

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Aleksy Patejuk, Bazyli Krupicz

**Zużycie ściernie i erozyjne
wybranych materiałów kompozytowych typu FeAl-Al₂O₃**

Słowa kluczowe: materiał kompozytowy FeAl-Al₂O₃, twardość, zużycie ściernie, zużycie erozyjne

Przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych materiału kompozytowego na podstawie fazy międzymetalicznej Fe-Al zbrojonego cząstkami Al₂O₃. Zbadano wpływ ilości i wielkości tych cząstek na właściwości tribologiczne i odporności na zużycie erozyjne badanego materiału kompozytowego. Stwierdzono wyraźną poprawę właściwości materiału kompozytowego, którego zbrojenie stanowią cząstki Al₂O₃ z powłoką niklową ukonstytuowaną na ich powierzchni.

**Abrasive and Erosion Wear
of Selected Composite Materials of FeAl-Al₂O₃ Type**

Key words: composite material FeAl-Al₂O₃, hardness, abrasive wear, erosion wear

The results of research on selected mechanical properties of composite material on the matrix of intermetallic phase Fe-Al reinforced with Al₂O₃ particles are presented. The influence of particle quantity and size on tribologic properties of selected composite material was examined as well as the influence of resistance on erosion wear of the material was investigated. Significant improvement of properties was recorded in the composite material reinforced with Al₂O₃ particles with nickel layer placed on their surface.

Wstęp

Analiza właściwości użytkowych materiałów kompozytowych wskazuje, że nie są one prostą sumą właściwości komponentów. Stąd też projektowanie tych materiałów, przy z góry założonych cechach użytkowych (właściwościach), jest utrudnione. Ich wytwarzanie wymaga starannej realizacji procesu technologicznego i ciągłej kontroli uzyskiwanych właściwości [1]. Problem ten dotyczy w szczególności materiałów kompozytowych z osnową metaliczną. Pomimo, że w drugiej połowie XX wieku zostały opracowane podstawy technologii wytwarzania tej grupy materiałów, nazywanych niekiedy kompozytami zaawansowanymi, to jednak nie doprowadziło to do lawinowego ich wykorzystywania w praktyce przemysłowej [2]. Największą barierą w tym względzie okazały się problemy związane z uzyskaniem wysokiej i powtarzalnej wytrzymałości połączeń komponentów (faz) składowych tych materiałów kompozytowych.

Wieloletnie badania potwierdziły, że na jakość trwałego i gazoszczelnego procesu spajania składników fazowych materiału kompozytowego składa się wiele czynników. Najważniejsze z nich to:

- zwilżalność powierzchni fazy zbrojącej przez osnowę,
- stan fizyczny i skład chemiczny warstwy powierzchniowej na granicy rozdziału faz,
- podobieństwo współczynników rozszerzalności liniowej spajanych materiałów.

Przedstawione powyżej czynniki odnoszą się w szczególności do grupy materiałów kompozytowych z osnową metaliczną. Problem uzyskiwania niepowtarzalnych właściwości w tej grupie materiałów kompozytowych, wzbudza zainteresowanie wielu badaczy, wymuszając niejako naturalną potrzebę zintensyfikowania prac badawczych właśnie nad tą grupą tworzyw konstrukcyjnych [3, 4]. Wynika to również z faktu wciąż rosnących wymagań konstruktorów oraz użytkowników maszyn i urządzeń technicznych, w zakresie potrzeby aplikacji coraz to doskonalszych jakościowo materiałów [5, 6]. Stąd też zachodzi pilna potrzeba prowadzenia badań nad istniejącymi bądź nowymi materiałami kompozytowymi, a w szczególności z osnową metaliczną. Wynikiem tych prac powinno być opracowanie funkcjonalnych charakterystyk użytkowych [7, 8].

