



Wpływ obróbki cieplnej na zużycie tribologiczne stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B)

PAWEŁ JÓŹWIK, ZBIGNIEW BOJAR

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,
Katedra Zaawansowanych Materiałów i Technologii,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu obróbki cieplnej na zużycie tribologiczne stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al z dodatkami stopowymi chromu cyrkonu i boru w stanie po odlewaniu i po 100-godzinnym wygrzewaniu w temperaturze 1200°C w atmosferze argonu lub powietrza. Wykorzystując metodę „pin-on-disc”, w warunkach tarcia suchego, w atmosferze powietrza stwierdzono istotny wpływ środowiska i temperatury wygrzewania na zużycie tribologiczne badanego materiału. W granicznym przypadku — dla materiału po homogenizacji $1200^\circ\text{C}/100\text{ h}$ /argon uzyskano bardzo istotne zmniejszenie zużycia wagowego w odniesieniu do stopu Ni_3Al (Cr, Zr, B) w stanie po odlewaniu, a nawet wynik lepszy od austenitycznej stali zaworowej 50H21G9N4 badanej w analogicznych warunkach eksperymentu.

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ jednorodności umocnienia poszczególnych faz strukturalnych i stabilność składu fazowego, a także prawdopodobnego wzrostu stopnia uporządkowania struktury badanego stopu (w trakcie próby zużywania) na jego odporność na zużycie tribologiczne.

Słowa kluczowe: stopy na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al , zużycie tribologiczne, wygrzewanie ujednorodniające

1. Wprowadzenie

Stopy na osnowie faz międzymetalicznych z udziałem aluminium (aluminki) cechują się zespołem właściwości fizykochemicznych i mechanicznych pozwalających zaliczyć je do grupy perspektywicznych materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych nowej generacji.

Względnie mała gęstość, wysoka wytrzymałość i odporność na utlenianie czynią te materiały atrakcyjnymi dla zastosowań jako elementy maszyn pracujące w podwyższonej

temperaturze oraz w środowisku korozyjnym. Jednak większość intermetali, w tym także aluminki, wykazuje 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 wykazują, w porównaniu do stosowanych obecnie żarowytrzymałych stopów na bazie niklu, znacznie lepszą wytrzymałość zmęczeniową, wyższą wytrzymałość w podwyższonej temperaturze, relatywnie niższą gęstość i wysoką odporność na utlenianie.

Intermetale Ni_3Al znalazły jak dotąd zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i hutnictwie. Stosowane są m.in. do tworzenia elementów turbosprężarek, zaworów i gniazd zaworowych w silnikach spalinowych (Cummins Engine Company), matryc i tłoczników, osprzętu pieców do obróbki cieplno-chemicznej (Bethlehem Steel), a także — po krystalizacji kierunkowej — łopatek turbin silników odrzutowych (m.in. 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 proces zużywania [4-7].

Celem prezentowanej pracy jest analiza wpływu czynników strukturalnych i ocena możliwości poprawy odporności na zużycie tribologiczne stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al poprzez wygrzewanie ujednorodniające.

2. Materiał i metody badawcze

Obiektem badań był stop na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al o składzie chemicznym (% wag.): Ni-7,5Cr-11,7Al-0,73Zr-0,04B. Próbkę w stanie po odlewaniu poddano 100-godzinnemu wygrzewaniu ujednorodniającemu w temperaturze 1200°C, w atmosferze powietrza lub argonu.

Tak uzyskany materiał badawczy po cięciu elektroerozyjnym szlifowano i polerowano mechanicznie, a następnie trawiono odczynnikami Marble'a. Analiza mikrostruktury (przed badaniami tribologicznymi) i powierzchni współpracy próbek (po testach tribologicznych) została przeprowadzona przy użyciu analizującego mikroskopu skaningowego Philips XL30.

Badania twardości zrealizowano metodą Vickersa, przy obciążeniu 98 N (HV 10) i 0,98 N (HV0,1) w czasie 10 s, wykonując dla każdego z analizowanych obszarów fazowych po 10 pomiarów.

