

Zbigniew PAWELEC\*, Janusz DASIEWICZ\*

## ANALIZA PRZYDATNOŚCI PROSZKÓW METALI I STOPÓW JAKO NAPEŁNIACZY ŚLIZGOWYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

### ASSESSMENT OF SUITABILITY OF POWDERED METALS AND ALLOYS AS FILLERS IN POLYMER COMPOSITES FOR SLIDING TRIBOSYSTEMS

#### Słowa kluczowe:

Kompozyt polimerowy, napełniacze, energia powierzchniowa, tarcie, zużycie.

#### Keywords

Polymer composite, fillers, surface energy, friction, wear

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ proszkowych napełniaczy metalicznych na właściwości fizykomechaniczne cieplne i tribologiczne kompozytów polimerowych. Za pomocą mikroskopu określono skład chemiczny i para-

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

metry stereometryczne komponentów proszkowych. Jako napelniacze metaliczne zastosowano proszki żelaza jego stopów i innych metali oraz mieszaniny tych komponentów. Dokonano oceny właściwości fizykomechanicznych i cieplnych, opracowanych kompozytów, a ich parametry tribologiczne określono na maszynie tarciowej T-05 typu rolka-kłosek. Wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy przeprowadzono analizę stanu powierzchni próbek kompozytów po eksperymencie tribologicznym i określono stężenie występowania na powierzchni wytypowanych pierwiastków.

## WPROWADZENIE

Tworzywa kompozytowe otworzyły nowe możliwości i perspektywy przed inżynierią materiałową zwłaszcza co do zakresu stosowalności polimerów organicznych. Wykorzystanie matryc polimerowych do wytwarzania kompozytów stanowi ważniejszy etap rozwoju nowych materiałów niż zastosowanie matryc metalowych oraz ceramicznych w metalurgii i do wytwarzania ceramiki. Szczególnie cenna stała się możliwość wykorzystania dużej różnorodności matryc polimerowych (termoplasty, żywice chemo- i termoutwardzalne, polimery naturalne, kopolimery, kauczuki), jak i postaci materiałów stanowiących fazę rozproszoną (włókna węglowe, szklane, aramidowe, włókna naturalne mineralne i biopolimerowe). Istotny wpływ na właściwości mechaniczne, elektryczne, antykorozyjne lub cieplne wytwarzanych kompozytów ma także sposób przestrzennego rozmieszczenia napelniaczy w matrycy polimerowej (układ jednoosiowy, gradientowy, warstwowy, chaotyczny). Dzięki temu we względnie prosty sposób można uzyskać całkowicie nowe lub też w istotny sposób poprawić dotychczasowe właściwości [L. 1, 2, 3].

Materiały kompozytowe na podstawie polimerowej coraz powszechniej zastępują metale i ich stopy w zastosowaniach do części maszyn pracujących w warunkach tarcia. Są one chyba jedyną grupą materiałów, które stosuje się zarówno w węzłach, gdzie wymagane jest jak najmniejsze tarcie (łożyska ślizgowe), jak i tam, gdzie zachodzi potrzeba dużych oporów ruchu (okładziny hamulcowe). Obok całego szeregu zalet kompozytów polimerowych, które decydują o ich stosowaniu jako materiały ślizgowe mają one pewne ograniczenia: małą przewodność i odporność cieplną i stosunkowo dużą rozszerzalność [L. 4, 5].

Najważniejsze parametry decydujące o przydatności materiałów konstrukcyjnych zapisano w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Pożądane tendencje kształtowania podstawowych właściwości materiałów konstrukcyjnych decydujących o ich użyteczności**

↑	Wytrzymałość	↑	Temperatura pracy
↑	Sztywność	↑	Ciągliwość
↓	Gęstość	↓	Koszt

W procesie projektowania – komponowania materiałów kompozytowych, wyraźnie zaznacza się oczekiwanie małej gęstości, a możliwie dużej wytrzymałości właściwej  $R_m/\gamma$  (wytrzymałość odniesiona do gęstości) oraz dużej sztywności właściwej  $E/\gamma$  (moduł Younga odniesiony do gęstości). Kompozyty polimerowe pozwalają na uzyskanie wyjątkowo dużych wartości  $R_m/\gamma$  i lub  $E/\gamma$  jest to jeden z powodów ich stosowania. w różnych konstrukcjach [L. 6, 7, 8].

