

**Andrzej Posmyk<sup>1\*</sup>, Henryk Bąkowski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi, Wydział Zamiejscowy w Wodzisławiu, ul. 1 Maja 23b, 44-304 Wodzisław Śląski, Poland

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

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

Otrzymano (Received) 06.01.2010

## WPŁYW ROZKŁADU GRAFITU W ŻELIWIE NA JEGO WSPÓŁPRACĘ Z KOMPOZYTEM NA OSNOWIE STOPU ALUMINIUM

Przedstawiono próbę wyjaśnienia wpływu rozkładu wydzieleni grafitu w pierścieniu żeliwnym na mechanizm zużywania skojarzenia żeliwo EN-GJL-350/kompozyt W6D.22A za pomocą MES. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań cech stereologicznych wydzieleni grafitu w żeliwie i cząstek faz zbrojących użytego do badań kompozytu opracowano model skojarzenia i przeprowadzono symulację, w wyniku której uzyskano rozkłady naprężeń i odkształceń w skojarzeniu na początku etapu docierania skojarzenia. W obliczeniach MES uwzględniono dwa skrajne przypadki ułożenia wydzieleni grafitu, tj. wydzielenia są prostopadłe i równoległe do powierzchni tarcia. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że naprężenia przy poziomym ułożeniu grafitu są około 50% mniejsze niż przy pionowym. Odkształcenia w obydwóch przypadkach są zbliżone, a ich maksimum znajduje się w strefie przejściowej pomiędzy cząstkami FZ a osnową. Przy pionowym ułożeniu grafitu występuje lokalna koncentracja naprężeń w cząstkach FZ pod krawędzią styku grafitu z perlityczną osnową. Krawędź działa na FZ jak mikroostrze skrawające.

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

## INFLUENCE OF GRAPHITE PARTICLES DISTRIBUTION IN CAST-IRON ON ITS RUBBING AGAINST COMPOSITE MATERIAL WITH ALUMINIUM ALLOY MATRIX

The attempt to explain of the influence of graphite stereological parameters in cast iron piston ring on mechanism of wear in pairing cast iron EN-GJL-350/composite W6D.22A using of Finite Elements Method (FEM) has been presented in this paper. As a result of conducted metallographic and stereological investigations the graphite stereological parameters and its orientation to friction surface in cast-iron and stereological parameters of reinforcing phase of AlMC have been determined. Based on those results, two extreme models of pairing, i.e. with vertical and horizontal graphite orientation have been elaborated and simulating calculations have been conducted. The assumptions for that model are as follows: the average diameter of reinforcing particles  $d = 15 \mu\text{m}$ , average distance between particles is  $25 \mu\text{m}$ , the surface fraction of alumina particles  $N_A = 625 \text{ mm}^{-2}$ , friction in air ( $\mu = 0.3$ ). The stereological parameters of cast-iron are as follows: average graphite precipitation chord  $d = 5 \mu\text{m}$ , average length  $L = 15 \mu\text{m}$ , average distance between graphite particles  $15 \mu\text{m}$ . These models have been named "advanced", compared to former simplified model, which does not consider graphite precipitates in cast-iron, i.e. cast-iron is isotropic. Two models of pairing with vertical and horizontal graphite precipitates localisation have been elaborated. Simulation calculations have shown that the maximum of stresses is in graphite precipitates at the contact line between pearlitic cast-iron matrix and the reinforcing phase. The maximal stresses in vertical graphite (82 MPa) are about 50% higher then the stresses in horizontal graphite (55 MPa). Comparing the stresses calculated using advanced and simplified models it should be stated that the average stresses in the contact zone between cast-iron and composite having alumina reinforcing particles are between the both analysed extreme cases. The maximum stresses are 17÷27 times larger then the given load (3 MPa).

