Polskie Towarzystwo Materiałów Kompozytowych
Polish Society of Composite Materials

Kompozyty 10: 1 (2010) 70-75

KOMPOZYTY
COMPOSITES

Andrzej Posmyk

Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland
Corresponding author. E-mail: andrzej.posmyk@polsl.pl

Otrzymano ((Received) 02.03.2009

BADANIA TRIBOLOGICZNE MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH PRZEZNACZONYCH NA PODZESPOŁY TECHNICZNYCH ŚRODKÓW TRANSPORTU

Przedstawiono podstawowe informacje na temat metod badania właściwości tribologicznych materiałów kompozytowych przeznaczonych na skojarzenia ślizgowe technicznych środków transportu pracujące w ruchu posuwisto-zwrotnym i obrotowym. Opisano zasady doboru testerów tribologicznych w zależności od warunków pracy obiektów rzeczywistych, w których są stosowane części maszyn wykonane z kompozytów, oraz podano przykłady rzeczywistych węzłów tarcia z grupy tłokowej silnika spalinowego i odpowiadające im węzły tarcia testerów do badań. Opisano zasady doboru materiałów na próbki i przeciwpróbki oraz warunki obróbki powierzchni przeznaczonych do współpracy ślizgowej.

Omówiono dwie grupy skojarzeń, tj. ślizgowe z ruchem posuwisto-zwrotnym i ślizgowe z ruchem obrotowym. Pierwsze skojarzenie jest reprezentowane przez wykonany z żeliwa pierścień tłokowy i wykonaną z kompozytu tuleję cylindra albo płaszcz tłoka i tuleję cylindra silnika spalinowego, a drugie przez czop wału korbowego wykonany z żeliwa (wały lane) i stali (wały kute) oraz wykonaną z kompozytu panewkę ślizgową.

Słowa kluczowe: badania tribologiczne, materiały kompozytowe, dobór skojarzenia, przygotowanie próbek

TRIBOLOGICAL RESEARCHES OF COMPOSITE MATERIALS ASSIGNED FOR MACHINERY PARTS OF TECHNICAL TRANSPORT MEANS

Basic information to the point of investigations methods of tribological properties of composite materials assigned for sliding pairs of technical transport means using in reciprocated and rotational movement has been described. The choice principles of tribological testers depend on using conditions of real objects with machinery parts made from composite materials have been described. A frictional pairings sample from the piston/cylinder liner-group from combustion engines and their equivalent pairings from tribological testers was given. The principle of choice of material for samples and countersamples, the conditions for machining of surfaces destined for rubbing were discussed.

Two kinds of tribological pairings, i.e. sliding pair with reciprocated and sliding pair with rotational movement have been named. The first pairing is represented by piston ring (made of cast iron or cast iron with chromium-ceramic covering) and cylinder liner sleeve (made of composite material). To simulate of using conditions of this pairing can be used tester with "cube on block" couple. Crankshaft and journal bearing represent the second one. The crankshaft can be made of composite material, steel (wrought shafts) and of cast iron (cast shafts). The bearing is produced of composite material, for example from aluminum alloy-matrix with graphite as reinforcing phase. To simulate of using conditions of this pairing can be used tester with "block on ring" couple. Tribological tests can be conducted with lubrication agent, for example combustion engine oil ant under friction in air conditions.

During preparation of samples for investigations an attention should be paid to proper choice of materials for samples and countersamples because friction coefficient for example in pairing rubber/steel is about 20% less then steel/rubber. During machining of cast iron graphite is removed from the surface, which results in decreasing of tribological properties. Therefore the surface of samples destined for sliding should be machined in the same way that the machinery parts. The best way for samples preparing is to make them from the original machinery parts, for example from a piston ring. If the sliding surface of piston ring is covered with chromium-ceramic layer samples for tests should be prepared in that way that their sliding layer is the original sliding layer of piston. Duration of tribological test with samples covered with Cr-Al_2O_3-layer should be adjusts to the covering thickness.

