

Andrzej POSMYK*, Henryk BĄKOWSKI*

ZUŻYWANIE W MIKROSKALI SKOJARZENIA ŻELIWNY PIERŚCIEŃ TŁOKOWY –KOMPOZYTOWA TULEJA CYLINDROWA

WEAR IN THE MICROSCALE OF CAST IRON PISTON
RING/COMPOSITE CYLINDER LINER CONTACT

Słowa kluczowe:

zużycie, mikroskala, pierścień tłokowy, tuleja cylindrowa, mikrostruktura, perlit, MES

Key words:

wear, microscale, piston ring, cylinder liner, microstructure, pearlite, FEM

Streszczenie

W pracy przedstawiono próbę wyjaśnienia mechanizmów zużycia skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy/kompozytowa tuleja cylindrowa w mikroskali, używając płytkowego modelu perlitu. Do obliczeń lokalnych wartości naprężeń i odkształceń w perlicie stanowiącym osnowę żeliwa, stykającym się z włóknami zbrojącymi tulei cylindrowej zbudowano model geometryczny i wykonano obliczenia Metodą Elementów Skończonych.

* Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Z. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska, e-mail: andrzej.posmyk@polsl.pl, henryk.bakowski@polsl.pl.

Do budowy modelu geometrycznego wykorzystano cechy stereologiczne ziaren perlitu i włókien zbrojących w kompozycie. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano lokalne rozkłady wartości naprężeń i odkształceń w płytkach cementytu i ferrytu oraz w pobliżu włókna w osnowie kompozytu. Naprężenia wyliczone z użyciem modelu uproszczonego (izotropowe ziarna perlitu) są inne niż z użyciem modelu rozbudowanego (płytki cementytu i ferrytu w ziarnach perlitu). Wartości te pozwalają wyjaśnić mechanizm zużycia analizowanego skojarzenia.

WPROWADZENIE

Skojarzenie pierścien–tuleja cylindrowa silników spalinowych jest jednym z ważniejszych skojarzeń grupy tłokowo-cylindrowej decydującym o sprawności i trwałości silników spalinowych i sprężarek tłokowych. Najczęściej pierścienie tłokowe są wykonywane z żeliwa szarego z grafitem płatkowym lub sferoidalnym. Osnową takiego żeliwa jest perlit, który dzięki swym wysokim właściwościom wytrzymałościowym (R_m do 1300 MPa, HB do 260) zapewnia długi czas eksploatacji pierścienia. Płatki grafitu rozłożone stochastycznie na tle ziaren perlitu zapewniają lepsze smarowanie skojarzenia (mała wytrzymałość na ścinanie do 30 MPa). Tuleje cylindrowe są wykonywane ze stopów żelaza z węglem (żeliwo GJL-300) lub ze stopów glinu z krzemem (np. AC-47000). Twarde wydzielania krzemu (do 12 GPa μHV) o odpowiednich cechach stereologicznych zapewniają mniejsze zużywanie tulei, ale przyspieszają zużywanie pierścienia. Dlatego stopy te są modyfikowane w celu rozdrobnienia wydzielen krzemu. Wydzielenia krzemu, wystając nad powierzchnię osnowy (roztwór krzemu w Al) pełnią rolę separatora zapobiegającego szczepianiu adhezyjnemu żeliwa z aluminium, co zmniejsza siły tarcia w grupie tłokowej i zużycie paliwa przez silnik oraz emisję szkodliwych spalin.

Nowszymi rozwiązaniami w budowie silników spalinowych są tuleje cylindrowe wykonane z kompozytów na osnowie siluminów okołoeutektycznych zbrojonych włóknami z tlenku glinu. Obecność 10–12% włókien ceramicznych (Al_2O_3) zwiększa odporność na zużycie tulei wielokrotnie. Cechy stereologiczne włókien ceramicznych są zbliżone do rozdrobnionych wydzielen krzemu po modyfikacji, tj. średnia średnica kilka mikrometrów, a długość kilkadziesiąt μm). Podczas współpracy wykonanych z żeliwa szarego z osnową perlityczną pierścieni tłokowych z kompozytową tuleją cylindrową może mieć miejsce okresowa zmiana współczynnika tarcia, czego konsekwencją jest zwiększenie zużycia paliwa, które nie jest zauważane przez użytkowników pojazdów samochodowych. Zjawisko to jest związane z wykruszaniem płatków grafitu i współpracą perlitu z tuleją cylindrową.