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

## WPROWADZENIE

Do istotnego rozwoju technicznych środków transportu w ostatnich latach minionego wieku przyczyniło się zastosowanie materiałów kompozytowych na osnowie stopów metali lekkich, np. glinu lub magnezu. Kompozyty charakteryzują się coraz lepszymi właściwościami użytkowymi, w tym wytrzymałościowymi i tribologicznymi. Odporność na zużycie kompozytów jest wielokrotnie większa niż materiałów osnowy, z których wy-

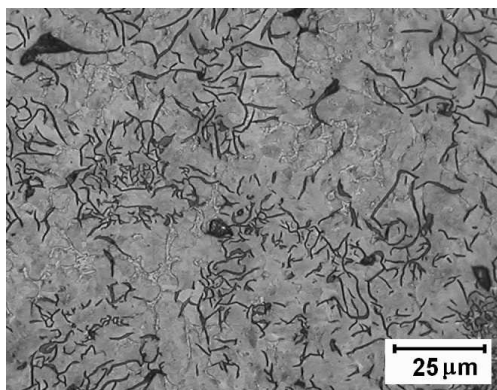
tworzono kompozyt. Przykładem może być wykazujący średnie właściwości wytrzymałościowe ( $R_m = 280 \text{ MPa}$  - T6) i praktycznie brak przydatności na skojarzenia ślizgowe bez specjalnej obróbki stop EN AW-6061 [1]. Po dodaniu 20% cząstek tlenku glinu wytrzymałość na rozciąganie zwiększa się prawie o 30%, a moduł Younga o 40% [1]. Kompozyt może współpracować w skojarzeniach ślizgowych w warunkach smarowania z wieloma

tworzywami konstrukcyjnymi, w tym z żeliwem szarym. Obecność płatków grafitu w warstwie powierzchniowej żeliwa może być przyczyną poprawy właściwości tribologicznych skojarzenia żeliwo/kompozyt lub w skrajnym przypadku pogorszenia. Zależy to od cech stereologicznych zarówno fazy zbrojącej kompozytu, jak i grafitu w żeliwie. Wpływ wybranych cech stereologicznych grafitu i fazy zbrojącej na zjawiska tarcia i zużycia skojarzenia żeliwo/kompozyt zostanie omówiony w niniejszym opracowaniu.

## WARUNKI I PRZEBIEG BADAŃ

Celem badań było wyjaśnienie wpływu cech stereologicznych grafitu i fazy zbrojącej na zużywanie skojarzenia EN-GJL-350/W6D.22A. Badania wykonano dwuetapowo, tj. w pierwszym etapie określono cechy stereologiczne płatków grafitu i cząstek fazy zbrojącej kompozytu, współczynnik tarcia i intensywność zużywania, a w drugim opracowano model skojarzenia z użyciem oprogramowania Algor bazującego na metodzie elementów skończonych (MES) [2, 3].

Do badań użyto żeliwa EN-GJL-350 stosowanego na pierścieniu tłokowe silników spalinowych oraz kompozytu W6D.22A, z którego wykonuje się części maszyn i urządzeń, w tym części rowerowe, tuleje cylindrowe silników małej mocy. Cechy stereologiczne wyznaczono na zglądach przedstawionych na rysunkach 1 i 2. Osnowę badanego kompozytu stanowi stop EN-AW-6061 umocniony dodaniem 22% cząstek  $Al_2O_3$ . Do badań tribologicznych użyto próbek żeliwnych i kompozytowych szlifowanych papierem ściernym 500.

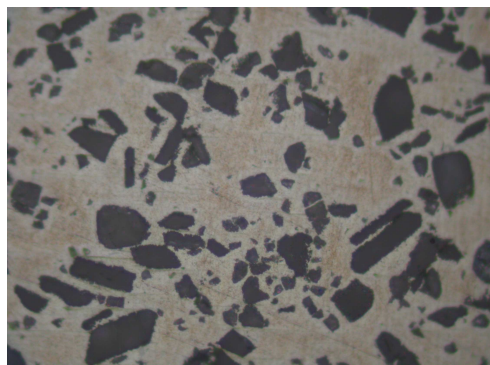


Rys. 1. Zgląd metalograficzny żeliwa EN-GJL-350 użyty do wyznaczenia cech stereologicznych grafitu