Keywords: tribological investigations, composite materials, choice of pairing, samples preparing

WSTĘP

Od wielu lat specjaliści z inżynierii materiałowej i tribologii zajmują się projektowaniem, wytwarzaniem i badaniem materiałów kompozytowych na osnowie metalowej, ceramicznej i z tworzyw sztucznych. Materiały kompozytowe mają właściwości lepsze, a czasami nowe w porównaniu do materiału ich osnowy. Najczęściej wymienianymi właściwościami, które są poprawiane (zwiększają się) przez dodanie fazy zbrojącej, są

wytrzymałość na rozciąganie lub ściskanie, moduł sprężystości podłużnej, udarność czy malejący po dodaniu materiałów ceramicznych (Al_2O_3, SiC) współczynnik rozszerzalności cieplnej. Te poprawione cechy materiałów pozwalają na ich zastosowanie do wytwarzania części maszyn, w których dotychczas nie były stosowane, oraz na zmniejszenie masy tych maszyn lub zwiększenie przenoszonych obciążeń.

Wzrost wytrzymałości ma duże znaczenie dla części maszyn wykonanych z tworzyw konstrukcyjnych o małej gęstości, np. tworzyw sztucznych i stopów aluminium czy magnezu, a nawet tytanu. Zmniejszenie rozszerzalności cieplnej tworzyw pozwala zmniejszyć luzy współpracujących ślizgowo części maszyn cieplnych, np. tłoków i tulei cylindrowych. Ma to istotne znaczenie dla zmniejszania zużycia paliwa silników spalinowych lub zwiększenia wydajności sprężarek tłokowych pracujących w termodynamicznie nieustalonych stanach wynikających z cyklicznego załączania i wyłączania, np. sprężarek do gaszenia łuku elektrycznego na bezobsługowych stacjach energetycznych. Największym odbiorcą materiałów kompozytowych jest przemysł wytwarzający pojazdy - począwszy od okrętów podwodnych, przez pojazdy samochodowe, szynowe i rowery aż po samoloty i statki czy promy kosmiczne.

Materiały kompozytowe to nie tylko tworzywa lite, zawierające fazę zbrojącą w całej swej objętości, to też kompozyty z gradientowym rozkładem fazy zbrojącej oraz powłoki kompozytowe wytwarzane na wielu częściach maszyn z tworzyw konstrukcyjnych charakteryzujących się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, ale niewystarczającymi właściwościami tribologicznymi. Powłoki kompozytowe i kompozyty gradientowe pozwalają zmniejszyć koszty materiału oraz obróbki części maszyn, poprawiając w istotny sposób właściwości tribologiczne.

Do najbardziej rozpowszechnionych w budowie maszyn kompozytów metalowych należy zaliczyć kompozyty wytworzone - metodą odlewania i wyciskania - na osnowie aluminium i jego stopów (AlMC - Aluminium Matrix Composite) oraz stopów magnezu (MgMC). W źródłach literaturowych można znaleźć informacje na temat wytwarzania AlMC, ich właściwości i zastosowań [1-3]. Praktycznie w większości publikacji są zawarte dane na temat zwiększenia odporności na zużycie materiału osnowy wraz ze wzrostem zawartości fazy zbrojącej. Pojawiają się też coraz liczniejsze prace poświęcone technologiom wytwarzania i ich wpływowi na wybrane właściwości użytkowe kompozytów. Niewiele miejsca poświęca się doborowi materiału partnera współpracującego z badanymi kompozytami. Zarówno opory tarcia, jak i zużycie obydwóch partnerów wywierają istotny wpływ na sprawność, trwałość i niezawodność całego skojarzenia, a tym samym na niezawodność maszyny, w której to skojarzenie pracuje.

Niniejsza praca stanowi próbę systematyki warunków pracy kompozytów w zależności od rodzaju skojarzenia oraz możliwości kształtowania i badania właściwości tribologicznych skojarzeń ślizgowych, w których jeden z partnerów jest wykonany z AlMC, a drugi z żeliwa. Takie skojarzenie znalazło już zastosowanie m.in. w silnikach spalinowych z tuleją cylindrową z kompozytu z włóknami Al_2O_3 i pierścieniami z żeliwa pokrytego kompozytową powłoką $CrAl_2O_3$ [2, 4].

