



Badania zużycia tribologicznego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni₃Al

PAWEŁ JÓŻWIK, ZBIGNIEW BOJAR, CZESŁAW PAKOWSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
*Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zużycia tribologicznego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni₃Al z dodatkami stopowymi cyrkonu i boru, metodą „pin-on-disc” w warunkach tarcia suchego. Na podstawie wyników badań stwierdzono istotny wpływ jednorodności struktury na odporność na zużycie tribologiczne badanego stopu (homogenizacja składu fazowego i prawdopodobny wzrost stopnia uporządkowania). Próbki poddane procesowi rekrytalizacji po uprzednim odkształceniu plastycznym na zimno materiału ze stanu po odlewaniu lub homogenizacji posiadają dobrą odporność na zużycie tribologiczne. W przeciwieństwie do nich materiał w stanie po odlewaniu i po odkształceniu plastycznym na zimno wykazuje istotnie niższą odporność na zużycie tribologiczne. Pomimo znacznego umocnienia (dwukrotnie wyższe — w porównaniu do stanu po odlewaniu), stop Ni₃Al odkształcony plastycznie na zimno wykazuje najniższą odporność na zużycie tribologiczne.

Słowa kluczowe: faza międzymetaliczna Ni₃Al, zużycie tribologiczne, umocnienie zgniotem, obróbka cieplna, obróbka plastyczna, twardość

Symbole UKD: 621.89

Wprowadzenie

Potencjalnie wysoka wytrzymałość oraz stabilność termiczna i chemiczna struktury (odporność na utlenianie, nawęglanie), a także względnie mała gęstość, czynią stopy na osnowie fazy międzymetalicznej (intermetale) atrakcyjnymi materiałami na elementy maszyn pracujące w podwyższonej temperaturze oraz w środowisku korozyjnym. Intermetale w przeważającej większości wykazują

jednak niską plastyczność, małą odporność na kruche pękanie oraz skłonność do tworzenia przelomu międzykrystalicznego w temperaturze otoczenia, co ogranicza ich praktyczne wykorzystanie.

Stopy na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al charakteryzują się, w porównaniu ze stosowanymi powszechnie żarowytrzymałymi stopami na bazie niklu, znacznie lepszą wytrzymałością zmęczeniową, wyższą wytrzymałością w podwyższonej temperaturze i przy dużej szybkości odkształcenia, relatywnie niską gęstością, a także wysoką odpornością na utlenianie. Materiały te znalazły jak dotąd zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym i lotniczym. Przeznaczone są głównie na elementy turbosprężarek, zawory, gniazda zaworowe oraz tuleje cylindrowe silników spalinowych (m.in.: firmy AP Cummins Engine Company, PCC Airfoils), elementy matryc i tłoczników, osprzęt pieców do obróbki ciepło-chemicznej (m.in.: General Motors, Oak Ridge National Laboratory), a także — po krystalizacji kierunkowej — na łopatki turbin silników odrzutowych (m.in.: General Electric, Beijing Institute of Aeronautical Materials) [1-3].

Dostępne publikacje na temat właściwości tribologicznych stopów intermetalicznych są stosunkowo nieliczne i ograniczają się głównie do analizy wpływu dodatków stopowych i wpływu parametrów procesu tarcia (temperatura, atmosfera) na zużycie [4-6].

Celem tej pracy jest analiza wpływu mikrostruktury i stopnia umocnienia stopu intermetalicznego Ni_3Al na wielkość i sposób zużycia tribologicznego w próbie „pin-on-disc” w warunkach tarcia suchego.

1. Materiał i metody badawcze

Przedmiotem badań był stop na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al o składzie (% wag.): Ni — 11,5 Al — 0,46 Zr — 0,02 B. Próbki w stanie po odlewaniu poddano:

- homogenizacji w temperaturze 1200°C , w czasie 10 godzin, w atmosferze argonu,
- obróbce plastycznej na zimno do zgniotu 40% (ze stanu zarówno bezpośrednio po odlewaniu, jak i po homogenizacji),
- wygrzewaniu rekrystalizującym w temperaturze 1000°C , w czasie 1 godziny w atmosferze powietrza (próbki wcześniej umocnione odkształceniowo).

Tak uzyskany materiał badawczy po cięciu elektroerozyjnym szlifowano i polerowano mechanicznie, a następnie trawiono odczynnikami Marble'a. Analiza mikrostruktury, a także powierzchni współpracy (próbek po testach tribologicznych) została przeprowadzona za pomocą analizującego mikroskopu skaningowego Philips XL30 LaB₆.