Fig. 1. Cross-section of EN-GJL-350 cast-iron used for stereological parameters of graphite quantifying

We wcześniejszych badaniach [2, 4] opracowano model dotartego skojarzenia żeliwo/kompozyt, przyjmując, że żeliwo jest materiałem monolitycznym i idealnie gładkim, a cząstki fazy zbrojącej są na tyle zużyte, że pole powierzchni styku jest okręgiem o promieniu  $5 \mu m$  (przyjęto idealny kształt cząstek - sferę). Podstawą takich założeń była m.in. topografia powierzchni żeliwa po dotarciu skojarzenia, której średnia wysokość chropowato-

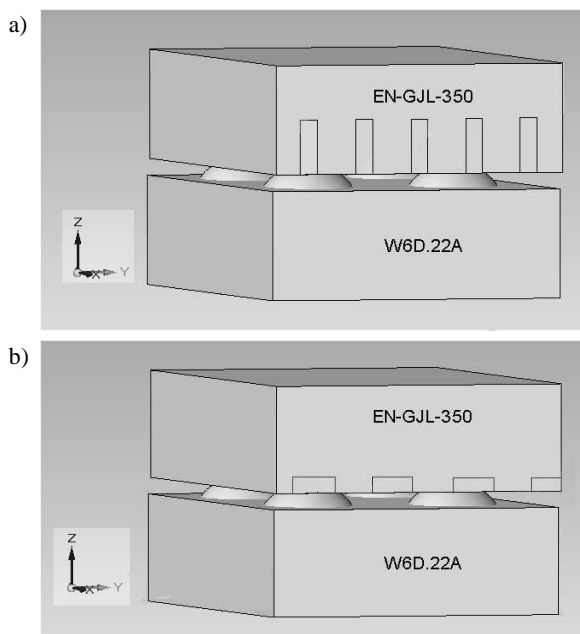
ści  $R_a$  wynosiła  $0,05 \mu m$ . Przy tak gładkiej i błyszczącej powierzchni można przyjąć, że w bezpośrednim styku są tylko cząstki osnowy perlitycznej. W płytkich wgłębieniach pozostaje niewiele wydzielen grafitu (połysk świadczący o braku pochłaniania światła). Inaczej wygląda problem podczas docierania skojarzenia. Wtedy cechy stereologiczne zarówno cząstek fazy zbrojącej, jak i płatków grafitu są inne.



Rys. 2. Zgląd metalograficzny kompozytu W6D.22A użyty do wyznaczenia cech stereologicznych cząstek  $Al_2O_3$

Fig. 2. Cross-section of composite W6D.22A used for stereological parameters of  $Al_2O_3$  particles quantifying

W ramach kolejnych badań opracowano nowy model skojarzenia na etapie docierania, w którym uwzględniono obecność wydzielen grafitu. W modelu założono, że wydzielenie grafitu jest prostopadłościanem o wymiarach  $5 \times 5 \times 15 \mu m$ . Wymiary przyjęto na podstawie pomiaru cech stereologicznych. Opracowano dwa skrajne przypadki skojarzenia, tj. z grafitem ustawionym prostopadle (bok  $5 \mu m$  styka się z fazą zbrojącą) i równolegle (bok  $15 \mu m$  styka się z FZ) do powierzchni tarcia (rys. 3).

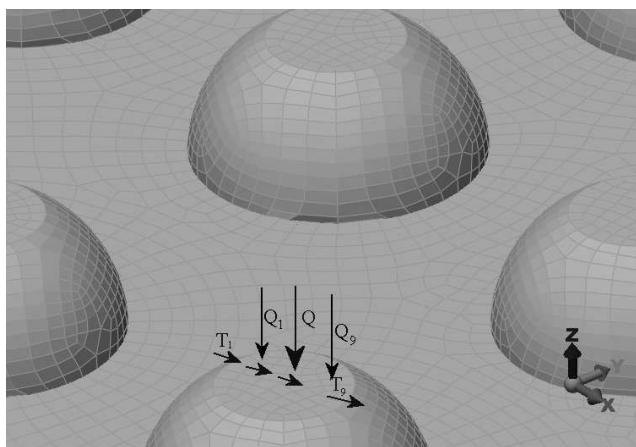


Rys. 3. Model bryłowy skojarzenia EN-GJL-350/W6D.22A z pionowym (a) i poziomym (b) ułożeniem grafitu