SKOJARZENIA I WARUNKI, W KTÓRYCH STOSUJE SIĘ KOMPOZYTY

Z tribologicznego punktu widzenia rozróżnia się trzy rodzaje skojarzeń, tj.:

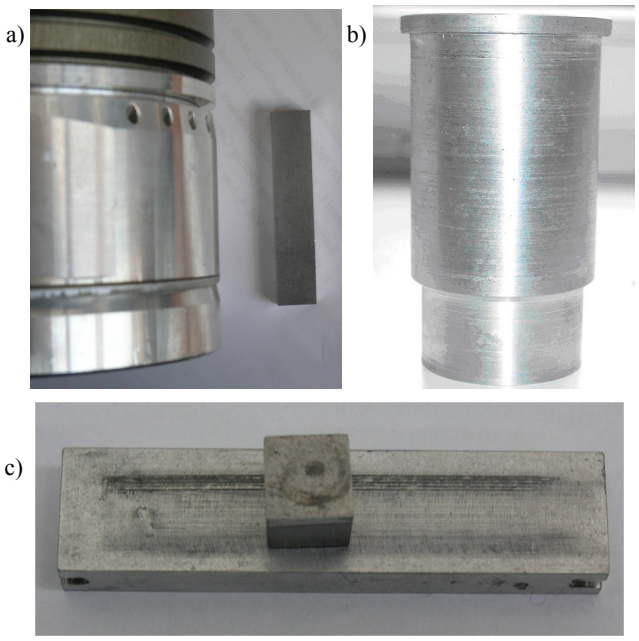
- ślizgowe, w którym prędkość względna jednego partnera w stosunku do drugiego jest różna od zera (z ruchem posuwisto-zwrotnym i obrotowym);
- toczne, w którym prędkość względna jednego partnera w stosunku do drugiego jest równa zeru;
- wiertne (zwane też krętnym), które jest szczególnym przypadkiem tarcia ślizgowego z obrotem i dlatego nie będzie omawiane osobno.

Najbardziej rozpowszechnionymi skojarzeniami ślizgowymi z ruchem posuwisto-zwrotnym, w których stosuje się materiały kompozytowe, są grupy tłokowe maszyn tłokowych (silników i sprężarek) i wały maszynowe. W grupie tłokowej ślizgowo współpracują pierścienie tłokowe z gładzią tulei cylindrowej i z wewnętrznymi powierzchniami rowków pierścieniowych w tłoku oraz płaszcz tłoka z gładzią tulei cylindrowej. Te skojarzenia wykonują ruch posuwisto-zwrotny, w którym prędkość względna zmienia się od zera (w górnym i dolnym martwym punkcie tłoka) do około 25 m/s podczas suwu pracy silnika. Prędkość względna zależy od prędkości obrotowej silnika. Pierścienie tłokowe w silnikach samochodów osobowych wywierają zróżnicowany nacisk na gładzie tulei od 0,2 do 5 MPa [5]. Najmniejszy nacisk wywiera pierścień zgarniający, a największy uszczelniający. Wartość nacisków zależy od ciśnienia indykowanego i jest znacznie większa w silnikach z zapłonem samoczynnym niż z zapłonem iskrowym. Na rysunku 1a przedstawiono fragment skojarzenia płaszcz tłoka/tuleja cylindrowa, na rysunku 1b kompozytową tuleję cylindrową, a na rysunku 1c odpowiedni węzeł tarcia testera tribologicznego służącego do podstawowych badań laboratoryjnych. Tuleja cylindrowa jest wykonana z kompozytu EN-AC-47000 +15%WS (15% cząstek węgla szklistego) i służy do badań półeksploatacyjnych w silniku spalinowym Romet 32 na stanowisku badawczym.

Smarowanie ww. skojarzeń w grupie tłokowej jest diametralnie różne. Między powierzchnią roboczą pierścienia zgarniającego a gładzią tulei cylindrowej jest wystarczająco dużo oleju dla zapewnienia smarowania półpłynnego, a nawet hydrodynamicznego przy dużej prędkości. Pomiędzy pierścieniami a półkami pierścieniowymi panują umiarkowane warunki smarowania, ale naciski i prędkości względne są niewielkie, dlatego zużycie tribologiczne jest pomijalnie małe. Bardziej znaczące jest zużywanie półek pierścieniowych tłoka spowodowane odkształceniami plastycznymi.