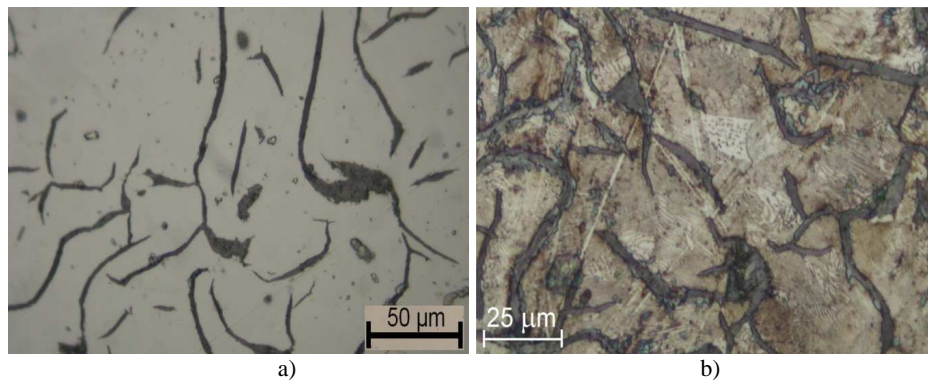
W celu określenia lokalnych wartości naprężeń i odkształceń są prowadzone badania z wykorzystaniem różnych metod modelowania, np. chropowości

powierzchni w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych z zastosowaniem modelu Archarda [L. 1–3] lub Metody Elementów Skończonych [L. 4]. Metody te pozwalają obliczyć pole rzeczywistej powierzchni styku i naciski lokalne. Znane są też próby zastosowania analizy fraktalnej [L. 3] oraz stereologii [L. 5] do wyjaśniania mechanizmów zużycia materiałów kompozytowych oraz modele uwzględniające rozkład ciśnień w klinie smarowym między pierścieniem a gładzią tulei cylindrowej [L. 6]. Trudniej spotkać prace uwzględniające mikrostrukturę materiałów współpracujących części maszyn.

Zużywanie skojarzenia pierścien-kompozytowa tuleja cylindrowa jest lepiej widoczne, gdy rozpatrzy się jego mechanizm w mikroskali, tj. z poziomu składników struktury. Autorzy tego artykułu zajmują się wyjaśnianiem mechanizmów zużycia skojarzeń wykonanych z różnych materiałów z wykorzystaniem modelowania Metodą Elementów Skończonych [L. 7–10]. Zbudowanie modelu skojarzenia w skali mikro pozwala obliczyć rozkład lokalny naprężeń i odkształceń w elementach struktury materiałów współpracujących części maszyn. Obliczone wartości naprężeń lokalnych przekraczają kilkukrotnie wartości naprężeń liczonych według zasad wytrzymałości materiałów. Zagadnieniami tarcia smarowania i zużycia w skali makro i mezo zajmuje się nauka zwana tribologią. Dla odróżnienia zjawiska tribologiczne analizowane w mikroskali autorzy proponują włączyć w zakres subdziedziny nazywanej mikrotribologią. Termin ten jest używany czasami do określenia zjawisk tribologicznych zachodzących w mikromechanizmach. Obszary, w których są analizowane mechanizmy zużycia w mikroskali są wymiarowo podobne do mikromechanizmów. Wyjaśnianiu mechanizmów zużycia w skali mikro skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy-kompozytowa tuleja cylindrowa jest poświęcony ten artykuł.

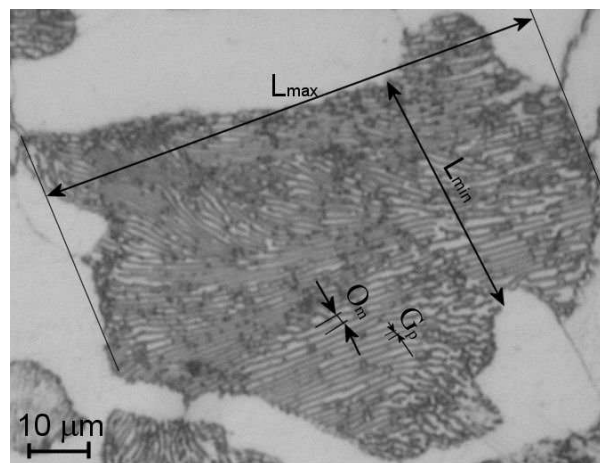
WARUNKI PRACY SKOJARZENIA W MAKRO- I MIKROSKALI