Fig. 3. Solid model of pairing EN-GJL-350/W6D.22A with vertical (a) and horizontal (b) graphite localisation

Do opracowania modelu skojarzenia przyjęto następujące założenia:

- tarcie ślizgowe w skojarzeniu odwzorowującym warunki pracy pary żeliwny pierścień tłokowy-kompozytowa tuleja cylindrowa;
- współczynnik tarcia przyjmuje skrajną wartość odpowiadającą etapowi docierania ( $\mu = 0,3$ ) w warunkach tarcia technicznie suchego,
- udział powierzchniowy cząstek fazy zbrojącej wynosi  $N_A = 625 \text{ mm}^{-2}$ ;
- cząstki mają idealny kształt sferyczny;
- średnia średnica cząstek FZ  $d = 15 \text{ }\mu\text{m}$ ;
- średnia odległość między cząstkami  $L = 25 \text{ }\mu\text{m}$ ;
- 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  $5 \text{ }\mu\text{m}$  (rys. 4).



Rys. 4. Model powierzchni tarcia kompozytu po zużyciu wierzchołków cząstek FZ (rozkład siły na cząstce FZ)

Fig. 4. Frictions surface model of composite material with worn tops of reinforcing phase (forces distribution on reinforcing phase)

Do obliczeń wykorzystano stałe materiałowe podane w tabeli 1.

TABELA 1. Właściwości materiałów użytych do badań  
TABLE 1. Properties of materials used for investigations

Stala \ Materiał	Żeliwo	Grafit	6061	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$R_{m/c}$ , MPa	350	55	280	1500
$E$ , GPa	140	4,8	70	370
$\nu$	0,26	0,2	0,36	0,22
$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	7450	2250	2730	3200

## WYNIKI BADAŃ

Pomiaru cech stereologicznych żeliwa dokonano na zglądach metalograficznych przygotowanych próbek wyciętych z odlewanych pierścieni tłokowych. Powierzchnie robocze pierścieni znajdowały się w płaszczyźnie

polerowania po to, żeby ułożenie grafitu w próbkach było podobne do jego ułożenia podczas współpracy z kompozytowa tuleją cylindrową.

Obserwacje przeprowadzono na 8 polach zawierających minimum po 1000 obiektów. Na potrzeby zbudowania modelu skojarzenia do obliczeń MES określono następujące parametry stereologiczne: średnią średnicę cząstki/cięciwę wydzielenia ( $d$ ), ilość cząstek/wydzieleń na jednostkę powierzchni ( $N_A$ ), średnią odległość pomiędzy cząstkami/wydzieniami ( $D_a$ ), współczynnik kształtu ( $\lambda = d_{min}/d_{max}$ ). Wyniki zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Wybrane parametry stereologiczne badanych materiałów

TABLE 2. Chosen stereological parameters of investigated materials

Parametr \ Materiał	$d$ $\mu\text{m}$	$N_A$ 1/mm <sup>2</sup>	$D_a$ $\mu\text{m}$	$\lambda$ –
EN-GJL 350	5,0	128	15	0,24
W6D.22A	14,3	625	24,92	0,73

