

Jarosław MOLEND<sup>\*</sup>, Zbigniew PAWELEC<sup>\*</sup>

## **NISKOTEMPERATUROWE CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW METALOPOLIMEROWYCH**

### **LOW-TEMPERATURE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF METAL-POLYMER COMPOSITES**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie suche, kompozyty metalopolimerowe, smary stałe, niska temperatura, współczynnik tarcia

#### **Key words:**

dry friction, metal-polymer composites, solid-state lubricants, low temperature, friction coefficient

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono niskotemperaturowe charakterystyki tribologiczne kompozytów polimerowych, przeznaczonych do regeneracji ślizgowych elementów maszyn. Sporządzono trzy serie kompozytów z udziałem smarów stałych o spójności anizotropowej (grafitu i disiarczku molibdenu) o różnych składach jakościowych i ilościowych. Charakterystyki tribologiczne kompozytów wyznaczono za pomocą reometru MCR 102, firmy Anton Paar, wyposażonego w przystawkę do badań tribologicznych. Modelowy węzeł tarcia składa się

---

<sup>\*</sup> Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.

z 3 płytek wykonanych z kompozytów polimerowych i współpracującej z nimi kulki stalowej w styku skoncentrowanym. Zbadano wpływ smarów stałych na przebieg i zmiany współczynnika tarcia w temperaturze  $-10$  i  $-20^{\circ}\text{C}$  oraz porównano je z odpowiednimi współczynnikami tarcia wyznaczonymi w temperaturze pokojowej. Dla wszystkich badanych materiałów obniżenie temperatury otoczenia węzła tarcia powoduje wzrost oporów ruchu. Niemniej jednak skojarzenie: kompozyt metalopolimerowy–stal w niskich temperaturach charakteryzuje się kilkakrotnie mniejszym współczynnikiem tarcia niż skojarzenie: stal–stal w tych samych warunkach. Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla kompozytów z udziałem disiarczku molibdenu.

## WPROWADZENIE

Rozwój technik kriogenicznych generuje potrzebę poszukiwania nowych materiałów zarówno konstrukcyjnych, jak też stosowanych w szybkich naprawach urządzeń, pracujących w niskich temperaturach. Tego typu urządzeniami mogą być różnego typu przemysłowe komory chłodnicze, instalacje transportu czynników niskokrzepnących w układach klimatyzacyjnych oraz pompach ciepła lub aparatura do wytwarzania, transportu i przechowywania ciekłych gazów (np. elementy pomp, zawory i zbiorniki). Wymagania stawiane materiałom pracującym w niskich temperaturach są wielokrotnie ostrzejsze niż wymagania dla materiałów pracujących w typowych warunkach otoczenia. Wśród właściwości mechanicznych należy zwrócić uwagę na wytrzymałość materiału na kruche pękanie, ciągliwość, udarność, a także odporność na ścieranie. Typowymi materiałami konstrukcyjnymi są odpowiednio dobrane stale charakteryzujące się specyficzną strukturą krystalograficzną decydującą o granicznych warunkach eksploatacji. Najpopularniejszym gatunkiem stali stosowanej w technice niskich temperatur jest stal 12H18N10T [L. 1, 2].

Szczególnie istotnego znaczenia nabierają właściwości tribologiczne materiałów pracujących w niskich temperaturach, bowiem tego typu warunki eksploatacji ograniczają możliwość zastosowania większości środków smarowych, a tym samym elementy ruchome urządzeń użytkowanych w niskich temperaturach współpracują ze sobą w warunkach tarcia suchego. W ekstremalnie kriogenicznych warunkach eksploatacji wartości współczynnika tarcia dla wielu typów stali są znacząco wyższe niż uzyskiwane w temperaturze pokojowej. Ponadto współczynnik tarcia, jak też zużycie materiałowe nie są monotonicznymi funkcjami temperatury, co wskazuje na złożoność mechanizmów tarcia i zużycia występujących w warunkach niskotemperaturowych [L. 3].

Coraz częściej poszukuje się więc materiałów kompozytowych, których właściwości użytkowe w porównaniu ze stalą stopową mogą być łatwiej kształtowane poprzez odpowiedni dobór komponentów. Zastosowanie odpowiednio dobranych napełniaczy oraz innych komponentów uszlachetniających pozwala

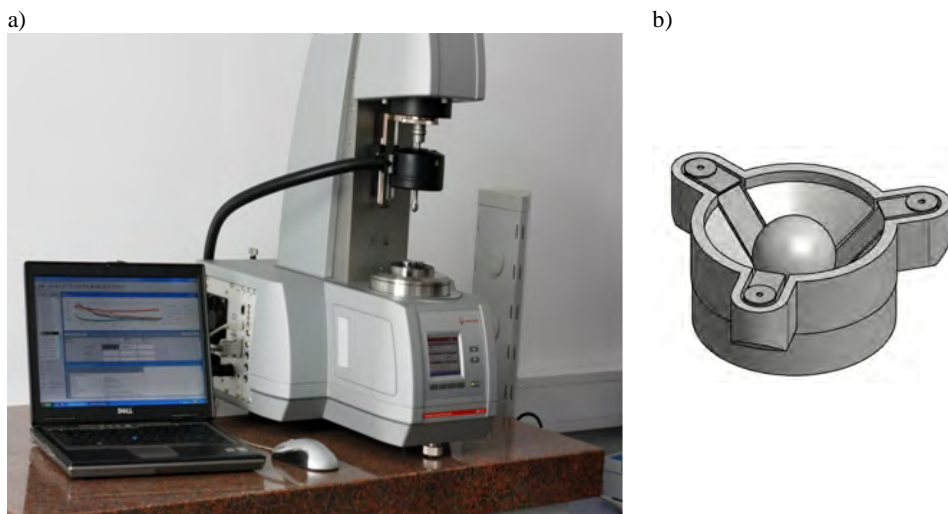
na selektywne kształtowanie kluczowych właściwości mechanicznych, opisywanych takimi parametrami jak: moduł Young'a, naprężenie ściskające i rozciągające, a także właściwościami determinowanymi przez warunki termiczne, w tym przewodność cieplną czy też skurcz materiału. Najczęściej testowane są kompozyty na osnowie żywic epoksydowych, które zawierają różnego typu napełniacze, zarówno proszkowe (aluminium, bor, żelazo, grafit), jak też włókniste (włókna szklane, węglowe, aramidowe). Zastosowanie tego typu materiałów związane jest m.in. z minimalnym skurczem w niskich temperaturach oraz możliwością kształtowania właściwości mechanicznych w stosunkowo szerokim zakresie poprzez odpowiedni dobór napełniacza [L. 4–7].

Badania kompozytów w niskich temperaturach podejmują głównie problem oceny właściwości mechanicznych w zależności od zastosowanych napełniaczy i w ograniczonym zakresie dotyczą zagadnień związanych z odpornością cierną tego typu materiałów. W związku z powyższym celem pracy było zbadanie wpływu dodatków stanowiących tzw. smary stałe na właściwości tribologiczne kompozytów na osnowie epoksydowej napełnionej proszkiem żelaza, pracujących w temperaturach ujemnych.

## METODYKA BADAŃ

Obiektami badań były kompozyty metalopolimerowe wykonane na osnowie żywicy epoksydowej Epidian 5. Osnowa przed utwardzeniem została napełniona proszkiem żelaza o granulacji (0–40  $\mu\text{m}$  – 2%, 40–75  $\mu\text{m}$  – 10%, 75–100  $\mu\text{m}$  – 16%, 100–125  $\mu\text{m}$  – 60%, 125–150  $\mu\text{m}$  – 12,3%, 150–200  $\mu\text{m}$  – 1,7%), w ilości 250 cz. wag. na 100 cz. wag. żywicy epoksydowej (próbkę oznaczono symbolem Fe-250). Ponadto wprowadzano dodatki smarne w ilościach 10, 20 i 30 cz. wag. Przygotowano próbki, do których wprowadzono jeden z dodatków, tj. grafit lub disiarczki molibdenu (próbki oznaczono odpowiednio: Fe-250+grafit-10, Fe-250+grafit-20, Fe-250+grafit-30, Fe-250+MoS<sub>2</sub>-10, Fe-250+MoS<sub>2</sub>-20, Fe-250+MoS<sub>2</sub>-30). Wykonano także próbki kompozytów z binarnym układem dodatków smarnych zawierających grafit oraz disiarczki molibdenu w proporcjach 50%:50%, tak dobranych, aby łącznie zawartość wprowadzonego pakietu dodatków wynosiła 10, 20 lub 30 cz. wag. Dla wszystkich kompozytów podstawowym napełniaczem włóknistym były organiczne włókna poliaramidowe w ilości 2 cz. wag. Wprowadzone dodatki oraz napełniacz metaliczny dyspergowano w osnowie metodami mechanicznymi, a następnie prowadzono utwardzanie w temperaturze odpowiednio uformowanych płytek testowych. Jako utwardzacz zastosowano trietanoltetraaminę w ilości 12 cz. wag. na 100 cz. wag. osnowy epoksydowej.

Badania tarciove przeprowadzono, wykorzystując reometr MCR 102 firmy Anton Paar przedstawiony na **Rys. 1**.



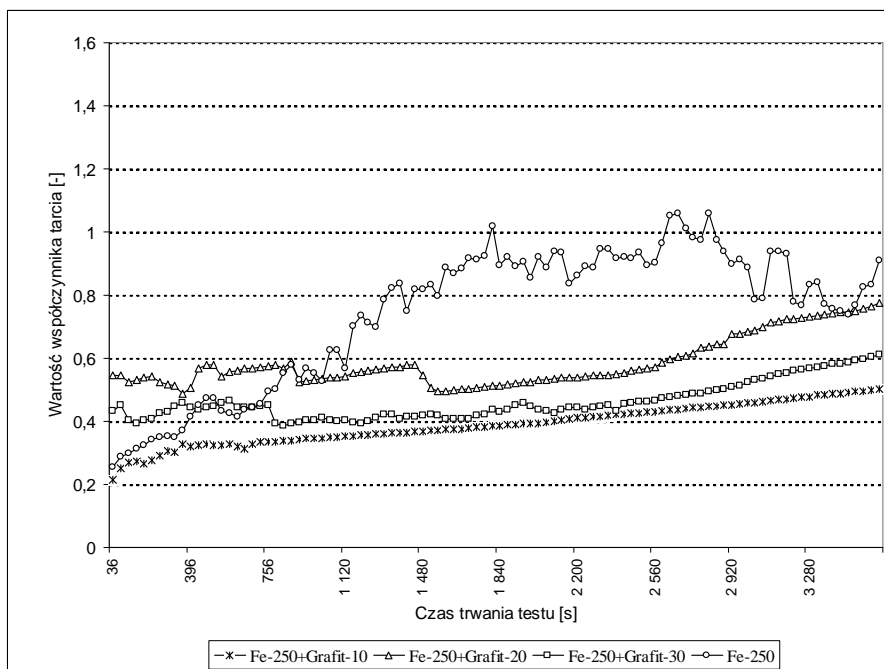
**Rys. 1. Widok reometru MCR 102 (a) i modelowego węzła tarcia (b)**  
Fig. 1. MCR 102 rheometer (a) and the model tribosystem (b)

Urządzenie wyposażone było w przystawkę tribologiczną o skoncentrowanym styku typu płytka–kula, w którym kula wykonana była ze stali łożyskowej ŁH15 i umieszczona w obrotowym wrzecionie urządzenia, a płytki wykonane były z badanego kompozytu. W celach porównawczych wykonano także pomiary współczynnika tarcia w skojarzeniu stal–stal. Termostatowana komora testowa pozwoliła na precyzyjną regulację temperatury otoczenia węzła tarcia.

Testy tribologiczne zrealizowano w następujących warunkach: siła normalna – 10 N, prędkość obrotowa kuli – 500 obr./min, czas trwania testu – 3600 s, temperatura otoczenia węzła tarcia odpowiednio: +20°C, –10°C oraz – 20°C. Podczas testu rejestrowano siłę tarcia, którą automatycznie przeliczano na współczynnik tarcia w odstępach 36-sekundowych. Badania tribologiczne zrealizowano w warunkach tarcia suchego. Jako wynik końcowy biegu podawano średnią arytmetyczną ze 100 pomiarów zarejestrowanych podczas trwania testu. Przeprowadzono dwa równoległe biegi testowe, a uzyskane końcowe wyniki testów uśredniono.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

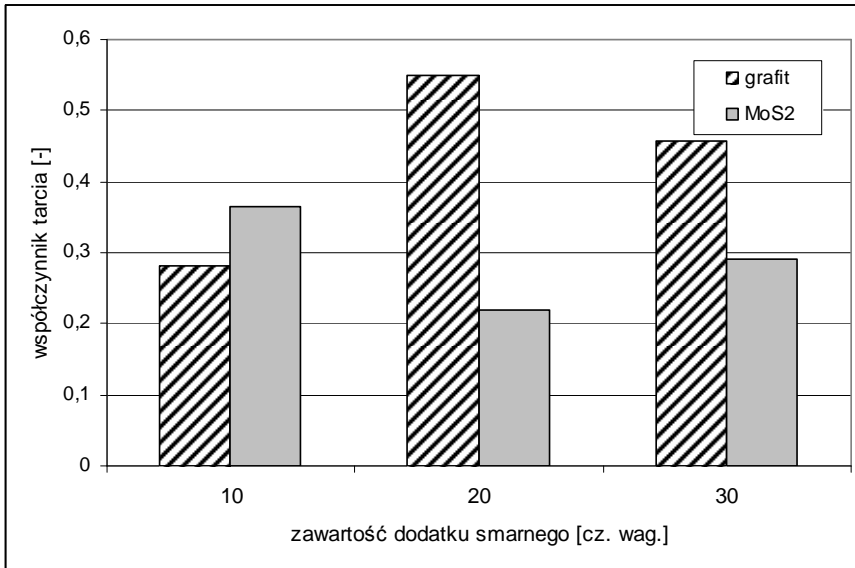
Na **Rys. 2** przedstawiono przykładowe zależności współczynnika tarcia od czasu trwania testu prowadzonego w temperaturze –20°C.



**Rys. 2. Zmiany współczynnika tarcia w czasie testu tribologicznego w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$**   
 Fig. 2. Changes in the friction coefficient during the tribological test at the temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$

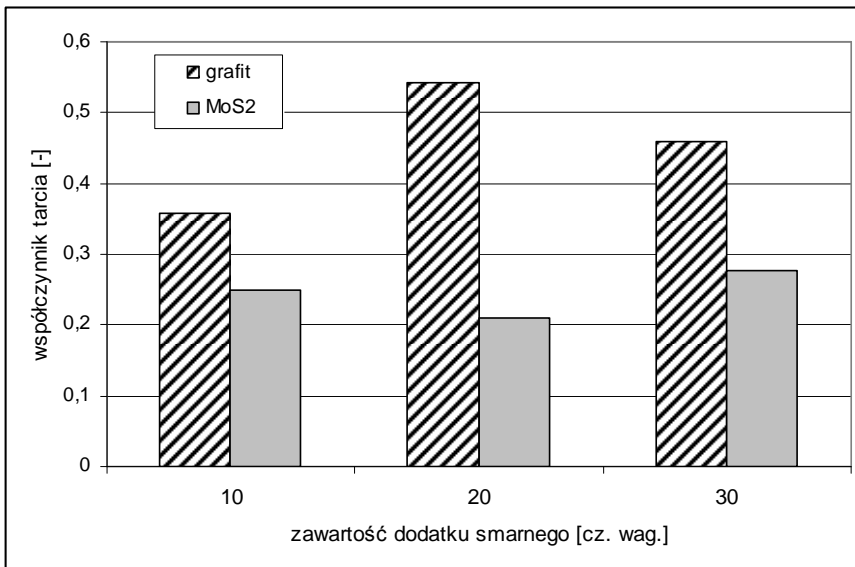
Analiza przedstawionych przebiegów wskazuje, że kompozyt złożony wyłącznie z żywicy epoksydowej oraz napełniacza metalicznego charakteryzuje się stosunkowo wysokim współczynnikiem tarcia, a ponadto jego wartości mają znaczny rozrzut i skokowe zmiany w czasie trwania testu. Zarejestrowane charakterystyki wskazują jednoznacznie, iż kompozyt metalopolimerowy bez stosownych dodatków ma słabe właściwości tribologiczne w niskiej temperaturze. Natomiast wprowadzenie do kompozytu grafitu pozwala na znaczne obniżenie oporów ruchu kompozytu oraz zniwelowanie rozrzutu wartości współczynników tarcia, co jest obserwowane jako wygładzenie krzywych opisujących zależność pomiędzy współczynnikiem tarcia i czasem testu. Zastosowanie dodatków pozwala więc na istotną poprawę parametrów tribologicznych badanych kompozytów.

Szczegółowej analizie poddano średnie współczynniki tarcia wyznaczone dla poszczególnych kompozytów w przyjętych warunkach termicznych. Uzyskane wyniki prezentujące wpływ ilości dodatku smarnego na współczynnik tarcia, rejestrowany w różnych warunkach temperaturowych, zestawiono na **Rys. 3–5**.



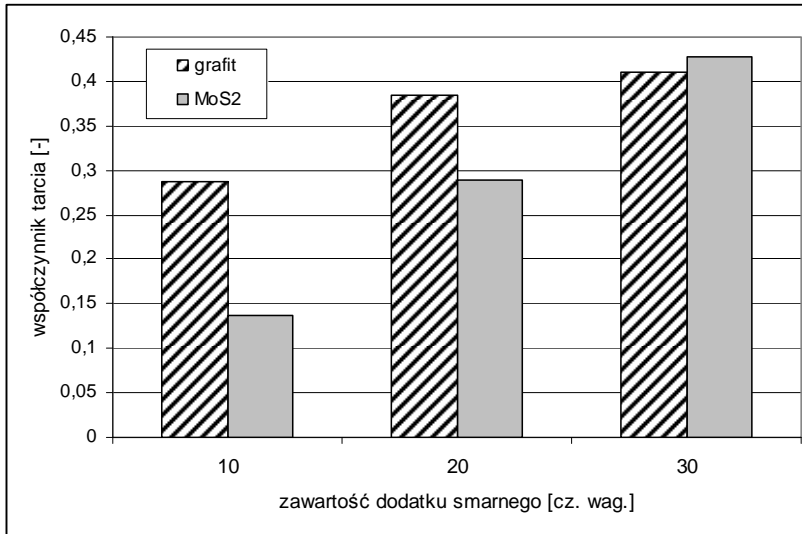
**Rys. 3. Wpływ zawartości dodatku smarnego na średni współczynnik tarcia kompozytu wyznaczony w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$**

Fig. 3. An effect of the content of the lubricating additive on the average friction coefficient determined at the temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$



**Rys. 4. Wpływ zawartości dodatku smarnego na średni współczynnik tarcia kompozytu wyznaczony w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$**

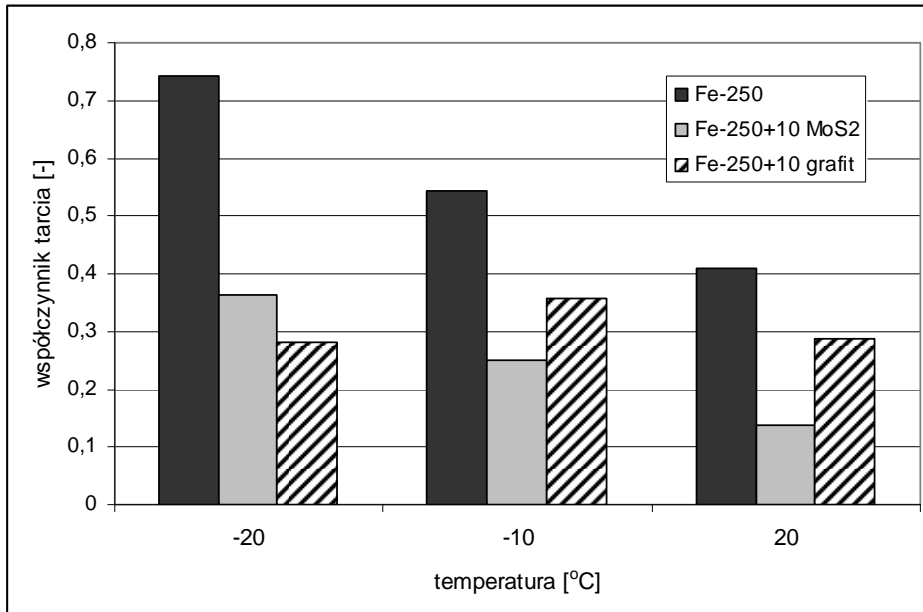
Fig. 4. An effect of the content of the lubricating additive on the average friction coefficient determined at the temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$



**Rys. 5. Wpływ zawartości dodatku smarnego na średni współczynnik tarcia kompozytu wyznaczony w temperaturze +20°C**

Fig. 5. An effect of the content of the lubricating additive on the average friction coefficient determined at the temperature of +20°C

Zastosowane modyfikatory właściwości tribologicznych kompozytów polimerowych mają budowę heksagonalną z wyraźną strukturą płytkową charakteryzującą się brakiem oddziaływań pomiędzy warstwami, co znacznie ułatwia poślizg i redukuje opory tarcia. W większości przypadków obserwuje się skuteczniejsze działanie disiarczku molibdenu w porównaniu z grafitem. Jego większa skuteczność w redukcji współczynnika tarcia skojarzenia: kompozyt–stal może wynikać dodatkowo z polarności i dużego powinowactwa do powierzchni metalowych, w tym przypadku do stalowej kulki oraz ewentualnego wytworzenia na powierzchni współpracy silnie związanej warstwy łagodzącej proces tarcia. Ponadto obecność siarki może sprzyjać oddziaływaniom i możliwym reakcjom między osnową polimerową a zastosowanym dodatkiem, co wpływa korzystnie na kohezję kompozytu i jego właściwości tribologiczne. Najkorzystniejsze charakterystyki tribologiczne w warunkach niskich temperatur uzyskano dla mikrokompozytu polimerowego zawierającego 20 cz. wag. disiarczku molibdenu. Analiza przedstawionych wyników wskazuje, iż wprowadzenie do kompozytów większej niż 20 cz. wag. ilości dodatków smarnych nie powoduje znaczącej poprawy właściwości tribologicznych, a w niektórych przypadkach obserwuje się pogorszenie niskotemperaturowych właściwości smarnych. Efekt taki występuje w szczególności w przypadku zastosowania grafitu. Niemniej jednak w temperaturze pokojowej najwyższa redukcja współczynnika tarcia w skojarzeniu: stal–kompozyt jest obserwowana dla materiału polimerowego zawierającego disiarczek molibdenu w ilości 10% wag.

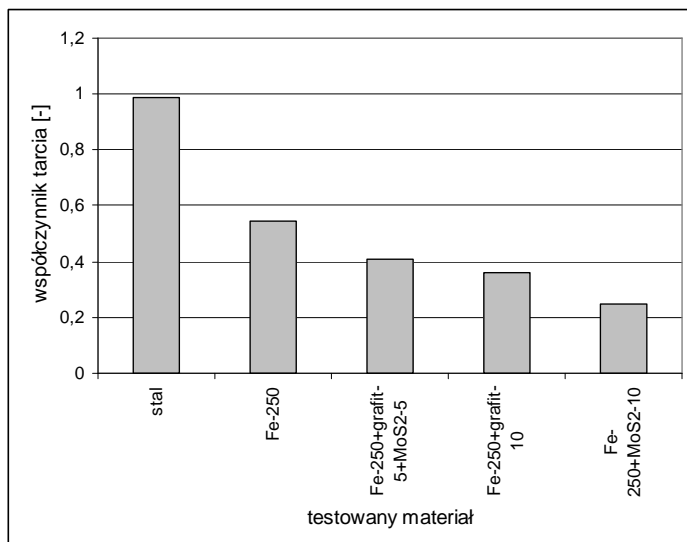


**Rys. 6. Wpływ rodzaju dodatku smarnego na średni współczynnik tarcia kompozytu wyznaczony w różnych temperaturach pracy wężła**

Fig. 6. An effect of the type of the lubricating additive on the average friction coefficient determined at various temperatures

Porównanie wyników testów tribologicznych prowadzonych w różnych warunkach termicznych przy udziale kompozytów zawierających 10% wag. smarów stałych wskazuje, iż w większości przypadków rejestrowane w ujemnych temperaturach współczynniki tarcia mają wyższe wartości niż współczynniki tarcia analogicznych kompozytów testowanych w temperaturze pokojowej. Prawidłowość taka jest również obserwowana podczas analizy wyników badań kompozytu bez dodatków smarnych **Rys. 6**. Wprowadzenie dodatków smarnych powoduje istotne obniżenie współczynników tarcia, co jest szczególnie widoczne w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ , w której obserwuje się około dwukrotnie niższą wartość współczynnika tarcia kompozytów z dodatkami w odniesieniu do współczynnika tarcia kompozytu bez dodatków. Należy jednak zauważyć, iż współczynniki tarcia kompozytów (w każdym spośród zadawanych warunków temperaturowych) są niższe niż współczynnik tarcia rejestrowany w skojarzeniu wykonanym ze stali, co poglądowo przedstawiono na **Rys. 7**.

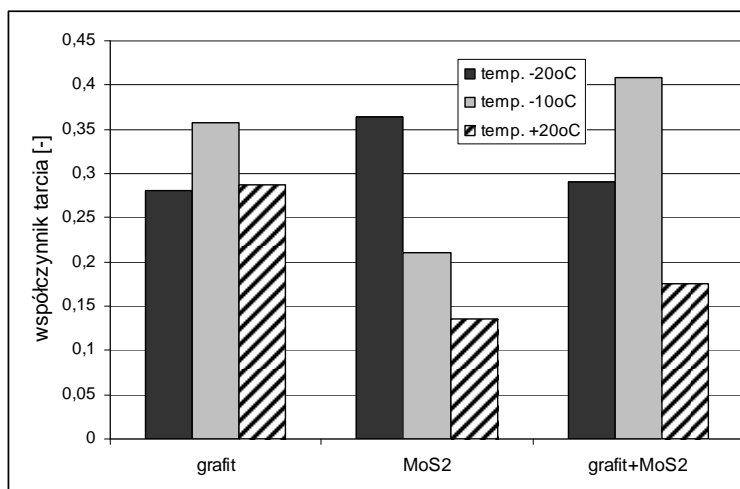




**Rys. 7. Porównanie współczynników tarcia skojarzenia: stal-stal oraz stal-kompozyt w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$**

Fig. 7. Comparison between the friction coefficients determined for the steel-steel and composite-steel material combinations at the temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$

Przeprowadzono także analizę wpływu binarnej mieszanki dodatków smarnych wprowadzonych do kompozytu metalopolimerowego na współczynnik tarcia. Uzyskane wyniki zamieszczono na **Rys. 8**.



**Rys. 8. Porównanie współczynników tarcia kompozytów zawierających 10 cz. wag. dodatków smarnych wprowadzonych pojedynczo oraz w pakiecie binarnym**

Fig. 8. Comparison between the friction coefficients determined for the composites containing 10 wt. % of lubricating additives introduced singly or in binary batches

Porównanie współczynników tarcia kompozytów zawierających pojedynczo wprowadzane dodatki smarne oraz mieszaninę binarną wskazuje, iż nie występuje efekt synergii działania tych dodatków, a w wielu przypadkach obserwuje się pogorszenie skuteczności przeciwtarciowej odnotowanej dla kompozytu zawierającego jeden dodatek. Współdziałanie zastosowanych w kompozytach dodatków smarnych o budowie warstwowej może być trudne do zaobserwowania ze względu na możliwą niejednorodność składu i struktury kompozytu, a także ze względu na rodzaj styku (skoncentrowany) występującego w modelowym węźle tarcia.

## PODSUMOWANIE

Podsumowując przeprowadzone badania, można stwierdzić, iż kompozyty na podstawie epoksydowej napełnione proszkiem żelaza i zawierające dodatki uszlachetniające o właściwościach smarów stałych mogą być stosowane w warunkach niskotemperaturowych jako materiały regeneracyjne, szczególnie w skojarzeniach ruchowych. Wśród zbadanych dodatków uszlachetniających (grafit oraz disiarczek molibdenu) efektywniejszą substancją poprawiającą właściwości tribologiczne w szerokim zakresie temperaturowym, tj. zarówno w niskich temperaturach, jak i w temperaturze pokojowej jest disiarczek molibdenu. Niemniej jednak w  $-20^{\circ}\text{C}$  również grafit powoduje znaczące obniżenie współczynnika tarcia badanego kompozytu metalopolimerowego. Wystarczające jest wprowadzenie ok. 10–20 cz. wag. dodatków smarnych, aby uzyskać wielokrotne obniżenie współczynnika tarcia skojarzenia: kompozyt–stal w porównaniu z nieuszlachetnionym materiałem kompozytowym testowanym w skojarzeniu ze stalą. Skojarzenie: kompozyt metalopolimerowy–stal w warunkach niskich temperatur charakteryzuje się ponaddwukrotnie mniejszym współczynnikiem tarcia niż skojarzenie: stal–stal.

## LITERATURA

1. Wojtkun F.: Materiałoznawcze problemy eksploatacji urządzeń technicznych w niskich temperaturach. *Problemy Eksploatacji*, 2001, 4, 337–344.
2. Wojtkun F.: Problem zużywania tribologicznego staliwa w niskich temperaturach. *Tribologia*, 2003, 5, 409–415.
3. Mańkowska A., Michalczewski R., Szczerek M., Wulczyński J.: Niskotemperaturowe charakterystyki tribologiczne stalowych skojarzeń ciernych. *Tribologia*, 2010, 1, 77–92.
4. Schutz J.B.: Properties of composite materials for cryogenic applications. *Cryogenics*, 1998, 3, 3–12.
5. Reed R.P., Golda M.: Cryogenic composite: a review of strap and strut properties. *Cryogenics*, 1997, 37, 233–250.

6. Myung-Gon Kim, Sang-Guk Kang, Chun-Gon Kim, Cheol-Won Kong: Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures. *Composite Structures*, 2007, 79, 84–89.
7. Evseeva L.E., Tanaeva S.A.: Thermal conductivity of micro- and nanostructural epoxy composites at low temperatures. *Mechanics of Composite Materials*, 2008, 44, 1, 87–92.

*Praca wykonana w ramach Programu Badawczego Rozwojowego nr N R15 0023 10.*

### Summary

The paper presents low-temperature tribological characteristics of the metal-polymer composites intended for regeneration of the sliding machine elements. Three series of the composites were prepared, employing solid-state lubricants of the anisotropic consistency (graphite and molybdenum disulphide) with the various qualitative and quantitative content. Tribological characteristics of the composites were determined using the MCR 102, Anton Paar rheometer equipped with a system for tribological testing. The tribosystem consisted of 3 plates made of the metal-polymer composite rubbed against a steel ball (non-conformal contact). An effect of the solid-state lubricants on the friction coefficient curves at the temperatures within the range of  $-10$  to  $-20^{\circ}\text{C}$  was investigated. The friction coefficients were compared with the ones determined at the room temperature. It was observed that for all the tested materials a drop in the temperature caused an increase in friction. However, what should be pointed out, when the metal-polymer composite rubbed against steel at low temperatures, the friction coefficient was noticed to be several times lower than the friction coefficient determined in the steel-steel tribosystem. The best results were obtained for the composites containing molybdenum disulphide.