 All rights reserved

Przykładem skojarzenia ślizgowego z ruchem obrotowym w silniku spalinowym jest wał korbowy, którego czopy współpracują z panewkami łożysk ślizgowych w ruchu obrotowym o zmiennej prędkości wywierającej istotny wpływ na możliwości smarowania hydrodynamicznego. Panewki łożysk w niektórych samochodach (np. fiat) są wykonane z kompozytu na osnowie stopów aluminium zawierającego cząstki grafitu.



Rys. 1. Tłok wykonany z kompozytu i wycięta z jego płaszcza przeciwpróbka do badań tribologicznych (a), kompozytowa tuleja cylindrowa (b) i węzeł tarcia testerów tribologicznych (c)

Fig. 1. Piston made of composite material and prepared from his skirt counter-specimen (a), composite cylinder sleeve (b) and friction pair for tribological testers (c)

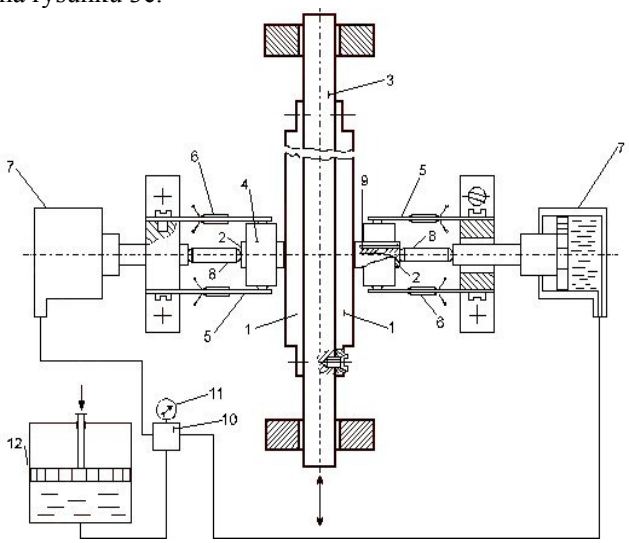
Produkty zużycia grafitu stanowią stały środek smarny, który jest nanoszony na współpracujące powierzchnie oraz tworzy zawiesinę w oleju. Dzięki temu zmieniają się warunki współpracy, ponieważ cząstki grafitu są nanoszone we wgłębienia nierówności powierzchni zarówno czopa, jak i panewki, co znacznie zmniejsza siły tarcia i intensywność zużywania skojarzenia.

METODY BADANIA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH KOMPOZYTÓW

Opisane w poprzednim podrozdziale warunki pracy podzespołów wykonanych z materiałów kompozytowych narzucają metody i warunki badań tych materiałów. Generalnie są praktykowane trzy grupy metod badań właściwości tribologicznych tworzyw konstrukcyjnych, tj.:

- badania podstawowe na stanowiskach badawczych,
- badania półeksploatacyjne na stanowiskach,
- badania eksploatacyjne w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

W każdej z tych metod badań należy zadbać o dobór właściwych skojarzeń odzwierciedlających w maksymalnym stopniu (z uwzględnieniem teorii podobieństwa maszyn) rzeczywiste warunki eksploatacji (rys. 2). Jeżeli chcemy badać przeznaczony na tuleje cylindrowe kompozyt we współpracy z pierścieniami tłokowymi pokrytymi powłoką chromowo-ceramiczną, to musimy tak wyciąć próbki z pierścienia, żeby powierzchnia pokryta powłoką współpracowała z gładzią tulei zawierającej fazę zbrojącą. Próbkę stanowiącą wycinek pierścienia tłokowego wykonanego z żeliwa EN-GJL-350 pokazano na rysunku 3a, pierścienia pokrytego powłoką chromowo-ceramiczną na rysunku 3b (widok powierzchni i zgład poprzeczny), powierzchnię roboczą próbki z pierścienia pokrytego powłoką po współpracy ślizgowej z kompozytem zawierającym cząstki Al_2O_3 na rysunku 3c.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego symulującego warunki pracy zespołu tłokowo-cylindrowego podczas zimnego rozruchu: 1 - przeciwpróbka (badane kompozyty); 2 - próbka (wycinek z pierścienia tłokowego); 3 - wodzik z umocowanymi przeciwpróbkami; 4 - ramka mocująca próbkę; 5 - beleczkowy przetwornik siły tarcia; 6 - tensometry w układzie pełnego mostka; 7 - siłownik hydrauliczny dociskający próbkę do przeciwpróbki; 8 - przegubowy teleskop dociskający próbki; 9 - otwór na termoelement; 10 - rozdzielacz hydrauliczny; 11 - manometr; 12 - pompa hydrauliczna