W celu sprawdzenia poprawności przyjętych na podstawie pomiarów cech stereologicznych założeń wykonano badania profilografometryczne na powierzchniach badanych materiałów. Na rysunku 5a przedstawiono profil 3D chropowatości powierzchni z zaznaczonymi przykładami cząstek fazy zbrojącej, a na rysunku 5b pokazano sposób pomiaru powierzchni styku (w dwóch prostopadłych kierunkach (A i B) wierzchołka cząstki z żeliwem z wykorzystaniem profilu 2D. Wybrane profile 2D pokazują minimalną (rys. 5, profile A i C) i maksymalną długość styku (rys. 5, profil B). Na przedstawionych profilach można zauważyć, że żeliwo może się stykać z cząstkami tlenku na odcinkach od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Rzeczywisty styk żeliwa z cząstką tlenku przedstawiono na rysunku 6 przez nałożenie na profil cząstki tlenku odwróconego profilu żeliwa. Obydwa profile mają nieskażoną skalę w osiach X i Z, tzn. powiększenia pionowe i poziome są takie same (działka elementarna 0,1  $\mu\text{m}$ ). Na rysunku 5 użyto skali skażonej, tj. wzmocnienie pionowe jest większe (działka elementarna 0,1  $\mu\text{m}$ ) niż poziome (działka elementarna 1  $\mu\text{m}$ ).

Do wyjaśnienia mechanizmu zużywania podczas docierania skojarzenia jest potrzebna znajomość rozkładu lokalnych naprężeń i odkształceń panujących w styku. Rozkłady te wyznaczono, stosując MES.

Podczas badań tribologicznych wyznaczono współczynnik tarcia i zużycie oraz wykonywano obserwacje mikroskopowe i profilografometryczne powierzchni po współpracy.

Na podstawie badań stwierdzono, że współczynnik tarcia w skojarzeniu EN-GJL-350/ W6D.22A w warunkach tarcia technicznie suchego może osiągać wartość maksymalną 0,3÷0,5. W modelu przyjęto najmniejszą wartość  $\mu = 0,3$ .

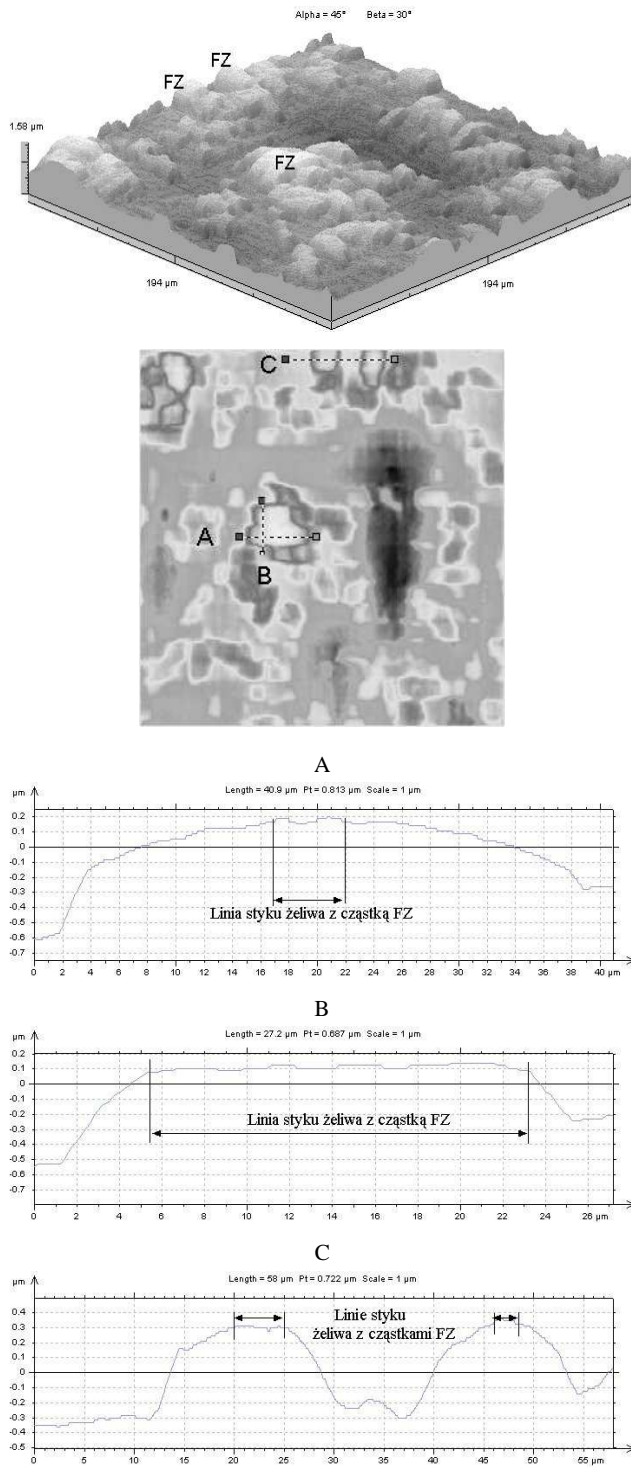
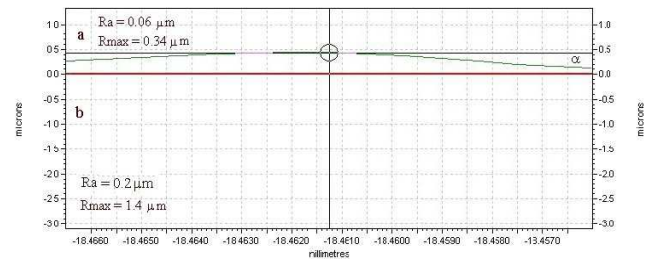
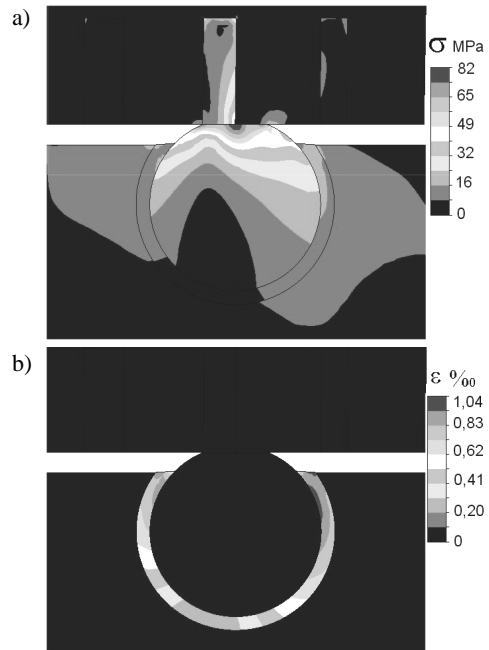
Rys. 5. Sposób pomiaru powierzchni styku żeliwa z cząstkami  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 

