ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol.1704

Stanisław WITASZEK, Andrzej POSMYK

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW AlMC W WARUNKACH EKSPLOATACJI SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie. W niniejszym artykule przeprowadzono badania wpływu warunków odpowiadających warunkom pracy grupy tłokowej w silniku spalinowym na współczynnik tarcia oraz zużycie materiału kompozytowego EN AC-42000 + 20%$_m$$Al_2O_3$ i współpracującego z nim żeliwa EN-GJL-350. W celu sprawdzenia przydatności kompozytu EN AC-42000 + 20%$_m$$Al_2O_3$ do wytwarzania tłoków i tulei cylindrowych silników spalinowych wykonano badania tribologiczne na testerze laboratoryjnym w warunkach cieplnych, odpowiadających warunkom pracy grupy tłokowej w silniku spalinowym. Wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że zużycie zarówno kompozytu, jak i żeliwa w temperaturze 160°C, przy większych prędkościach współpracy, jest mniejsze lub zbliżone do zużycia tych materiałów w temperaturze 20°C. Daje to podstawy do założenia, że badany kompozyt będzie dobrze pracował w silniku. Wartość współczynnika tarcia maleje wraz ze wzrostem temperatury i prędkości współpracy, natomiast zwiększa się wraz ze wzrostem nacisków.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AlM-COMPOSITE MATERIALS UNDER COMBUSTION ENGINE'S CONDITIONS

Summary. In this work an influence of the working conditions on friction coefficient and wear of elements of a tribological pair: composite EN AC-42000 + 20%$_m$$Al_2O_3$ – grey cast iron EN-GJL-350 has been researched. These conditions simulate the ones of a piston group in an internal combustion engine. To assess the possibilities of application of the composite material EN AC-42000 + 20%$_m$$Al_2O_3$ for pistons and cylinder liners manufacturing laboratory wear tests have been carried out. Heat conditions of these tests corresponded to the ones of a piston group in an internal combustion engine. The results of the tests indicated that both composite and cast iron wear in the temperature of 160° C and high speed is lower or comparable with the one obtained for the temperature of 20° C. These results encourage authors to assume that investigated composite is suitable for internal combustion engines elements. The friction coefficient value decreases with temperature and velocity increase. It increases with a pressure growth.

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie materiałów kompozytowych na osnowie stopów aluminium w silnikach spalinowych może zmniejszyć zużycie tłoka i tulei cylindrowej oraz poprawić warunki smarowania grupy tłokowej, a tym samym zmniejszyć straty spowodowane tarciem. Następstwem zmniejszenia strat mechanicznych w silniku jest zwiększona jego sprawność i zmniejszone zużycie paliwa. Zmniejszenie zużycia paliwa jest jednym z najważniejszych zagadnień dotyczących współczesnej motoryzacji zarówno ze względów ekologicznych, jak i ekonomicznych. Jak podano w pracy [1], zastosowanie materiałów kompozytowych w obszarze komory spalania, między innymi w postaci wstawek do denka tłoka lub na cały tłok, spowodowało poprawę jej zaizolowania, w wyniku czego zmniejszyła się intensywność odprowadzania ciepła w grupie tłokowej. Sprzyja to pełniejszemu spalaniu paliwa i zmniejszeniu toksyczności spalin.

Z analizy warunków pracy tłoka wynika, że temperatura jego części współpracującej ślizgowo z gładzią tulei cylindrowej dochodzi do około 200° C, w zależności od typu i mocy silnika. Ponieważ właściwości wytrzymałościowe materiałów kompozytowych zmieniają się wraz ze wzrostem temperatury, o czym informują ich producenci [2], istnieje konieczność zbadania właściwości tribologicznych materiałów kompozytowych w warunkach zbliżonych do tych, które panują na powierzchniach ślizgowych tłoka podczas pracy silnika. Dodatkowym argumentem przemawiającym za wykonaniem badań kompozytów w podwyższonych temperaturach jest duża różnica rozszerzalności cieplnej materiałów osnowy (EN AC-42000) i fazy zbrojącej (Al_2O_3), która w temperaturze powyżej 300° C może powodować utratę spójności na granicy osnowa-faza zbrojąca [3, 4].