Próby zużycia tribologicznego przeprowadzono w warunkach tarcia suchego na stanowisku badawczym typu trzpień-tarcza, w temperaturze pokojowej, przy nacisku jednostkowym 5,16 MPa i drodze tarcia o długości 550 m. Trzpień (próbkę) wykonano z badanego materiału na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B), natomiast

tarczę (przeciwpróbkę) ze stali NC6 po hartowaniu i odpuszczaniu do twardości średniej 500HV10. W trakcie badań rejestrowano w sposób ciągły liniowe zużycie tribologiczne badanego skojarzenia ciernego, a także masowe zużycie tribologiczne próbki i przeciwpróbki, traktowane jako różnica masy przed i po zakończeniu pomiarów. Dla każdego stanu materiałowego analizę zużycia tribologicznego realizowano na trzech zestawach próbek.

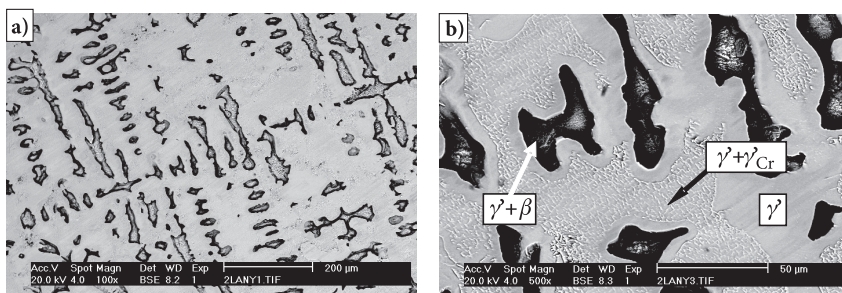
W tych samych warunkach badano zużywanie tribologiczne austenitycznej stali zaworowej 50H21G9N4, która w stanie po przesycaaniu wykazywała twardość średnią 346 HV 10.

3. Wyniki badań

Stop Ni_3Al (Cr, Zr, B) posiada w stanie po odlewaniu złożoną, dendrytyczną budowę wielofazową (rys. 1). Na podstawie przeprowadzonych badań mikroskopowych, mikroanalizy składu chemicznego i rentgenowskiej analizy fazowej stwierdzono, że w skład struktury badanego stopu w stanie po odlewaniu wchodzi (rys. 1):

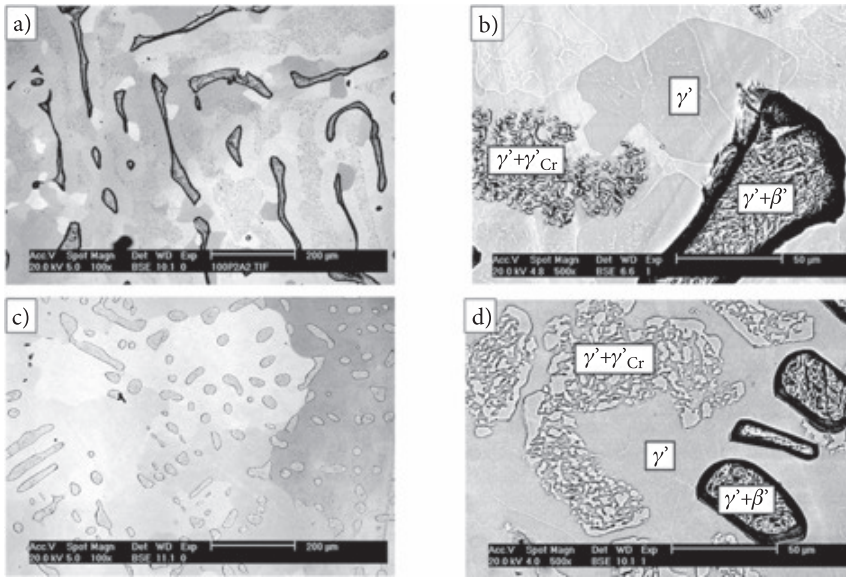
- faza γ' (stechiometria typu Ni_3Al o proponowanym zapisie $(\text{Ni},\text{Cr})_3(\text{Al},\text{Cr})$)
- obszary jasne jako podstawowy składnik osnowy,
- mieszanina faz międzymetalicznych $\gamma' + \beta$ (typu NiAl) — obszary ciemne o morfologii płytkowej, rozmieszczone w przestrzeniach międzydendrytycznych,
- mieszanina faz $\gamma'_{\text{Cr}} + \gamma'$ (faza γ'_{Cr} — typu γ' , ale znacznie wzbogacona w chrom) w postaci drobnych szarych wydzielań, jako drugi składnik osnowy.