Badania twardości zrealizowano metodą Vickersa, przy użyciu obciążenia 98 N (HV 10), w czasie 10 s, wykonując dla każdego ze stanów materiału po 10 pomiarów.

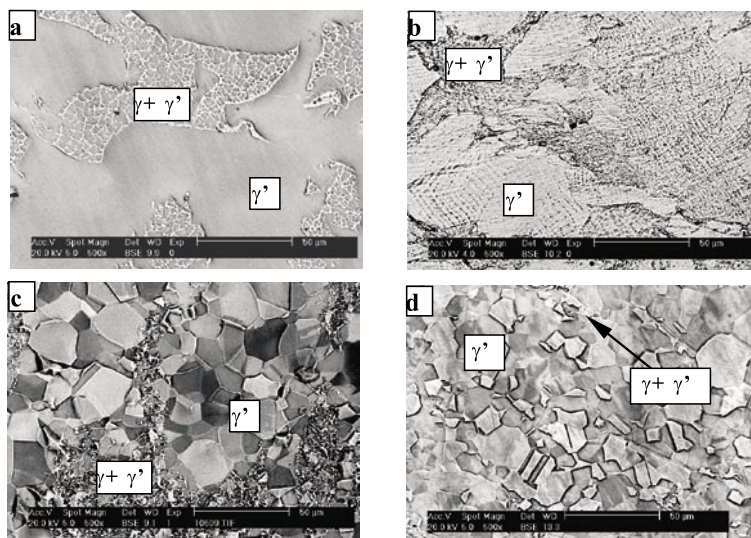
Próby zużycia tribologicznego przeprowadzono w warunkach tarcia suchego na stanowisku badawczym typu trzpień — tarcza (T-11 ITE Radom), w temperaturze pokojowej, przy nacisku jednostkowym 5,16 MPa i drodze tarcia o długości ok. 150 m. Trzpień (próbka) wykonany był z badanego materiału, natomiast tarcza (przeciwpróbka) — ze stali NC6 po hartowaniu i odpuszczaniu do twardości ok. 500 HV.

Dodatkowo przeprowadzono badania austenitycznej stali zaworowej 50H21G9N4, którą testowano w identycznych warunkach próby tribologicznej.

2. Wyniki badań

Badany stop charakteryzuje się w stanie po odlewaniu złożoną, dwufazową strukturą dendrytyczną. Na podstawie badań strukturalnych stwierdzono, że:

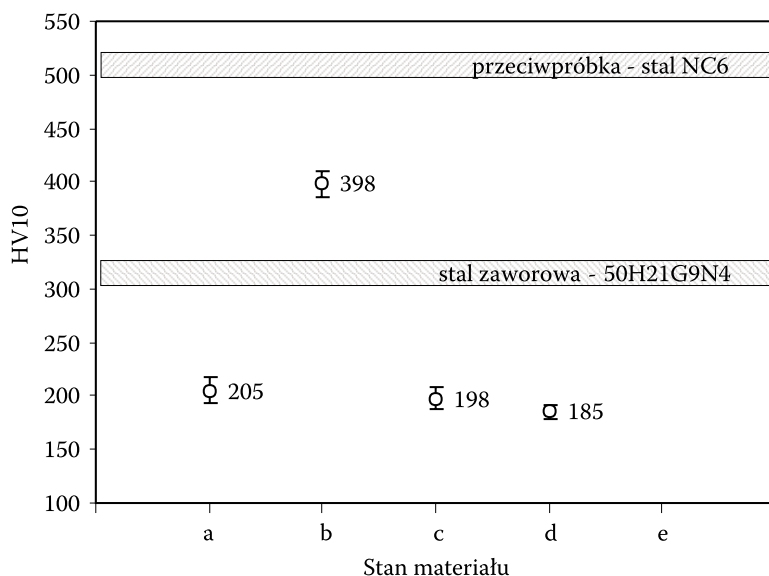
- osnowę stopu (rys. 1) stanowi uporządkowany roztwór wtórny γ' na bazie fazy międzymetalicznej Ni_3Al ,
- przestrzenie międzydendrytyczne (rys. 1) wypełnia mieszanina fazy γ' i nieuporządkowanego roztworu stałego γ (aluminium w sieci niklu) [8-10].