Uwzględniając wyżej wymienione uwarunkowania w artykule opisano wybrane wyniki badań wpływu warunków pracy grupy tłokowej w silniku spalinowym na współczynnik tarcia oraz zużycie materiału kompozytowego EN AC-42000 + 20%$_m$$Al_2O_3$ i współpracującego z nim żeliwa EN-GJL-350.

2. BADANIA WŁASNE

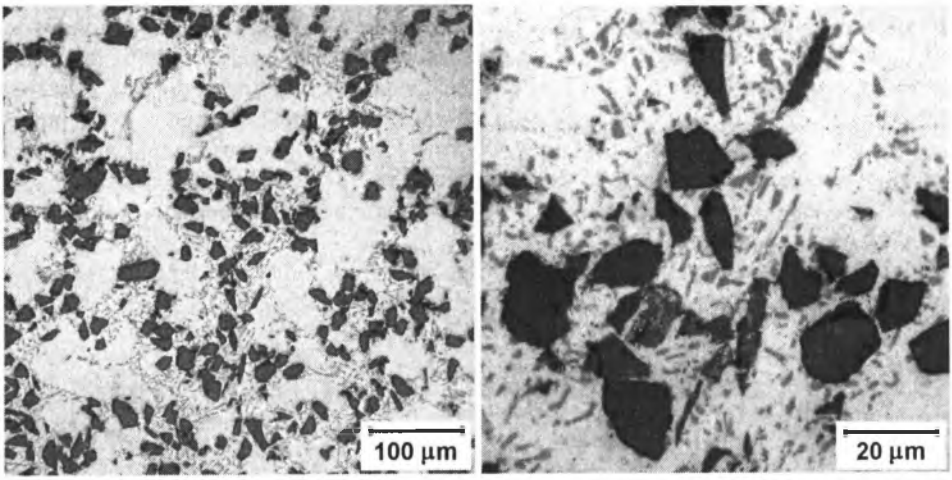
Badania własne obejmowały skojarzenie żeliwo szare gatunku EN-GJL-350/ kompozyt EN AC-42000+20%$_m$$Al_2O_3$. Badania przeprowadzono na stanowisku tribologicznym T-11 w układzie trzpień-tarcza w warunkach tarcia technicznie suchego. Trzpienie o średnicy 4 mm wykonano z fragmentów gotowych pierścieni tłokowych. Tarcze o średnicy 25,4 mm zostały wykonane z kompozytu, którego osnowę stanowi odlewniczy stop aluminium z krzemem EN AC-42000. Fazą zbrojącą są cząstki Al_2O_3 o zróżnicowanej wielkości (od kilku do kilkudziesięciu μm), których udział masowy wynosi 20%. Skład chemiczny stopu zamieszczono w tabeli 1, a widok mikrostruktury kompozytu przedstawiono na rys. 1.

Z tribologicznego punktu widzenia istotnymi sprawami dla zmniejszenia zużycia i sił tarcia współpracujących materiałów są struktura osnowy żeliwa oraz postać węgla. W badanym żeliwie osnowę stanowi przede wszystkim perlit, co daje dużą twardość i odporność na zużycie, a grafit ma wydzielenia płatkowe, co zmniejsza siły tarcia. Skład chemiczny żeliwa EN-GJL-350 zamieszczono w tabeli 2, natomiast widok jego mikrostruktury przedstawiono na rys. 2.

Tabela 1

Skład chemiczny stopu aluminium EN-AC-42000 [2, 5, 6]

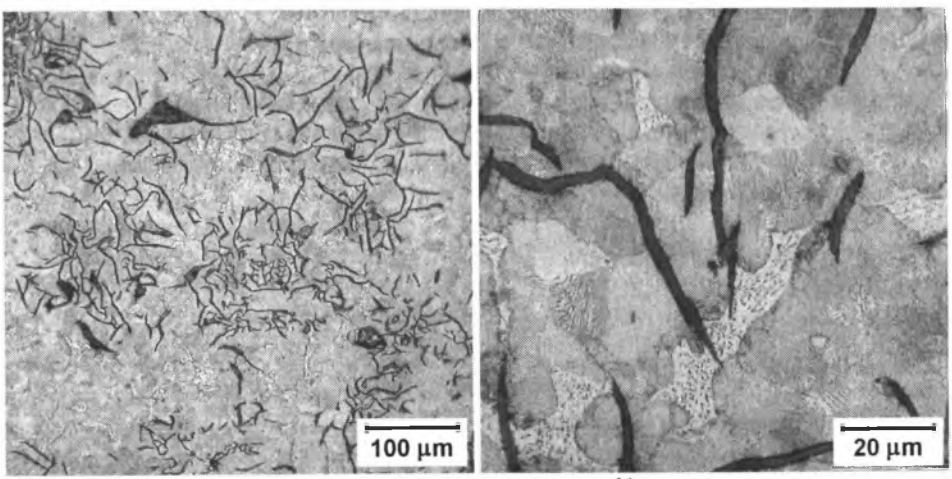
Skład chemiczny, %										
Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Al
6–8	0,25–0,65	0,11–0,55	0,1-0,2	0,04– 0,20	0,01–0,5	0,016–0,15	0,15	0,05	0,05–0,25	reszta