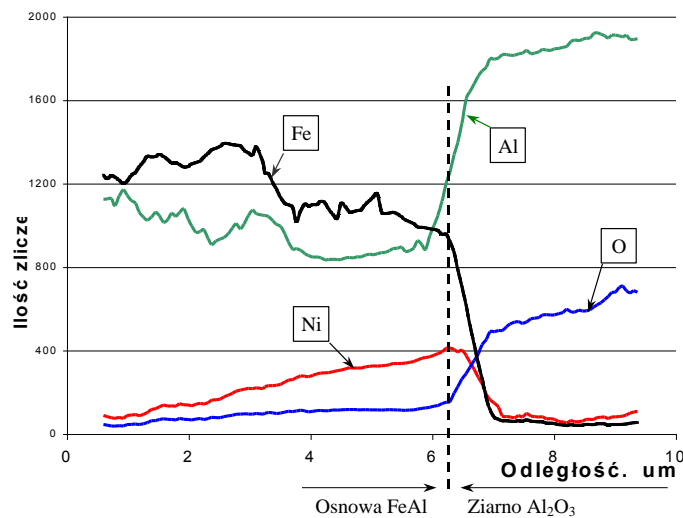
W wielu przypadkach jednym z najważniejszych kryterium decydującym o możliwości wykorzystania danego materiału kompozytowego w konstrukcji, jest możliwość uzyskania wysokich właściwości wytrzymałościowych oraz odporności na zużycie, przy jednoczesnym zachowaniu dobrej stabilności tych właściwości [9, 10]. Powyższe stało się główną przesłanką przeprowadzenia badań i przedstawienia ich wyników w niniejszym artykule.

Metodyka i wyniki badań

Materiał wyjściowy do wykonania próbek materiału kompozytowego został przygotowany metodą mieszania technicznie czystych proszków żelaza i aluminium oraz cząstek fazy zbrojącej. Wcześniejsze badania [11] wykazały, że aby uzyskać osnowę materiału kompozytowego złożoną z fazy FeAl, należy zastosować mieszaninę proszków w proporcji udziału atomowego: 60% żelaza i 40% aluminium. Zbrojenie stanowiły wyselekcjonowane wcześniej cząstki Al₂O₃ o trzech zakresach wielkości, tj. poniżej 10 μm (umownie nazwanych f0), 20 – 30 μm (umownie nazwanych f2) i 50 – 60 μm (umownie nazwanych f5). Proces wytwarzania materiału kompozytowego składał się z dwóch etapów.

Pierwszy etap (spiekanie wstępne) polegał na prasowaniu wcześniej przygotowanych mieszanin proszkowych, przy dwuwariantowym sposobie prasowania: I wariant – prasowanie w warunkach statycznego obciążenia przy ciśnieniu 300 MPa, II wariant – prasowanie w warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych o częstotliwości 40 Hz. Parametry procesu, tj. temperatura i czas spiekania w obydwu wariantach były jednakowe i wynosiły odpowiednio: 660°C, przy czasie prasowania wynoszącym jedną godzinę.

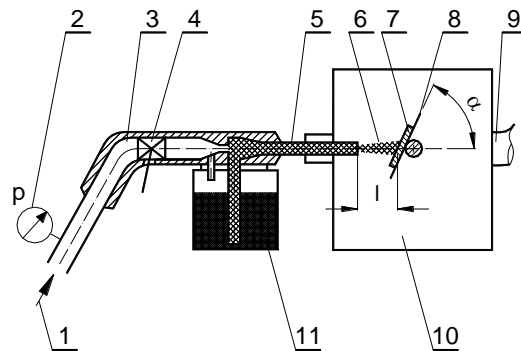
Drugi etap prasowania (spiekania) nazwany umownie zasadniczym realizowano w temperaturze 1250°C w atmosferze ochronnej argonu w czasie 1 godziny. Wykonane próbki miały kształt walca o średnicy 10 mm i wysokości około 10 – 12 mm.