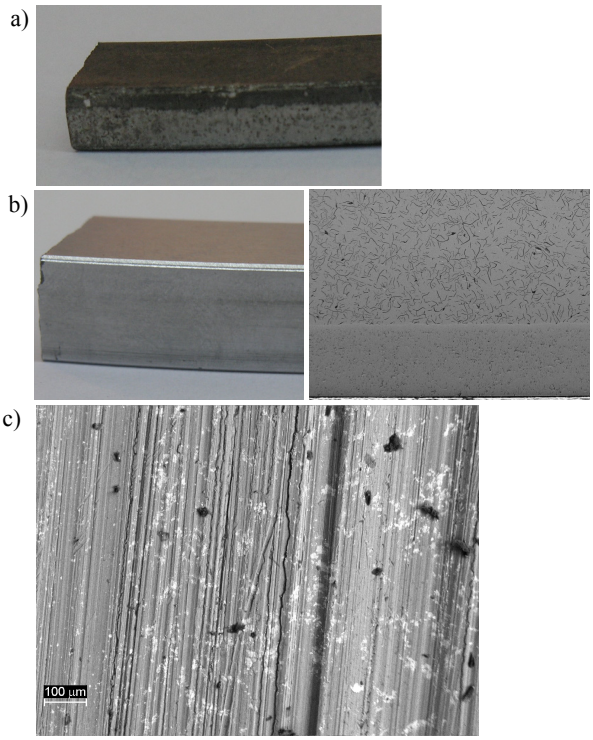
Fig. 2. Scheme of the tribological tester simulating cold start of piston-cylinder liner group conditions: 1 - counter-specimen (tested composite); 2 - specimen (part of piston ring); 3 - slide way with fastened counter-specimens; 4 - hinged specimen holder; 5 - force sensor; 6 - strain gauge bridge; 7 - hydraulic cylinder pressing the sample to counter-specimen; 8 - hinged samples pusher; 9 - bore for thermocouple; 10 - 4/2 manipulator; 11 - pressure gauge; 12 - hydraulic pump

Czas badań takich skojarzeń należy ograniczyć do dopuszczalnego zużycia powłoki. Jeżeli powłoka zostanie zużyta, to powstanie nowe skojarzenie, które nie występuje w obiektach rzeczywistych.

Podczas badania materiałów kompozytowych przeznaczonych na elementy grupy tłokowej należy uwzględnić temperatury panujące na płaszczu tłoka (do 120°C) i tulei cylindrowej (60÷80°), ponieważ kompozyty na osnowie aluminium zmieniają istotnie swoje właściwości wytrzymałościowe wraz ze zmianą tempe-

 All rights reserved

ratury (obniżenie *Rm*, *E* i *HB*) oraz cieplne (zmniejszenie przewodności i rozszerzalności cieplnej). Dodatkowym problemem jest duża różnica rozszerzalności cieplnej materiału osnowy i ceramicznej fazy zbrojącej, co skutkuje utratą spójności na granicy faz.



Rys. 3. Widok pierścienia tłokowego bez powłoki na powierzchni roboczej (a) i z powłoką chromowo-ceramiczną przed tarciem (b) oraz po współpracy z kompozytem zawierającym cząstki Al_2O_3 (c)

Fig. 3. View of piston ring without covering on sliding surface (a), covered with chromium-ceramic layer before friction (b) and after rubbing against composite including alumina reinforcing phase (c)

Przykład węzła tarcia odwzorowującego warunki pracy skojarzenia ślizgowego w ruchu obrotowym przedstawiono na rysunku 4. Ten węzeł może służyć do badania zarówno skojarzenia kompozytowy czop/panewka z materiałów łożyskowych, jak i stalowy czop/panewka z materiałów kompozytowych. W pierwszym przypadku należy wykonać klocek z materiału łożyskowego i pierścień z kompozytu, a w drugim klocek z kompozytu i pierścień ze stali (dla wałów kutych) lub żeliwa (dla wałów odlewanych).