## WYNIKI BADAŃ

Poddane badaniom kompozyty metalożywiczne stanowią przykład kompozytów proszkowych. Model wytrzymałościowy takiego materiału zasadniczo odbiega od modelu kompozytu włóknistego. Kompozyt taki jest bliższy cechom materiału izotropowego, stopień jego niejednorodności jest znacznie niższy niż kompozytu zbrojonego włóknem a stosowane napełniacze proszkowe muszą spełniać następujące warunki:

- być chemicznie obojętnym w stosunku do osnowy i nie wpływać na przebieg procesu sieciowania,
- charakteryzować się wysoką dyspersją,
- być dobrze zwilżalnym przez osnowę.

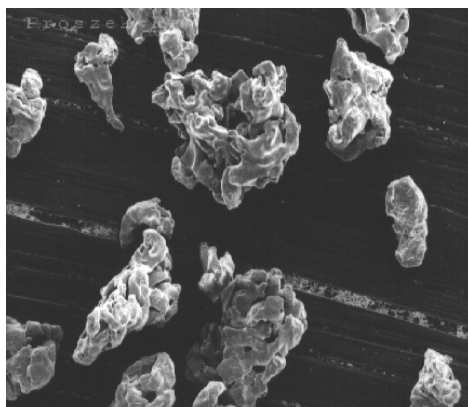
Wymagania takie spełniają m.in. napełniacze proszkowe pochodzenia mineralnego oraz sproszkowane metale i ich tlenki.

Celem badań było określenie wpływu rodzaju, granulacji szczególnie frakcji poniżej 40  $\mu\text{m}$  i składu chemicznego podstawowego napełniacza proszkowego na właściwości użytkowe otrzymanych kompozytów polimerowych. Jako napełniacze kompozytów zastosowano:

- proszek żelaza Fe,
- proszek stopowy Sn – Cu,
- proszek stopowy NiCrFe,

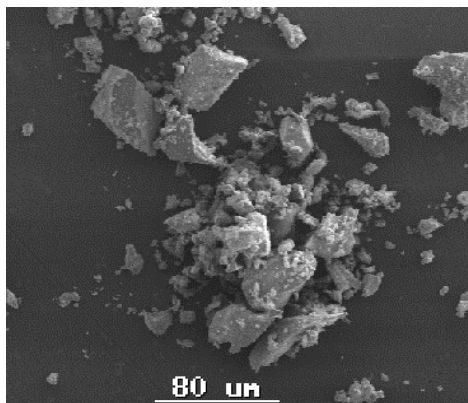
- proszek stopowy Fe – Mn,
- proszek żelaza MT-212.

Dla określenia parametrów stereometrycznych wybranych napełniaczy poddano ich obserwacji na skaningowym mikroskopie elektronowym.



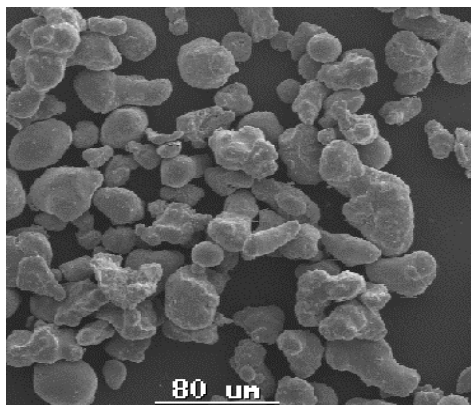
**Rys. 1. Obraz mikroskopowy proszku żelaza**

Fig. 1. SEM image of Fe powder

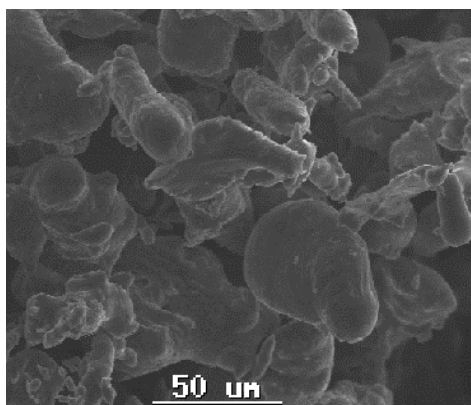


**Rys.2. Obraz mikroskopowy proszku stopowego Fe-Mn**

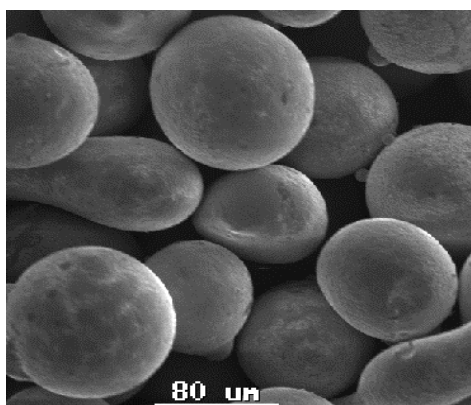
Fig. 2. SEM image of Fe-Mn alloy powder



**Rys.3. Obraz mikroskopowy proszku stopowego MT 212**  
Fig. 3. SEM image of MT 212 alloy powder



**Rys. 4. Obraz mikroskopowy proszku Sn-Cu**  
Fig. 4. SEM image of Sn-Cu powder



**Rys. 5 Obraz mikroskopowy proszku stopowego NiCrFe**  
Fig. 5. SEM image of NiCrFe powder

Wykorzystując przedstawione na rysunkach proszkowe napełniacze metaliczne sporządzono kompozyty polimerowe, których składy jakościowe podano w **Tabeli 2**.

**Tabela 2. Składy jakościowe kompozytów**

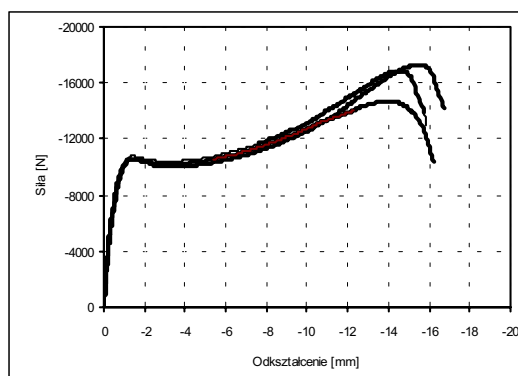
<b>Symbol próbki / Rodzaj napełniacza</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>
<b>Proszek Fe</b>	X					X	X	X
<b>Proszek Fe-Mn</b>		X				X		
<b>Proszek MT-212</b>			X				X	
<b>Proszek NiCrFe</b>				X				
<b>Proszek Sn - Cu</b>					X			X

Dla opracowanych kompozytów określono podstawowe właściwości fizykomechaniczne temperaturę odkształcenia cieplnego i współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej uzyskując następujące rezultaty.

**Tabela 3. Właściwości fizykomechaniczne i cieplne badanych kompozytów polimerowych**

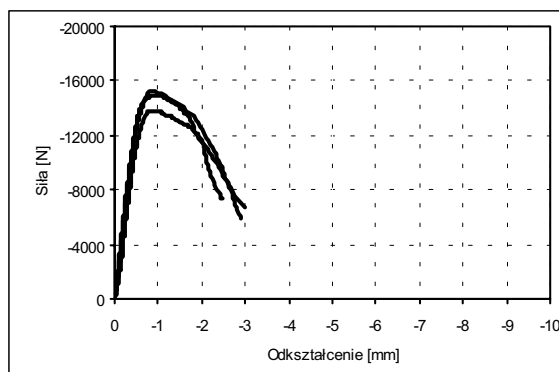
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>
<b>Twardość [MPa]</b>	283	260	245	259	222	267	250	255
<b>Udarność [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	3,0	3,7	3,2	2,2	2,1	4,1	3,3	3,3
<b>Ściskanie [MPa]</b>	96	108	100	97	99	121	100	114
<b>Odrywanie [MPa]</b>	22	21	20	18	22	26	21	18
<b>Wsp. <math>\alpha</math> [x10<sup>-6</sup>°C<sup>-1</sup>]</b>	73	70	75	79	77	75	71	73
<b>Temp. ugięcia [°C]</b>	52	51	48	48	49	53	50	52

Na podstawie otrzymanych wyników badań można wnioskować, że czynnikami rzutującymi na właściwości materiałów kompozytowych są cechy napełniacza metalicznego. Badane własności mechaniczne uzależnione są w dużym stopniu od rodzaju napełniacza kształtu i parametrów stereometrycznych.



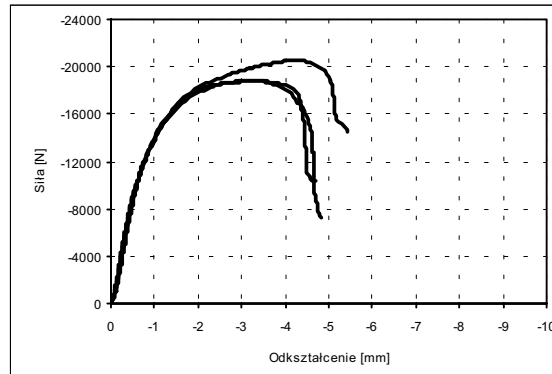
**Rys. 6. Krzywe ściskania dla kompozytu napełniaczem Sn-Cu**

Fig. 6. Compression characteristics for the composite with Sn-Cu filler



**Rys. 7. Krzywe ściskania dla kompozytu z proszkiem NiCrFe**

Fig. 7. Compression characteristics for the composite with NiCrFe filler



**Rys. 8. Krzywe ściskania dla kompozytu z proszkiem Fe- FeMn**

Fig. 8. Compression characteristics for the composite with Fe-FeMn filler

Przedstawione na **Rys 6–8** krzywe ściskania wskazują na dość zróżnicowane właściwości opracowanych materiałów. Porównując ich przebieg można stwierdzić, że kompozyty polimerowe w skład których wchodzi proszki metali o małej spójności wewnętrznej cyna, miedź (**Rys. 6**) odznaczają się pewnymi cechami plastycznymi. Wartość odkształcenia przy, której następuje proces niszczenia próbki wykonanej z tych kompozytów jest kilkakrotnie większa niż dla kompozytu z proszkiem NiCrFe (**Rys.7**) dla których proces kruchej pęknięcia następuje przy znacznie mniejszym odkształceniu. Duża przyczepność do materiału podłoża oraz wysoka wytrzymałość na ściskanie kompozytów zawierających w swoim składzie wypełniacz proszkowy żelazo – żelazo-mangan wskazuje, że kompozyt ten posiada cechy niezbędne dla materiału, który może być stosowany na ślizgowe elementy maszyn. Najniższe wskaźniki wytrzymałościowe kompozytów z udziałem proszku NiCrFe wynikają prawdopodobnie z kulistej budowy i regularnego kształtu tego wypełniacza.

W materiałach kompozytowych z ciekłą osnową wytrzymałość połączenia między komponentami niezależnie od stopnia rozwinięcia powierzchni (adhezja mechaniczna, większa liczba wiązań i punktów styczności osnowy z wypełniaczem powoduje zwiększenie sztywności makrocząsteczek kompozytu i zwiększenie energii jego degradacji mechanicznej) uwarunkowana jest także procesem zwilżania i możliwością wystąpienia między komponentami oddziaływań chemicznych, elektrycznych i dyfuzyjnych. Procesy te z kolei uzależnione są od wielkości energii powierzchniowej wypełniaczy. Dla pełniejszego wyjaśnienia przyczyn zróżnicowanych wła-



ściwości wytrzymałościowych kompozytów postanowiono, na podstawie pomiarów kąta zwilżania na tensjometrze K-12 firmy Kruss i zmodyfikowanego równania Washburna, dokonać pomiaru swobodnej energii powierzchniowej (SFE) niektórych napełniaczy.

$$\cos\Theta = (m^2/t) \times (\eta/\rho\sigma c)$$

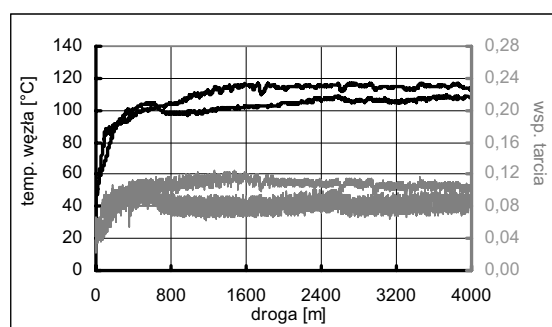
gdzie:  $t$  – czas,  $m$  – masa cieczy,  $\eta$  – lepkość cieczy,  $\rho$  – gęstość cieczy,  $\sigma$  – napięcie powierzchniowe cieczy,  $\Theta$  – kąt zwilżania proszku,  $c$  – stała materiałowa wyznaczana dodatkowymi pomiarami.

Swobodna energia powierzchniowa proszków wynosiła odpowiednio:

- proszek żelaza – 39,31 [mN/m],
- proszek żelazo–mangan – 42,14 [mN/m],
- proszek nikiel–chrom–żelazo – 34,17 [mN/m].

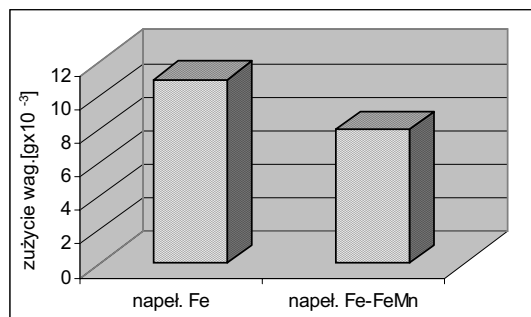
W przypadku proszku NiCrFe napięcie powierzchniowe tego napełniacza jest zbliżone do wartości tego parametru dla osnowy kompozytu powoduje to pogorszenie zwilżalności, zmniejszenie oddziaływań adhezyjnych i w konsekwencji spadek parametrów wytrzymałościowych.

Nałożenie powłoki regeneracyjnej z kompozytu polimerowego powoduje istotne zmiany warunków tarcia a tym samym odmienną specyfikę zużywania. Dla dokonania oceny trwałości skojarzenia ślizgowego przeprowadzono eksperyment tribologiczny na testerze T-05. Celem badań było wyznaczenie charakterystyk tarciowo – zużyciowych wybranych materiałów kompozytowych w następujących warunkach  $p = 9$  MPa,  $v = 0,3$  m/s, smarowanie jednokrotne smarem plastycznym.



**Rys 9. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia kompozytów z napełniaczem Fe i Fe-FeMn**

Fig. 9. Tribosystem temperature and friction coefficient curves during tribological testing of the composites



**Rys. 10. Zużycie wagowe badanych materiałów**

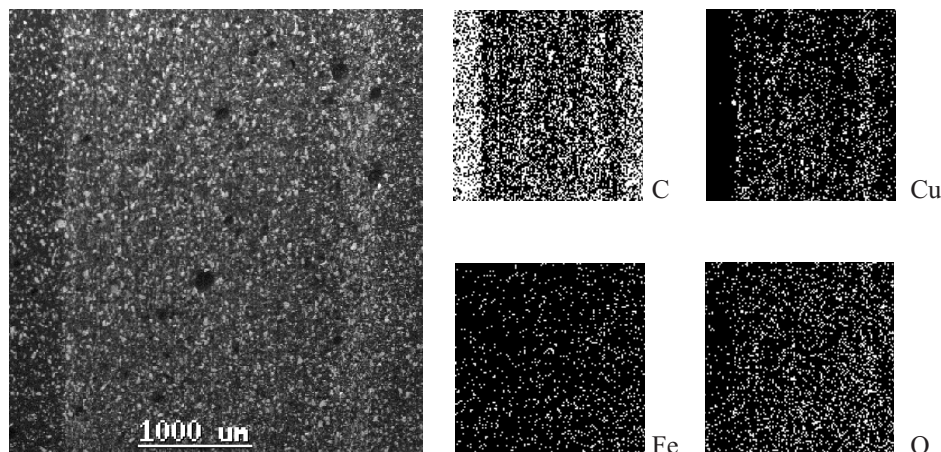
Fig. 10. Wear (mass loss) of the tested composites

Wstępnym testom tarciowo zużyciowym poddano wszystkie z opracowanych kompozytów, najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla materiałów z napełniaczem Fe i Fe-FeMn.

