

**Tomasz ŚLEBODA\***, **Janusz KRAWCZYK\***, **Sławomir ZIMOWSKI\*\***,  
**Marcin KOT\*\***

## **WYSOKOTEMPERATUROWE WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE STOPÓW Fe-Al**

### **HIGH TEMPERATURE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Fe-Al ALLOYS**

#### **Słowa kluczowe:**

stopy Fe-Al, zużycie, współczynnik tarcia

#### **Key words:**

Fe-Al alloys, wear, friction coefficient

#### **Streszczenie**

W niniejszej pracy poddano dyskusji wysokotemperaturowe własności tribologiczne stopów Fe-Al. Jako materiał wyjściowy do badań zastosowano stop FeAl w formie odlewu oraz otrzymany z proszku stopu. Analizie został poddany wpływ rodzaju stopu na jego własności tribologiczne. Badania tribologiczne wykonano w temperaturze 700°C w układzie trzpień-tarcza. Określono wielkość zużycia oraz współczynnik tarcia. Dyskusji poddano różnice w mechanizmach zużycia tribologicznego badanych materiałów.

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. (12) 617-35-26.

\*\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

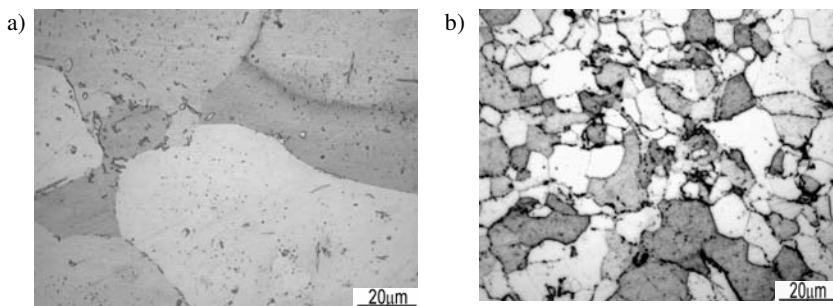
## WPROWADZENIE

Stopy z układu Fe-Al są jednymi z najbardziej intensywnie badanych związków międzymetalicznych [L. 1]. Duża odporność na korozję, niższa gęstość oraz porównywalne własności wytrzymałościowe w relacji do odpornych na korozję stali stopowych czynią stopy z układu Fe-Al bardzo atrakcyjnymi dla zastosowań między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, okrętowym, chemicznym czy energetycznym. Potencjalne zastosowanie tych materiałów jako stopów konstrukcyjnych jest ograniczone przez ich relatywnie niską plastyczność w temperaturze pokojowej. Domieszki takich pierwiastków jak Ti, Mo czy Si zdecydowanie poprawiają wytrzymałość, natomiast B, C czy Zr korzystnie wpływają na poprawę plastyczności tego materiału [L. 2]. Wykorzystanie technik związanych z metalurgią proszków poszerza możliwości sterowania rozwojem mikrostruktury oraz własnościami tego typu stopów [L. 3–5]. Stosując proszki stopów z układu Fe-Al, eliminuje się problem niejednorodności składu chemicznego w objętości materiału, co jest dużym problemem w wypadku stopów z tej grupy uzyskiwanych poprzez odlewanie.

Ze względu na szereg zalet, takich jak odporność na korozję, dobre własności mechaniczne w podwyższonych czy wysokich temperaturach, stopy Fe-Al są również potencjalnie atrakcyjnymi materiałami do zastosowań na elementy konstrukcyjne cechujące się dużą odpornością na zużycie w środowiskach agresywnych. Jakkolwiek własności fizyczne, mechaniczne czy odporność na korozję stopów z grupy FeAl były wielokrotnie analizowane w wielu pracach badawczych, to niewiele opracowań naukowych poświęconych jest badaniom własności tribologicznych tego typu stopów [L. 6–8]. W niniejszej pracy poddano analizie wybrane wysokotemperaturowe własności tribologiczne stopów z układu Fe-Al.