a) b)

Rys. 1. Powierzchnia zgładu kompozytu EN-AC-42000/22%$_m$$Al_2O_{3p}$ (widoczne ciemne cząstki tlenku glinu na tle materiału osnowy)

Fig. 1. Polished microsection of composite material EN-AC-42000/22%$_m$$Al_2O_{3p}$ (dark alumina-particles on the matrix material are visible)



a) b)

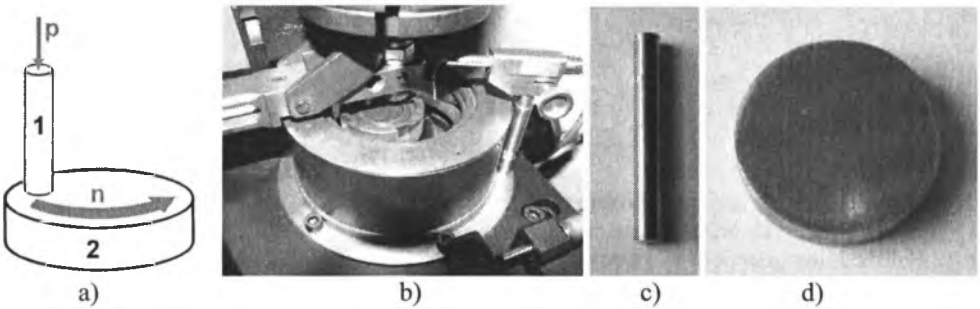
Rys. 2. Powierzchnia zgładu żeliwa EN-GJL-350 (widoczne płatkowe wydzielenia grafitu na tle osnowy; pojedyncze ziarna perlitu- rys. b)

Fig. 2. Polished microsection of cast iron EN-GJL-350 (graphite flakes on the matrix are to se; single pearlite grains – fig. b)

Warunki współpracy skojarzenia tribologicznego (temperatura, obciążenie, prędkość współpracy) dobrano w taki sposób, aby odzwierciedlały one warunki pracy grupy tłokowej w silniku spalinowym. Badania stanowiskowe przeprowadzono zgodnie z poliselekcyjnym, D-optymalnym, cząstkowym planem eksperymentu wg Hartleya. Plan ten zakłada trzy poziomy czynników sterowanych (minimalny, centralny, maksymalny) i pozwala opisać badane zależności wielomianem drugiego stopnia oraz umożliwia optymalizację. Czynnikami sterowanymi są w tym przypadku: prędkość współpracy (v), nacisk (p) i temperatura (t).

Największe zużycie współpracujących elementów grupy tłokowo-cylindrowej występuje przy niewielkich prędkościach współpracy (znacznie poniżej 1 m/s), przykładem jest zwiększone zużycie tulei cylindrowej w obszarach górnego i dolnego martwego punktu [9]. Dlatego też w badaniach przyjęto wartości prędkości współpracy w zakresie 0,1 m/s – 1 m/s. Pozostałe parametry dobrano tak, aby były one w jak największym stopniu zbliżone do rzeczywistych warunków pracy silnika spalinowego. Wartości nacisku występującego pomiędzy płaszczem tłoka a ścianką tulei cylindrowej oraz temperatury panującej w płaszczu tłoka wyznaczono na podstawie danych literaturowych [9, 10]: p_{min} = 0,4 MPa, p_{max} = 1 MPa, t_{min} – 20° C (temperatura otoczenia), t_{max} = 160°C (nominalna temperatura pracy płaszcza tłoka w rozgrzanym silniku).