Rys. 1. Mikroanaliza liniowa składu chemicznego w strefie granicy rozdziału faz
Fig. 1. Linear microanalysis of chemical composition in the area of phase separation border

Przeprowadzone badania mikroskopowe wykazały, że w każdym przypadku odnotowano występowanie dwóch faz materiału kompozytowego, przy czym osnowę stanowi faza intermetaliczna o składzie chemicznym charakterystycznym dla występowania fazy FeAl. Dodatkowo w próbkach materiału kompozytowego zbrojonych cząstkami z powłoką niklową, badanych bezpośrednio po spiekaniu zasadniczym, odnotowano zwiększone stężenie niklu w obszarze osnowy bezpośrednio przylegającym do granicy rozdziału (rys. 1).

Próby erozyjne wykonano na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym (rys. 2). Parametry eksperymentu zostały dobrane zgodnie ze wcześniejszymi badaniami własnymi [12, 13]. Podczas próby utrzymywano stałe ciśnienie powietrza na poziomie 0,3 MPa. Przy tym ciśnieniu uzyskiwano prędkość strumienia około 150 m/s. Kąt padania strumienia na powierzchnię badanej próbki wynosił 30° . Elementem erozyjnym były cząstki piasku kwarcowego, frakcji 0,2 – 0,3 mm. Podczas realizacji eksperymentu dokonywano cyklicznie pomiaru ubytku masy próbki – co 1 minutę (w zakresie łącznego czasu ekspozycji do 4 minut), następnie co 2 minuty do czasu zakończenia próby.

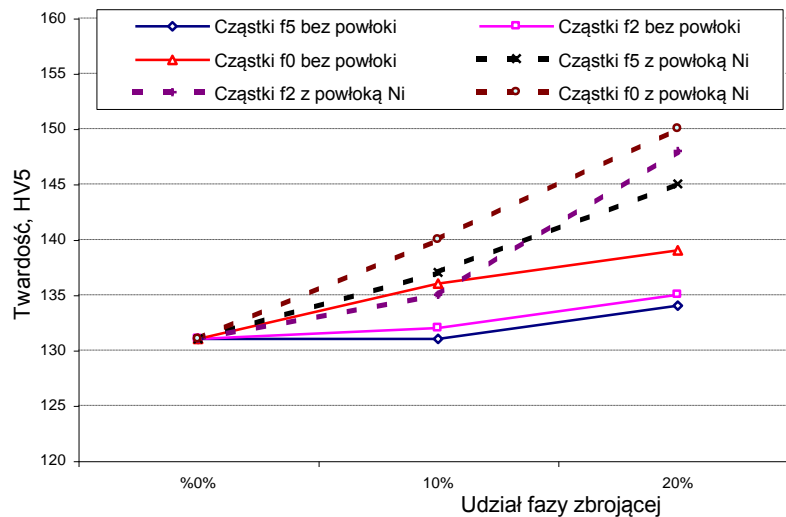


Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 – doprowadzenie sprężonego powietrza, 2 – manometr, 3 – przewód ciśnieniowy, 4 – zawór zamykający, 5 – kierownica o średnicy 6 mm i długości 120 mm, 6 – strumień piasku, 7 – próbka, 8 – uchwyt mocujący, 9 – przewód wentylacyjny, 10 – komora robocza, 11 – pojemnik z piaskiem, $l = 15$ mm – odległość próbki od wylotu strumienia piasku, $\alpha = 90^\circ$ – kąt padania strumienia

Fig. 2. The diagram of test stand

Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości użytkowe większości materiałów inżynierskich jest ich twardość. Pomiary twardości próbek wytworzonego materiału kompozytowego przeprowadzono metodą Vickers'a, przy obciążeniu 50 N. Wyniki testów wskazują, że udział fazy zbrojącej niezależnie od wielkości zastosowanych cząstek, jest czynnikiem stosunkowo mało wpływającym na poziom twardości (rys. 3). Zauważono jedynie nieznaczną tendencję wzrostu twardości badanego materiału kompozytowego

wraz ze wzrostem ilości zbrojenia. Odnotowano również nieznaczny wzrost twardości materiału kompozytowego, w którym zostały zastosowane cząstki o mniejszych rozmiarach. Podobne oddziaływanie, jednak znacznie bardziej wyraźnie rejestrowalne, odnotowano w przypadku zastosowania na cząstkach zbrojenia powłoki niklowej, wtedy poziom twardości zwiększył się o około 5 – 10%.

