

Andrzej POSMYK*, Henryk BĄKOWSKI*

**MECHANIZM ZUŻYWANIA MODELOWEGO
SKOJARZENIA PIERŚCIEŃ TŁOKOWY–TULEJA
CYLINDROWA WYKONANEGO Z ŻELIWA
I KOMPOZYTU ZBROJONEGO WŁÓKNAMI Al_2O_3
UŁOŻONYMI STYCZNIE DO POWIERZCHNI
TARCIA**

**WEAR MECHANISM OF PISTON CYLINDER LINER
PAIRING MADE OF CAST IRON-COMPOSITE MATERIAL
REINFORCED WITH Al_2O_3 FIBERS PLACED TANGENTIAL
TO WEAR SURFACE**

Słowa kluczowe:

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

Key words:

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono mechanizm zużywania skojarzenia pierścienia tłokowy–tuleja cylindrowa wykonanego z żeliwa i siluminu okołoetek-

* Politechnika Śląska, Wydział Transportu, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8,
Corresponding autor: andrzej.posmyk@polsl.pl.

tycznego zbrojonego włóknami z tlenku glinu. Żeliwo szare lub sferoidalne jest stosowane na pierścienie tłokowe silników spalinowych, a kompozyt na osnowie siluminu na tuleje cylindrowe silników spalinowych. Osnową kompozytu jest stop EN-AC-4700, a fazą zbrojącą są włókna tlenku glinu. Zadaniem fazy zbrojącej jest zmniejszenie skłonności do szepiania adhezyjnego żeliwa z aluminium w osnowie. Podczas współpracy ślizgowej ma miejsce styk powierzchni żeliwa z wystającymi ponad powierzchnię włóknami tlenku glinu. Zawartość tych włókien i ich ułożenie w stosunku do powierzchni tarcia decydują o wartości lokalnych naprężeń i odkształceń, które wywierają istotny wpływ na opory tarcia i mechanizm zużywania skojarzenia. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń lokalnych naprężeń i odkształceń wykonanych MES na modelu, w którym włókna są ułożone stycznie do powierzchni tarcia i prostopadle do kierunku ruchu pierścienia.

WPROWADZENIE

W budowie technicznych środków transportu coraz więcej miejsca zajmują materiały kompozytowe na osnowie metali lekkich i polimerów. Jest to możliwe m.in. dzięki ich mniejszej gęstości niż stopów żelaza, większej wytrzymałości i odporności na zużycie oraz mniejszej rozszerzalności cieplnej niż materiałów osnowy. W budowie technicznych środków transportu najczęściej miejsca zajmują kompozyty na osnowie stopów aluminium. Kompozyty te są wykonywane ze stopów do przeróbki plastycznej zawierających magnez i krzem oraz ze stopów odlewniczych z krzemem. Jako faza zbrojąca (FZ) są używane cząstki tlenku glinu (Al_2O_3) w ilości od 10 do 22% oraz cząstki węgla krzemu (SiC) w ilości do 60% oraz włókna z tlenku glinu maksymalnie do 12–15% zawartości. Cząstki zbrojące są stosowane do umacniania siluminowych tarcz i bębnow hamulcowych, a włókna tulei cylindrowych.

Wykonane z materiałów kompozytowych gładzie tulei cylindrowych silników spalinowych współpracują z żeliwnymi pierścieniami tłokowymi i z płaszczem siluminowego lub stalowego tłoka. Podczas współpracy ślizgowej tych skojarzeń w strefie styku panują lokalnie duże naprężenia, które decydują o mechanizmie i intensywności zużywania zarówno kompozytu, jak i współpracującego z nim partnera. Naprężenia te są wynikiem bardzo dużej różnicy twardości materiałów współpracujących części. Twardość materiału osnowy kompozytu, np. siluminu AC- $AlSi12CuMgNi$ wynosi od 90