Fig. 5. Measuring method of contact surface between cast iron and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle

Do wyjaśnienia mechanizmu zużywania wykorzystano model opracowany z użyciem oprogramowania Algor. Model powierzchni tarcia kompozytu w skojarzeniu z żeliwem wraz z przyłożonymi siłami przedstawiono na rysunku 4. Siłę tarcia rozłożono na 9 składowych (od  $T_1$  do  $T_9$ ), po jednej w każdym węźle siatki (co 1  $\mu\text{m}$ ). Podobnie rozłożono siłę nacisku  $Q$ . Wyznaczone MES rozkłady naprężeń i odkształceń przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

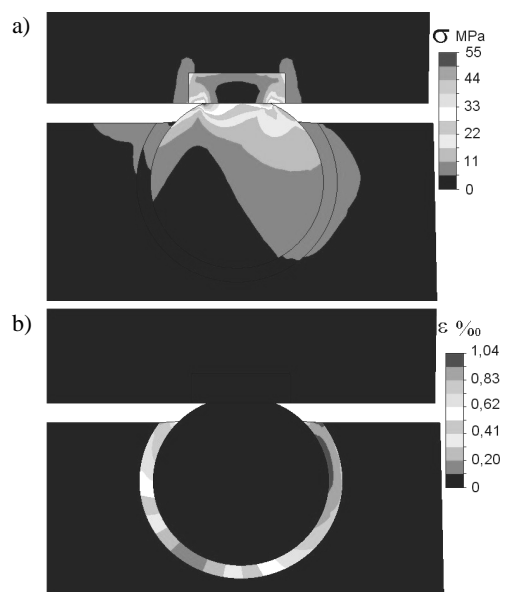


Rys. 6. Rzeczywista linia styku żeliwa (a) z cząstką  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) (ok. 3  $\mu\text{m}$ )  
Fig. 6. Really contact line between cast-iron (a) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle (b) (near 3  $\mu\text{m}$ )