Obróbka cieplna w czasie 100 godzin (zarówno w atmosferze powietrza, jak i argonu) w temperaturze 1200°C prowadzi do postępującej zmiany morfologii i rozmiarów przestrzeni międzydendrytycznych zajmowanych przez obszary dwufazowe ($\gamma' + \beta$) (rys. 1 i 2). Tendencję do fragmentacji i sferoidyzacji tych obszarów obserwuje



Rys. 1. Dendrytyczna budowa mikrostruktury badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) w stanie po odlewaniu

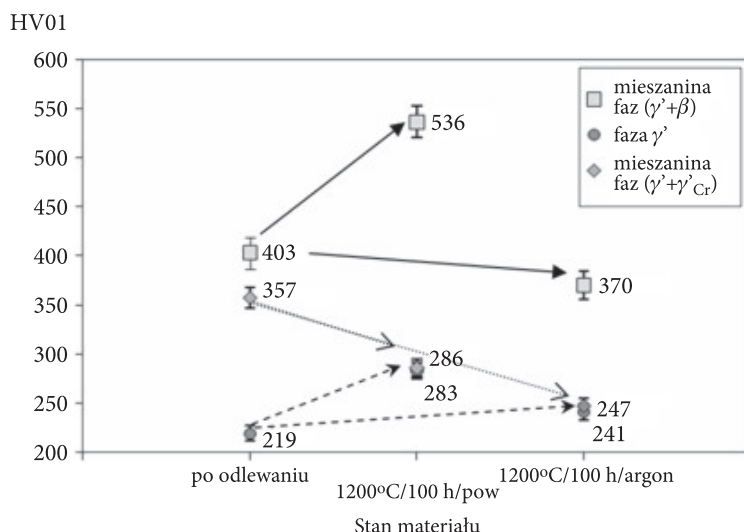
się szczególnie wyraźnie po procesie homogenizacji w atmosferze ochronnej argonu (rys. 2c, d). Stwierdzono także istotne zmniejszenie różnic w umocnieniu faz strukturalnych tworzących osnowę stopu (tzn. fazy γ' i mieszaniny faz ($\gamma'+\gamma'_{Cr}$)), jednakże przy wyższym jego poziomie dla materiału po homogenizacji w powietrzu. Wygrzewanie w powietrzu wpływa szczególnie istotnie na mikrotwardość obszarów ($\gamma'+\beta$) — obserwowano, w porównaniu do materiału po homogenizacji w atmosferze argonu, ponad 40% wzrost umocnienia (rys. 3).



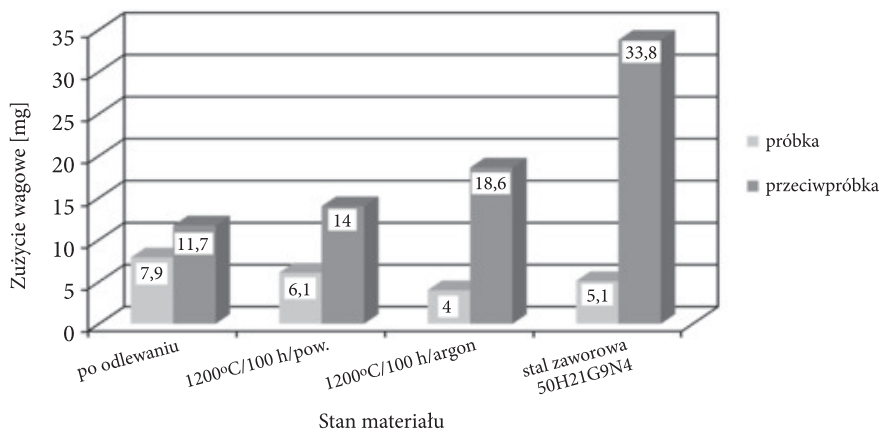
Rys. 2. Zmiany morfologii przestrzeni międzydendrytycznych w strukturze stopu Ni_3Al (Cr, Zr, B) po 100-godzinym wygrzewaniu ujednorodniającym w temperaturze $1200^\circ C$ w atmosferze: a, b) powietrza; c, d) argonu

