

Henryk BĄKOWSKI

## ANALIZA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ/ODKSZTAŁCEŃ ZA POMOCĄ MES W SKOJARZENIU ŻELIWO-KOMPOZYT W WARUNKACH SMAROWANIA OLEJEM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono model występujący zarówno w skojarzeniu pierścienia tłokowy-tuleja cylindrowa, jak i tłok-tuleja cylindrowa. Rzeczywisty kształt i wielkość fazy zbrojącej ( $Al_2O_3$ ) określono na podstawie badań metalograficznych i statystycznych. W ten sposób odzwierciedlono rzeczywisty kształt twardych cząstek fazy zbrojącej. W badanym skojarzeniu wprowadzono medium smarne w postaci oleju. Przeprowadzone badania symulacyjne miały na celu określenia rozkładu i wartości naprężeń/przemieszczeń w warunkach ekstremalnej eksploatacji.

## DISTRIBUTION OF STRESSES/STRAINS IN CAST IRON-COMPOSITE CONTACT IN LUBRICATED CONDITIONS BY MEANS OF FEM

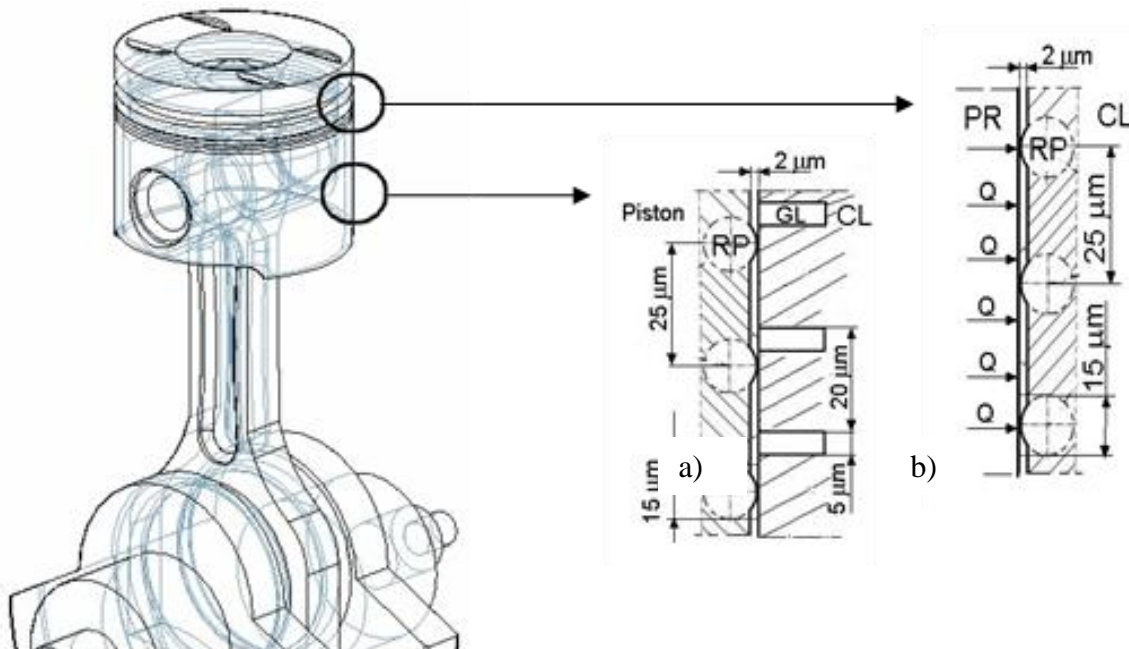
**Summary.** In this paper presented model occurring in piston ring – cylinder liner and piston – cylinder liner. The materials in these contacts were made from composites and cast iron. The real shape and size of reinforcement phases ( $Al_2O_3$ ) in composite were determined on the basis of metallographic and statistic examination. On the basis of these examination could be reconstruction the real shape of reinforcement phase hard particles. The main aims of the simulation research were determination of stresses and strains in extreme service condition.