Badania przeprowadzono na stanowisku tribologicznym T-11 w układzie trzpień-tarcza. Nieruchomy trzpień i ruchoma tarcza stanowią węzeł tarcia testera, rys. 3.



Rys. 3. Węzeł tarcia testera T11: a – schemat, b – widok, c – trzpień (1), d – tarcza (2)
Fig. 3. Friction pairing of T11-Machine: a– schematic, b– photograph, c– pin (1), d– disc (2)

W trakcie badań mierzono i rejestrowano siłę tarcia z częstotliwością 7 Hz. Pomiary ubytków masy współpracujących elementów (trzpienia i tarczy) przeprowadzono za pomocą wagi A&D HM-300, której dokładność wynosi 0,1 mg. Droga tarcia wynosiła 900 m. Każde badanie powtarzano trzykrotnie.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów siły tarcia oraz ubytków masy kompozytu i żeliwa posłużyły do wyznaczenia funkcji eksploatacji (współczynnik tarcia, zużycie) badanego skojarzenia, w zależności od parametrów eksploatacyjnych, stanowiących odzwierciedlenie warunków panujących w obiekcie rzeczywistym (tłok/tuleja cylindrowa). Zależność współczynnika tarcia od prędkości ślizgania, nacisku powierzchniowego i temperatury ma następującą postać:

$$\mu = 0{,}64409 - 0{,}05286 \cdot v - 0{,}1566 \cdot p - 0{,}0015 \cdot t + 0.0014 \cdot p \cdot t \qquad (1)$$

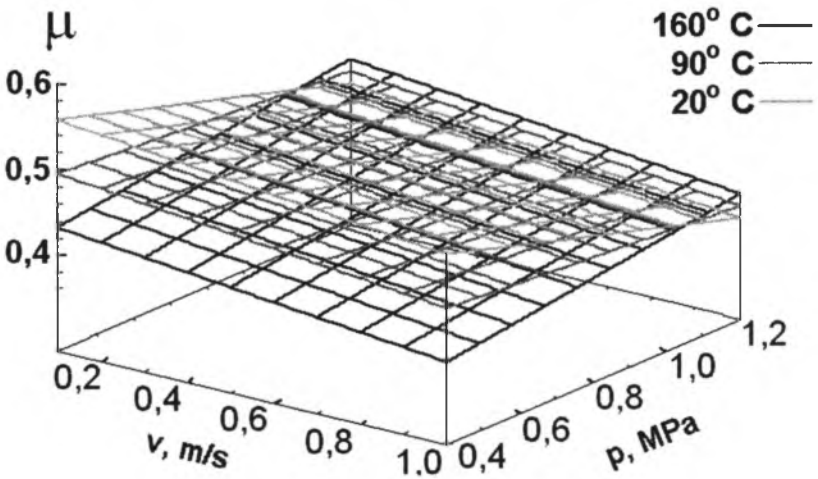
Na rys. 4 przedstawiono graficzną prezentację wyznaczonej zależności.
Wyznaczone zależności ubytku masy tarczy kompozytowej (Δm_{tar}) od prędkości, nacisku i temperatury opisane są następującym równaniem:

$$\Delta m_{tar} = 3{,}722 - 3{,}487 \cdot v - 0{,}045 \cdot t + 3{,}434 \cdot v^2 + 0{,}0003 \cdot t^2 - 0{,}031 \cdot v \cdot t + 0{,}019 \cdot p \cdot t \quad (2)$$

Natomiast analogiczne zależności ubytku masy żeliwnego trzpienia (Δm_{trzp}) od prędkości, nacisku i temperatury są opisane równaniem:

$$\Delta m_{trzp20} = -0{,}0128 + 2{,}6501 \cdot p + 2{,}8265 \cdot v^2 - 2{,}8520 \cdot v \cdot p - 0{,}0282 \cdot v \cdot t + 0{,}0149 \cdot p \cdot t \quad (3)$$

Wykresy uzyskanych funkcji eksploatacji dla materiału kompozytowego przedstawiono na rys. 5a, a dla współpracującego z nim żeliwa, na rys. 5b.