do 125 HB [L. 1], a tlenku glinu do 1600 HV (włókien 7 w skali Mohsa). Różnice te powodują, że w wyniku obróbki skrawaniem włókna wystają nad powierzchnię osnowy na wysokość kilku dziesiątych części mikrometra (Rys. 1), powodując, na etapie docierania, lokalne koncentracje naprężeń i odkształceń, które intensyfikują zużywanie obydwóch partnerów, w tym wydzielenie grafitu w żeliwie. Bardzo miękki grafit jest usuwany z warstwy powierzchniowej żeliwa podczas obróbki skrawaniem oraz współpracy ślizgowej z włóknami. Stosując Metodę Elementów Skończonych można wyznaczyć rozkład naprężeń i odkształceń lokalnych wokół włókien zbrojących i określić, jak one zachowują się podczas tarcia i które z nich zostaną usunięte podczas docierania, a które będą rozdzielały osnowę żeliwa od osnowy kompozytu, chroniąc przed zacieraniem [L. 2].

MODEL SKOJARZENIA ŻELIWO-KOMPOZYT

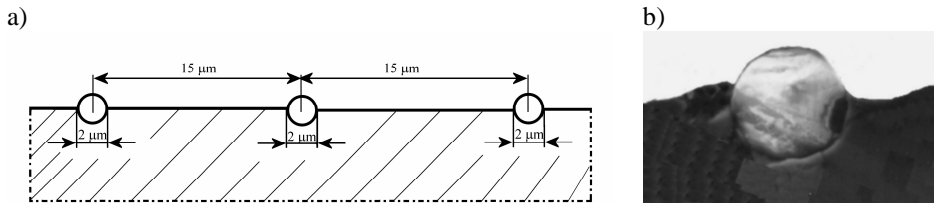
W ramach przeprowadzonych badań przyjęto następujące warunki pracy skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy-kompozytowa gładź tulei cylindrowej:

- tarcie technicznie suche ($\mu = 0,3$), na styku włókna z osnową występuje strefa przejściowa (Rys. 2), której wytrzymałość na ścinanie przyjmuje wartość średnią $\tau = 10$ MPa [L. 3,4],
- tarcie w warunkach ograniczonego smarowania ($\mu \approx 0,1$), tj. 2 mg oleju na cm^2 powierzchni co 30 minut (symulacja warunków rozruchu zimnego silnika),
- pierścień wykonany z żeliwa GJL-350, a tuleja ze stopu AC-47000+15% włókien Al_2O_3 .

Pierwszy warunek współpracy może wystąpić lokalnie, wokół włókna, podczas rozruchu zimnego silnika w górnym martwym punkcie tłoka ($v = 0$), gdzie resztki oleju są zmywane przez paliwo. Drugi z warunków występuje w dolnej części cylindra, gdzie są dostarczane znikome ilości zimnego oleju ze względu na jego dużą lepkość. Uwzględnienie strefy przejściowej pomiędzy włóknem i osnową pomaga wyjaśnić przyczyny usuwania włókien z materiału osnowy podczas docierania skojarzenia.

W ramach tego artykułu jest rozpatrywany kompozyt, w którym włókna są ułożone w płaszczyźnie stycznej do powierzchni tarcia. W kompozycie rzeczywistym włókna są ułożone pod dowolnym kątem

do powierzchni tarcia, mogącym przyjmować dwa skrajne położenia, tj. 0° (włókna równoległe) i 90° (włókna prostopadłe). Wartość kąta ułożenia włókien powoduje, że naprężenia lokalne mogą być większe niż obliczone z użyciem opisywanego modelu.



Rys. 1. Model stereologiczny powierzchni tarcia kompozytu zawierającego włókna (a) i włókno rzeczywiste wystające z osnowy (b)

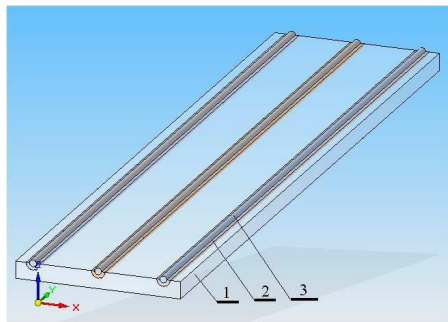
Fig. 1. Stereological model of composite rubbing surface including fibers (a) and a really fiber protruding from the matrix (b)