### 1. WPROWADZENIE

Skojarzenie pierścienie tłokowe-tuleja cylindrów silników spalinowych, pełniące funkcje uszczelniające, narażone są na szczególnie ciężkie warunki pracy. Zwiększenie ich trwałości i niezawodności może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa i obniżenia kosztów eksploatacji oraz do zmniejszenia zanieczyszczeń środowiska. Zjawiska tribologiczne zachodzące w stykach pierścienie-gładź tulei cylindrowej, pierścienie-półki pierścieniowe, płaszcz tłoka-gładź tulei cylindrowej decydują o sprawności i trwałości silnika spalinowego. Straty energii na pokonanie oporów tarcia w tej grupie są szacowane na ponad 20% [1], dlatego prowadzi się badania sprawdzające przydatność nowych materiałów, które charakteryzują się składem chemicznym i topografią powierzchni zmniejszającą negatywne skutki tarcia. Materiałami, których topografia powierzchni po obróbce skrawaniem ułatwia smarowanie, są kompozyty, których zastosowanie do wytwarzania tulei cylindrowych umożliwia zmniejszenie oporów tarcia oraz wydłuża trwałość tulei, przekraczając wartość 1 mln km przebiegu pojazdu. Topografia powierzchni kompozytów zawiera zasobniki na olej, które zwiększają jego adsorpcję na powierzchni tulei, zmniejszając tarcie w grupie tłokowej, co pozwala w decydujący sposób obniżyć koszty eksploatacji pojazdu [2].

Poprawne zamodelowanie, szczególnie fazy zbrojącej ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jest możliwe dzięki wykonaniu analiz metalograficznych, ilościowej i jakościowej, uwzględniających rzeczywisty kształt cząstek. Przeprowadzone badania stereologiczne, na podstawie reprezentatywnej grupy, umożliwiły określenie wybranych cech stereologicznych, tj. kształtu i średniej średnicy fazy zbrojącej, co wykorzystano do budowy modeli przestrzennych [3]. Wprowadzenie oleju zmienia rozkład i wartości naprężeń/odkształceń powstających podczas tarcia w ruchu posuwisto-zwrotnym, dlatego warunki eksploatacji występujące w badanym skojarzeniu (obecność oleju smarnego), a szczególnie rozkład i wartości naprężeń/odkształceń, są różne niż w styku suchym. Wiedza o rzeczywistych naprężeniach w miejscach styku pierścieni tłokowych-tuleja cylindrowa umożliwia wyznaczenie wartości i głębokości zalegania maksymalnych naprężeń, co pozwala na prognozowanie miejsc szczególnie narażonych na zużycie. Wyznaczenie tych miejsc ma szczególne znaczenie w okresie docierania oraz ekstremalnej eksploatacji [4].

Na rysunku 1 przedstawiono wybrane możliwości współpracy różnych materiałów w skojarzeniu ślizgowym. Do badań symulacyjnych wykorzystano typ b.



Rys. 1. Model 3D grupy tłokowej: a) kompozyt-żeliwo, b) żeliwo-kompozyt; RP – cząstka  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , PR – pierścień tłokowy, CL – tuleja cylindrowa, GL – grafit płatkowy

Fig. 1. 3D model of piston group: a) composite-cast iron, b) cast iron-composite; RP – reinforced phase  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , PR – piston ring, CL – cylinder liner, GL – graphite lamellar

Celem artykułu było wyznaczenie rozkładu naprężeń i odkształceń w warunkach tarcia suchego oraz przy minimalnej grubości oleju smarnego, występującego pomiędzy współpracującymi powierzchniami (żeliwo-kompozyt). W przyszłości modyfikowanie właściwości reologicznych cieczy (medium smarnego) będzie umożliwiało prognozowanie rozkładu naprężeń/odkształceń w zależności od procesów starzenia przebiegających w badanym oleju.

## 2. WARUNKI BADAŃ

Badaniu MES poddano skojarzenie ślizgowe odwzorowujące warunki współpracy pierścienia tłokowego z tuleją cylindrową, tj. żeliwa GJL-350 i tulei wykonaną z kompozytu

na osnowie odlewniczego stopu AC-47000, zawierającego 20% cząstek  $Al_2O_3$ . Na podstawie badań metalograficznych określono wybrane cechy stereologiczne, tj. kształt i wymiary fazy zbrojącej oraz ich udział powierzchniowy. Znajomość cech stereologicznych pozwala określić wymiary przestrzeni pomiędzy cząstkami fazy zbrojącej potrzebne do odwzorowania badanego skojarzenia, uwzględniającego medium smarne w postaci oleju. Wybrane właściwości materiałów użytych do badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie wybranych właściwości materiałów użytych w badaniach

| Właściwości                | Żeliwo | AC-47000 | $Al_2O_3$ |
|----------------------------|--------|----------|-----------|
| R <sub>m</sub> ; MPa       | 350    | 280      | 1500      |
| E, GPa                     | 120    | 70       | 370       |
| $\nu$                      | 0,26   | 0,36     | 0,22      |
| $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | 7250   | 2730     | 3200      |