Rys. 7. Rozkład naprężeń zastępczych (a) i odkształceń (b) ułożony pionowo w styku grafit/ $\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 7. Reduced stresses (a) and strains (b) distribution in a vertical placed graphite/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  contact



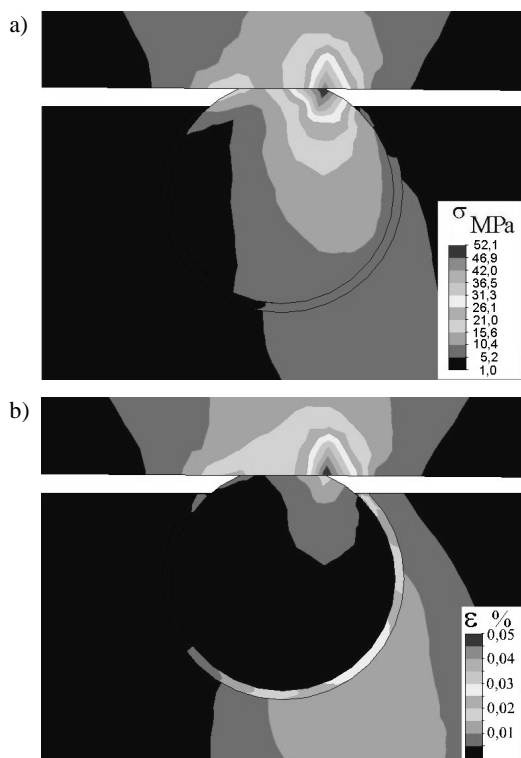
Rys. 8. Rozkład naprężeń zastępczych (a) i odkształceń (b) ułożony poziomo w styku grafit/ $\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 8. Reduced stresses (a) and strains (b) distribution in a horizontal placed graphite/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  contact

## OMÓWIENIE WYNIKÓW

Z przedstawionych na rysunkach 7 i 8 rozkładów naprężeń i odkształceń wynika, że podczas docierania skojarzenia w styku ułożonego pionowo grafitu z cząstką  $Al_2O_3$  występują naprężenia zastępcze około 50% większe (82 MPa) niż w styku grafitu ułożonego poziomo (55 MPa). Wartości te przekraczają 18÷27 razy wynikające z przyłożonego obciążenia  $Q$  naciski konturowe (3 MPa). Maksimum tych naprężeń występuje na krawędzi styku wydzielenia grafitu z osnową perlityczną. Ponieważ twardość osnowy perlitycznej - w porównaniu do grafitu - jest duża (>250 HB, nawet 387÷416 HB [3]), krawędź ta działa jak mikroostrze skrawające wierzchołki cząstek fazy zbrojącej, co jest przyczyną zużycia ściernego cząstek. Naprężenia spadają po wyjściu cząstki ze styku z grafitem do około 5 MPa. Duża ilość cząstek na jednym  $mm^2$  (625) powoduje, że grafit jest obciążany impulsowo, co powoduje jego wykruszanie.

Odształcenia w strefie styku w obydwóch modelach są zbliżone do siebie. Przyczyną tego jest obecność strefy przejściowej na granicy osnowy z cząstkami fazy zbrojącej. W modelach przyjęto, że wytrzymałość na ściskanie tej strefy jest mała i wynosi 10 MPa [5], przez co strefa ta amortyzuje odkształcenia, ponieważ zarówno cząstki tlenku glinu, jak i osnowa perlityczna mają bardzo dużą wytrzymałość na ściskanie (ok. 1110 MPa - żeliwo i 1500 MPa -  $Al_2O_3$ ) i odkształcają się nieznacznie (poniżej 0,1 promila).