Opisane zmiany mikrostruktury i poziomu umocnienia poszczególnych faz strukturalnych, wywołane obróbką cieplną, wywierają istotny wpływ na zużycie tribologiczne badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) w warunkach tarcia suchego w temperaturze pokojowej, w atmosferze powietrza (rys. 4, 7, 8).

W granicznym przypadku — dla materiału po 100-godzinym wygrzewaniu w temperaturze $1200^\circ C$, w atmosferze argonu (rys. 2c, d) uzyskano, w porównaniu do materiału przed obróbką (po odlewaniu — rys. 1), blisko dwukrotne zmniejszenie wagowego zużycia tribologicznego. Opisywane zmiany struktury wywołane różnym środowiskiem wygrzewania (w analogicznym czasie i temperaturze) wywierają istotny wpływ na proces zużywania tribologicznego — najmniejszy ubytek masy po próbach zużywania tribologicznego wykazał materiał najbardziej jednorodny po homogenizacji w argonie (rys. 4).



Rys. 3. Zmiany poziomu umocnienia poszczególnych faz strukturalnych badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) wywołane obróbką cieplną

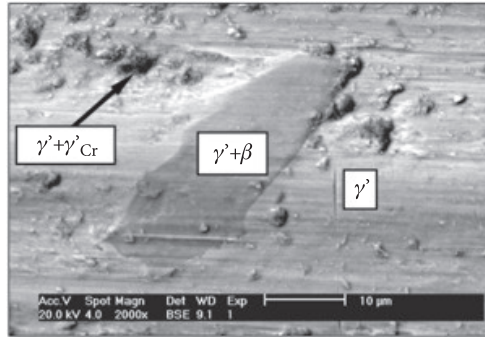


Rys. 4. Wpływ stanu materiału na masowe zużycie tribologiczne badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) w porównaniu do stali austenitycznej zaworowej

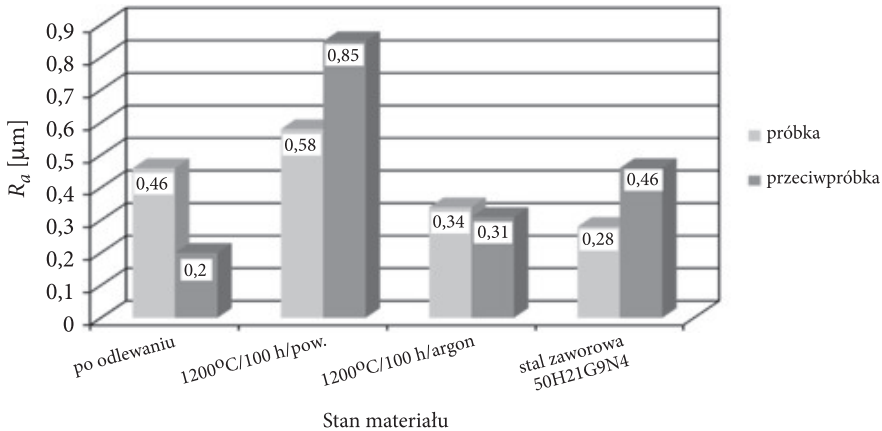
Wyniki wagowego zużycia tribologicznego korespondują z wykresem liniowego zużycia tribologicznego skojarzenia ciernego (ujmującego sumaryczny ubytek materiału próbki i przeciwpróbki) — dla materiału po homogenizacji w argonie (1200°C/100 h) obserwowano mniejsze o 70% zużycie liniowe niż dla materiału po odlewaniu.

