

Andrzej POSMYK*, Henryk BĄKOWSKI*

**MECHANIZM ZUŻYWANIA W SKOJARZENIU
ŻELIWO SZARE-KOMPOZYT ZBROJONY
CZĄSTKAMI Al_2O_3**

**WEAR MECHANISM IN PAIRING GREY CAST
IRON – Al_2O_3 PARTICLES REINFORCED COMPOSITE**

Słowa kluczowe:

zużywanie, żeliwo, kompozyt, MES, modelowanie, tlenek glinu

Key-words:

wear, cast iron, composite material, FEM, modelling, aluminium oxide

Summary

W pracy przedstawiono mechanizm zużywania skojarzenia żeliwo–kompozyt. Żeliwo jest stosowane na pierścienie tłokowe silników spalinowych, a kompozyt na tuleje cylindrowe silników małej mocy. Osnową kompozytu jest stop EN-AW-6062, a fazą zbrojącą są cząstki tlenku glinu. Do wyjaśnienia mechanizmu zbudowano model skojarzenia, wykorzystując metodę elementów skończonych. W modelu uwzględniono

* Politechnika Śląska, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, ul. Z. Krasieńskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 032 603 41 87, 032 603 41 58 e-mail: andrzej.posmyk@polsl.pl; henryk.bakowski@polsl.pl.

zmianę wytrzymałości na styku materiałów osnowy i cząstek fazy zbrojącej. Symulacja z wykorzystaniem zbudowanego modelu pozwoliła wyznaczyć rozkład naprężeń i odkształceń w żeliwie i kompozycie w pobliżu cząstki zbrojącej. Z otrzymanego rozkładu wynika, że w żeliwie w pobliżu cząstek fazy zbrojącej panują naprężenia przekraczające granicę plastyczności żeliwa, co prowadzi do przyspieszonego zużycia żeliwa na etapie docierania skojarzenia. Siły tarcia generują moment, który obraca cząstki słabo związane z osnową. Cząstki usunięte z osnowy powodują zużycie przez brzdowanie zarówno żeliwa, jak i materiału osnowy.

WPROWADZENIE

W budowie maszyn coraz więcej miejsca zajmują materiały kompozytowe na osnowie metali lekkich. Jest to możliwe dzięki m.in. ich małej gęstości, większej wytrzymałości i odporności na zużycie niż materiałów osnowy oraz mniejszej rozszerzalności cieplnej. Wśród materiałów kompozytowych z osnową metalową najwięcej miejsca zajmują kompozyty na osnowie stopów aluminium [L. 1, 2]. Kompozyty te są wykonywane zarówno ze stopów do przeróbki plastycznej, jak i ze stopów odlewniczych. Najczęściej jako fazę zbrojącą (FZ) stosuje się wielościany nieforemne z tlenku glinu (Al_2O_3) w ilości od 10 do 22% oraz podobne wielościany z węgla krzemu (SiC) w ilości nawet do 60%. Wskutek zastosowania materiałów kompozytowych na części maszyn współpracujące ślizgowo w strefie styku pojawiają się określone problemy, które decydują o mechanizmie i intensywności zużycia zarówno kompozytu, jak i współpracującego z nim partnera, np. żeliwa. Podstawowym problemem jest bardzo duża różnica twardości materiału osnowy (80 HB) i fazy zbrojącej (3600–5000 MPa). Różnica ta powoduje, że cząstki FZ wystają nad powierzchnię osnowy do kilku mm powodując, na etapie docierania, lokalne koncentracje naprężeń i odkształceń, które intensyfikują zużycie obydwóch partnerów, w tym intensywne zużycie ściernie żeliwa. Siły tarcia wywierają moment obrotowy na cząstki wystające ponad osnowę, próbując je obrócić. Jeżeli moment utwierdzenia cząstek w osnowie jest mniejszy niż moment obrotowy od sił tarcia, to cząstki zostają usunięte z osnowy. Luźno przemieszczające się pomiędzy partnerami cząstki są wciskane przez twarde żeliwo w materiał osnowy, powodując jego zużycie przez brzdowanie.

Stosując Metodę Elementów Skończonych można wyznaczyć rozkłady naprężeń i odkształceń lokalnych wokół cząstek fazy zbrojącej i określić, które cząstki zostaną usunięte podczas docierania, a które będą zużywały ściernie żeliwo. O usuwaniu cząstek FZ decyduje wytrzymałość na ścinanie strefy przejściowej pomiędzy cząstką a osnową. W budowanym modelu uwzględniono istnienie takiej strefy. Pozwoli to wyjaśnić mechanizm zużywania w skojarzeniu żeliwo–materiał kompozytowy. Tym zagadnieniom jest poświęcony artykuł.