Rys. 9. Rozkład lokalnych naprężeń (a) i odkształceń (b) w pobliżu cząstki tlenku glinu w skojarzeniu EN-GJL-350/W6D.22A

Fig. 9. Distribution of local stresses (a) and strains (b) near of alumina particle in EN-GJL-350/W6D.22A pairing

Na rysunku 9 przedstawiono rozkłady naprężeń i odkształceń w badanym skojarzeniu wyznaczone z wykorzystaniem uproszczonego modelu nieuwzględniającego cech stereologicznych wydzielen grafitu [2], tj. przy założeniu, że żeliwo ma izotropowe właściwości. Z porównania maksymalnych wartości naprężeń, tj. 52 MPa (bez uwzględnienia grafitu), 55 MPa (z poziomym grafitem) i 82 MPa (z pionowym grafitem) wynika, że naprężenia w uproszczonym modelu odpowiadają naprężeniom występującym w lokalnym stanie warstwy wierzchniej żeliwa, w której wydzielenia grafitu są ułożone równoległe do powierzchni tarcia. W miejscach, w których wydzielenia grafitu są ułożone prostopadle do powierzchni tarcia, panują wyższe o około 50% naprężenia lokalne. Można przyjąć, że w pozostałych miejscach warstwy wierzchniej żeliwa współpracującego z kompozytem zawierającym cząstki tlenku glinu panują naprężenia pośrednie, a ich wartość zależy od kąta nachylenia wydzielenia do powierzchni tarcia.

## PODSUMOWANIE

Wykorzystanie oprogramowania Algor i MES oraz zbudowanie rozwiniętego modelu skojarzenia EN-GJL-350/W6D.22A pozwoliło określić maksymalne wartości lokalnych naprężeń i odkształceń kompozytu i współpracującego z nim żeliwa. Uwzględnienie w modelu rozwiniętym dwustanowego ułożenia wydzielen żeliwa, tj. równoległego i prostopadłego do powierzchni tarcia pozwoliło wyjaśnić przyczyny zużycia zarówno żeliwa, jak i wierzchołków cząstek fazy zbrojącej.

Z przeprowadzonych obliczeń na wykonanych modelach wynika, że na etapie docierania w badanym skojarzeniu - po wywarceniu nacisku konturowego 3 MPa - panują lokalnie maksymalne naprężenia w żeliwie na granicy styku wydzielen grafitu z osnową perlityczną (rys. 7) i w miejscu styku z krawędziami zużytej powierzchni wierzchołka cząstki fazy zbrojącej (rys. 8) oraz w materiale cząstki. Naprężenia te przekraczają 18-27-krotnie wielkości zadane.

Podczas przemieszczania się żeliwa po kompozycie (ruch żeliwnego pierścienia tłokowego po gładzi kompozytowej tulei cylindrowej) dochodzi do impulsowej zmiany naprężeń od 5 do 85 MPa, co powoduje zmęczeniowe zużycie, kruszenie i przyspieszone usuwanie grafitu z osnowy. Produkty zużycia grafitu są nanoszone na zużyte wierzchołki cząstek FZ, zmniejszając siły tarcia i zużycie skojarzenia.

## LITERATURA

- [1] Duralcan composites for wrought products - Property data. Katalog firmy ALCAN 1993.
- [2] Posmyk A., Bąkowski H., Mechanizm zużycia w skojarzeniu żeliwo szare-kompozyt zbrojony cząstkami  $Al_2O_3$ , Tribologia 2009, 2, 183-190.

- [3] Fraś E., Kawalec M., Struktura, właściwości mechaniczne i odporność na zużycie ściernie stopów Fe-C-V, *Inżynieria Materiałowa* 2008, 29, 2, 78-85.
- [4] Posmyk A., Bąkowski H., Wpływ cząstek  $Al_2O_3$  w materiale kompozytowym na zużycie tribologiczne w badaniach modelowych, *Kompozyty (Composites)* 2009, 9, 1, 29-33.
- [5] Janczak J., Rohr L., Schulz P., Degischer H.P., Entwicklung von Endlosfaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen für Raumfahrttechnik, *Oberflächen Werkstoffe* Nr 5, Zürich 1995, 8-10.