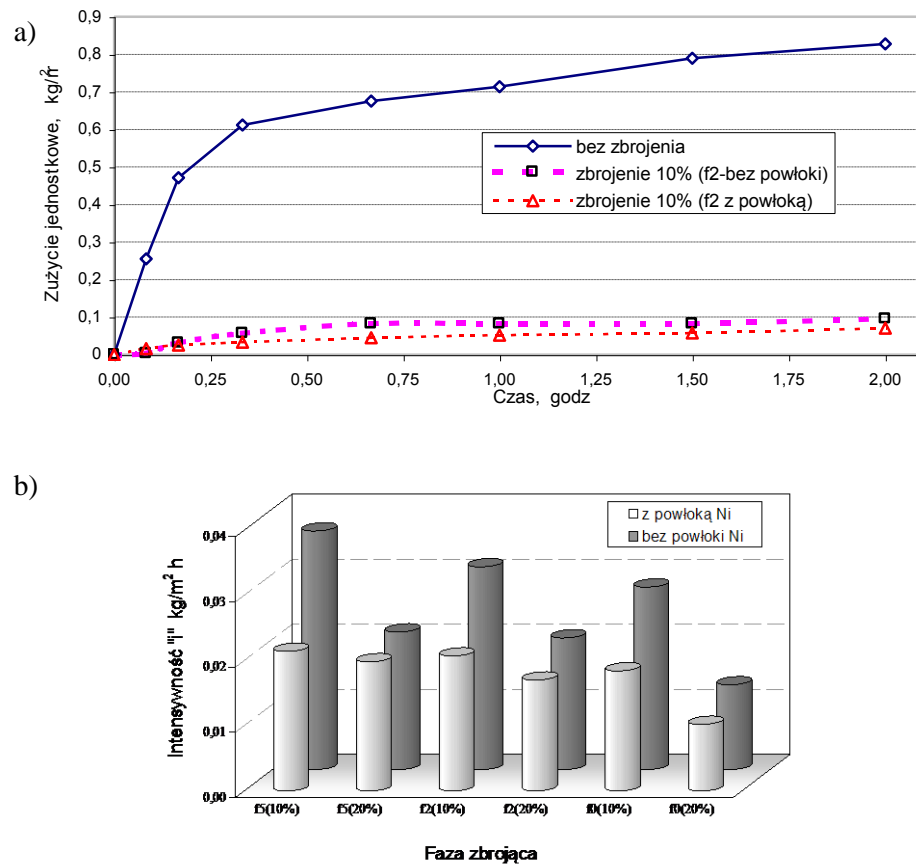


Rys. 3. Wpływ ilości zbrojenia na twardość materiału kompozytowego
 Fig. 3. Influence of reinforcement quantity on the hardness of composite material

W kolejnym etapie badań, przygotowane próbki poddano testom odporności na zużycie dwoma metodami: metodą „pin on disc” oraz strumieniowo-ścierną. Testy odporności na zużycie ściernie realizowano stosując nacisk jednostkowy 3 MPa, oraz prędkość liniową (obwodową) 0,5 m/s. Przeciwpółka była wykonana ze stali 45 ulepszonej cieplnie o twardości około 45 HRC. Czas trwania próby był jednakowy dla wszystkich testów i wynosił 2 godziny. Temperatura rejestrowana w sposób ciągły w bezpośrednim sąsiedztwie węzła tribologicznego (w bezpośredniej strefie pomiaru wartości zużycia liniowego) wynosiła 25±2°C. Zmianę masy próbki (ubytek masy) określano okresowo poprzez jej ważenie, z dokładnością 0,001 g.