MODEL SKOJARZENIA ŻELIWO–KOMPOZYT

Na potrzeby tego opracowania przyjęto porównanie trzech przypadków skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy silnika spalinowego–kompozytowa gładź tulei cylindrowej, tj.:

- 1) skojarzenie jest w spoczynku i współczynnik tarcia jest równy zero, na styku cząstki fazy zbrojącej z materiałem osnowy nie występuje strefa przejściowa, **Rys. 2A**;
- 2) skojarzenie jest w ruchu i współczynnik tarcia jest równa 0,2, na styku cząstki fazy zbrojącej z materiałem osnowy nie występuje strefa przejściowa, **Rys. 2b**;
- 3) skojarzenie jest w ruchu i współczynnik tarcia jest równy 0,2, na styku cząstki fazy zbrojącej z materiałem osnowy występuje strefa przejściowa, której wytrzymałość na ścinanie przyjmuje wartość średnią $\tau = 10$ MPa, **Rys. 3**.

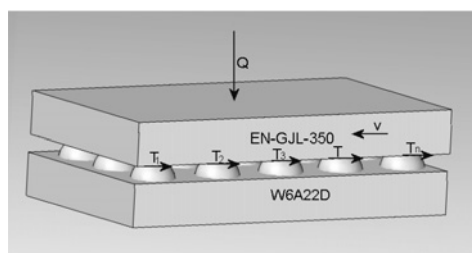
Pierwszy przypadek może wystąpić w spoczynku ($v = 0$), co ma miejsce w silniku w punktach zwrotnych, gdzie panuje największe zużycie. Z drugim i trzecim przypadkiem mamy do czynienia, gdy uruchamiany silnik jest zimny i smarowanie rozbryzgowe nie jest wystarczające, ponieważ lepkość oleju jest zbyt duża. Między przypadkiem drugim i trzecim jest podstawowa różnica w pracochłonności budowy modelu. Uwzględnienie strefy przejściowej wymaga przyjęcia odpowiednich uproszczeń tej strefy oraz pomaga wyjaśnić przyczyny usuwania cząstek fazy zbrojącej z materiału osnowy podczas docierania skojarzenia. Wymaga to jednak znajomości stałych materiałowych tej strefy, których wyznaczenie nie jest łatwe. Dlatego autorzy posłużyli się danymi z literatury opublikowanej przez szwajcarski instytut EMPA, w którym opracowano specjalną metodę określania wytrzymałości na granicy włókno–osnowa metodą wypychania pojedynczego włókna [**L. 3**].

W ramach tego artykułu jest rozpatrywany kompozyt na osnowie stopu EN-AW-6062 zawierającego 22% cząstek tlenku glinu jako fazy zbrojącej. Dla uproszczenia modelowania cząstki przyjęto za sfery. W kompozycie rzeczywistym cząstki mają kształt wielościanu nieforemnego o dość ostrych krawędziach, które powodują, że naprężenia lokalne są jeszcze większe niż obliczone przy użyciu modelu sferycznego. Wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie na granicy cząstka–osnowa analizowanego kompozytu wymagałoby budowy specjalnego stanowiska wykorzystującego mikrozinganie cząstki utwardzonej sztywno w osnowie. Badania takie zostaną wykonane w późniejszym terminie [L. 4].

Potrzebny do symulacji skojarzenia żeliwo–kompozyt model zbudowano przyjmując następujące założenia:

- średnia wartość współczynnika tarcia w skojarzeniu $\mu = 0,2$,
- średnie naciski jednostkowe w skojarzeniu odpowiadają naciskom pierwszego pierścienia (żeliwo) tłokowego na gładź tulei cylindrowej (kompozyt) silnika o mocy 100 kW,
- powierzchnia żeliwa współpracująca z kompozytem ma bardzo małą chropowatość (po dotarciu skojarzenia $R_a < 0,05 \mu\text{m}$);
- powierzchnia kompozytu ma dwupłaszczyznową budowę, tj. jedną płaszczyznę stanowi materiał osnowy, a drugą wystające z niego cząstki fazy zbrojącej;
- wierzchołki cząstek FZ są zużyte tak, że promień powierzchni styku z żeliwem nie przekracza 5 mm,
- wytrzymałość na ścinanie na styku cząstki fazy zbrojącej z osnową jest niewielka (5–15 MPa; średnio 10 MPa).

Do budowy modelu wykorzystano oprogramowanie MSC. Software bazujące na Metodzie Elementów Skończonych [L. 5].