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

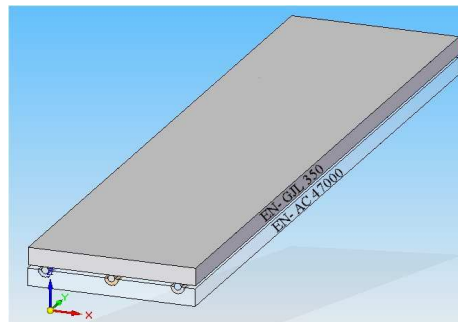
- średnia wartość współczynnika tarcia w skojarzeniu $\mu = 0,3$,
- średnie naciski jednostkowe w skojarzeniu odpowiadają naciskom pierwszego pierścienia tłokowego na gładź tulei cylindrowej silnika o mocy 100 kW i wynoszą 3 MPa,
- powierzchnia żeliwa współpracująca z kompozytem ma bardzo małą chropowatość (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 włókna tlenku aluminium;
- włókna stykają się z żeliwem na tworzącej walca i wystają nad osnowę na wysokość nieprzekraczającą swego promienia ($< 1 \mu\text{m}$),
- wytrzymałość na ścinanie na styku włókien z osnową jest niewielka (średnio 10 MPa).

Do budowy modelu i przeprowadzenia obliczeń rozkładu naprężeń i odkształceń wykorzystano oprogramowanie bazujące na Metodzie Elementów Skończonych. Wyniki obliczeń przedstawiono na **Rysunkach 3 i 4**.

a) kompozyt z włóknami



b) żeliwo we współpracy z kompozytem



Rys. 2. Model bryłowy skojarzenia pierścienia żeliwny–kompozytowa tuleja cylindrowa (1 – osnowa z AC 47000, 2 – strefa przejściowa na granicy faz, 3 – włókno Al_2O_3)

Fig. 2. Solid model of pairing cast-iron piston ring-composite cylinder liner (1 – AC 47000 matrix, 2 – transitional zone, 3 – Al_2O_3 -fibre)

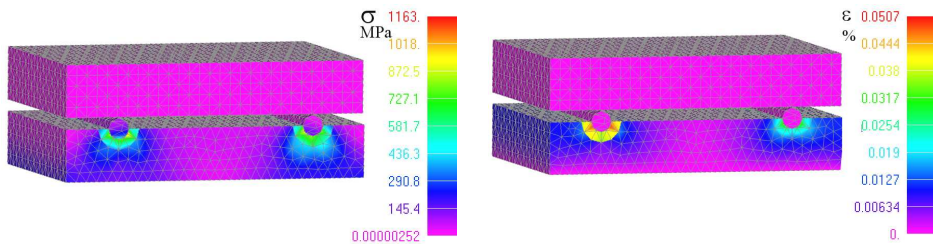
MECHANIZM ZUŻYWANIA

Podczas zimnego rozruchu, znajdującego się na etapie docierania skojarzenia, w górnej części tulei cylindrowej, podczas współpracy żeliwa z kompozytem na powierzchni wystających włókien tlenku glinu panują warunki zbliżone do tarcia technicznie suchego, a siła tarcia działająca na ramieniu równym promieniowi włókna (do $1\ \mu\text{m}$, **Rys. 1**) stara się obrócić włókno. Ponieważ na styku materiału osnowy z włóknami podczas wytwarzania kompozytu powstaje strefa przejściowa o małej wytrzymałości na ścinanie, to moment potrzebny do ścięcia takiego połączenia nie jest duży. Na etapie docierania skojarzenia, lokalne siły tarcia pomiędzy żeliwem i powierzchnią włókna są wystarczająco duże, żeby zniszczyć połączenie osnowy z włóknami wystającymi z osnowy na wysokość krytyczną (**Rys. 4**).