Wyniki badań zużycia ściernego w funkcji czasu trwania próby (rys. 4) wskazują, że ilość fazy zbrojącej w postaci cząstek Al₂O₃ wydatnie wpływa na poziom zużycia tego materiału. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem udziału fazy

zbrojącej (w zakresie udziału do 20%) wytworzonej w warunkach statycznych, wzrasta wydatnie odporność materiału kompozytowego na zużycie ściernie.



Rys. 4. Odporność badanego materiału kompozytowego na zużycie ściernie: a – jednostkowy ubytek masy, b – intensywność zużycia

Fig. 4. Resistance of tested composite material to abrasive wear: a) – unit mass loss, b) – wear intensity

Również wyraźny wzrost odporności na zużycie ściernie odnotowano w przypadku badania materiałów kompozytowych zawierających cząstki Al_2O_3 z powłoką niklową. Należy przy tym jednak nadmienić, że charakterystyczną prawidłowością zaobserwowaną podczas prowadzenia testów było to, że intensywność zużywania się badanych par tribologicznych (o parametrach chropowa-

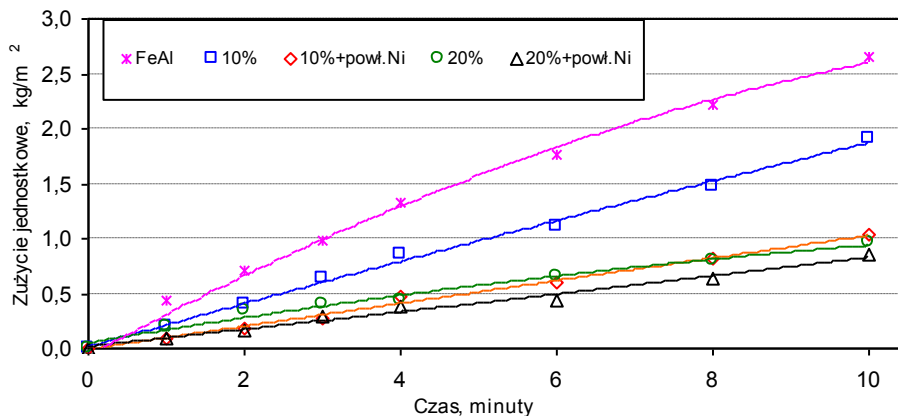
tości, próbki i przeciwpróbki, zarejestrowanych przed badaniami w zakresie $R_a = 0,1 - 0,2 \mu\text{m}$), stabilizowała się po około 15 minutach testu (rys. 4a). W związku z powyższym dla tego zakresu próby, możliwe było wyznaczenie współczynnika intensywności zużycia „i”, opisanego zależnością:

$$i = \frac{\Delta m / P}{t_u} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}]$$

gdzie:

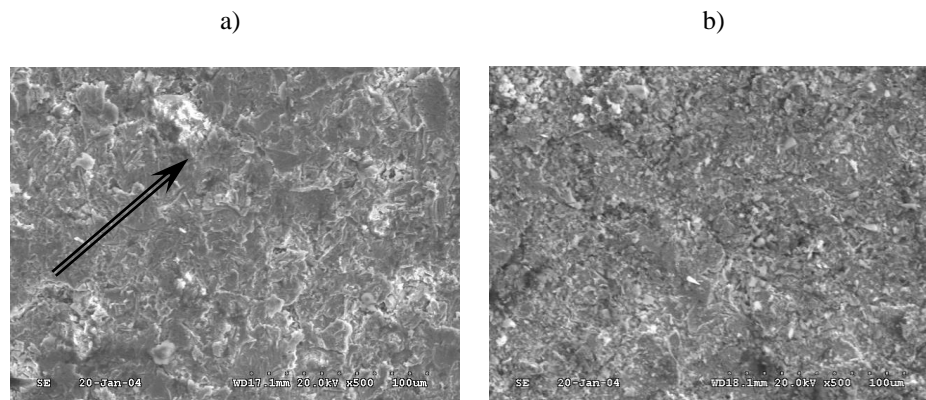
- $\Delta m / P$ – ubytek masy materiału próbki przypadający na jednostkową powierzchnię trącą,
- t_u – czas próby w stanie ustabilizowanym.