W celu przeanalizowania warunków pracy skojarzenia w mikroskali należy zbudować model geometryczny skojarzenia. Do budowy tego modelu jest potrzebna znajomość mikrostruktury materiałów i ich cech stereologicznych. W skojarzeniu pierścien-tuleja kompozytowa współpracują ze sobą dwa materiały, tj. żeliwo GJL-300 i kompozyt AlSi12CuNi+10% włókien Al₂O₃. Pierścień tłokowy uszczelniający wywiera największe naciski na gładź tulei cylindrowej, które są superpozycją ciśnienia od gazów spalinowych i sprężystości własnej. W silniku o mocy około 100 kW nacisk pierścienia uszczelniającego na gładź tulei cylindrowej wynosi około 2,5 MPa. W skali mikro należy uwzględnić strukturę żeliwa szarego GJL-300, które ma osnowę perlityczną i płatkowe wydzielania grafitu oraz strukturę kompozytu, w którym na tle stopu AlSi12CuNi są rozmieszczone włókna ceramiczne o średniej średnicy 2 μm i długości 2–3 mm.



Rys. 1. Mikrografia z powierzchni roboczej żeliwnego pierścienia tłokowego: a – zgląd, b – zgląd trawiony z widocznymi ziarnami perlitu
 Fig. 1. Micrograph from sliding surface of cast iron piston ring: a – crossection, b – etched crossection

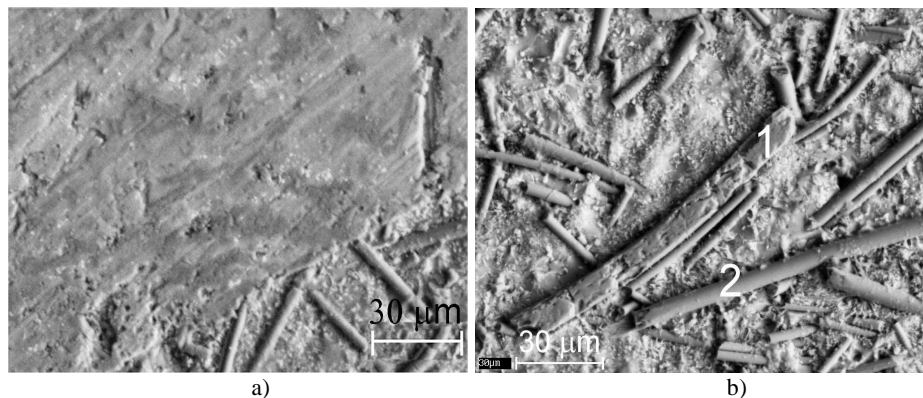
Mikrografie powierzchni roboczej żeliwnego pierścienia tłokowego przedstawiono na **Rysunku 1**. W celu pokazania płatków ferrytu i cementytu w perlicie (**Rys. 1b i 2**) zgląd trawiono w roztworze Nital (3%). Mikrografie powierzchni roboczej kompozytowej tulei cylindrowej przedstawiono na **Rysunku 3**. W celu pokazania włókien zgląd trawiono w wodnym roztworze kwasu pikrynowego.



Rys. 2. Sposób pomiaru cech stereologicznych perlitu w żeliwie GJL-300: L_{max} – maksymalna długość ziarna perlitu, L_{min} – minimalna długość ziarna perlitu, O_m – odległość między płytkami cementytu, G_p – grubość płytki cementytu
 Fig. 2. Measuring method of stereological parameter of pearlite in GJL-300 cast iron: L_{max} – maximal length of pearlite grain, L_{min} – minimal length of pearlite grain, O_m – distance between cementite lamellas, G_p – thickness of cementite lamelle