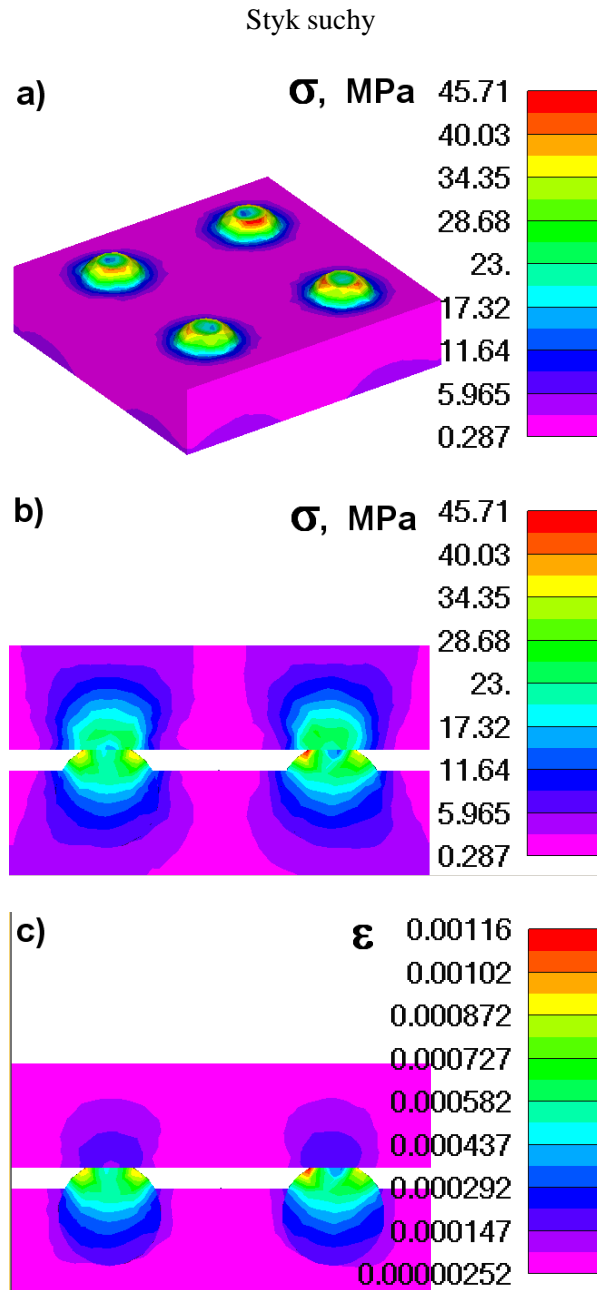
Grubość warstwy oleju przyjęto z literatury [5] i zaproponowano na poziomie 5,5  $\mu\text{m}$ , co odpowiada ekstremalnym warunkom eksploatacji. W badaniach symulacyjnych za pomocą MES poddano analizie styki suchy oraz smarowany skojarzenia pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa. Przeprowadzono badania symulacyjne w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, które panują w silniku spalinowym samochodu osobowego o średniej mocy 100 kW, tj. przy nacisku pierwszego pierścienia uszczelniającego na tuleję cylindrową równym 3 MPa. Prowadzone badania laboratoryjne skojarzeń tribologicznych są dość drogie i wymagają stosowania MES do wyjaśnienia niektórych zjawisk przebiegających w strefie tarcia.