Rys. 4. Zależności współczynnika tarcia skojarzenia tribologicznego EN AB-42000+20%$_m$$Al_2O_3$ z żeliwem szarym EN-GJL-350 od prędkości i nacisku w temperaturach 20° C, 90° C i 160°C
Fig. 4. Coefficient of friction of pairing EN AC-42000+20%$_m$$Al_2O_3$ with cast iron EN-GJL-350 vs. velocity and load in temperature 20° C, 90° C and 160°C

Z rys. 4 wynika, że współczynnik tarcia maleje wraz ze wzrostem temperatury, co jest szczególnie ważne z uwagi na charakter pracy grupy tłokowo-cylindrowej. Ze względu na warunki współpracy (tarcie technicznie suche), jego wartości są dość duże, ale przy obecności środka smarnego maleją. Zaobserwowano też, że wzrasta on wraz ze zmniejszaniem się prędkości współpracy.

Przyczynę spadku współczynnika tarcia wraz ze wzrostem temperatury współpracujących materiałów można znaleźć w hipotezie tarcia, zaproponowanej przez Ernsta i Merchanta. Z tej hipotezy wynika, że współczynnik tarcia jest ilorazem wytrzymałości na ścinanie słabszego materiału i twardości mocniejszego, wg zależności:

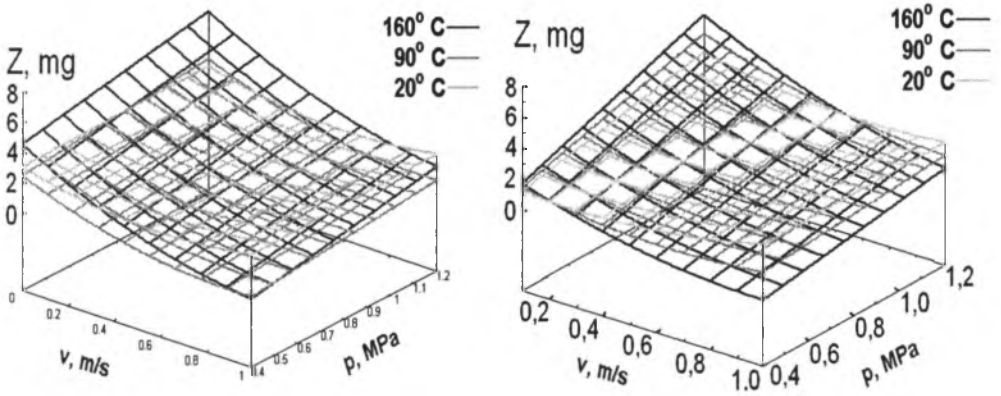
$$\mu = \frac{\tau}{H} + tg\alpha, \quad (4)$$

gdzie:
τ – wytrzymałość na ścinanie słabszego materiału w strefie tarcia w MPa,

H – twardość mocniejszego materiału w MPa,
∝ – kąt pochylenia wierzchołków nierówności zależny od chropowatości powierzchni (przy małej chropowatości pomijalnie mały).

W badanym skojarzeniu wytrzymałość na ścinanie pochodzi od osnowy, tj. aluminium i maleje ona wraz ze wzrostem temperatury. Natomiast faza zbrojąca, tj. Al_2O_3 wnosi do skojarzenia twardość. Tlenek glinu zachowuje swoje właściwości dla wysokich temperatur (1100° C), dlatego twardość w strefie styku żeliwa z kompozytem pozostaje niezmieniona i współczynnik tarcia maleje.

Pomimo że materiał kompozytowy zbrojony jest twardymi cząstkami Al_2O_3 o ostrych krawędziach, zależności zużycia kompozytu i współpracującego z nim żeliwa od warunków współpracy mają zbliżony charakter. W przypadku obydwóch materiałów największe zużycie występuje w warunkach minimalnej prędkości współpracy i maksymalnego obciążenia w temperaturze 160° C. W obydwóch przypadkach dochodzi ono do około 7 mg, jednakże przy większych prędkościach współpracy w podwyższonych temperaturach, zużycie zarówno kompozytu, jak i żeliwa jest mniejsze niż w temperaturze 20° C.