Wpływ atmosfery wygrzewania na zachowanie próbek w trakcie badań zużywania powiązано z różnym poziomem umocnienia poszczególnych faz strukturalnych. Prawdopodobnie proces zużywania stopu po homogenizacji w powietrzu przebiega analogicznie do łożysk ślizgowych — twarde obszary ($\gamma' + \beta$) spełniają funkcję nośną,

a pozostałe obszary przy istotnie mniejszym poziomie umocnienia — rolę osnowy. Interpretację taką potwierdza obserwacja powierzchni po testach zużycia tribologicznego (rys. 5), a także analiza profilu chropowatości tych powierzchni (rys. 6).



Rys. 5. Obraz powierzchni po testach zużycia tribologicznego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) poddanego homogenizacji $1200^\circ\text{C}/100$ h/pow



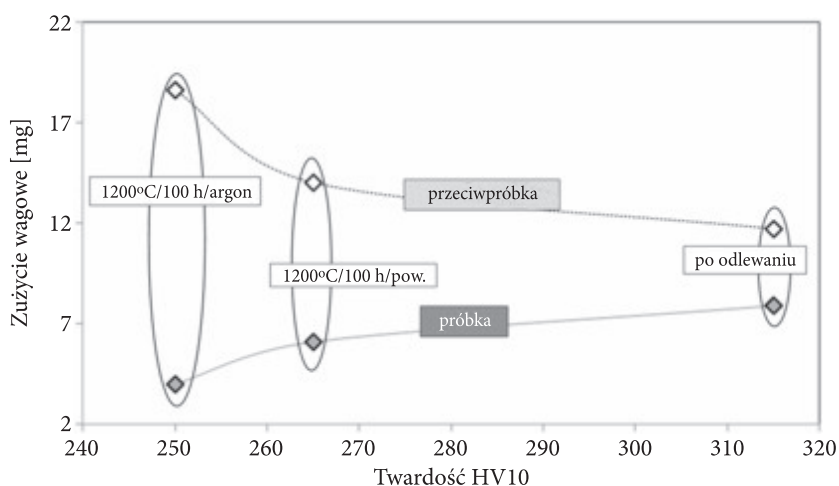
Rys. 6. Wpływ obróbki cieplnej na wartość średniego arytmetycznego odchylenia R_a profilu nierówności od linii średniej uzyskanego dla próbki i przeciwpółki po badaniach zużycia tribologicznego

Dla próbek z materiału po homogenizacji w powietrzu uzyskano, w odniesieniu do stanu przed obróbką (po odlewaniu), istotny wzrost wartości średniego arytmetycznego odchylenia R_a profilu nierówności od linii średniej, a dla przeciwpółki wzrost tego parametru był jeszcze większy (rys. 6).

Materiał o najlepszej odporności na zużycie tribologiczne ($1200^\circ\text{C}/100$ h/argon) posiadał najslabiej rozwiniętą powierzchnię próbki i współpracującej z nim przeciwpółki, co świadczy o bardziej równomiernym procesie zużywania. Efekt ten koresponduje także z mniejszymi różnicami poziomu umocnienia poszczególnych faz strukturalnych (rys. 3).

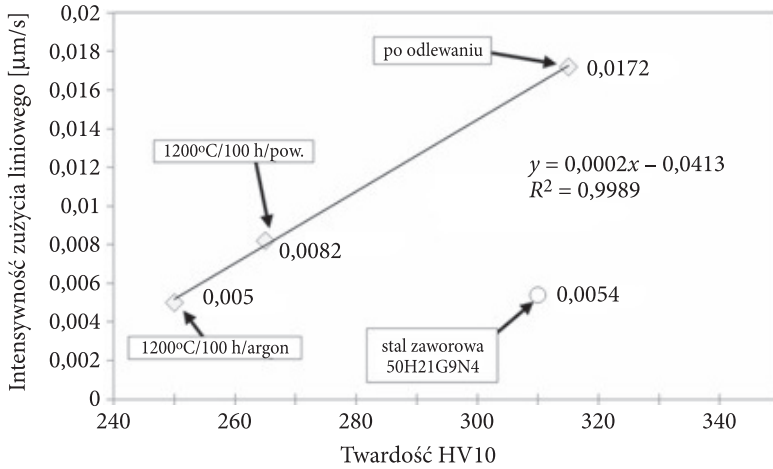
Dodatkowo, w celu porównania wyników badań uzyskanych dla badanego stopu na podstawie fazy międzymetalicznej Ni_3Al , przeprowadzono w analogicznych warunkach eksperymentu badania austenitycznej stali zaworowej 50H21G9N4. Stwierdzono, w granicznym przypadku — dla stopu po homogenizacji w argonie ($1200^{\circ}C/100\text{ h}$) — zużycie tribologiczne ponad 25% mniejsze od materiału odniesienia — stali zaworowej.