Rys. 1. Mikrostruktura stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al : a) po odlewaniu (AC); b) AC + obróbka plastyczna na zimno do zgniotu 40% (40% CW); c) AC + 40% CW + wygrzewanie rekrytalizujące 1000°C/1 h/pow. (R); d) AC + homogenizacja 1200°C/10 h/pow. (H) + 40% CW + R

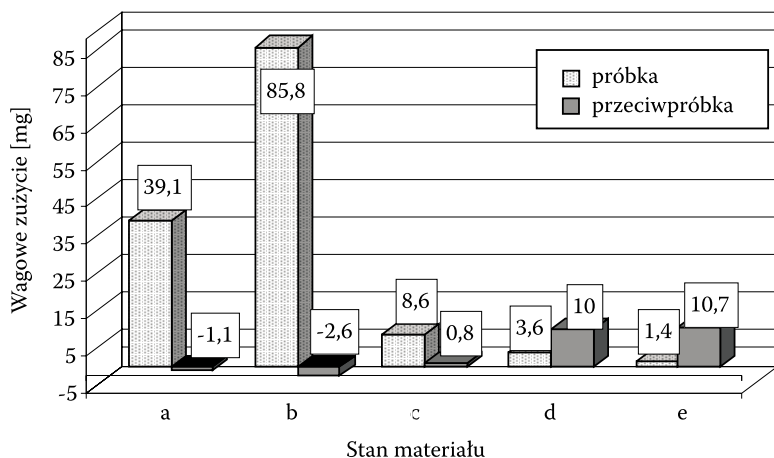
Po odkształceniu plastycznym na zimno do zgniotu 40% badany stop zachowuje strukturę dendrytyczną, z jednoczesnym ujawnieniem pasm poślizgu (rys. 1b) i blisko dwukrotnym wzrostem twardości (do poziomu ok. 400 HV10) w stosunku do materiału po odlewaniu (rys. 2). Wygrzewanie rekrystalizujące tak odkształconego materiału w temperaturze 1000°C, w czasie 1 godziny, w atmosferze powietrza, prowadzi do rozdrobnienia struktury osnowy (fazy γ') na drodze zarodkowania i stopniowego wzrostu nowych ziaren (por. rys. 1a i rys. 1c). W wariacie struktury uzyskanym po dodatkowej homogenizacji (1200°C/10 h/argon), poprzedzającej proces odkształcenia i rekrystalizacji, uzyskano większą skuteczność ujednorodnienia składu fazowego badanego stopu — stwierdzono wyraźne zmniejszenie udziału powierzchniowego obszarów dwufazowych ($\gamma + \gamma'$) (rys. 1d) [8-10]. Wykazano (rys. 2), że oprócz przypadku umocnienia zgniotem (dla którego twardość wzrasta dwukrotnie) opisane zmiany mikrostruktury w pozostałych stanach materiału nie wywarły istotnego wpływu na poziom umocnienia stopu. W stopach drobnoziarnistych (stany c i d — po rekrystalizacji) twardość zmniejsza się od poziomu po odkształceniu plastycznym do poziomu nieznacznie poniżej twardości w stanie po odlewaniu.

Stwierdzono natomiast istotny wpływ obróbki plastycznej i cieplnej (wygrzewanie ujednorodniające i wygrzewanie rekrystalizujące) na zużycie tribologiczne (wagowe i liniowe) badanego materiału w warunkach tarcia suchego, w temperatu-



Rys. 2. Zmiana mikrotywardości w funkcji stanu badanego materiału: a) po odlewaniu (AC); b) AC + obróbka plastyczna na zimno do zgniotu 40% (40% CW); c) AC + 40% CW + wygrzewanie rekrystalizujące 1000°C/1 h/pow. (R); d) AC + homogenizacja 1200°C/10 h/pow. (H) + 40% CW + R

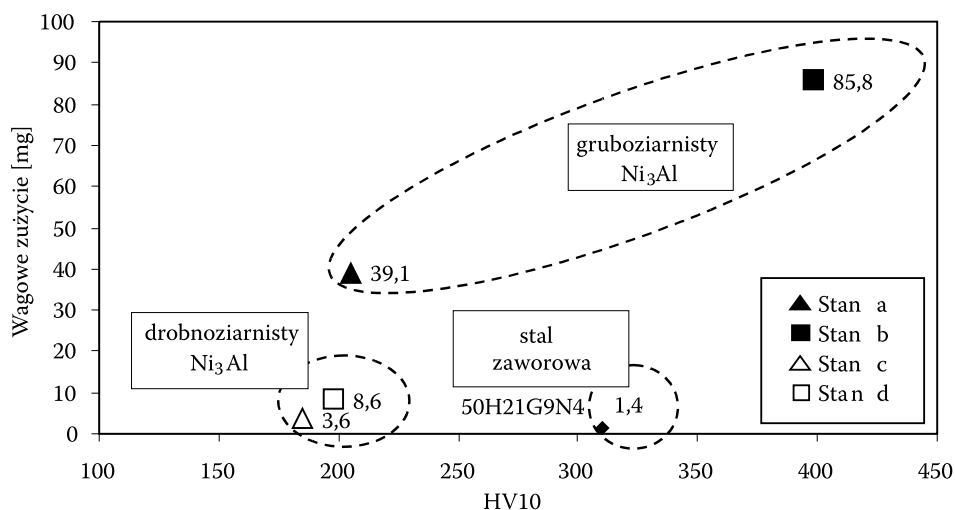
rze pokojowej w atmosferze powietrza (rys. 3). Zużycie wagowe badanego materiału po odkształceniu i rekrytalizacji jest około czterokrotnie mniejsze w odniesieniu do stanu wyjściowego — po odlewaniu i dziesięciokrotnie mniejsze niż dla stopu po umocnieniu zgniotem. Dalszy spadek zużycia uzyskano, wprowadzając przed odkształceniem dodatkowy proces homogenizacji ($1200^{\circ}C/10$ h/argon).



