iż w przypadku zastosowania większych nacisków maleje negatywny wpływ wysokiej temperatury pracy na wartość zużycia masowego.

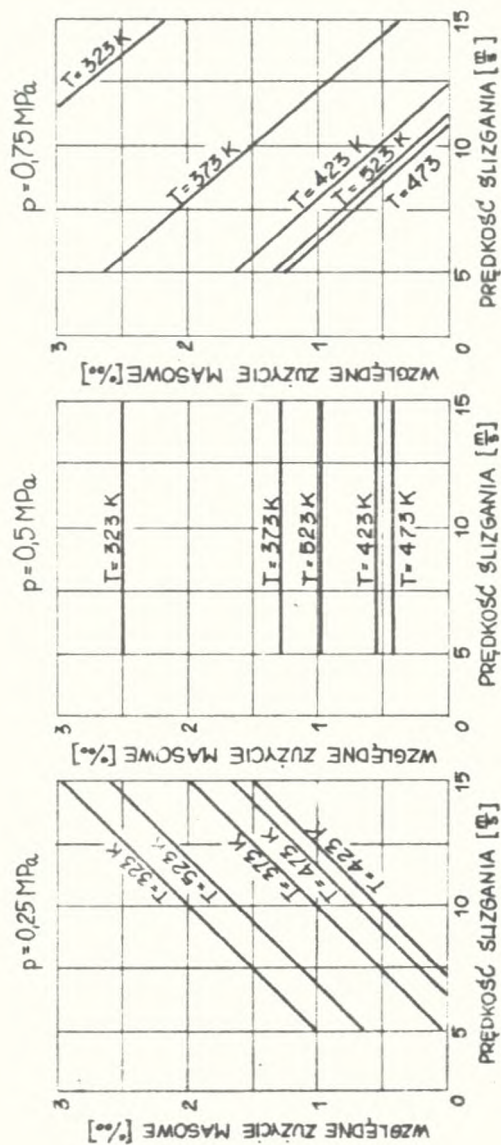
Bardzo interesujące jest tutaj jeszcze jedno zjawisko, a mianowicie wyraźne przesunięcie się minimum charakterystyk zużyciowych, wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego, w kierunku wyższej temperatury. I tak dla $p = 0,25$ Mpa minimum Z_m odpowiada temperatura $T = 438$ K, oznaczona na wykresie umownie literą X, natomiast w przypadku $p = 0,75$ Mpa Z_m osiąga swe minimum w temperaturze $T = 498$ K (na wykresie temperatura Z).

Należy sądzić, że jest to efekt wzrostu przewodności cieplnej styku tarcowego. Wiąże się z tym zwiększone odrowadzanie ciepła do otoczenia poprzez wirującą przeciwpróbkę, oczywiście przy założeniu, że minimum zużycia odpowiada określona wartość temperatury na powierzchni tarcia.

Wpływ prędkości ślizgania na zużycie Z_m (rys. 5) przy niskich wartościach nacisków p jest oczywisty - zużycie rośnie wraz z prędkością. W przypadku nacisku średniego $p = 0,5$ Mpa prędkość nie wpływa na intensywność zużycia, przy czym zwraca

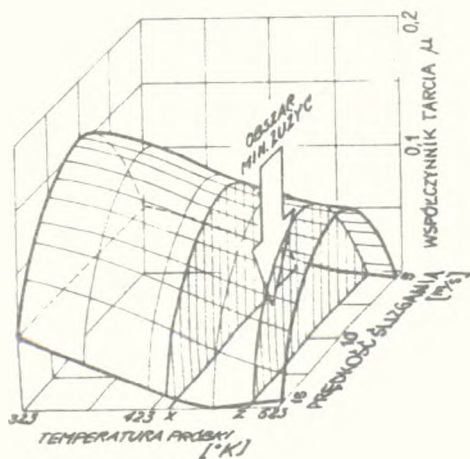


Rys. 4. Charakterystyki $Z_m(T)$ przy ustalonych wartościach prędkości ślizgania dla 3 nacisków