ZASTOSOWANIE MES DO WYJAŚNIANIA MECHANIZMÓW ZUŻYWANIA

We wcześniejszych pracach autorów [L. 7–10] wykonano analizę mechanizmów zużycia skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy–kompozytowa tuleja cylindrowa sinika spalinowego, ale w modelu przyjęto ziarna perlitu jako jeden składnik o izotropowych właściwościach w całej objętości. Konsekwencją takiego założenia było uproszczenie modelu i skrócenie obliczeń. Jednak uproszczenie nie pozwoliło wyjaśnić, co dzieje się wewnątrz ziarna perlitu składającego się z na przemian ułożonych płytek cementytu (twardość do 1200 MPa, Rm do 5 GPa) i ferrytu (80–90 HB i Rm 350 do 590 MPa) o grubościach 0,05 μm przy średnicy zawartych w kompozycie ceramicznych włókien 2 μm . Dlatego autorzy wykonali pomiary cech stereologicznych perlitu i zbudowali model geometryczny żeliwa uwzględniający płytki cementytu i ferrytu (Rys. 4). Do budowy modelu wykorzystano średnie wymiary płatków grafitu zastąpionego prostopadłościanem o wymiarach $5 \times 5 \times 20 \mu\text{m}$ oraz średnie grubości płytek ferrytu ($G_F = 0,05 \text{ m}$) i cementytu ($G_P = 0,005 \mu\text{m}$) oraz średnie odległości między płytkami cementytu ($O_m = 0,5 \mu\text{m}$). Model (Rys. 4) zbudowano, stosując oprogramowanie Solid Edge. Jako osnowę zastosowano ułożone równoległe, na przemian, płytki ferrytu i cementytu. Grubość płytek cementytu i ferrytu wyznaczono za pomocą ilościowej analizy metalograficznej.



Rys. 3. Mikrofotografia z powierzchni roboczej kompozytowej tulei cylindrowej: a – zgląd z wytrawioną częścią, b – powierzchnia robocza po współpracy ślizgowej z żeliwem z wytrawioną osnową: 1 – włókno częściowo zużyte, 2 – włókno niebiorące udziału w tarcu

Fig. 3. Micrograph from sliding surface of composite cylinder liner: a – partially etched cross-section, b – surface after rubbing against cast iron with etched matrix: 1 – partially worn fiber, 2 – fiber without friction

Tabela 1. Wartości stałych materiałowych użytych w obliczeniach MES

Table 1. Values of material parameters used for FEM calculations

Materiał	Cecha	Moduł Younga E, GPa	Stała Poissona ν	R_m MPa
Grafit		20	0,20	2
Ferryt		180–210	0,25	350-590
Cementyt		260–282	0,29	-5000
Żeliwo GJL-350		120–140	0,30	> 300
Włókno Al_2O_3		370	0,22	1500
AC-47000 (osnowa kompozytu)		71	0,33	70–120

Obliczenia rozkładu naprężeń i odkształceń wykonano z użyciem oprogramowania Femap z solverem Nastran. Wartości stałych materiałowych do obliczeń przyjęto na podstawie literatury [L. 11–12], a ich wartości skrajne zestawiono w Tabeli 1. Do obliczeń przyjęto uproszczony kształt wydzielań grafitu w postaci prostopadłościanu ($5 \times 5 \times 20$ mm) oraz uproszczony kształt płytek cementytu ($0,005 \times 20 \times 50$ μm) i ferrytu ($0,5 \times 20 \times 50$ μm).