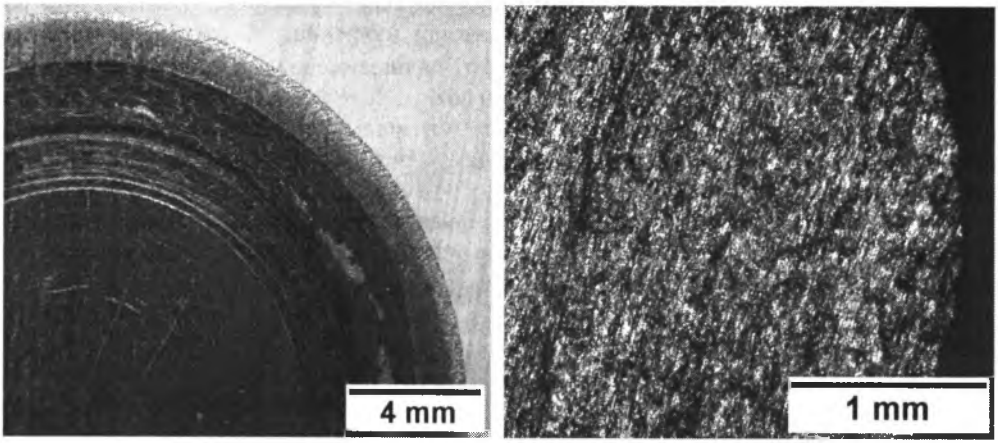
a) b)

Rys. 5. Zależności ubytku masy kompozytowej tarczy (a) oraz żeliwnego trzpienia (b) od prędkości i nacisku w temperaturach 20° C, 90° C i 160° C

Fig. 5. Mass loss of composite disc (a) and cast iron (b) pin vs. velocity and load in temperatures 20° C, 90° C and 160° C

Na obydwu powierzchniach można zaobserwować, powstałe w wyniku współpracy, rysy, których kierunek jest zgodny z kierunkiem ruchu badanego skojarzenia tribologicznego. Przyczyną powstawania rys na trzpieniu żeliwnym są cząstki fazy zbrojącej, wystające nad powierzchnię materiału osnowy, natomiast prawdopodobną przyczyną powstawania ww. rys na powierzchni tarczy jest oddziaływanie cząstek fazy zbrojącej usuniętych z osnowy. Niektóre, najbardziej wystające cząstki zbrojenia są usuwane z materiału osnowy w trakcie współpracy. Na skutek wzrostu temperatury i różnicy rozszerzalności cieplnej materiałów osnowy i fazy zbrojącej dochodzi do zniszczenia połączenia na granicy faz i siły tarcia mogą łatwiej osunąć cząstki. Pozostają one przez pewien czas w strefie tarcia, do całkowitego usunięcia, przytrzymywane przez naniesiony na trzpień materiał osnowy, powodując zużycie ścierne powierzchni tarczy i w mniejszym stopniu trzpienia. W niektórych przypadkach (przy maksymalnym obciążeniu) zaobserwowano plastyczne odkształcenia i przemieszczenia

wzdłuż kierunku ruchu trzpienia warstwy powierzchniowej osnowy badanego kompozytu, w wyniku czego może dochodzić do zakrywania cząstek fazy zbrojącej materiałem osnowy (rys. 7) i zmniejszania intensywności zużywania żeliwa. Na rys. 7 przedstawiono obszary odkształconego plastycznie, tworzącego nawisy, stopu.

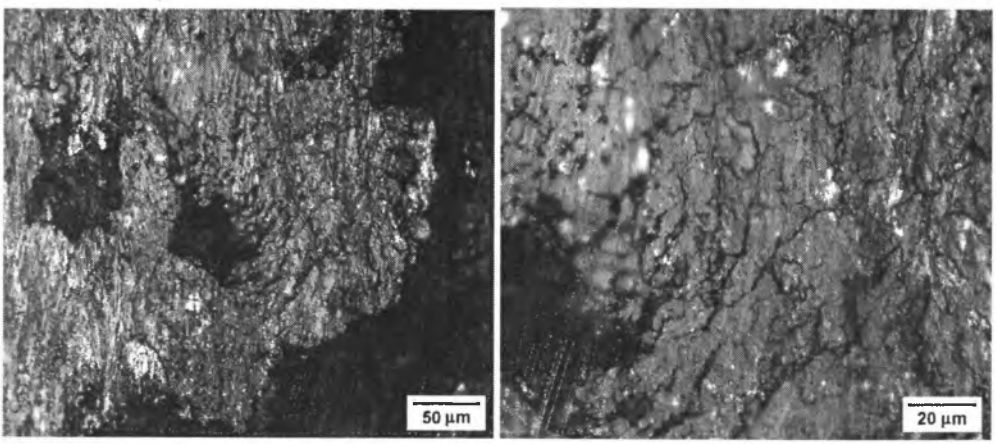


a) b)