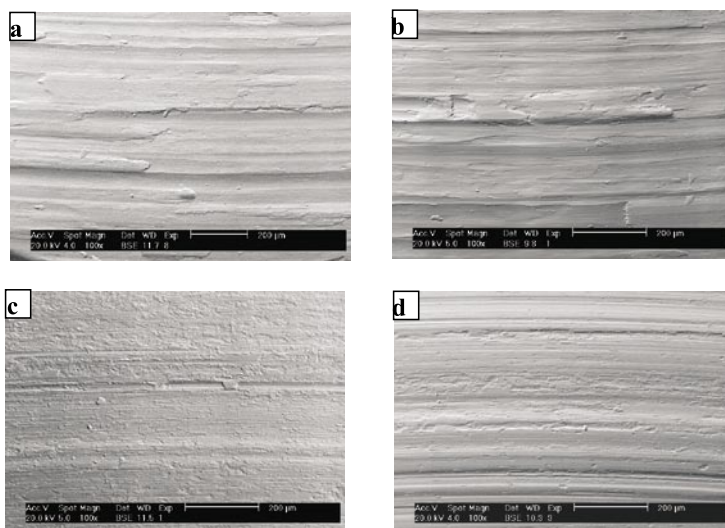
Rys. 3. Wagowe zużycie tribologiczne badanego stopu w funkcji stanu materiału: a) po odlewaniu (AC); b) AC + obróbka plastyczna na zimno do zgniotu 40% (40% CW); c) AC + 40% CW + wygrzewanie rekrytalizujące $1000^{\circ}C/1$ h/pow. (R); d) AC + homogenizacja $1200^{\circ}C/10$ h/pow. (H) + 40% CW + R i dla porównania — e) stal zaworowa 50H21G9N4

Na podstawie zestawienia zużycia badanych próbek w funkcji twardości materiału (rys. 4) wykazano niekonwencjonalną relację zużycie — twardość, to znaczy, że odporność badanego stopu na zużycie jest tym mniejsza, im większa jest jego twardość. Prawidłowość ta pojawia się konsekwentnie w każdym z badanych stanów, zarówno w grubokrystalicznych (stan po odlewaniu i po odkształceniu plastycznym — krystality o wymiarach liniowych około 4 mm), jak i w drobnoziarnistych (po wygrzewaniu rekrytalizującym — wielkość ziarna określona przez średnicę ekwiwalentną około 10 μm).

Jednocześnie wykazano, że zużyciu tribologicznemu grubokrystalicznych próbek intermetalicznych (po młotkowaniu i po odlewaniu) towarzyszy nanoszenie materiału próbki na przeciwpróbkę — proces zużycia ma dominujący charakter adhezyjny (rys. 3 i 5). Dla stopu o drobnoziarnistej strukturze (dwa stany o mniejszej twardości — po wygrzewaniu rekrytalizującym) obserwowano całkowicie inny charakter zużycia — przez ścieranie, analogicznie do efektu tarcia stali zaworowej (występuje bardzo małe zużycie próbek i nieznaczne, porównywalne w tych trzech przypadkach zużycie przeciwpróbek). Odmienne charakter zużycia badanych próbek koresponduje z obrazami powierzchni po badaniach zużycia (rys. 5).