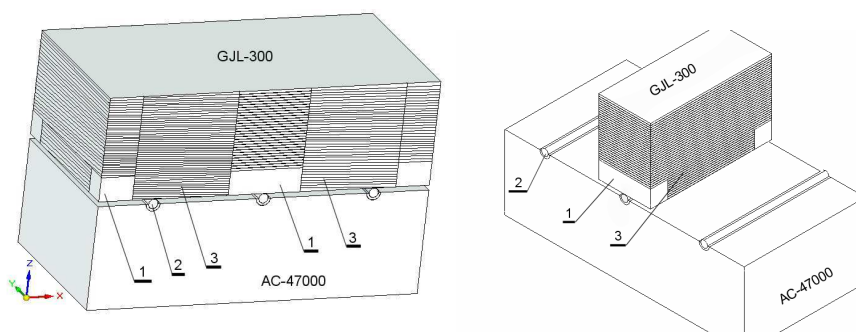
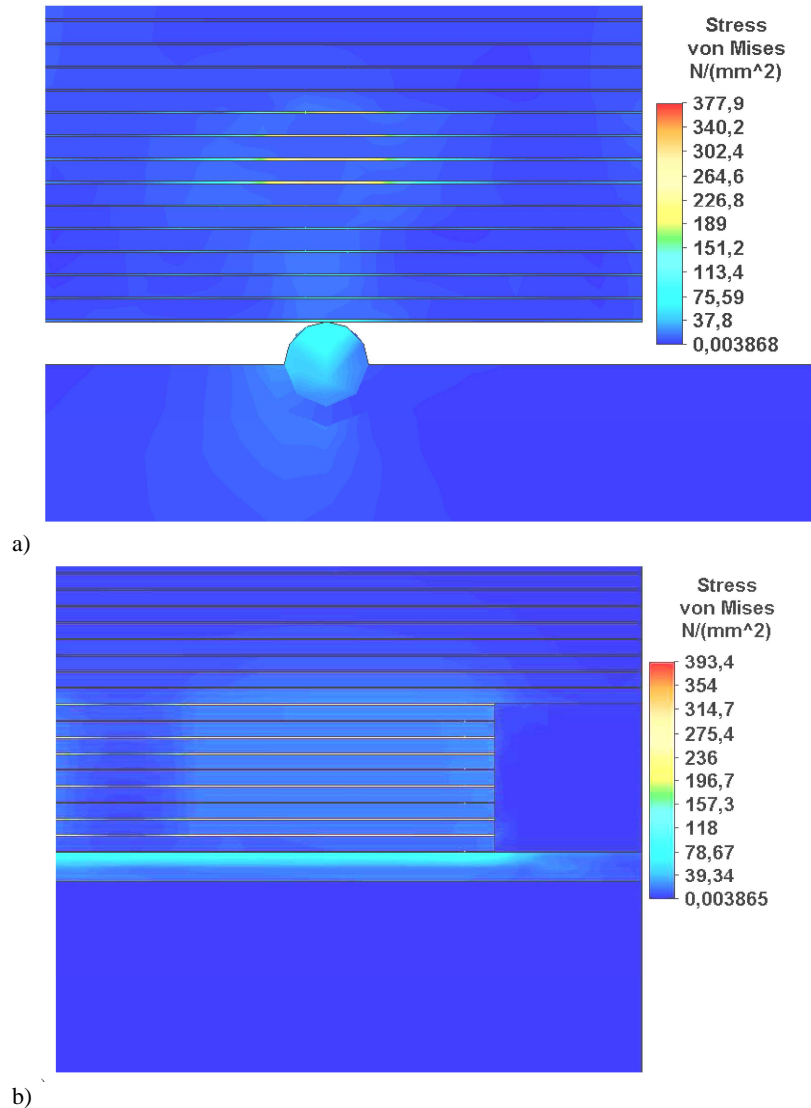
**Rys. 4. Model geometryczny skojarzenia żeliwny pierścień tłokowy/kompozytowa tuleja cylindrowa: 1 – wydzielenia grafitu, 2 – włókno, 3 – ziarno perlitu**

Fig. 4. Geometric model of the cast iron piston ring/composite cylinder liner contact: 1 – graphite precipitates, 2 – fiber, 3 – pearlite grain

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki obliczeń numerycznych rozkładu naprężeń i odkształceń badanego skojarzenia przedstawiono na **Rysunkach 5 i 6**. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartości naprężeń lokalnych w płytkach cementytu (290 MPa) znajdujących się w pobliżu włókna ceramicznego z kompozytu przekraczają wartości naprężeń dopuszczalnych na ściskanie ($k_c = R_m/2,5 = 350/2,5 = 140$ MPa) i na zginanie ($k_g = R_g/2,5 = 560/2,5 = 224$ MPa) dla żeliwa. Płytki ferrytu ze względu na gorsze właściwości wytrzymałościowe (R_m 350–590) odkształcają się bardziej w pobliżu wydzielań grafitu ($\epsilon \approx 0,2\%$ – jaśniejszy obszar na **Ry-**

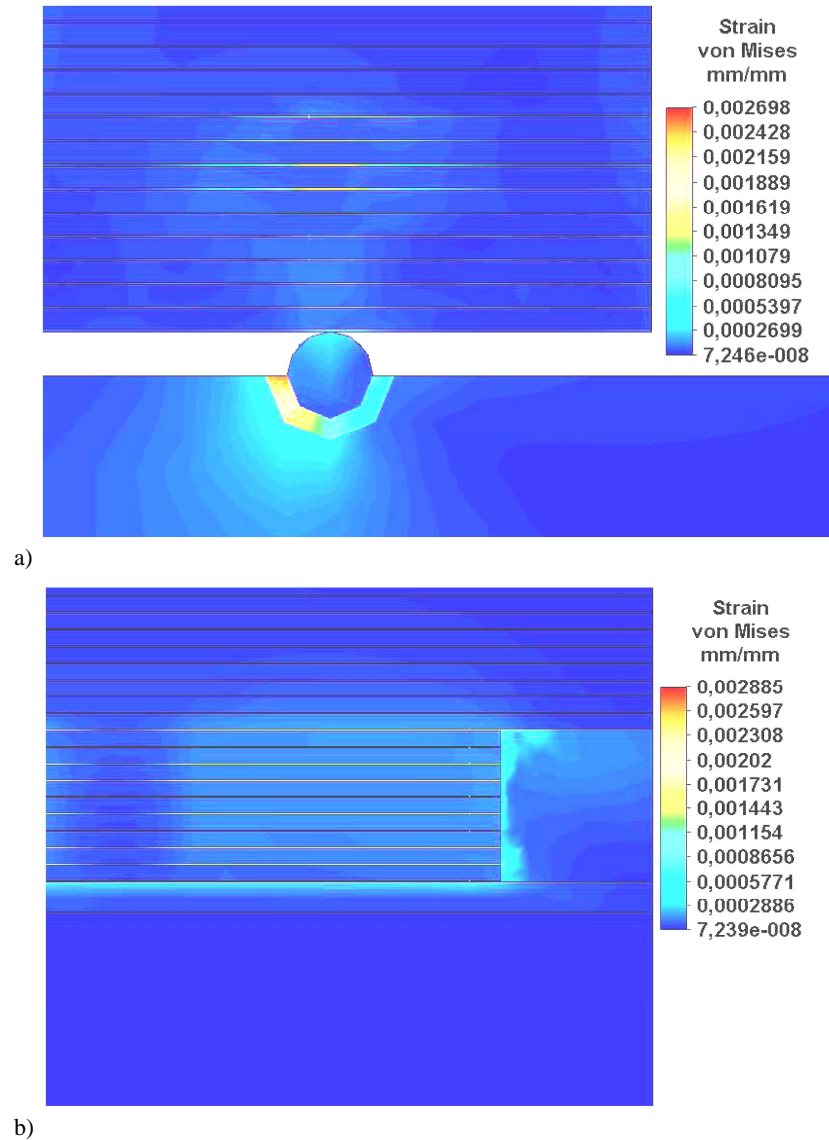
sunku 6b), powodując zginanie płytek cementytu, co zwiększa wartości naprężeń (jaśniejsze paski w środku **Rysunku 5a**) oraz odkształceń w osnowie kompozytu (jaśniejsze obszary pod włóknem na **Rys 6a**). Wartości naprężeń w płytkach ferrytu są znacznie mniejsze i nie przekraczają 70 MPa, co wynika z mniejszej twardości (80–90 MPa).



Rys. 5. Rozkład naprężeń lokalnych w perlicie w pobliżu włókna w kierunku prostopadłym (a) i równoległym (b) do włókna podczas tarcia

Fig. 5. Distribution of local stresses in pearlite near to fiber perpendicular (a) and parallel (b) to fiber during rubbing

Przemieszczający się po zawierającej duże ilości włókien powierzchni kompozytu pierścień żeliwny podlega cyklicznemu zwiększaniu lokalnych naprężeń zginających w cementycie, co po określonej liczbie cykli powoduje jego pękanie zmęczeniowe i wykruszanie. Powoduje to okresową zmianę sił tarcia.



Rys. 6. Rozkład odkształceń lokalnych w perlicie w pobliżu włókna w kierunku prostopadłym (a) i równoległym (b) do włókna podczas tarcia

Fig. 6. Distribution of strains in pearlite near to fiber perpendicular (a) and parallel (b) to fiber during rubbing

Tabela 2. Wartości maksymalne naprężeń w elementach struktury skojarzenia
 Table 2. Maximal values of stresses in structural elements of contact

Model	Wartości naprężeń w:			
	perlicie	cementycie	ferryście	osnowie kompozytu
uproszczony	100 MPa	–	–	500 MPa
rozbudowany	–	300 MPa	70 MPa	40 MPa

PODSUMOWANIE

Zastosowanie w obliczeniach MES rozbudowanego modelu skojarzenia żeliwny pierścień/kompozytowa tuleja cylindrowa, w którym uwzględniono płytkową budowę perlitu w porównaniu z modelem uproszczonym [L. 9], w którym ziarna perlitu przyjęto za izotropowe pozwoliło określić dokładniej wartości lokalnych naprężeń w analizowanym skojarzeniu. W modelu uproszczonym największe naprężenia uzyskano w osnowie kompozytu, tuż pod włóknem, które było wciskane do osnowy przez twarde perlit (800–1200 HB). W modelu rozbudowanym ziarna perlitu przyjmują część naprężeń ze względu na obecność płytek miękkiego ferrytu (80–90 HB). Taki rozkład naprężeń (Tab. 2) daje informację, że intensywność zużywania osnowy kompozytu jest mniejsza a intensywność zużywania perlitu większa. Dodatkowo perlit jest narażony nie tylko na zużywanie ściernie, ale również na wykruszanie zmęczeniowe.

LITERATURA

1. Archard J.F.: Elastic Deformation and the Laws of Friction. Proceedings of the Royal Society of London A, 243, 1957, 190–205.
2. Stanley H.M., Kato, T.: FFT-Based Method for Rough Surface Contact. Journal of Tribology, Transactions of the ASME, 119(3), 1997, 481–485.
3. Jackson R.L.: An Analytical Solution to an Archard-Type Fractal Rough Surface Contact Model. Tribology Transactions (1) 2010, 543–553.
4. Muskalski Z., Milenin A.: Development of Finite Element Model of Reorientation of Cementite Lamellae in Pearlite Colonies in Wire Drawing Process for Wires Made from High Carbon Steel. Solid State Phenomena, Vol. 165, 2010, 136–141.
5. Li M., Ghosh S., Richmond O., Weiland H., Rouns T.N.: Three dimensional characterization and modeling of particle reinforced metal matrix composites part II: damage characterization. Materials Science and Engineering A266, 1999, 221–240.
6. Zheng M., Heinen A.N, Bryzik W.: Model of wear and friction in cylinder liners and piston rings. Tribology Transactions 49, 2006, 315–327.
7. Posmyk A., Bąkowski H.: Wpływ cząstek Al_2O_3 w materiale kompozytowym na zużycie tribologiczne w badaniach modelowych. Kompozyty 9: 1, 2009, 29–33.
8. Posmyk A., Bąkowski H.: Mechanizm zużywania w skojarzeniu żeliwo szare–kompozyt zbrojony cząstkami Al_2O_3 . Tribologia nr 2, (224), 2009, 183–190.

9. Posmyk A., Bąkowski H.: Mechanizm zużywania modelowego skojarzenia pierścienia tłokowy-tuleja cylindrowa wykonanego z żeliwa i kompozytu zbrojonego włóknami Al_2O_3 ułożonymi stycznie do powierzchni. Tribologia nr 5, 2010, 173–180.
10. Posmyk A., Bąkowski H.: Wear mechanism of cast iron piston ring/aluminum matrix composite cylinder liner. Tribology Transactions, 56, 2013, 806–815.
11. Bon-Woong Koo at all: Experimental measurement of Young's modulus from a single crystalline cementite. Scripta Materialia 82, 2014, 25–28.
12. Zubkova T.A., Yakovleva I.L., Karkina L.E., Veretennikova I.A.: Study of the hardness and elastic modulus of cementite in the structure of granular pearlite by the nano-indentation method. Metal Science and Heat Treatment, Vol. 56, 2014, 5–6.

Summary

The paper presents an attempt to explain the mechanism of wear in a contact cast iron piston ring/composite cylinder liner analysed at a microscale by using of lamellar model of a pearlite. For calculation of local stresses and strains levels in a pearlite, which constitutes the matrix of cast iron being in a contact with reinforcing fibres in a cylinder liner, a geometrical model was built and calculations using FEM were carried out.

Stereological parameters of pearlite grains and fibres in a composite were used for the construction of the geometrical model. Local distributions of stresses and strains in cementite and ferrite lamellas have been acquired as a result of calculations carried out. Stresses calculated by using the simplified model (isotropic pearlite grains) are different from those calculated by using the enlarged model (cementite and ferrite lamellas in pearlite grains). These values allow one to explain the wear mechanism of the investigated contact.