Ze względu na małą rzeczywistą powierzchnię styku naprężenia w pobliżu włókien w osnowie są duże i przekraczają naprężenia dopuszczalne ($\sigma \approx 500\ \text{MPa}$ przy $R_e = 180\ \text{MPa}$, **Rys. 3a**), co powoduje plastyczne deformowanie osnowy w kierunku ruchu pierścienia (**Rys. 4** i **6b**) ułatwiające usuwanie włókien. Usunięte z osnowy kawałki włókien przebywają w strefie tarcia przez ograniczony czas i pracują jak mikroigielki łożyska tocznego, powodując lokalne wygładzanie powierzchni osnowy i łagodząc tarcie (spadek μ do ok. 20 godzin współpracy, **Rys. 5a**). Usuwanie włókien z materiału osnowy zależy od wartości obciążeń i sił tarcia, sił spójności między włóknami i osnową oraz orientacji włókien w stosunku do kierunku tarcia.

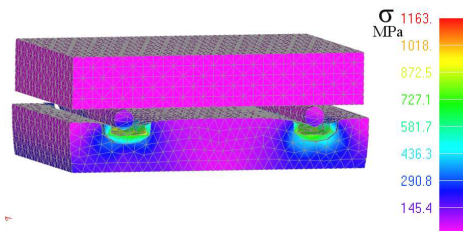
Pozostające w osnowie twarde włókna zużywają ściernie żeliwo, powodując usuwanie z niego grafitu pełniącego rolę stałego środka smarnego do czasu usunięcia produktów zużycia poza strefę tarcia, czemu towarzyszy nieznaczny wzrost μ po 25 h współpracy, **Rys. 5a**.

Naprężenia w żeliwie ($\sigma \approx 100$ MPa, **Rys. 3a**) są znacznie mniejsze niż w osnowie kompozytu, dlatego zużywanie żeliwa jest prawie stałe w czasie przeprowadzonych badań.



Rys. 3. Rozkład lokalnych naprężeń (σ) i odkształceń (ϵ) w skojarzeniu żeliwny pierścień–kompozytowa tuleja cylindrowa ($v = 0$)

Fig. 3. Distribution of local stresses and strains in cast iron piston ring-composite cylinder liner pairing

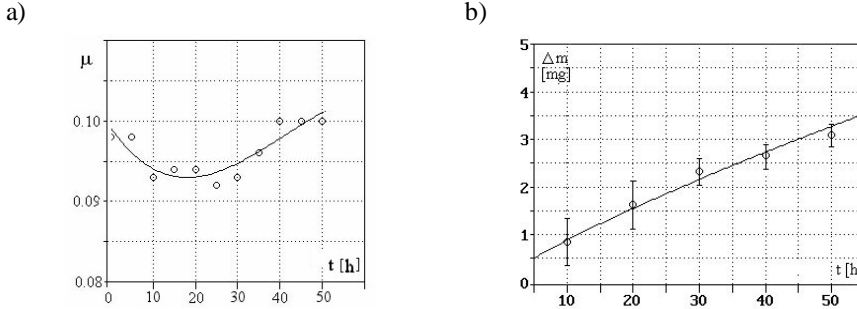


Rys. 4. Odkształcenia osnowy spowodowane siłami tarcia i nacisków ($\mu = 0,3$, $v = 2,5$ m/s, $p = 3$ MPa)

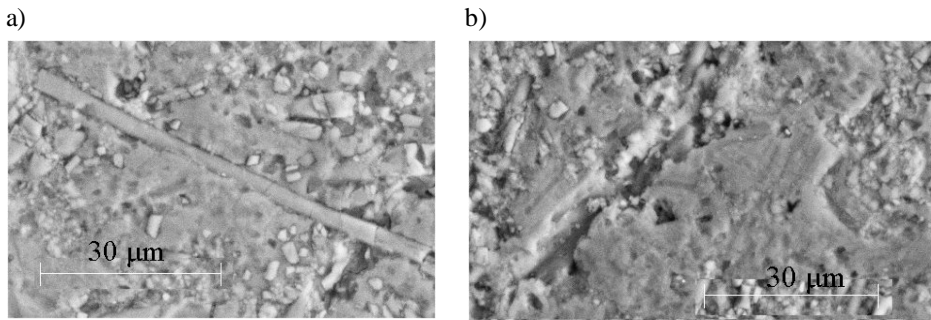
Fig. 4. Deformation of matrix material caused by friction forces and pressures