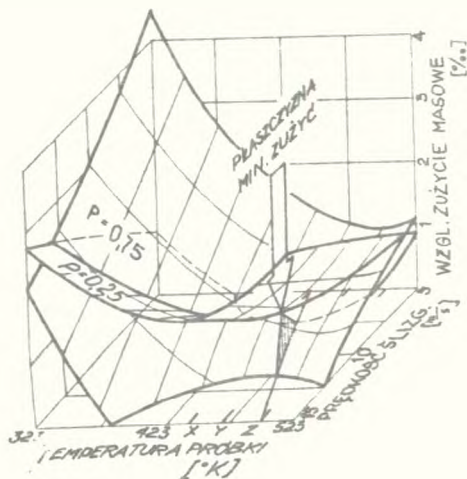


Rys. 5. Charakterystyki $Z_m(v)$ przy ustalonych wartościach temperatury próbki T dla 3 przyjętych wartości nacisku p

ca uwagę fakt, iż dla średniej prędkości $v = 10$ m/s następuje nieznaczny spadek zużycia w stosunku do zużycia przy $p = 0,25$ Mpa, ale jedynie w odniesieniu do temperatur pracy większych od 423 K. Zwiększenie nacisku do $p = 0,75$ Mpa powoduje w przypadku prędkości $v \gg 10$ m/s dalsze obniżenie intensywności zużycia dla temperatur powyżej 423 K. Ciekawym zjawiskiem jest tutaj wyraźny spadek wartości zużycia wraz ze wzrostem prędkości. Wyjaśnić to można chyba jedynie założeniem, że przy zwiększonym nacisku i dużej prędkości ślizgania powstają na powierzchni tarcia stanowiska tribologicznego bardzo korzystne warunki smarowania i, być może, tarcie z mieszanego przechodzi w quasispłynne. Na wykresie przestrzennym, rys. 6 przedstawiającym graficznie zależność $Z_m(v,T)$ dla 2 skrajnych wartości nacisków jednostkowych, zaznaczono linię łączącą punkty X,Y,Z. Płaszczyzna przechodząca przez tę linię, nazwaną "linią optymalnych temperatur", wyznacza na wykresie powierzchnię minimalnych zużyć masowych dla wszystkich, przyjętych w badaniach, parametrów p,v,T .



Rys. 6. Wykres przestrzenny zależności $Z_m(v,T)$ dla 2 przyjętych wartości nacisków p



Rys. 7. Wykres przestrzenny zależności $\mu(v,T)$

Jak łatwo zauważyć, wartość Z_m dla najbardziej niekorzystnej w tym przypadku prędkości $v = 10$ m/s nie przekracza 0,5%. Natomiast w całym obszarze, leżącym pomiędzy temperaturami X i Z (tzn. 438 - 498 K) Z_m osiąga swą maksymalną wartość równą ok. 1,5% dla prędkości $v = 15$ m/s, przy nacisku jednostkowym $p = 0,25$ Mpa. Obszar najmniejszych zużyć masowych, zaznaczony na wykresie przestrzennym, rys. 7, odzwierciedlającym graficznie zależność $\mu(v,T)$, daje możliwość prześledzenia zmian współczynnika tarcia w tym obszarze.

Jak widać, maksymalna wartość μ , przyjęta dla prędkości $v = 10$ m/s w temperaturze X = 438 K wynosi ok. 0,13 i spada, wraz ze wzrostem temperatury do Z = 498 K, do wartości $\mu \cong 0,1$. W przypadku pozostałych prędkości wartość współczynnika tarcia nie przekracza 0,1, co jeszcze wyraźniej widoczne jest na rys. 4 w obszarze zakreskowanym.

5. PODSUMOWANIE

Przytoczone tutaj wyniki badań podstawowych, ujęte w formie pełnych charakterystyk tribologicznych, pozwalają na stwierdzenie, iż skojarzenie cierne typu silumin eutektyczny-silumin nadeutektyczny, przy zachowaniu odpowiedniego składu chemicznego, struktury i własności wytrzymałościowych obu partnerów trących, jest skojarzeniem przydatnym technicznie w warunkach tarcia mieszanego. Szeroki zakres przyjętych parametrów badań eksperymentalnych oraz bardzo korzystne wartości wielkości wynikowych w postaci współczynnika tarcia i względnego zużycia masowego (porównywalne, w warunkach pracy stanowiska doświadczalnego o układzie trącym typu tarczakołek, z analogicznymi wartościami skojarzenia klasycznego silumin-silichrom), dają podstawę do praktycznego wykorzystania tych materiałów w wielu typowych skojarzeniach ślizgowych.

Badania półeksploatacyjne w rzeczywistych warunkach pracy (np. skojarzenia tłok-cylinder silnika spalinowego) winny przynieść ostateczną odpowiedź na pytanie o faktyczną przydatność proponowanej pary trącej silumin-silumin, przy czym, wzięwszy pod uwagę znacznie łagodniejsze warunki tarcia układu tłok-cylinder w porównaniu z układem trącym stanowiska typu tarcza-kołek, należy sądzić, iż odpowiedź ta będzie pozytywna.