Rys. 4. Wagowe zużycie tribologiczne badanego stopu w funkcji twardości materiału: a) po odlewaniu (AC); b) AC + obróbka plastyczna na zimno do zgniotu 40% (40% CW); c) AC + 40% CW + wygrzewanie rekrytalizujące 1000°C/1 h/pow. (R); d) AC + homogenizacja 1200°C/10 h/pow. (H) + 40% CW + R



Rys. 5. Powierzchnia badanych próbek po badaniach zużycia tribologicznego: a) próbka gruboziarnista (stan po odlewaniu) i współpracująca z nią przeciwpróbka b); c) próbka drobnoziarnista (stan po odlewaniu + homogenizacja 1200°C/10 h/pow. + obróbka plastyczna na zimno do zgniotu 40% + rekrytalizacja 1000°C/1 h/pow.) i współpracująca z nią przeciwpróbka d)

3. Podsumowanie

- Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:
- obróbka plastyczna i cieplna (homogenizacja i rekrytalizacja) istotnie wpływają na zużycie tribologiczne badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al ;
 - materiał badawczy podczas prób zużycia wykazuje niekonwencjonalną relację twardość — zużycie, tzn. wraz ze wzrostem twardości rośnie jego zużycie;
 - zużycie materiału w stanie wyjściowym (po odlewaniu) i po odkształceniu na zimno ma charakter adhezyjny, przy obserwowanym dużym zużyciu próbki i jednoczesnym przyroście masy przeciwpróbki;
 - zużycie materiału po rekrytalizacji (z uprzednią homogenizacją lub bez) ma charakter ścierny, przy znacznie mniejszym zużyciu próbki i małym ubytku masy przeciwpróbki.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.11.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2006 r.

LITERATURA

- [1] C. T. LIU, J. STRINGER, J. N. MUNDY, L. HORTON, P. ANGELINI, *Ordered intermetallic alloys: an assessment*, Intermetallics, no. 5, 1997.
- [2] S. C. DEEVI, V. K. SIKKA, *Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing and applications*, Intermetallics, no. 4, 1996.
- [3] V. K. SIKKA, S. C. DEEVI, S. VISWANATHAN, R. W. SWINDEMAN, M. L. SANTELLA, *Advances in processing of Ni_3Al -based intermetallics and applications*, Intermetallics, no. 8, 2000.
- [4] N. R. BONDA, D. A. RIGNEY, *Unlubricated sliding wear of nickel aluminides at room temperature and 400°C*, Mat. Res. Symp. Proc., vol. 133, 1989.
- [5] M. L. JOHNSON, D. E. MIKKOLA, *Cavitation erosion and abrasive wear of Ni_3Al alloys*, Intermetallics, no. 3, 1994.
- [6] J. A. HAWK, D. E. ALMAN, *Abrasive wear of intermetallic — based alloys and composites*, Materials Science and Engineering, A239-120, 1997.
- [7] S. M. SPEARING, *Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS)*, Acta Materialia, no. 48, 2000.
- [8] MECS (Microtechnology-Based Energy, Chemical and Biological Systems) Technology: <http://www.mecs.oregonstate.edu/mecs>.
- [9] P. JÓZWIK, Z. BOJAR, D. ZASADA, T. DUREJKO, *Microstructure and properties of two-phase ($\gamma' + \gamma$) Ni_3Al (Zr; B) intermetallic alloy after heat treatment, thermo-mechanical treatment and plastic working*, Conference Euromat, Lausanne, Szwajcaria, 2003, topic T 2, no. 1080, <http://www.euromat2003.fems.org>.
- [10] Z. BOJAR, D. ZASADA, P. JÓZWIK, *The analysis of chemical composition and heat treatment parameters influence on structural transitions and fracture behaviour of as-cast Ni_3Al phase based intermetallic alloys*, Acta Metallurgica Slovaca, no. 2, 2002.

P. JÓŻWIK, Z. BOJAR, CZ. PAKOWSKI

Investigation of tribological wear of Ni₃Al-based intermetallic alloy

Abstract. Resistance to tribological wear of Ni₃Al-based intermetallic alloy with the alloying additions of Zr and B was investigated using “pin-on-disc” method at room temperature. It has been found that tribological wear resistance of investigated alloy strongly depends on a degree of homogenisation of its structure (predominantly chemical homogenisation and probably a level of ordering). Samples with structure modified by homogenisation treatment and by cold rolling followed by recrystallization showed excellent wear resistance in opposite to as-cast or cold rolled condition. Even though cold working significantly increases (doubled — in comparison to as-cast condition) level of Ni₃Al alloy hardening, a tribological wear resistance for this case is the lowest among all investigated samples.

Keywords: Ni₃Al-based intermetallic alloy, tribological wear, strain hardening, heat treatment, plastic forming, hardness

Universal Decimal Classification: 621.89