## MATERIAŁ DO BADAŃ

Badaniom poddano zarówno odlew stopu (Rys. 1a), jak i prasowane na gorąco wypraski proszku stopu o wielkości cząstek w zakresie 44÷149 (Rys. 1b). Skład chemiczny wypraski z proszku stopu Fe-Al oraz odlewu przedstawiono w Tabeli 1.



Rys. 1. Stop Fe-Al: a) wypraska stopu, b) odlew stopu

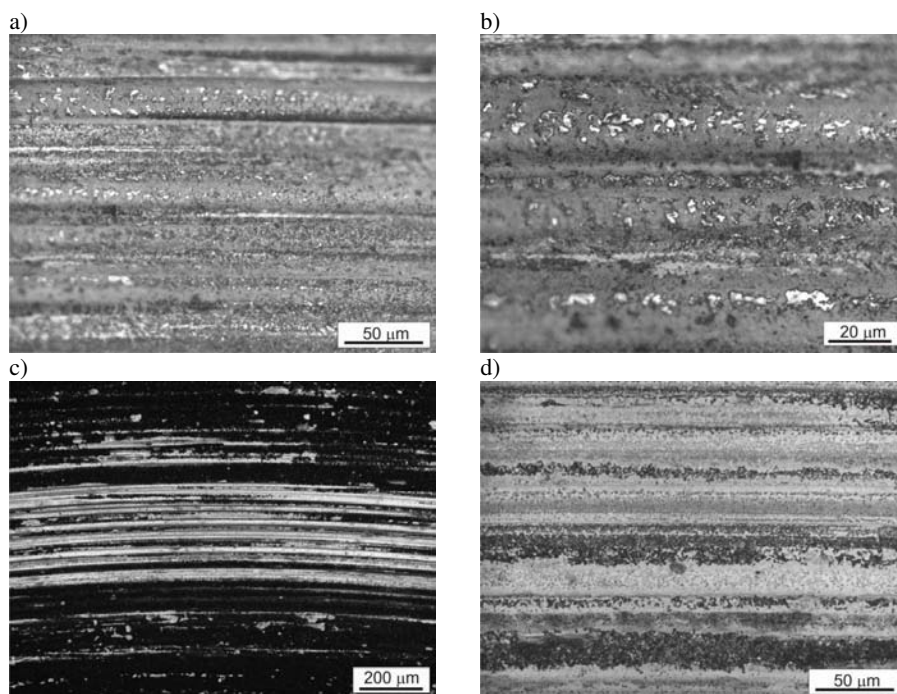
Fig. 1. Fe-Al alloy: a) alloy powder compact, b) ingot

**Tabela 1. Skład chemiczny (% masowe) proszku oraz odlewu stopu FeAl użytego do badań**  
 Table 1. Chemical composition (weight%) of cast and powder FeAl alloy

Stop FeAl	Al	Zr	Mo	Si	B	Cr	C	O	Fe
Wypraska	24,00	0,10	0,42	0,02	0,007	0,005	0,06	0,31	Reszta
Odlew	23,92	0,08	0,33	0,01	0,009	0,020	0,01	–	Reszta