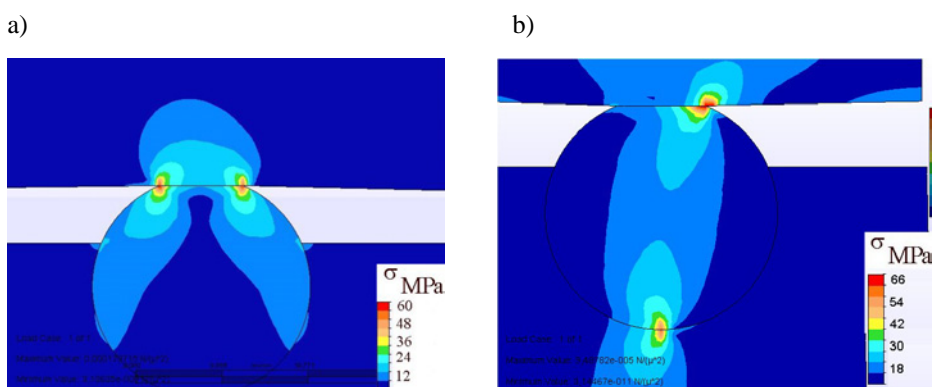


Rys. 1. Model bryłowy skojarzenia EN-GJL-350- W6A22D (v – prędkość ślizgania, Q – obciążenie, T – składowe siły tarcia na poszczególnych cząstkach fazy zbrojącej)

Fig. 1. Solid model of EN-GJL-350- W6A22D pairing (v – rubbing velocity, Q – load, T – partial friction forces on reinforcing phase particles)

MECHANIZM ZUŻYWANIA

Na etapie docierania skojarzenia podczas współpracy żeliwa z kompozytem na powierzchni wystającej cząstki tlenku glinu powstaje siła tarcia, która działając na ramieniu równym wysokości części cząstki wystającej nad powierzchnię osnowy (do 3 μm , **Rys. 1**) stara się obrócić cząstkę. Ponieważ na styku materiału osnowy z cząstką FZ podczas wytwarzania kompozytu powstaje strefa przejściowa o małej wytrzymałości na ścinanie (średnio 10 MPa), to moment potrzebny do ścięcia takiego połączenia nie jest duży. Na etapie docierania skojarzenia lokalne siły tarcia pomiędzy żeliwem i powierzchnią cząstek tlenku glinu są wystarczająco duże, żeby zniszczyć połączenie osnowy z cząstkami wystającymi z osnowy na wysokość nazwaną krytyczną.



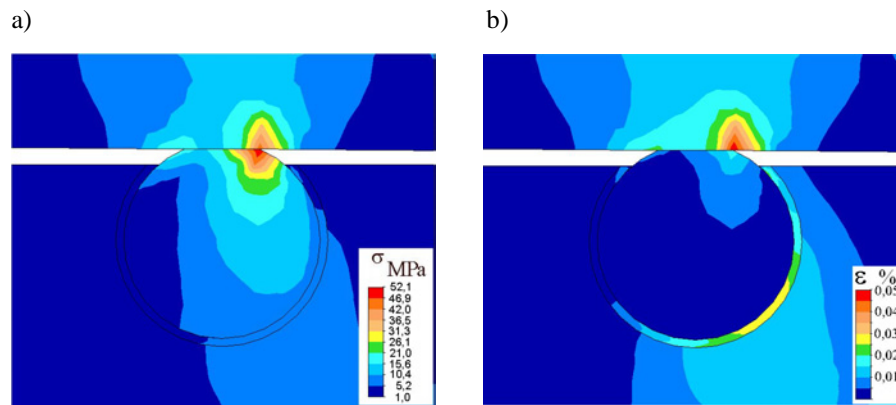
Rys. 2. Rozkład naprężeń lokalnych w pobliżu cząstki tlenku glinu w skojarzeniu EN-GJL-350-W6A22D (a – bez sił tarcia i strefy przejściowej, b – z siłami tarcia i bez strefy przejściowej)

Fig. 2. Distribution of local stresses near of alumina particle in EN-GJL-350-W6A22D pairing (a – without friction forces and transition layer, b – with friction forces and transition layer)

Po dotarciu i usunięciu wystających ponad osnowę cząstek Al_2O_3 ma miejsce normalna współpraca, w której dominuje zużywanie ściernie. Twarde cząstki FZ skrawają żeliwo (**Rys. 4b**), ulegając przy tym zużyciu, w wyniku którego ostre krawędzie zostają złagodzone.