Rys. 6. Widok powierzchni kompozytowej tarczy (a) oraz żeliwnego trzpienia (b) po współpracy ślizgowej w warunkach tarcia technicznie suchego (p = 1,2 MPa, t = 160° C)

Fig. 6. Surface of composite disc (a) and cast iron (b) after rubbing in air (p = 1,2 MPa, t = 160° C)

Na rys. 6a pokazano powierzchnię kompozytowej tarczy po współpracy z żeliwem, natomiast na rys. 6b przedstawiono, biorącą udział w tarciu, powierzchnię współpracującego z nią żeliwnego trzpienia. Na tej powierzchni można zauważyć naniesione produkty zużycia materiału osnowy z inkludowanymi produktami zużycia trzpienia.



a) b)

Rys. 7. Plastyczne odkształcenia osnowy kompozytu EN AB-42000 + 20%mAl_2O_3 po współpracy z żeliwem (p = 1,2 MPa, t = 160° C)

Fig. 7. Plastic deformation of matrix material of EN AC-42000 + 20%mAl_2O_3 after rubbing against cast iron (p = 1,2 MPa, t = 160° C)

4. PODSUMOWANIE

Analiza wyników badań przeprowadzonych w niniejszym artykule pozwoliła na stwierdzenie, że zużycie zarówno kompozytowej tarczy, jak i żeliwnego trzpienia są do siebie zbliżone. Wyznaczone funkcje eksploatacji mają podobny charakter. Zużycie tarczy i trzpienia maleje wraz ze wzrostem prędkości współpracy, wzrasta ono natomiast wraz ze wzrostem obciążenia. W warunkach podwyższonej temperatury i większych prędkości współpracy zużycie współpracujących materiałów jest mniejsze niż w temperaturze 20° C, co daje podstawy do założenia, że badany materiał będzie dobrze pracował w silniku.

Wartość współczynnika tarcia maleje wraz ze wzrostem temperatury, co jest szczególnie ważne z uwagi na charakter pracy grupy tłokowo-cylindrowej. Wzrasta on wraz ze zmniejszaniem się prędkości współpracy.

Ponieważ badania były prowadzone w warunkach tarcia technicznie suchego, można przypuszczać, że w obecności środka smarnego wartość współczynnika tarcia oraz zużycie współpracujących materiałów będą znacznie mniejsze.

Literatura

1. Sobczak J.: Kompozyty metalowe. Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego. Kraków 2001.
2. Duralcan Composites for wrought products – Property data. Katalog firmy Alcan, USA 1993.
3. Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H. P.: Grenzflächenuntersuchungen an Endlosfaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für die Raumfahrttechnik. Obersflächen Werkstoffe, nr 6, 1995, s. 16-19.
4. Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H. P.: Entwicklung von Endlosfaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für die Raumfahrttechnik. Oberflächen Werkstoffe nr 5, 1995, s. 8-10.
5. Choua S. N., Huanga J. L., Lii D. F., Lu H. H.: The mechanical properties of Al_2O_3/aluminum alloy A356 composite manufactured by squeeze casting. Journal of Alloys and Compounds 419 (2006), s. 98–102.
6. Dey A. K., Poddar P., Singh K. K., Sahoo K. L.: Mechanical and wear properties of rheocast and conventional gravity die cast A356 alloy. Materials Science and Engineering A 435–436 (2006), s. 521–529.
7. Choua S. N., Huanga J. L., Lii D. F., Lu H. H.: The mechanical properties of Al_2O_3/aluminum alloy A356 composite manufactured by squeeze casting. Journal of Alloys and Compounds 419 (2006), s. 98–102.
8. www.fpt-prima.com.pl.
9. Kozaczewski W.: Konstrukcja grupy tłokowo – cylindrowej silników spalinowych. WKŁ, Warszawa 2004.
10. Röhrle Manfred D.: Pistons for Internal Combustion Engines, Fundamentals of Piston Technology. verlag moderne industrie 2002, MAHLE GmbH.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Śleziona

Praca wykonana w ramach BW-488/RT1/2007