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

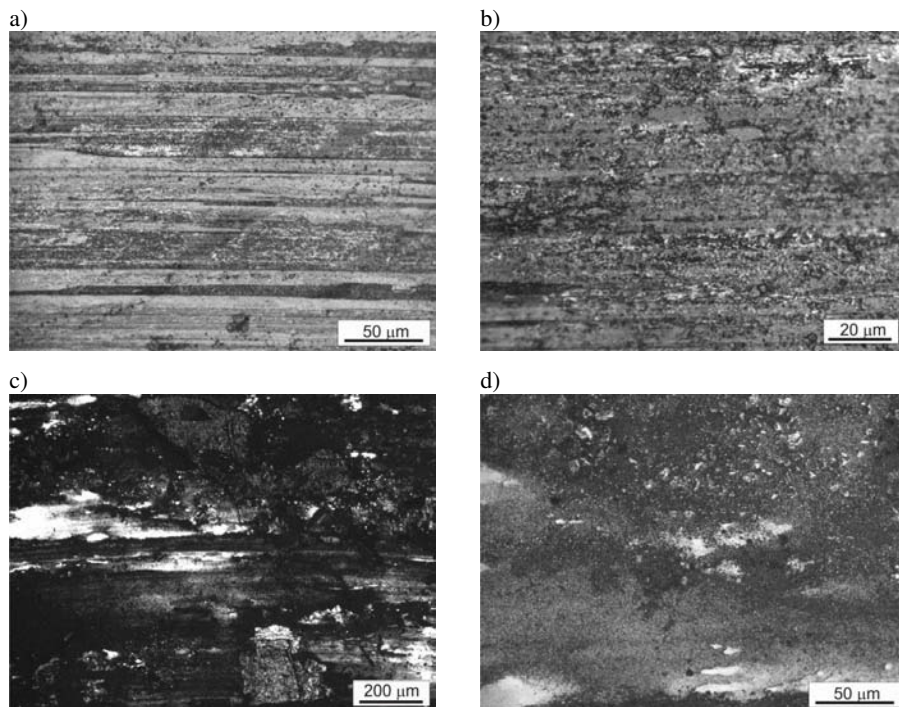
Badania tribologiczne wykonano w układzie trzpień–tarcza na testerze T-21 przy obciążeniu 10 N, w temperaturze 700°C. Testy wykonano przy prędkości 0,1 m/s, w czasie 10 000 s, na drodze 1000 m. Przeciwpórkę w postaci krążka (tarcza) wykonano ze stali narzędziowej HS6-5-2 o twardości 65 HRC. Natomiast próbkę stanowił walcowy trzpień o średnicy 3 mm wykonany ze stopu Fe-Al w postaci wypraski i odlewu. Przed przystąpieniem do pomiarów tribologicznych, układ badawczy wygrzewano w komorze grzewczej, która jest zainstalowana na tribotesterze.



**Rys. 2. Powierzchnia próbki z odlewane go stopu Fe-Al oraz przeciwpórkę po teście tribologicznym przy obciążeniu 10 N: a, b) próbka, c, d) przeciwpórkę**

Fig. 2. Surface of Fe-Al alloy ingot sample and counter-sample after tribological test under 10 N load: a, b) ingot sample, c, d) counter-sample

Mechanizm zużycia określono poprzez obserwacje mikroskopowe próbek oraz przeciwpróbek po teście tribologicznym. **Rysunek 2** oraz **3** przedstawiają powierzchnie próbek stopu Fe-Al (odlew – **Rys. 2a, b**) oraz wypraska – **Rys. 3a, b**) oraz przeciwpróbek (**Rys. 2c, d** oraz **Rys. 3c, d**).

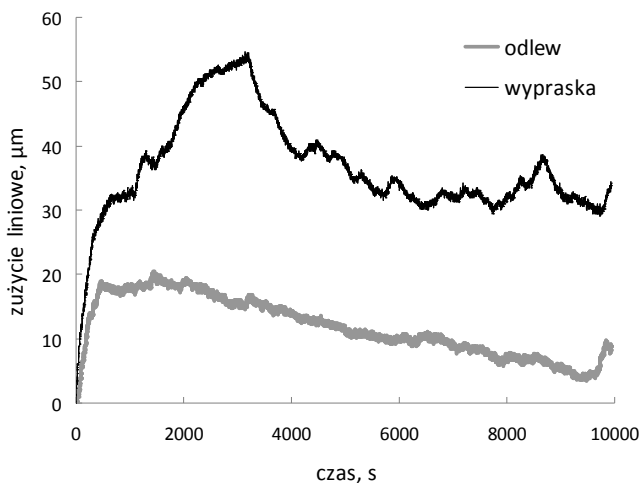


**Rys. 3. Powierzchnia próbki z wypraski stopu Fe-Al oraz przeciwpróbki po teście tribologicznym przy obciążeniu 10 N: a, b) próbka z wypraski, c, d) przeciwpróbka**