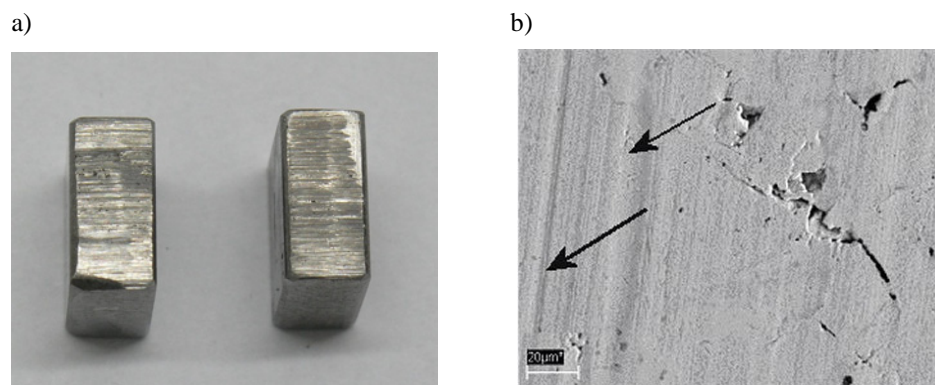
Naprężenia zredukowane w strefie przejściowej mają wartość od 1 do 26 MPa (**Rys. 3a**), co przekracza lokalnie wytrzymałość na ścinanie i prowadzi do próby obracania cząstki FZ. Po wielokrotnym „przejściu” wykonującego ruch rewersyjny pierścienia żeliwnego następuje zniszczenie war-

stwy przejściowej i utrata spójności między cząstką a osnową. Zniszczenie połączenia prowadzi do uwolnienia cząstek Al_2O_3 , których twardość jest przyczyną zużycia przez brzdowanie zarówno materiału osnowy, jak i żeliwa (**Rys. 4**). Niektóre cząstki mogą zostać inkludowane do żeliwa i jeszcze bardziej zwiększać intensywność zużycia osnowy kompozytu.



Rys. 3. Rozkład lokalnych naprężeń (a) i odkształceń (b) w pobliżu cząstki tlenku glinu w skojarzeniu EN-GJL- 350-W6A22D (z siłami tarcia i strefą przejściową)

Fig. 3. Distribution of local stresses near of alumina particle in EN-GJL-350-W6A22D pairing (a – with friction forces and transition layer, b – with friction forces and transition layer)



Rys. 4. Powierzchnia żeliwnego pierścienia tłokowego po współpracy ślizgowej z kompozytem zawierającym cząstki Al_2O_3 (a – makrofotografia, b – SEM, strzałkami zaznaczono ślady po zużyciu przez brzdowanie)

Fig. 4. Surface of cast iron piston ring after rubbing against composite including Al_2O_3 particles (a – macrograph, b – SEM, with arrows are the plastic deformations tracks marked)

PODSUMOWANIE

Wykorzystując Metodę Elementów Skończonych, można zbudować przybliżony model skojarzenia żeliwo–kompozyt, który pozwoli określić lokalne rozkłady naprężeń i odkształceń. Dzięki znajomości naprężeń i odkształceń można lepiej zrozumieć mechanizm zużywania zarówno żeliwa, jak i kompozytu na etapie docierania i współpracy zasadniczej. Znajomość mechanizmu zużywania pozwoli tak zaprojektować proces wytwarzania części maszyn, żeby intensywność ich zużywania była mniejsza, co wydłuży trwałość maszyn.

LITERATURA

1. Ramesh C.S., Safiulla M.: Wear behavior of hot extruded Al6061 based composites. *Wear* 263 (2007) 629–635.
2. Kannan S., Kishawy H.A.: Surface characteristics of machined aluminium metal matrix composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 2017–2025.
3. Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H.P.: Grenzflächenuntersuchungen an endlosverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für die Raumfahrttechnik. *Oberflächenwerkstoffe* Nr 5, 1995, 8–10.
4. Posmyk A.: Materiały kompozytowe w budowie pojazdów. *Badania Katedralne RT1 2009*, Wydział Transportu, Polit. Śl. Katowice 2009.
5. Bąkowski H.: Określenie mechanizmu zużywania stali szynowej w styku toczno-ślizgowym na podstawie wymiaru i kształtu płatkowych produktów zużycia. *Badania własne RT1 2009*, Wydział Transportu, Polit. Śl. Katowice 2009.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The wear mechanism of cast iron-composite material pairing was presented in this paper. Cast iron has been used for piston rings production and composite material for cylinder liners. The matrix of the composite is 6062 alloy and as the reinforcing phase aluminium oxide particles has been used. For an explanation of the wear mechanism the, Finite Elements Method has been used. Three cases have been analysed: first, without movement ($\mu = 0$) and without the transient layer, second, with movement ($\mu = 0,2$) and without the

transient layer, third, with movement ($\mu = 0,2$) and with the transient layer. Simulation with the use of a build model allowed us to achieve the distribution of stresses and strains. From the calculated distribution of stresses, it results that the stresses in cast iron near of reinforcing phase particles are higher then the yield strength of cast iron. This lead to accelerated wear of cast iron during the wear-in phase of the rubbing pair. The friction forces generate moment, which rotates the reinforcing particles with weak adherence to the matrix material. Particles are removed from the matrix cause wear of cast iron and matrix material.