Na **Rysunkach 9 i 10** przedstawiono wybrane charakterystyki tribologiczne kompozytów z proszkiem żelaza oraz mieszaniną żelaza i żelazo manganu. Charakterystyki te pokazują stosunkowo dużą stabilność rejestrowanych parametrów. Mniejsze opory ruchu a tym samym niższą temperaturę modelowego węzła tarcia notujemy dla kompozytu z napełniaczem żelazo – żelazo mangan. Kompozyt ten charakteryzuje się również większą odpornością na proces zużywania w porównaniu z kompozytem tylko z proszkiem żelaza. Wyniki uzyskanych badań tribologicznych nad doborem proszkowych napełniaczy metalicznych sugerują w tym przypadku o dobrym przewodnictwie cieplnym tego materiału i małych oddziaływaniach adhezyjnych między ślizgającymi się powierzchniami.

Po eksperymencie tribologicznym przeprowadzono obserwację powierzchni tarcia i mikroanalizę rentgenowską za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wyniki badań przedstawiono na rysunku.

Rentgenogramy pochodzące z powierzchni próbki kompozytu zawierającego żelazo i żelazo-mangan świadczą o tym, że w czasie procesu tribologicznego zachodzą zjawiska, które prowadzą do wytworzenia na powierzchni kompozytu warstewki składającej się m.in. z węgla, żelaza i miedzi. Wytworzona warstwa wierzchnia przyjmuje funkcję czynnika przeciw zużyciowego i poprawia jakość współpracy tribologicznej.



**Rys. 11. Obraz powierzchni rolki kompozytu z napełniaczem Fe-FeMn oraz wyniki mikroanalizy rentgenowskiej na obecność na powierzchni tarcia C, Cu, Fe, O**  
Fig. 11. SEM image of the worn surface of the composite with Fe-FeMn filler and EDS maps for C, Cu, Fe, O

## PODSUMOWANIE

Spośród wprowadzanych do osnowy polimerowej napełniaczy proszkowych najwyższą efektywność uzyskano dla mieszaniny żelaza i żelazo manganu. Otrzymane rezultaty badań pozwalają stwierdzić, że właściwości eksploatacyjne kompozytu polimerowego w istotny sposób zależą od rodzaju, składu chemicznego i parametrów stereometrycznych napełniacza metalicznego. Oprócz wymienionych czynników duży wpływ na właściwości kompozytów polimerowych ma wartość energii powierzchniowej napełniaczy. Decyduje ona o rodzaju i wielkości oddziaływań na granicy faz matryca polimerowa – napełniacz. Proszki metali o rozwiniętej powierzchni, zróżnicowanym składzie oraz charakteryzujące się wysoką energią powierzchniową (proszek FeMn) umożliwiają opracowanie kompozytu o wysokich parametrach wytrzymałościowych, dobrych charakterystykach tribologicznych i wysokiej odporności na zużywanie.

## LITERATURA

1. Wilczyński A.P. Polimerowe kompozyty włókniste. PWN Warszawa 1996.
2. Jurkowski B., Jurkowska B.: Sporządzanie kompozycji polimerowych. Elementy teorii i praktyki. WNT Warszawa 1995.

3. Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne. Wydawnictwo Rzeszów 1996.
4. Polak A.: Zwiększenie trwałości i niezawodności par trących przez zastąpienie materiałów łożyskowych tworzywami sztucznymi. Problemy Eksploatacji 6/1995.
5. Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K.: Polimerowe łożyska slizgowe z tworzyw termoplastycznych. Poradnik Tribologii i Tribotechniki. Tribologia 6/1995.
6. Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty. Oficyna wydawnicza PW Warszawa 2001.
7. Śleziona J.: Podstawy technologii kompozytów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 1998.
8. Blicharski M.: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT Warszawa 1998.

**Recenzent:**  
**Janusz JANECKI**

### Summary

**The authors present an effect of powdered metallic fillers on physico-mechanical, thermal and tribological properties of polymer composites. The aim of the research was to find an influence of chemical composition and stereometry of metallic and alloy particles on features of the composites. Metallic fillers were powders of iron and other metals, and their alloys, as well as mixtures of those components. Physico-mechanical and thermal properties of the developed composites were assessed; tribological properties were determined using a block-on-ring tester (T-05). An analysis of the worn surface was carried out using a scanning electron microscope (SEM) and X-ray spectrometer (EDS). The aim was to determine the surface distribution of some elements in the surface layer.**