Fig. 3. Surface of Fe-Al alloy compact and counter-sample after tribological test under 10 N load: a, b) compact, c, d) counter-sample

Analiza powierzchni próbek i przeciwpróbek w obszarze toru tarcia wskazuje, że głównym mechanizmem zużycia pary trącej było zużycie ściernie z udziałem utleniania przeciwpróbki. Na powierzchni przeciwpróbki po tarceniu z wypraską widoczne są skupiska produktów zużycia wraz z produktami utleniania przeciwpróbki. Natomiast w torze tarcia przeciwpróbki współpracującej z próbką odlewaną stwierdzono znacznie mniejszą ilość produktów utleniania. Stop Fe-Al w postaci odlewu charakteryzuje się większą odpornością na zużycie i najprawdopodobniej intensywniej usuwa produkty utleniania przeciwpróbki w porównaniu z wypraską z proszku stopu. Potwierdzają to wyniki pomiarów próbek po teście tribologicznym, które wskazują, że próbka wykonana z wypraski uległa zużyciu (starciu) o 10 μm, natomiast próbka z odlewu stopu tylko o 1 μm.

Analiza zmian liniowego zużycia próbek, przedstawiona na **Rys. 4** wskazuje, że początkowo w układzie tribologicznym następuje intensywne usuwanie (przez zużycie ściernie) warstwy utlenionej przeciwpróbki. Ponadto w strefie styku obecne są produkty zużycia pary tarciowej, jak również mogą tam być transportowane stosunkowo grube fragmenty utlenionej warstwy powierzchni stalowej, które są wyrywane z bocznych obszarów toru tarcia, co powoduje „podniesienie” próbki. Efekt ten jest szczególnie widoczny w przypadku wypraski po około 3000 s trwania testu. Jest to związane z większą intensywnością zużycia próbki z wypraski w porównaniu z intensywnością zużycia próbki z odlewu stopu oraz mniejszą zdolnością próbki z wypraski do mikroskrawania powierzchni przeciwpróbki w relacji do próbki wykonanej ze stopu odlewane-go. Wyniki sumarycznego zużycia pary tarciowej (**Rys. 4**) są trudne do jednoznacznej interpretacji, a wyznaczenie intensywności zużycia raczej niemożliwe. Sumaryczna intensywność zużycia pary tarciowej wyznaczona w całym zakresie pomiarowym wynosi ok.  $30 \times 10^{-3} \text{ m/m}$  dla wypraski, a dla odlewu ok.  $5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m/m}$ . Natomiast analiza zużycia liniowego w zakresie 300–1000 m sugeruje ujemną wartość intensywności zużycia. Przeprowadzone wstępne testy tribologiczne pozwalają na opis mechanizmu zużycia, jednak dla jego intensywności należy znacząco wydłużyć drogę tarcia.

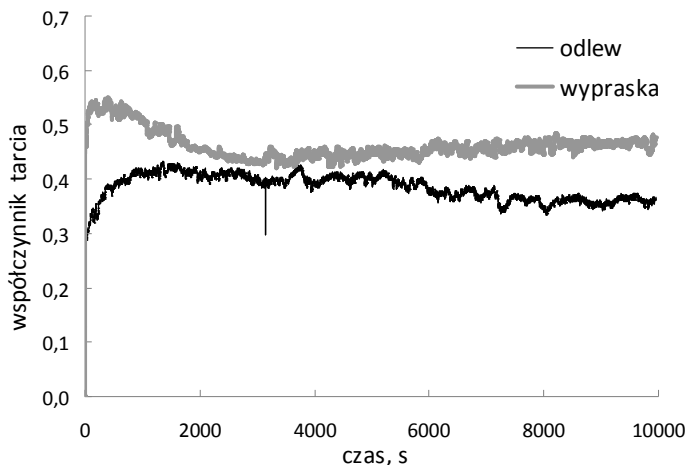


**Rys. 4.** Zmiany liniowego zużycia próbek ze stopu Fe-Al

Fig. 4. Changes of linear wear of Fe-Al alloy in relation to tribological test time

Wykres zmian współczynnika tarcia próbek stopu Fe-Al w czasie trwania testów tribologicznych przedstawiono na **Rys. 5**. Udział produktów utleniania przeciwpróbki podczas testu powinien obniżać współczynnik tarcia. Jednakże większe zużycie wypraski i wprowadzanie produktów tego zużycia w układ

trący powoduje, że współczynnik tarcia przy współpracy z próbką wykonaną z wypraski (0,44) jest większy niż dla próbki wykonanej z odlewu stopu (0,38).