Na **Rysunku 6a** pokazano pojedyncze włókno ułożone w osnowie prawie równoległe do powierzchni tarcia. Z lewej strony widać niewielkie ślady zużycia części włókna stykającej się z żeliwem. Na **Rysunku 6b** pokazano miejsce po usuniętym włóknie i ślady plastycznego wygładzania osnowy przez luźne włókno. Przestrzenie pomiędzy wystającymi ponad powierzchnię osnowy włóknami i miejsca po wyrwanych włóknach stanowią zasobniki na środek smarny, którego ilości są niewielkie ze względu na ograniczone smarowanie. Generowane podczas tarcia ciepło i mniejsza przewodność cieplna włókien niż osnowy powodują, że na

powierzchni włókien jest wyższa temperatura, co sprzyja migracji oleju z zasobników i łagodzi tarcie oraz zużycie skojarzenia.



Rys. 5. Współczynnik tarcia (a) i ubytek masy żeliwa (b) w badanym skojarzeniu
 Fig. 5. Friction coefficient (a) and loss of piston mass (b) in examined pairing



Rys. 6. Włókno ułożone prawie równoległe do powierzchni tarcia na początku współpracy (a) i miejsce po włóknie usuniętym z osnowy w wyniku tarcia – widoczne wygładzania osnowy luźnym włóknem (b)

Fig. 6. Simple fiber placed near parallel to rubbing surface at the sliding begin (a) and place after fiber removing (b) caused by friction – plastic smoothing of matrix surface by loose fiber to see (b)

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie MES pozwala obliczyć wartości lokalnych naprężeń i odkształceń w skojarzeniu żeliwny pierścieni–kompozytowa tuleja cylindra silnika spalinowego. Wyznaczone wartości wskazują, że lokalnie w osnowie w pobliżu włókien panują naprężenia przekraczające granice plastyczności materiału osnowy. Nie najlepsza zwilżalność włókien przez ciekłą osnowę – podczas wytwarzania – powoduje, że pomiędzy włóknami i osnową powstaje strefa przejściowa, która pogarsza wytrzymałość

połączenia. Sumaryczne oddziaływanie nacisków pierścienia na włókna i sił tarcia powoduje, że podczas współpracy ślizgowej ma miejsce plastyczna deformacja osnowy ułatwiająca usuwanie włókien wystających najwyżej ponad osnowę. Usunięte włókna wygładzają powierzchnie osnowy, a przestrzenie po nich stanowią zasobniki na środek smary, co łagodzi tarcie i zużycie skojarzenia.

LITERATURA

1. MAHLE Zylinderkomponenten. Anwendung, Eigenschaften, Werkstoffe. Verlag Vieweg+Teubner, Stuttgart 2009.
2. Posmyk A., Bąkowski H.: Wpływ cząstek Al_2O_3 w materiale kompozytowym na zużycie tribologiczne w badaniach modelowych. Kompozyty 9: 1 (2009) Częstochowa 2009, 29–33.
3. Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H. P.: Entwicklung von Endlosfaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Raumfahrttechnik, Oberflächen Werkstoffe Nr. 5. Zürich 1995, 8–10.
4. Canumalla S., Dynan S.A.: Mechanical behavior of Mullite fiber reinforced aluminium alloy composites. Journal of Composite Materials, 5 Vol. 29, 1995, 653–669.

Recenzent:

Tadeusz BURAKOWSKI

Summary

The wear mechanism of piston ring-cylinder liner pairing produced from cast iron and eutectic silumine reinforced with alumina fibers has been presented in this paper. Grey or spheroid cast iron is used for the production of piston rings and composite material is used for cylinder liners of combustion engines. EN-AC-4700 –alloy is the matrix of composite and alumina fibers are the reinforcing phase. The function of the reinforcing phase is the decrease of the tendency to adhesion tacking between cast iron and the aluminium matrix. During sliding, the contact exists between cast iron and alumina fibers protruding over the matrix surface. The content of fibers and their orientation to the friction surface determine the level of local stresses and stains, which exercise a significant influence on friction forces and the wear of pairing. The calculated results of local stresses and strains made by MES on the model are presented. The fibers in this model are oriented tangentially to the friction surface and perpendicularly to the direction of movement.