### 3. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

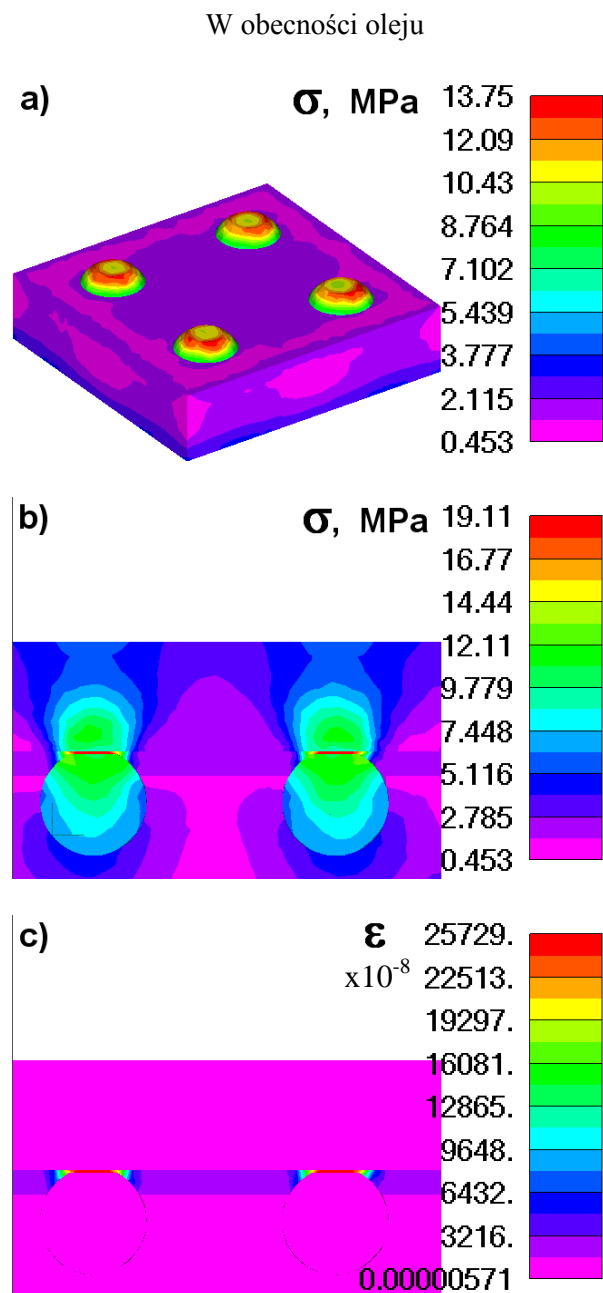
Zastosowanie MES pozwoliło na wyznaczenie rozkładu, wartości naprężeń i odkształceń, a także przemieszczeń występujących w badanym modelu. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Z przedstawionych na rysunku 2 rozkładów naprężeń i odkształceń w skojarzeniu pierścieni–tuleja cylindrowa wynika, że lokalne wartości naprężeń w styku żeliwa z cząstkami fazy zbrojącej znacznie przewyższają wartości nacisków, tj. 3 MPa. Obecność oleju w istotny sposób zmienia warunki współpracy ślizgowej. Przyjęta w założeniach warstewka oleju o grubości 5,5  $\mu\text{m}$ , zamknięta w przestrzeniach pomiędzy cząstkami fazy zbrojącej, zostaje sprężona do ciśnienia ok. 19 MPa. Ciśnienie to powoduje odpychanie pierścienia od powierzchni tulei cylindrowej, co zmniejsza naprężenia do wartości ok. 7-9 MPa. W styku suchym wartości naprężeń są ponad dwukrotnie większe.

Obliczone wartości naprężeń w kompresowanym oleju nie uwzględniają efektu hydrodynamicznego, tj. dodatkowego wzrostu ciśnienia w oleju zamkniętym pomiędzy cząstkami.



Rys. 2. Rozkład naprężeń (a, b) i odkształceń (c) w styku suchym w skojarzeniu ślizgowym  
Fig. 2. Distribution of stresses (a, b) and strains (c) in un-lubricated sliding contact



Rys. 3. Rozkład naprężeń (a, b) i odkształceń (c) w smarowanym skojarzeniu ślizgowym  
Fig. 3. Distribution of stresses (a, b) and strains (c) in lubricated sliding contact

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne z wykorzystaniem MES umożliwiają wyjaśnienie zjawisk zachodzących w styku pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa. Badania te pokazały, że wartości nacisków w obecności oleju są 2 razy mniejsze niż wartości wyliczone dla skojarzenia bez uwzględnienia obecności oleju, co w znacznym stopniu wpływa na zmniejszenie zużycia ilości ciepła generowanego tarcieniem, mimo że przyjęta warstwa oleju odbiega od grubości w normalnych warunkach eksploatacji (wynosi ona od kilkunastu do

kilkudziesięciu mikrometrów). Analiza MES pozwoliła określić miejsce występowania naprężeń/odkształceń oraz ich wartości. Miejsca o maksymalnych wartościach naprężeń/odkształceń mogą prowadzić do występowania zużycia katastroficznego.

### **Bibliografia**

1. Posmyk A., Bąkowski H.: Mechanizm zużywania w skojarzeniu żeliwo szare–kompozyt zbrojony cząstkami  $Al_2O_3$ , *Tribologia*, nr 2, 2009, s. 183-190.
2. Knez M., Glodez S., Kramberger J.: Fatigue assessment of piston rod threaded end. *Engineering Failure Analysis*, No.16, 2009, s. 1977-1982.
3. Posmyk A., Bąkowski H.: Wpływ cząstek  $Al_2O_3$  w materiale kompozytowym na zużycie tribologiczne w badaniach modelowych, *Kompozyty*, nr 9:1, 2009, s. 29-33.
4. Bąkowski H., Stanik Z.: Applications of FEM for explanation of influence of the operating parameters upon failure wear of the piston in a diesel engine, *Mechanik*, nr 4, 2010, s. 298-299.
5. Kaźmierczak A.: Tarcie i zużycie zespołu tłok–pierścienie–cylinder. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.