Podczas wykonywania próbek i przeciwpróbek należy przestrzegać zasady odwzorowania materiałów i wywierania nacisków. We wspomnianym skojarzeniu pierścień tłokowy/tuleja cylindrowa nacisk jest wywierany przez pierścień na gładź tulei i dlatego próbką powinien być wycinek pierścienia tłokowego, a przeciwpróbką wycinek gładzi tulei cylindrowej. Zazwyczaj pierścienie tłokowe silników spalinowych są wykonywane z żeliwa perlitycznego z grafitem płatkowym lub sferoidalnym, a tuleje cylindrowe z kompozytu na osnowie siluminu okołoeutektycznego EN-AC-47000 zawierającego około 10% włókien z tlenku glinu. Dlatego próbki należy wykonać ze wspomnianego żeliwa, a przeciwpróbki z kompozytu. Nie jest zalecane wykonywanie próbek z kompozytu, a przeciwpróbek z żeliwa. Takie skojarzenie nazywa się czasami odwrotnym i materiałowo odpowiada skojarzeniu podstawowemu, ale uzyskane wartości współczynników tarcia i zużycia mogą okazać się inne. Na potwierdzenie takiego przebiegu można przytoczyć skrajny przypadek doboru materiałów, tj. stal i guma. Jeżeli wykonamy gumową próbkę w postaci kostki i po obciążeniu zaczniemy ją przemieszczać po stalowej płycie, to uzyskamy współczynnik tarcia mniejszy o około 20% niż w skojarzeniu stalowa kostka/gumowa płyta. W skojarzeniu żeliwo/kompozyt na osnowie siluminów różnica właściwości tribologicznych może być mniejsza, ponieważ różnica twardości i plastyczności żeliwa i siluminu nie jest tak duża jak stali i gumy.

Rys. 4. Widok węzła tarcia odwzorowującego warunki pracy skojarzenia czop-panewka (klocek-pierścień)

Fig. 4. View of friction pairing imitating conditions of crankshaft and journal bearing using (block-ring)

Istotnym problemem jest właściwy dobór warunków badań, które powinny symulować warunki pracy w silniku spalinowym. Z analizy dostępnej literatury poświęconej tribologii pojazdów [5-7] oraz badań własnych autora [8] wynika, że najtrudniejsze warunki współpracy skojarzenia pierścień/tuleja cylindrowa panują podczas rozruchu zimnego silnika, ponieważ smarowanie rozbryzgowe zimnym olejem o zwiększonej lepkości jest trudniejsze niż rozgrzanym. Zużycie elementów grupy tłokowej silnika podczas zimnego rozruchu jest porównywalne ze zużyciem silnika pracującego przez dwie godziny w ustabilizowanych warunkach termodynamicznych. Dlatego badania laboratoryjne kompozytów przeznaczonych na tuleje cylindrowe powinny być wykonywane w warunkach ograniczonego smarowania, tj. przy podawaniu niewielkich ilości oleju. Poza tym przy mniejszych prędkościach nie ma warunków do zaistnienia smarowania hydrodynamicznego. Uwzględniając te uwarunkowania, zaleca się wykonywać badania przy prędkości do 1÷2 m/s i naciskach odpowiadających naciskom pierścienia uszczelniającego, tj. dla silników z zapłonem iskrowym do około 3 MPa. Skojarzenie należy smarować mgłą olejową w taki sposób, żeby ilość oleju znajdującego się na przeciwpróbce odpowiadała ilości oleju na gładzi

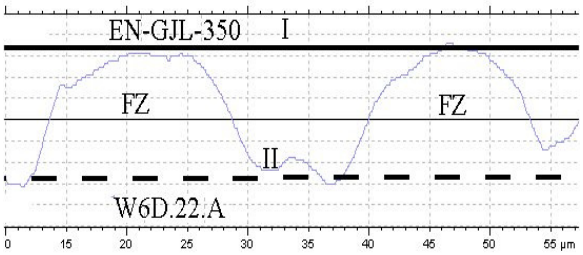
 All rights reserved

tulei podczas rozruchu zimnego silnika. Z literatury [5, 7] i doświadczeń autora [8, 9] wynika, że takie warunki są odwzorowane przez podanie, co 30 minut, około 2 mg oleju na cm^2 powierzchni gładzi.

Podczas przygotowywania próbek i przeciwpróbek należy pamiętać o tym, żeby stosować metody i rodzaje obróbki zbliżone do tych, którymi będą wytwarzane części obiektów rzeczywistych. Jeżeli pierścienie tłokowe są pokryte powłokami (np. twardym chromem porowatym lub $Cr+Al_2O_3$), to powierzchnie współpracujące z kompozytem muszą mieć taką powłokę.

Podczas obróbki skrawaniem żeliw dochodzi do wykruszania grafitu z powierzchni obrabianej, co skutkuje tym, że w początkowym etapie badań z kompozytem współpracuje twarda osnowa (najczęściej perlityczna) zawierająca mniej grafitu niż w rdzeniu. Ilość pozostałego grafitu zależy od rodzaju obróbki i użytego narzędzia. Dlatego powierzchnie robocze próbek do badań tribologicznych należy obrabiać w podobny sposób jak obiekty rzeczywiste.

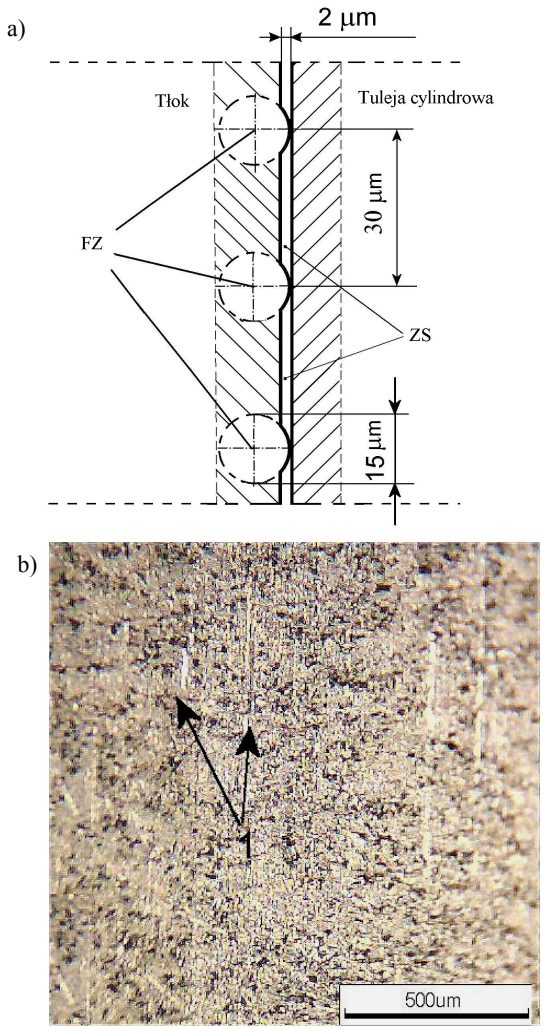
Obróbka powierzchni tarcia próbek wykonywanych z kompozytów też powinna być realizowana w podobnych warunkach jak tulei cylindrowej lub płaszcza tłoka, ponieważ ze względu na dużą różnicę twardości materiału osnowy i fazy zbrojącej (cząstki Al_2O_3 lub SiC) uzyskuje się dwupłaszczyznowość powierzchni tarcia (rys. 5). Jedną płaszczyznę (I) tworzą wierzchołki cząstek fazy zbrojącej (FZ) wystające ponad powierzchnię materiału osnowy, która jest drugą płaszczyzną (II). Tarcie odbywa się na poziomie pierwszej płaszczyzny, a o smarowaniu i o zużyciu decyduje druga płaszczyzna, a w zasadzie odległość pomiędzy nimi. Przestrzenie pomiędzy cząstkami FZ i powierzchniami żeliwa oraz materiału osnowy stanowią zasobniki środka smarnego oraz produktów zużycia i zanieczyszczeń dostających się do węzła tarcia.