Odnosząc wagowe zużycie tribologiczne badanych próbek i przeciwpróbek do twardości badanego materiału, stwierdzono niekonwencjonalną relację zużycie–twardość, tzn. zużycie tribologiczne badanego materiału jest tym większe, im większa jest jego twardość — przeciwnie do zachowania przeciwpróbek (rys. 7). Prawdliwość ta jest jeszcze bardziej widoczna w odniesieniu do intensywności zużycia liniowego — uzyskano liniową korelację między tymi parametrami (rys. 8). Takie zachowanie materiału powiązано z dwoma czynnikami będącymi konsekwencją przeprowadzonej obróbki cieplnej, tzn. większą jednorodnością przebiegu zużycia tribologicznego i wzrostem uporządkowania struktury.

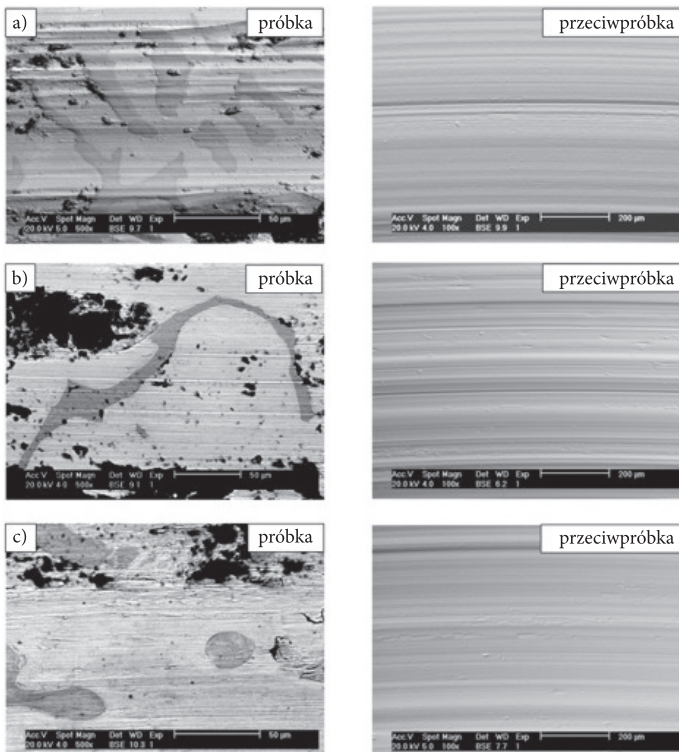


Rys. 7. Wpływ twardości badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) na zużycie wagowe próbki i przeciwpróbki

Obserwacje powierzchni próbek i przeciwpróbek po badaniach zużycia tribologicznego korespondują z wynikami badań profilu chropowatości (rys. 9 i 6). Wyniki badań dowodzą, że w procesie zużywania tribologicznego badanych próbek dominuje ścieranie — analogicznie do efektu tarcia stali zaworowej (występuje bardzo małe zużycie próbek i istotnie większe zużycie przeciwpróbek).



Rys. 8. Wpływ twardości badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) na intensywność zużycia liniowego



Rys. 9. Obraz powierzchni badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B) i współpracującej z nią przeciwpróbki po próbach zużycia tribologicznego: a) stan po odlewanii; b) stan po homogenizacji 1200°C/100 h/pow.; c) stan po homogenizacji 1200°C/100 h/argon

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- zmiany mikrostruktury i poziomu umocnienia poszczególnych faz strukturalnych będące efektem obróbki cieplnej (homogenizacji) istotnie wpływają na zużywanie tribologiczne badanego stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Ni_3Al (Cr, Zr, B);
- obserwowany efekt wpływu środowiska wygrzewania na mikrostrukturę (udział i kształt obszarów $\gamma' + \beta$), mikrotwardość, chropowatości i odporność na zużycie tribologiczne jest prawdopodobnie wynikiem „dynamicznego utleniania po granicach ziaren” opisanego szerzej w [10];
- najmniejsze zużycie tribologiczne uzyskano dla materiału po homogenizacji w argonie (1200°C/100 h) o najbardziej jednorodnej budowie fazowej — otrzymany wynik jest lepszy niż dla stali zaworowej 50H21G9N4 (w analogicznych warunkach eksperymentu);
- badany stop wykazuje niekonwencjonalną relację twardość-zużycie, tzn. wraz ze wzrostem twardości rośnie jego zużycie — opisane zjawisko obserwowano zarówno dla wagowego, jak i liniowego zużycia tribologicznego;
- zużywanie badanego materiału (z uprzednią homogenizacją lub bez) ma charakter ścierny, przy względnie większym ubytku masy przeciwpróbki.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt rozwojowy OR00004905.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.05.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2010 r.

LITERATURA

- [1] V. K. SIKKA, M. L. SANTELLA, J. E. ORTH, *Processing and operating experience of Ni_3Al -based intermetallic alloy IC-221M*, Materials Science and Engineering, A239-240, 1997.
- [2] R. R. JUDKINS, S. R. UDAYA, *Fossil energy applications of intermetallic alloys*, Intermetallics, 8, 2000.
- [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, 8, 2000.
- [4] Y. SOLMAZ, M. H. KELESTEMUR, *Wear behaviour of boron-doped Ni_3Al material at elevated temperature*, Wear, 257, 2004.
- [5] J. A. HAWK, D. E. ALMAN, *Abrasive wear of intermetallic — based alloys and composites*, Materials Science and Engineering, A239-120, 1997.
- [6] M. L. JOHNSON, D. E. MIKKOLA, *Cavitation erosion and abrasive wear of Ni_3Al alloys*, Intermetallics, 3, 1994.
- [7] N. R. BONDA, D. A. RIGNEY, *Unlubricated sliding wear of nickel aluminides at room temperature and 400°C*, Mat. Res. Symp. Proc., 133, 1989.

- [8] Z. BOJAR, P. JÓŹWIK, Cz. PAKOWSKI, *Abrasive wear of Ni₃Al – based intermetallic alloy*, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 9, 2004.
- [9] P. JÓŹWIK, Z. BOJAR, *Influence of heat treatment on the structure and mechanical properties of Ni₃Al – based alloys*, Archives of Metallurgy and Materials, 55, 2010.
- [10] C. T. LIU, *Ductility and fracture behavior of polycrystalline Ni₃Al alloys*, Material Research Society Symposium Proceedings, 81, 1987, 355-367.

P. JÓŹWIK, Z. BOJAR

Influence of heat treatment on tribological wear of Ni₃Al – based alloy

Abstract. The experimental results of heat treatment influence of alloys with Ni₃Al matrix with additions chromium, zirconium and boron on tribological wear are presented in this paper. Investigated materials were the samples in as cast conditions and 100-hours heat treatment at 1200°C temperature in the argon or in air atmosphere. By using “pin-on-disc” method in dry friction conditions in air atmosphere, the influence of environment and temperature of the homogenisation is significant for tribological wear of the investigated material. In the terminal case, for material after 1200°C/100 h/argon homogenization, significant decrease in the mass wear was observed for cast Ni₃Al (Cr, Zr, B) alloy. The results were better than the ones observed even for austenitic valve steel 50H21G9N4 investigated in the same experimental conditions.

Carried out research has shown that homogeneity of the strengthening of particular structural phases and stability of the phase composition and probable ordering increase in the investigated alloy influence on the materials resistance to tribological wear.

Keywords: intermetallic alloys, tribological wear, heat treatment