**Rys. 5. Zmiany współczynnika tarcia próbek ze stopu Fe-Al w czasie trwania testów tarcio-  
wych**

Fig. 5. Changes of friction coefficient of Fe-Al alloy in relation to tribological test time

## WNIOSKI

- 1) Stop z układu Fe-Al charakteryzuje się dużą odpornością na zużycie w wysokich temperaturach.
- 2) Sposób wytworzenia stopu Fe-Al (odlewanie lub metodami metalurgii proszków) ma istotny wpływ na mechanizmy jego zużycia w danych warunkach tribologicznych.
- 3) Wstępne badania tarcio-  
we pozwalają stwierdzić, że ze względu na wysokotemperaturowe własności tribologiczne stopu Fe-Al lepszy jest element w formie odlewu niż otrzymany jako wypraska z proszku tego stopu.
- 4) Istotną rolę w zużyciu zastosowanych par trących odgrywa intensywność utleniania przeciwpółki stalowej.

*Badania realizowane w ramach Projektu „Opracowanie nowych zaawansowanych technologii kucia materiałów wysokotopliwych” Nr WND-POIG.01.03.01-12-004/09 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

## LITERATURA

1. Stoloff N.S., Liu C.T., Deevi S.C.: Emerging applications of intermetallics, *Intermetallics* 8, 2000, 1313–1320.
2. Liu C.T., George E.P., Maziasz P.J., Schneibel J.H.: Recent advances in B2 iron aluminide alloys: deformation, fracture and alloy design, *Materials Science and Engineering A258*, 1998, 84–98.
3. Šleboda T., Hale P., Wright R.N., Stoloff N.S., Duquette D.J.: Thermomechanical processing of P/M FeAl alloy, *Science and Technology of Powder Materials: Synthesis, Consolidation and Properties*; eds. Leon L. Shaw et.al., *Materials Science and Technology*, 2005, 55–62.
4. Šleboda T., Kane J., Wright R.N., Stoloff N.S., Duquette D.J.: The effect of thermomechanical processing on the properties of Fe-40at.%Al alloy, *Materials Science and Engineering A368*, 2004, 332–336.
5. Šleboda T.: Influence of processing history on the mechanical behavior of P/M FeAl alloys, *Proc. of the 12th International Conference Metal Forming 2008*, in: *Steel Research International* 79, 2008, 493–498).
6. Šleboda T., Krawczyk J., Madej M., Paćko M.: The microstructure and properties of FeAl alloy strengthened with Yttrium oxide, *Archives of Metallurgy and Materials/ Polish Academy of Sciences. Committee of Metallurgy, Institute of Metallurgy and Materials Science*, 2009, vol. 54 iss. 4, s. 1231–1237.
7. Guan X., Zhu S., Shibata K., Iwasaki K.: Effect of Carbon on Tensile Properties and Wear Behavior of P/M FeAl Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 43, No. 6, 2002, 1325–1331.
8. Šleboda T., Krawczyk J., Bednarek S., Wojtaszek M., Paćko M.: Wybrane własności tribologiczne stopu z grupy FeAl, *Tribologia: teoria i praktyka*, 42, 4, 2011, 253–261.

## Summary

**This research was focused on high temperature tribological properties of Fe-Al alloys. Powder and cast FeAl alloy was used in this study. The influence of the alloy morphology on its tribological properties is discussed. Tribological tests were performed at 700°C. Wear and friction coefficients of the investigated materials were analysed. The differences in the mechanisms of the wear of the investigated alloys are also presented.**