

Andrzej Posmyk*, Henryk Bakowski

Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

* Corresponding author. E-mail: andrzej.posmyk@polsl.pl

Otrzymano (Received) 02.02.2009

WPŁYW CZĄSTEK Al_2O_3 W MATERIALE KOMPOZYTOWYM NA ZUŻYCIĘ TRIBOLOGICZNE W BADANIACH MODELOWYCH

Przedstawiono próbę wyjaśnienia mechanizmu zużywania skojarzenia żeliwo EN-GJL-350/kompozyt W6A.15A za pomocą MES. W wyniku przeprowadzonych badań tribologicznych i metalograficznych wyznaczono współczynnik tarcia i zużycie oraz cechy stereologiczne użytego do badań kompozytu. Na podstawie tych wyników opracowano model skojarzenia i przeprowadzono symulację, w wyniku której uzyskano rozkłady naprężeń i odkształceń w skojarzeniu. W obliczeniach MES uwzględniono dwa przypadki, tj. skojarzenie w spoczynku ($\mu = 0$) oraz w ruchu ($\mu = 0,3$). Siłę tarcia rozłożono na 9 składowych, co 1 μm siatki, co powoduje bardziej równomierny rozkład naprężeń. Symulacja obejmowała etap docierania skojarzenia, w którym cząstki fazy zbrojącej Al_2O_3 wystają znacznie nad powierzchnię materiału osnowy. Wyniki obliczeń pokazały, że na styku cząstka zbrojąca-żeliwo panują naprężenia 65 MPa, które są około 20-krotnie większe niż przyłożone naciski 3 MPa. Tak duże naprężenia powodują plastyczne odkształcenia żeliwa i intensyfikują jego zużycie. Siły tarcia wywołują naprężenia styczne dochodzące w skrajnym przypadku do 15 MPa, które przewyższają wytrzymałość na ścinanie materiału w miejscu styku materiału osnowy i cząstek wynoszącą do 10 MPa. Powoduje to obrót cząstek i ich usuwanie z osnowy, co intensyfikuje zużywanie skojarzenia.

Słowa kluczowe: cząstki zbrojące, rozkład naprężeń i odkształceń, kompozyt, żeliwo, zużycie

INFLUENCE OF Al_2O_3 PARTICLES IN COMPOSITE MATERIAL ON MODELING WEAR INVESTIGATIONS

The attempt to explain of the mechanism of wear in pairing cast iron EN-GJL-350/composite W6A.15D using of Finite Elements Methods (FEM) has been presented in this paper. As a result of conducted tribological and metallographic investigations the coefficient of friction, wear rate and stereological parameters of investigated material have been determined. Based on those results, the model of pairing has been elaborated and simulating calculations have been conducted. The assumptions for that model are as follows: the average diameter of reinforcing particles $d = 15 \mu m$, average distance between particles is 25 μm , the surface fraction of alumina particles $A_N = 625 mm^{-2}$, the frictionless case ($\mu = 0$) and friction in air ($\mu = 0.3$). The friction force acting on every particle has been divided by nine (one part per one mesh) what causes homogenous stresses distribution. The models of pairing without and with friction forces has been elaborated. Simulation calculations have shown that the maximum of stresses is in a cast iron on the reinforcing phase edge and in a matrix material, on the border between alumina particles and matrix. The maximum stresses (65 MPa) are 20 times larger then the given load (3 MPa). The first maximum helps to explain the wear intensity of cast iron and the second one helps to explain why some particles are removed from the matrix and make damages of the contact surfaces during the wearing in stage of the sliding. The hard alumina particles protruding over the matrix material cause the wear of sliding partner. Normal load acting on sliding parts causes plastic deformations of cast iron resulting in its intensive abrasion wear. Friction force acting tangential to the rubbing surface causes a formation of a rotation moment on the reinforcing particle that tries to rotate the particle. When the rotating moment is greater then the adhesion between matrix material and particle cams to hers removal from the matrix. One removed ceramic particle causes great damages in sliding surfaces of cast iron and aluminium alloy matrix.

Keywords: reinforcing particle, distribution of stresses and strains, composite, cast iron, wear

WPROWADZENIE

Rozwój technicznych środków transportu w ostatnich latach XX wieku był możliwy m.in. dzięki materiałom o coraz lepszych właściwościach użytkowych, w tym wytrzymałościowych i tribologicznych. Do takich materiałów można zaliczyć z pewnością kompozyty. Nowe tworzywa konstrukcyjne zanim zostaną wprowadzone

do produkcji podzespołów pojazdów i szerszego stosowania, powinny zostać przebadane w warunkach laboratoryjnych i w obiektach rzeczywistych. Wiele informacji na temat właściwości kompozytów można uzyskać, stosując, oprócz badań wytrzymałościowych i tribologicznych, badania symulacyjne pozwalające na określenie

wyężenia materiału w miejscu styku współpracujących elementów [1]. Badania takie mają szczególne znaczenie dla wyjaśnienia mechanizmów zużycia kompozytów na osnowie stopów metali o małej twardości, zbrojonych cząstkami ceramicznymi, takimi jak Al_2O_3 i SiC. W miejscu styku cząstek z partnerem panują lokalnie duże naprężenia, które przekraczają granice plastyczności. Zastosowanie MES umożliwia wyznaczenie głębokości zalegania maksymalnych naprężeń i odkształceń na podstawie uzyskanych rozkładów. Znając właściwości mechaniczne badanych materiałów, można określić wartości dopuszczalne parametrów eksploatacji, które nie powodują znaczącego zużycia rozpatrywanego skojarzenia.

WARUNKI I PRZEBIEG BADAŃ

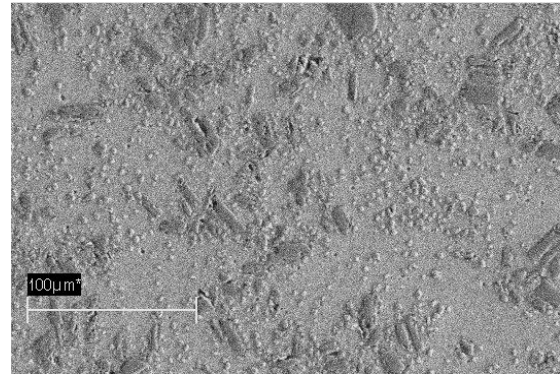
Celem badań było wyjaśnienie mechanizmu zużycia skojarzenia EN-GJL-350/W6A15A na podstawie znajomości cech stereologicznych kompozytu. Badania wykonano dwuetapowo, tj. w pierwszym etapie określono cechy stereologiczne kompozytu, współczynnik tarcia i intensywność zużycia, a w drugim opracowano model skojarzenia przy użyciu oprogramowania Algor bazującego na metodzie elementów skończonych (MES) [2, 3].

Do badań użyto żeliwa EN-GJ-L-35 stosowanego na pierścienie tłokowe silników spalinowych oraz kompozytu W6A15A, z którego wykonuje się tuleje cylindrowe silników małej mocy. Osnowę kompozytu stanowi stop EN-AC-6061 zbrojony cząstkami Al_2O_3 . Widok powierzchni kompozytu oraz profile chropowatości powierzchni przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku 1c pokazano profil 2D, na którym można rozpoznać pojedyncze cząstki Al_2O_3 wystające ponad osnowę, które uwzględniono w modelu MES. Na wierzchołkach tych cząstek opiera się współpracujące żeliwo (rys. 2). Do wyjaśnienia mechanizmu zużycia jest potrzebna znajomość lokalnych naprężeń i odkształceń panujących w styku. Rozkłady te wyznaczono, stosując MES. Do opracowania modelu skojarzenia przyjęto następujące założenia:

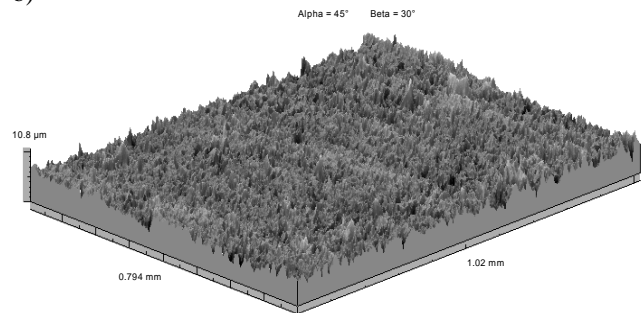
- tarcie ślizgowe w skojarzeniu odwzorowującym warunki pracy pary żeliwny pierścień tłokowy/kompozytowa tuleja cylindrowa;
- współczynnik tarcia przyjmuje skrajne wartości odpowiadające stanowi spoczynku ($\mu = 0$) i warunkom tarcia technicznie suchego ($\mu = 0,3$);
- udział powierzchniowy cząstek FZ wynosi $A_N = 625 \text{ mm}^{-2}$;
- cząstki mają idealny kształt sferyczny;
- średnia średnica cząstek FZ $d = 15 \text{ }\mu\text{m}$;
- średnia odległość między cząstkami FZ $25 \text{ }\mu\text{m}$;
- cząstki FZ wystają nad powierzchnię osnowy do wysokości nie większej niż promień cząstki ($<7,5 \text{ }\mu\text{m}$);

- cząstki FZ są zużyte w niewielkim stopniu w wyniku obróbki skrawaniem, a promień powierzchni zużycia wynosi $5 \text{ }\mu\text{m}$.

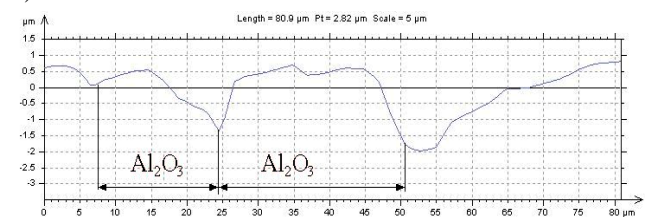
a)



b)



c)

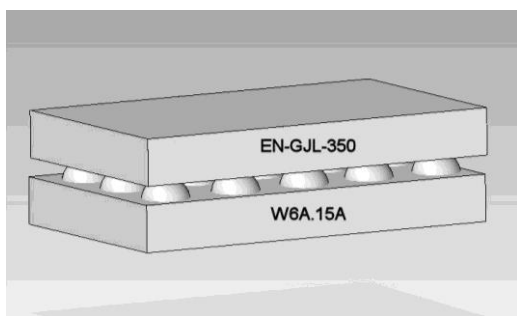


Rys. 1. Powierzchnia kompozytu z wystającymi nad osnowę cząstkami FZ (a) oraz profile chropowatości 3D (b) i 2D (c)

Fig. 1. Surface of composite material with RP-particle protruding over the matrix surface (a) and roughness profile 3D (b) and 2D (c)

Badania tribologiczne przeprowadzono na stanowisku symulującym rozruch zimnego silnika spalinowego, w którym żeliwna próbka ślizga się ruchem posuwistozwrotnym (jak pierścień po gładzi tulei cylindrowej) po przeciwpróbce wykonanej z kompozytu. Do badań przyjęto prędkość pierścienia względem tulei w punktach zwrotnych tłoka ($v = 1 \text{ m/s}$), ponieważ w tych warunkach jest największe zużycie. Nacisk próbki na przeciwpróbkę ($p = 3 \text{ MPa}$) odpowiada naciskowi pierścienia uszczelniającego w silniku pojazdu osobowego o mocy około 100 kW .

Rozruch zimnego silnika charakteryzuje się tym, że w skojarzeniu brakuje oleju. Dlatego siły tarcia są duże, co powoduje podczas docierania skojarzenia szybkie usuwanie cząstek FZ wystających najwyżej ponad materiał osnowy.



Rys. 2. Model bryłowy skojarzenia EN-GJL-350/W6A.15A
Fig. 2. Solid model of pairing EN-GJL-350/W6A.15A



Rys. 3. Powierzchnia kompozytu po współpracy ślizgowej z żeliwem (zniszczenie spowodowane usunięciem cząstką FZ)
Fig. 3. Composite surface after sliding against cast iron (damages caused by removed RP)



Rys. 4. Powierzchnia żeliwa po współpracy z kompozytem (ślady zużycia ściernego przez cząstki Al_2O_3 w postaci wzdłużnych rys zaznaczonych strzałkami)
Fig. 4. Cast iron surface after sliding against composite (traces of abrasive wear caused by Al_2O_3 particles as long scratches signed with arrows)

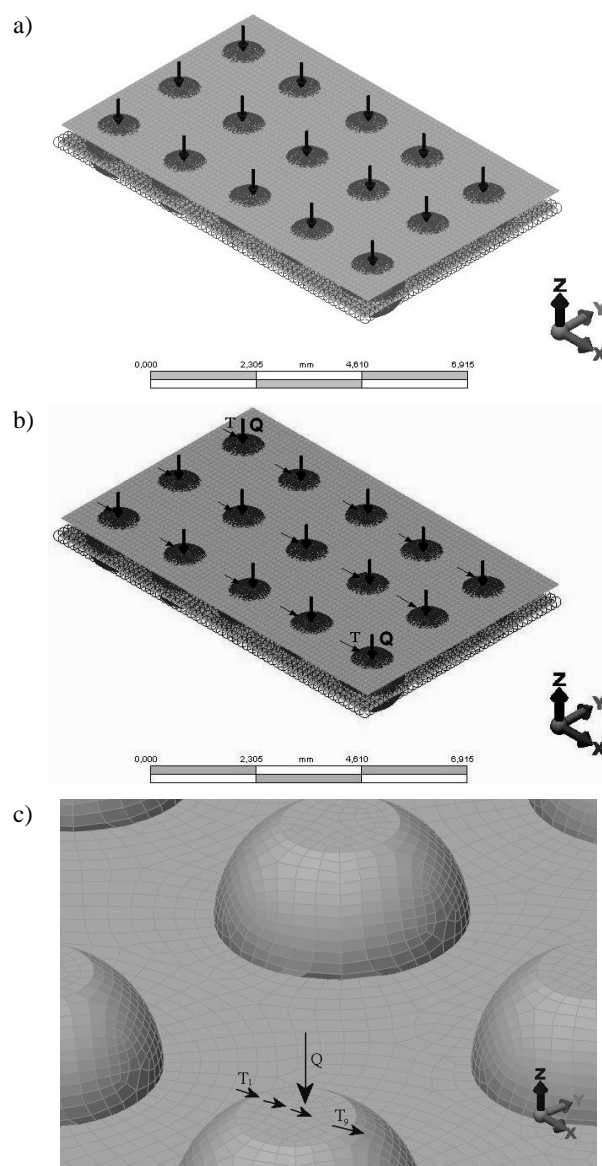
Założono skrajny przypadek, tj. skojarzenie pracuje bez oleju oraz jest smarowane niewielką ilością mgły olejowej (2 mg/cm^2 co 30 minut). Do obliczeń symulacyjnych przyjęto, że podczas spoczynku siła tarcia wynosi zero ($\mu = 0$).

WYNIKI BADAŃ

Podczas badań tribologicznych wyznaczono współczynnik tarcia i zużycie oraz wykonywano obserwacje mikroskopowe powierzchni po współpracy. Na podstawie badań stwierdzono, że współczynnik tarcia w sko-

jarzeniu EN-GJL-350/W6A.15A w warunkach tarcia technicznie suchego może osiągać wartość maksymalną 0,3, a przy smarowaniu ograniczonym 0,05. Dlatego do budowy modelu przyjęto jako najmniejszą wartość $\mu = 0$ (dla $v = 0 \text{ m/s}$) oraz jako największą $\mu = 0,3$. Wybrane wyniki obserwacji mikroskopowych powierzchni przed i po tarcii zamieszczono na rysunkach 1, 3-4.

Do wyjaśnienia mechanizmu zużywania wykorzystano model opracowany z wykorzystaniem oprogramowania Algor. Model powierzchni tarcia kompozytu w skojarzeniu z żeliwem wraz z przyłożonymi obciążeniami normalnymi (Q) przedstawiono na rysunku 5a (bez sił tarcia) i 5b (z siłami tarcia T). Siłę tarcia rozłożono na 9 składowych (od T_1 do T_9), po jednej w każdym węźle siatki co $1 \mu\text{m}$ (rys. 5c). Wyznaczone MES rozkłady naprężeń i odkształceń przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

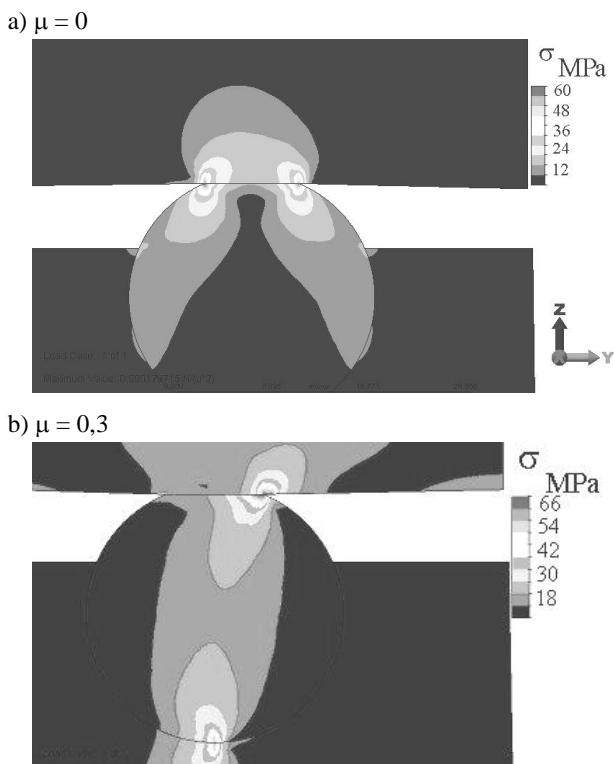


Rys. 5. Model powierzchni tarcia kompozytu po zużyciu wierzchołków cząstek FZ: a) bez sił tarcia, b) z siłami tarcia, c) rozkład siły tarcia na cząstce FZ

Fig. 5. Frictions surface model of composite material with worn tops of reinforcing phase: a) without friction force, b) with friction force, c) distribution of friction forces on reinforcing phase

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Z przedstawionych na rysunkach 6 i 7 rozkładów naprężeń i odkształceń wynika, że podczas docierania skrajzenia ma miejsce styk żeliwa z najwyższymi cząstkami FZ. W wyniku tego styku w żeliwie i w cząstkach zbrojących powstają naprężenia zredukowane dochodzące do 60 MPa bez uwzględnienia sił tarcia (rys. 6a) i do 65 MPa po uwzględnieniu sił tarcia (rys. 6b, od prawej do lewej strony) podczas współpracy w warunkach tarcia technicznie suchego ($\mu = 0,3$). Wartości te przekraczają dwudziestokrotnie naciski konturowe (3 MPa).

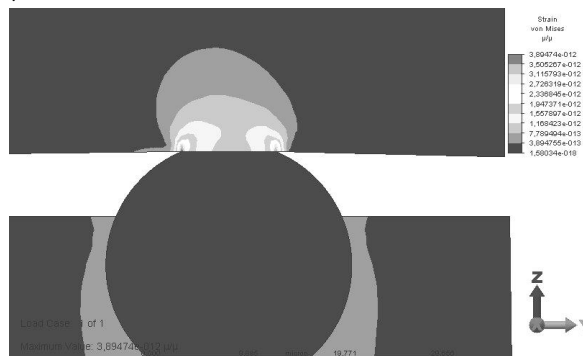


Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych w styku żeliwa cząstka FZ bez sił tarcia (a) i z siłami tarcia (b)

Fig. 6. Distribution of reduced stresses in contact zone between cast iron and RP particle without friction (a) and with friction forces (b)

Skutki uwolnionej cząstki w strefie tarcia pokazano na rysunku 3. Bardzo twarda cząstka Al_2O_3 była wgniatana w materiał osnowy, powodując jego znaczne deformacje, których wymiar zależy od średniej średnicy cząstki i od nacisku na nią. Dodatkowo siła tarcia działająca na ramieniu równym wysokości części cząstki wystającej nad powierzchnię osnowy daje moment (wywołujący naprężenia styczne 16 MPa), który próbuje spowodować obrót cząstki wokół własnej osi, odkształcając materiał osnowy (rys. 7b). Jeżeli moment obrotu jest większy od momentu utwierdzenia cząstki w osnowie, to następuje obrót cząstki i jej uwolnienie z osnowy i wgniatanie w materiał osnowy, powodując jego znaczne deformacje. Wymiar deformacji zależy od średniej średnicy cząstki i od nacisku na nią. Wartość momentu utwierdzenia zależy od wytrzymałości strefy na granicy faz cząstka/osnowa.

a) $\mu = 0$



b) $\mu = 0,3$



Rys. 7. Rozkład odkształceń w styku żeliwa cząstka FZ bez sił tarcia (a) i z siłami tarcia (b)

Fig. 7. Strains distribution in contact zone between cast iron and RP particle without friction (a) and with friction forces (b)

Z literatury [4] wynika, że wytrzymałość pomiędzy osnową a fazą zbrojącą w postaci włókien z tlenku glinu nie przekracza 10 MPa (mniejsze niż wyliczone naprężenia). Dlatego większość cząstek FZ wystających ponad osnowę powyżej wartości granicznej jest usuwana z osnowy. Taka cząstka przebywa przez jakiś czas pomiędzy współpracującymi powierzchniami i może spowodować intensywne zużycie wtórne przez bruzdowanie zarówno powierzchni żeliwa, jak i kompozytu.

Duże naprężenia w miejscu styku żeliwa z cząstką powodują znaczne odkształcenia żeliwa na krawędziach styku z cząstką Al_2O_3 (rys. 7) i intensyfikują jego zużycie. Ostre i bardzo twarde cząstki Al_2O_3 wystające ponad powierzchnię materiału osnowy działają na powierzchnię współpracującego żeliwa jak ściernica, powodując intensywniejsze zużycie ściernie, co pokazano na rysunku 3. Intensywność zużycia żeliwa zależy od kształtu cząstek. Najmniejsze jest, gdy cząstki mają kształt sfer, np. w kompozycie Comral [5], a największe, gdy FZ ma kształt nieforemnych wielościanów z ostrymi krawędziami.

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie oprogramowania Algor i MES pozwoliło określić maksymalne wartości lokalnych naprężeń i odkształceń materiału osnowy kompozytu i współpracującego z nim żeliwa. Z przeprowadzonych obliczeń

na wykonanym modelu wynika, że na etapie docierania w badanym skojarzeniu - po wywarciu nacisku konturowego 3 MPa - panują lokalnie duże naprężenia w żeliwie w miejscu styku z wierzchołkiem cząstki fazy zbrojącej (rys. 6) oraz w materiale osnowy - wokół cząstki. Naprężenia te przekraczają 20-krotnie wielkości zadane (3 MPa). Powoduje to intensywne zużywanie ściernie żeliwa oraz zużywanie zmęczeniowe na styku FZ/osnowa wspomagające usuwanie cząstek FZ z osnowy. Zmniejszenie ilości cząstek FZ zwiększa udział zużywania adhezyjnego przez sczepianie pierwszego rodzaju.

Opracowany model nie uwzględniał rzeczywistych wartości wytrzymałości strefy na granicy cząstka FZ-osnowa, co jest jego wadą, pozwolił jednak wyjaśnić przyczyny zużywania skojarzenia.

Obliczone wartości naprężeń odnoszą się do przypadku, w którym wszystkie cząstki fazy zbrojącej wystają na taką samą wysokość nad osnowę i na nich opiera się partner żeliwny. W rzeczywistości część cząstek znajduje się poniżej powierzchni styku, co powoduje, że lokalne naciski jednostkowe mogą być jeszcze większe niż obliczono. Określenie ilości cząstek FZ będących w styku z żeliwem wymaga wykonania osobnych badań metalograficznych i symulacyjnych.

Podziękowania

Praca finansowana częściowo z projektu: Ocena właściwości tribologicznych grupy tłok-tuleja cylindrowa wykonanych z materiałów kompozytowych na osnowie stopów aluminium, Nr N N504 488434.

LITERATURA

- [1] Posmyk A., Kształtowanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich tworzyw na bazie aluminium, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2] Ocena właściwości tribologicznych grupy tłok-tuleja cylindrowa wykonanych z materiałów kompozytowych na osnowie stopów aluminium, Grant Nr N N504 488434, Politechnika Śląska, Katowice 2008/2009.
- [3] Bakowski H., Posmyk A, Wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na zużycie elementów skojarzenia toczno-ślizgowego w obecności płynu, Badania Własne Katedry Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Śląskiej BW - 510/RT1/2008, Katowice 2008.
- [4] Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H. P., Entwicklung von Endlosfaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Raumfahrttechnik, Oberflächen Werkstoffe Nr. 5 Zürich 1995, 8-10.
- [5] Posmyk A., Kształtowanie właściwości tribologicznych materiałów kompozytowych, Inżynieria Materiałowa 2006, 2(150), 69-74.