Rys. 5. Profil chropowatości powierzchni kompozytu pokazujący dwie płaszczyzny w strefie styku (I i II)

Fig. 5. Roughness profile of composite materials showing the two planes in contact zone (I and II)

Model strefy styku płaszcza tłoka z tuleją cylindrową silnika spalinowego i widok powierzchni płaszcza tłoka po badaniach laboratoryjnych na stanowisku przedstawiono na rysunku 6. Strzałkami zaznaczono bruzdy wykonane przez cząstki fazy zbrojącej, które zostały usunięte z osnowy podczas współpracy tłoka z gładzią żeliwnej tulei cylindrowej. Na całej powierzchni płaszcza są widoczne cząstki tlenku glinu (ciemne punkciki).



Rys. 6. Model styku płaszcza kompozytowego tłoka z żeliwną tuleją cylindrową (a) i widok powierzchni płaszcza tłoka po współpracy (b): FZ - faza zbrojąca, ZS - zasobniki smaru

Fig. 6. Model of contact between composite piston skirt and cast iron cylinder sleeve (a) and view of skirt surface after rubbing (b): FZ - reinforcing phase, ZS - lubricant depots

PODSUMOWANIE

Materiały kompozytowe znajdują coraz szersze zastosowanie w budowie części pojazdów samochodowych, które pracują w skojarzeniach ślizgowych w ruchu posuwisto-zwrotnym i obrotowym. Każde ze skojarzeń obiektów rzeczywistych pracuje w specyficznych warunkach zależnych od rodzaju części (tłok, tuleja, łożysko) i typu pojazdu. Dlatego, prowadząc badania laboratoryjne, których celem jest poznanie właściwości tribologicznych materiałów kompozytowych przeznaczonych do konkretnych zastosowań, należy tak dobrać maszyny do badań, materiały, kształty próbek i przeciwpróbek oraz warunki badań, żeby odpowiadały warunkom pracy obiektów rzeczywistych. Niewłaściwy dobór warunków badań tribologicznych materiałów kompozytowych pozwoli uzyskać określone wyniki, które jednak nie będą podstawą do poprawnej oceny przydatności tych materiałów do konkretnych zastosowań.

 All rights reserved

Z poznawczego punktu widzenia badania w każdych warunkach są źródłem informacji porównawczej, jeżeli będziemy badać różne materiały w tych samych warunkach, ale ich przydatność do celów inżynierskich będzie mniejsza.

LITERATURA

[1] Śleziona J., Podstawy technologii kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

[2] Sobczak J., Kompozyty metalowe, Wyd. Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków--Warszawa 2001.

[3] Konopka Z., Cisowska M., Mikrostruktura grawitacyjnie odlewanych kompozytów na osnowie stopu AlMg10 z cząstkami grafitu, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 1, 86-88.

[4] Śleziona J., Wieczorek J., Posmyk A., Właściwości tribologiczne kompozytów AK12-Al_2O_3 i AK12-SiC, Kompozyty 98, Częstochowa 1998, 133-138.

[5] Włodarski J. K., Tłokowe silniki spalinowe, Procesy trybologiczne, WKŁ, Warszawa 1982.

[6] Kozaczewski W., Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych, WKŁ, Warszawa 2004.

[7] Franek F., Tribologie rund um das KFZ, Verlag Österreichischer Tribologischer Gesellschaft, Wien 1996.

[8] Posmyk A., Myalski J., Wieczorek J., Neuartige Verbundwerkstoffe mit Aluminiummatrix bestimmt für Verbrennungsmotoren. Tribosysteme in der Fahrzeugtechnik. Verlag der Österreichischen Tribologischen Gesellschaft Copy and Druck GmbH, Wien-Graz 2005, 73-78.

[9] Posmyk A., Materiały kompozytowe w budowie pojazdów, Badania katedralne Katedry Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, Politechnika Śląska, Katowice 2010.

 All rights reserved