Odporność na zużycie erozyjne określono na tych samych próbkach, na których wykonano testy zużycia ściernego. Przeprowadzone badania odporności erozyjnej ujawniły, że zastosowanie zbrojenia w postaci cząstek Al₂O₃ obniża zużycie jednostkowe badanego materiału. Stwierdzono, że wielkość cząstek zbrojenia użytych w badaniach (f0, f2 i f5) nie wpływa w sposób zauważalny na wartość zużycia jednostkowego próbek materiału kompozytowego (przy porównywalnej zawartości fazy zbrojącej). Natomiast odnotowano istotny wpływ stanu powierzchni (obecności powłoki niklowej) zastosowanych cząstek fazy zbrojącej na poziom zużycia tych kompozytów (rys. 5).



Rys. 5. Zużycie erozyjne próbek fazy międzymetalicznej FeAl oraz materiału kompozytowego na jej podstawie z udziałem 10 i 20% fazy zbrojącej (materiał kompozytowy – próbki f2)
 Fig. 5. Erosion wear of intermetallic phase FeAl and composite material on its layer with a share of 10 and 20 % reinforcement phase (composite material – samples f2)

Badania ujawniły również, że w przypadku gdy cząstki fazy zbrojącej posiadają na powierzchni powłokę niklową, poziom zużycia jednostkowego obniża się. Zwiększenie ilości fazy zbrojącej (cząstek Al_2O_3 do 20%), powoduje obniżenie odporności kompozytu na erozję. Takie zachowanie się tych materiałów jest najprawdopodobniej związane ze zwiększonym prawdopodobieństwem (w stosunku do materiału zawierającego 10% zbrojenia) wykruszania się twardej i kruchej fazy zbrojącej, której w tym przypadku jest więcej. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe ujawniły również, że w efekcie powstałych wykruszeń na obserwowanej powierzchni pojawiły się wgłębienia, w których stwierdzano niekiedy obecność niecałkowicie usuniętych jeszcze fragmentów cząstek Al_2O_3 .



Rys. 6. Widok powierzchni po zużyciu erozyjnym materiału kompozytowego z udziałem 10 i 20% fazy zbrojącej (materiał kompozytowy – próbki f2 (powiększenie $\times 500$), przy kącie padania cząstek ścierniwa: a) 30° , \uparrow – ukierunkowanie odkształceń plastycznych b) 90°

Fig. 6. The view of surface of the composite material after erosion wear with a share of 10% and 20% reinforcement phase (composite material – samples f2, magnification $\times 500$) at the abrasive particle impact angle of a) 30° , \uparrow - direction of plastic deformation, b) 90°

Obserwacje struktury stereometrycznej powierzchni próbek materiału kompozytowego po badaniach erozyjnych (rys. 6) wskazują, że uderzenie cząstek ścierniwa wywołuje w materiale odkształcenia plastyczne. Przy kącie padania cząstek wynoszącym 30° widoczne są również ślady poślizgów cząstek, które wywołują odkształcenia plastyczne w określonym kierunku – kierunek poślizgów oznaczono strzałką na rysunku 6a. Wskazuje to, że w tym przypadku mechanizm zużywania się erozyjnego próbek jest wywołany również mechanizmem powstawania ubytków erozyjnych poprzez mikroskrwanie. Natomiast przy kącie padania cząstek ścierniwa wynoszącym 90° (rys. 6b) nie obserwuje się wyraźnej orientacji odkształceń plastycznych. Jest to charakterystyczne dla

„erozji uderzeniowej” [14]. W tym przypadku wykruszanie się cząstek materiału następuje po wyczerpaniu się możliwości ich odkształceń plastycznych.

Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Ilość fazy zbrojącej nie wpływa istotnie na poziom twardości materiałów kompozytowych na osnowie fazy międzymetalicznej zbrojonych cząstkami Al₂O₃.
2. Wraz ze wzrostem ilości fazy zbrojącej w materiale kompozytowym rośnie jego odporność na zużycie ściernie.
3. Odporność na zużycie ściernie materiału kompozytowego jest zdecydowanie wyższa (praktycznie o rząd wielkości) w porównaniu z odpornością materiału osnowy.
4. Odporność na zużycie erozyjne materiału kompozytowego na osnowie fazy międzymetalicznej zbrojonych cząstkami Al₂O₃ jest tylko nieznacznie większa w porównaniu z odpornością materiału osnowy.
5. Zastosowanie powłoki niklowej na cząstkach Al₂O₃, stanowiących fazę zbrojącą MK, powoduje poprawę jego cech użytkowych takich jak odporność ścierna i erozyjna.

Literatura

1. Bystrzycki J., Garbacz H., Przetakiewicz W., Kurzydłowski K., *Tematyka polskich prac badawczych w obszarze faz międzymetalicznych na tle badań światowych*, Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe nt. Stopy na osnowie faz międzymetalicznych, Warszawa (2000) s. 123 – 128.
2. Braszczyński J., *Problemy technologii odlewanych kompozytów metalowych*, Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Częstochowa (2001) s. 11 – 19.
3. Rudnik D., Sobczak J., *Tłoki kompozytowe do silników spalinowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.
4. Wojciechowski A., Sobczak J., *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.
5. Hunt W. H., Miracie D. B., *Automotive Applications of Metal-Matrix Composites*, ASM Handbook, Vol. 21 (2003), s. 1029 – 1032.
6. Gabrylewski M., Patejuk A., *Materiały kompozytowe z osnową metaliczną*, Inżynieria Materiałowa, 6 (1997), s. 222 – 227.

7. Zarański Z., Patejuk A., *Ocena jakości materiałów kompozytowych stosowanych w pojazdach samochodowych*, IV Krajowa Kursokonferencja „Technika samochodowa mechanika-elektronika”, Rzeszów (1999), s. 55 – 63.
8. Patejuk A., Durejko T., *Wpływ cyklicznie zmiennego obciążenia na odporność na zużycie ściernie kompozytu typu FeAl- Al₂O₃*, VI Sympozjum Naukowo-Techniczne, Jurata 2003, s. 369 – 374.
9. Patejuk A., Durejko T., *Badanie materiałów kompozytowych na osnowie aluminium zbrojonych cząstkami SiO₂*, Archiwum Odlewnictwa Nr 1, 2001, s. 544 – 550.
10. Patejuk A., *The influence of nickel covering of Al₂O₃ on properties of composite material with aluminium matrix*, Międzynarodowa Konferencja “Progres transportnych sredstw”, Wołgograd 2002, s. 246 – 250.
11. Patejuk A., Durejko T., *Wpływ fazy zbrojącej na odporność na zużycie ściernie kompozytu typu FeAl- Al₂O₃*, Mat. Konf. II Sympozjum Mechaniki „Zniszczenia materiałów i konstrukcji”, Augustów 2003, s. 303 – 306.
12. Krupicz B., *Problemy obespečeniâ iznosostojkosti detalej sistem pnevmo-transporta*, Trenie i iznos, T. 23, nr 5, 2002, s. 477 – 482.
13. Krupicz B., *Zastosowanie poliuretanów do ochrony luków rurociągów przed erozją*. X Seminarium „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn”, Kraków 2003, s. 205 – 210.
14. Chmielniak T., *Erozja pyłowa w maszynach przepływowych*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1988, Vol. 76, No. 4, s. 339 – 458.

Pracę wykonano w ramach badań własnych nr W/WM/6/04 finansowanej przez Komitet Badań Naukowych.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jerzy Honczarenko
dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

Adresy Autorów

dr inż. Aleksy Patejuk
dr inż. Bazyli Krupicz
Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok