

Anna Dolata-Grosz¹

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Jakub Wieczorek²

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Zakład Kompozytów i Metalurgii Proszków, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE HETEROFAZOWYCH ALUMINIOWYCH ODLEWÓW KOMPOZYTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH WĘGLIKI CHROMU I TYTANU

Przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych (współczynnik tarcia, zużycie) pary ciernej żeliwo-kompozyt. Badaniom poddano kompozyty heterofazowe zawierające węgliki chromu (Cr_3C_2) i tytanu (TiC). Na osnowę wytwarzanych kompozytów zastosowano stop aluminium z magnezem AlMg10. Fazy zbrojące w postaci mieszaniny proszku kompozytowego typu Ni-Cr- Cr_3C_2 -TiC, stosowane w procesie technologicznym jako nośnik umocnienia, otrzymano w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS). Do wytworzenia wlewków kompozytowych typu AlMg10/NiCr- Cr_3C_2 -TiC, stanowiących półwyrób w przyjętym procesie technologicznym, zastosowano metodę mechanicznego mieszania zawiesiny kompozytowej, którą przeprowadzono w temperaturze 720°C. Uzyskane odlewy charakteryzowały się złożoną strukturą faz o różnej morfologii i składzie chemicznym. Metodą odlewania odśrodkowego z pionową osią wirowania ukształtowano tuleje, z których pobrano próbki w postaci pierścieni z przeznaczeniem do badań tribologicznych. Dla wytworzonych kompozytów wykonano pomiar twardości metodą Brinella. Badania pary kompozyt-żeliwo przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego, wykorzystując tester tribologiczny T-01 typu tarcza-trzpień. Tarczę stanowił kompozyt odlany odśrodkowo, partnerem tarcia zaś żeliwny trzpień. Wyniki uzyskane w badaniach tribologicznych pozwalają stwierdzić, że na wartość współczynnika tarcia pary kompozyt-żeliwo nie wpływa ilość stosowanego zbrojenia. Udział objętościowy stosowanego umocnienia wpływa natomiast na poziom zużycia partnera tarcia, czyli żeliwa. Wykonane badania dowodzą słuszności stosowania metody odlewania odśrodkowego zawiesin kompozytowych, która umożliwia wytwarzanie odlewów warstwowych przeznaczonych do pracy w warunkach tribologicznych.

Słowa kluczowe: AMCs, zbrojenie heterofazowe, metody odlewnicze, właściwości tribologiczne

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HETEROPHASES ALUMINIUM CAST COMPOSITES CONTAINING CHROMIUM AND TITANIUM CARBIDES

The application of heterophase reinforcement is a solution which enables the broadening of the possibilities of designing the tribological properties of friction couples. The appropriate choice of components such as matrix and reinforcing phases allows us to limit the wear of the elements of frictional couple and to gain the stability of friction coefficient. This article presents the research results on tribological properties (friction coefficient, wear) of the frictional couple cast iron-composite. The subject of that research was heterophase composites containing chromium carbides (Cr_3C_2) and titanium carbides (TiC). The aluminium-magnesium alloy (AlMg10) was used as a matrix of the produced composites. The result of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) were the reinforcing phases such as mixture of composite powder like NiCr- Cr_3C_2 -TiC used in technological process as a consolidation carrier. The structure and phase composition of the composite powder used in modification of aluminium alloy is shown in Figure 1. The method of mechanical stirring of composite suspended matter conducted in 720°C was used to produce AlMg10/NiCr- Cr_3C_2 -TiC composite ingot being a semi-finished product in the applied technological process. The obtained castings were characterized by complex phase structure of different morphology and chemical composition (Fig. 3). The sleeves that were formed using the centrifugal casting method, with vertical axis, were used for further tribological research. Tribological investigations of cast iron - composite couple were carried out under technically dry friction on a T-01 pin-on-disk tester. The centrifugal cast composite constituted the disc; the friction partner was the cast iron pin. The device's diagram used in tribological examinations is presented in Figure 2. The process of wear and changes of friction coefficient in the path function is presented in histograms as an absolute mass decrement of composite and the cooperating cast iron respectively (Figs. 4, 6, 8). The created composites were measured with Brinell hardness method and the results were presented in the form of diagram, shown in Figure 9. The results obtained during tribological examinations allow us to state that the amount of used reinforcement does not influence the value of friction coefficient composite - cast iron couple. Volume fraction of the applied reinforcement influences the level of friction partner wear, that is the cast iron. All the conducted tests of the centrifugal casting method of composite suspended matters proved to be correct; it also enables creating layered castings used in tribological conditions.

Keywords: AMCs, heterophase reinforcement, casting methods, tribological properties

WPROWADZENIE

W procesie projektowania składu i budowy materiału kompozytowego, przeznaczonego do współpracy tribologicznej, brane są pod uwagę zarówno czynniki zewnętrzne, wymuszające określony zespół reakcji materiału, w tym: obciążenie, temperatura pracy, rodzaj smarowania lub jego brak, prędkość ruchu, obecność drgań, jak również szeroki zespół właściwości strukturalnych materiału: rodzaj osnowy, rodzaj fazy zbrojącej, udział i wielkość fazy zbrojącej oraz jej morfologia [1-4]. Każdy z tych czynników wpływa w sposób bezpośredni na trwałość i niezawodność węzła tribologicznego. Wzajemna korelacja pomiędzy budową i technologią wytwarzania kompozytów a ich właściwościami, w określonych warunkach pracy, jest źródłem ciągłych dociekań badawczych. Zastosowanie zbrojenia heterofazowego jest rozwiązaniem materiałowym pozwalającym w znacznym stopniu na rozszerzenie możliwości projektowania i zróżnicowania właściwości tribologicznych skojarzeń ciernych. Poprzez odpowiedni dobór komponentów zarówno osnowy, jak i faz umacniających możliwe jest ograniczenie zużycia elementów pary ciernej i uzyskanie stabilizacji współczynnika tarcia [5-8].

W danych literaturowych znajdują się sygnałne informacje o wytwarzaniu, strukturze i właściwościach tribologicznych kompozytów aluminiowych zawierających fazy węglkowe różniące się od węgliku krzemu, węgliku aluminium i węgliku tytanu [9-11]. Brak jest informacji o wytwarzaniu i właściwościach tribologicznych kompozytów zawierających dwie fazy węglkowe stosowane do hybrydowego umocnienia stopów aluminium. Założono, że węgliki chromu i tytanu, przede wszystkim ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne, mogą być efektywnym umocnieniem w kompozytowych stopach aluminium, zwłaszcza przeznaczonych do odlewania odśrodkowego wyrobów [12-18]. Stwierdzono, że ze względu na różnicę w gęstości

stosowanych faz węglkowych będzie można wytworzyć odlewy ze strukturą warstwową i hybrydowym umocnieniem. Roztwór stały NiCr 80/20 zawarty w proszku kompozytowym ulega rozpuszczeniu w aluminiowej osnowie z wytworzeniem dodatkowego dyspersyjnego umocnienia z faz międzymetalicznych z układu Ni-Al oraz Ni-Cr-Al [15-18]. Na końcową strukturę, a zatem i właściwości wytworzonych kompozytów wpływa także stabilność faz węglkowych w roztopionym stopie AlMg10 [16-18].

CEL I ZAKRES BADAŃ

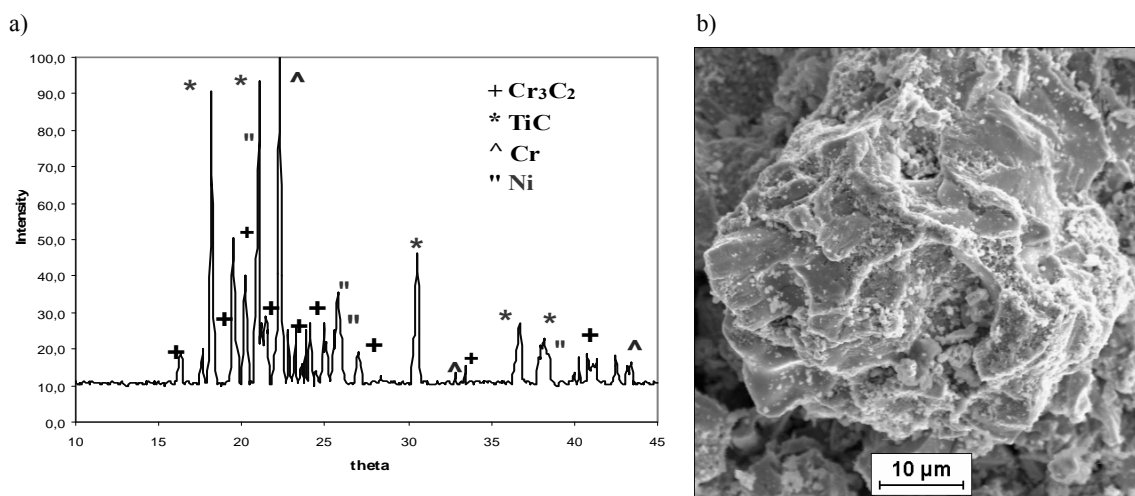
Celem zrealizowanych badań były badania właściwości tribologicznych - współczynnika tarcia i zużycia - kompozytów heterofazowych, zawierających węgliki chromu i tytanu, ukształtowanych w procesie odlewania odśrodkowego, a także ocena zużycia elementu współpracującego.

Zakres badań obejmował:

- ▶ wytworzenie kompozytu z aluminiową osnową i węglkami,
- ▶ wykorzystanie zawiesiny kompozytowej w procesie odlewania odśrodkowego i wytworzenie tulei z warstwowym rozmieszczeniem faz zbrojących,
- ▶ badania właściwości tribologicznych, współczynnika tarcia oraz zużycia pary ciernej żeliwo-kompozyt,
- ▶ analizę mikroskopową śladów zużycia,
- ▶ badania twardości.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

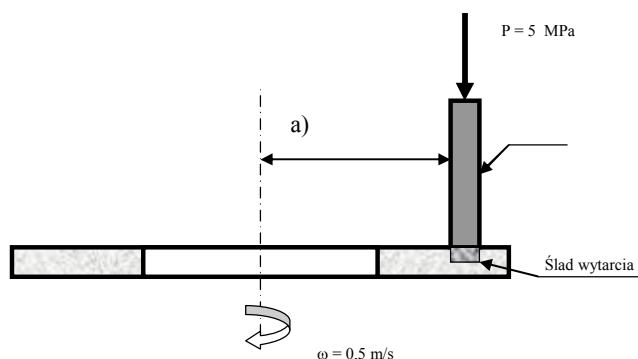
Na osnowę wytworzonych kompozytów zastosowano odlewniczy stop aluminium z magnezem - AlMg10 (AG10). Jako nośnik umocnienia wykorzystano proszek kompozytowy, zawierający węgliki chromu i tytanu oraz



Rys. 1. Dyfraktogram (a) i morfologia (SEM) (b) proszku kompozytowego NiCr/Cr₃C₂-TiC zastosowanego do modyfikacji stopu AlMg10

Fig. 1. The diffraction pattern (a) and the morphology (SEM) (b) of NiCr/Cr₃C₂-TiC composite powder used for the AlMg10 alloy modification

fazę roztworu stałego NiCr ($\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$). Proszek kompozytowy otrzymano w procesie samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (SHS) [12--14]. Skład fazowy oraz morfologię proszku zastosowanego do modyfikacji stopu osnowy pokazano na rysunku 1. Proszek kompozytowy, o wielkości $20\div 40\ \mu\text{m}$, wprowadzono do mieszanego mechanicznie ciekłego aluminium w zakresie temperatur od 720 do 740°C [16, 17]. Uzyskaną zawiesinę kompozytową mieszano w czasie 10 minut i odlewano do formy grafitowej. Stosowano dwa udziały objętościowe proszku kompozytowego, odpowiednio: 5 i 10%. Wytworzone wlewki kompozytowe przetopiono i odlano do wirującej formy w celu uzyskania odlewów odśrodkowych. Z wytworzonych tulei wycięto pierścienie, które poddano badaniom tribologicznym. Proces ścierania został przeprowadzony na testerze trybologicznym typu trzpień-tarcza (T-01M) produkcji Instytutu Technologii i Eksploatacji w Radomiu. Schemat stanowiska do badań tribologicznych pokazano na rysunku 2. Przeciwpróbka w postaci żeliwnego trzpienia o średnicy 3 mm w pozycji pionowej została dociśnięta z siłą 5 MPa do obracającej się z prędkością 0,7 m/s powierzchni tarczy kompozytowej. Średnica pomiarowa została tak dobrana, aby współpraca trących elementów odbywała się w obszarze warstwy kompozytowej. Proces ścierania odbywał się w warunkach tarcia technicznie suchego.



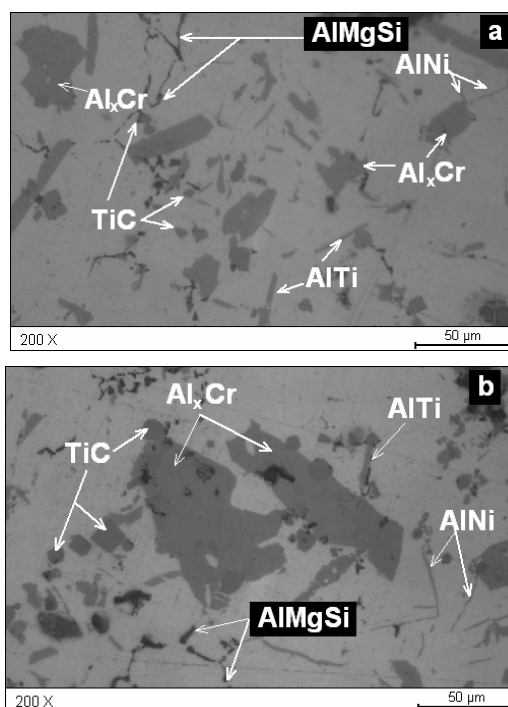
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego trzpień-tarcza

Fig. 2. The schema of measurements system T-01 used in the investigation

Strukturę warstwy kompozytowej otrzymanej w wyniku odlewania odśrodkowego zawiesiny powstałej po wprowadzeniu proszku kompozytowego $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$ do stopu AlMg10 przedstawiono na rysunku 3. Na podstawie badań strukturalnych oraz analizy rentgenowskiej, których szczególne wyniki przedstawiono w publikacjach [16-18], potwierdzono obecność w osnowie aluminiowej faz o różnej dyspersji, morfologii i składzie chemicznym.

Zidentyfikowane fazy, tj. Al_5Cr , Al_2Cr , AlTi oraz AlNi , powstały w wyniku reakcji rozpuszczania węglików i wiążącej osnowy NiCr ze stopem AlMg10 . Wykonane badania rentgenowskie potwierdziły również

występowanie węgla aluminium Al_4C_3 , który stanowił dodatkowe, dyspersyjne umocnienie osnowy aluminiowej [16-19].



Rys. 3. Struktura kompozytowego odlewu AlMg10 z proszkiem kompozytowym $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$ po odlewaniu grawitacyjnym

Fig. 3. The structure of composite casts AlMg10 with $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$, composite powder after gravitational casting

TABELA 1. Zestawienie materiałów tarcz wykorzystanych w badaniach

TABLE 1. Comparison of disk materials used for research

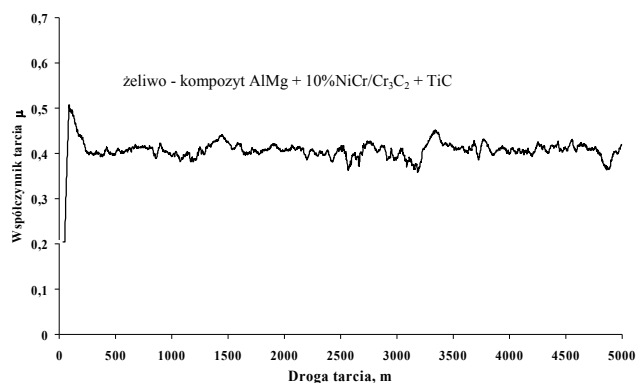
Oznaczenie próbki	Trzpień	Tarcza	Dystans m	Prędkość m/s	Nacisk jednostkowy MPa
Al10 NiCr	Żeliwo sferoidalne	$\text{AlMg}+10\%\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC}$	5000	0,5	5
Al5 NiCr	Żeliwo sferoidalne	$\text{AlMg}+5\%\text{NiCr}/\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC}$	5000	0,5	5

Materiały kompozytowych tarcz poddanych ścieraniu oraz ich skład fazowy przedstawiono w tabeli 1. Jako materiał przeciwpółki wybrano żeliwo sferoidalne wykorzystywane do produkcji tarcz hamulcowych.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badania własności tribologicznych obejmowały wyznaczenie wartości współczynnika tarcia oraz ubytku masy współpracujących w warunkach tarcia technicznie suchego elementów skojarzenia żeliwo-warstwa kompozytowa. Ponadto przeprowadzono analizę mikroskopową śladów wytarcia pozwalającą zidentyfikować mechanizm zużycia w badanych skojarzeniach ciernych.

Na rysunku 4 przedstawiono wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla skojarzenia tribologicznego żeliwo-kompozyt AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC. Dla badanej pary ciernej żeliwo-kompozyt w początkowym etapie tarcia współczynnik tarcia wynosił niewiele ponad $\mu = 0,2$, po czym gwałtownie wzrastał aż do osiągnięcia wartości $\mu = 0,5$. Po dystansie tarcia równym około 400 metrów wartość współczynnika tarcia ustabilizowała się na poziomie $\mu = 0,4$ i z niewielkimi wahaniami nie zmieniała się do końca próby.



Rys. 4. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla układu żeliwo-kompozyt AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC

Fig. 4. The diagram of friction coefficient shifts in track function for AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite

a)



b)

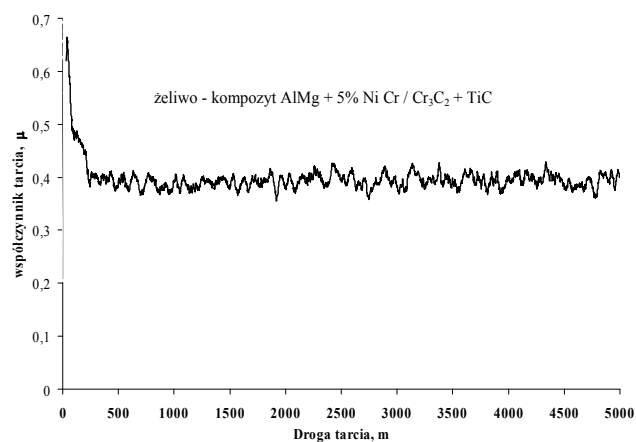


Rys. 5. Widok elementów pary ciernej żeliwo-kompozyt AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC: a) tarcza Al10 NiCr, b) żeliwny trzpień

Fig. 5. View of the frictional couple cast iron-AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite: a) Al10 NiCr disk, b) cast iron pin

Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcia współpracujących powierzchni pary ciernej żeliwo-kompozyt AlMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC. Na powierzchni tarczy kompozytowej widoczny jest równomierny ślad pozostawiony przez żeliwny trzpień o średnicy 3 mm. Ślad ten jest stosunkowo płytki. Na powierzchni roboczej żeliwnego trzpienia można zaobserwować zarysowania oraz niewielkie rowki, których kierunek odpowiadał kierunkowi ruchu współpracującej pary ciernej. Podczas przeprowadzania próby wskutek tarcia powstało niewiele produktów zużycia w postaci równomiernie rozproszonych na powierzchni drobnego czarnego proszku.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badania współczynnika tarcia w funkcji drogi skojarzenia żeliwo-kompozyt AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC. Z przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia można zaobserwować wyraźny okres docierania na dystansie około 500 m. W początkowym okresie współpracy wartość współczynnika tarcia wynosiła $\mu = 0,7$, po czym zaczęła szybko zmniejszać się do wartości $\mu = 0,5$. Następnie spadek wartości współczynnika tarcia nie był już tak dynamiczny, nadal jednak systematycznie się obniżał i po około 500 m nastąpiło ustabilizowanie jego wartości na poziomie $\mu = 0,4$. Wartość ta z niewielkimi odchyleniami była rejestrowana do końca pomiaru.

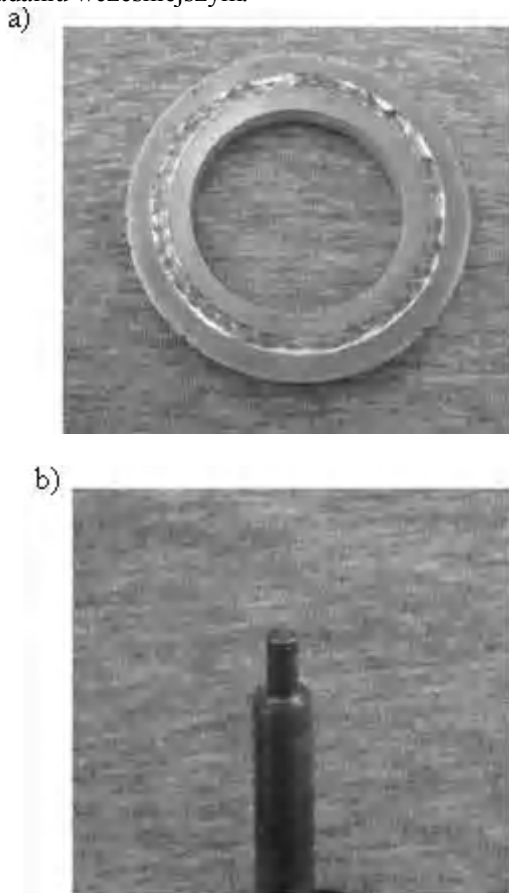


Rys. 6. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla układu żeliwo-kompozyt AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC

Fig. 6. The diagram of friction coefficient shifts in track function for AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite

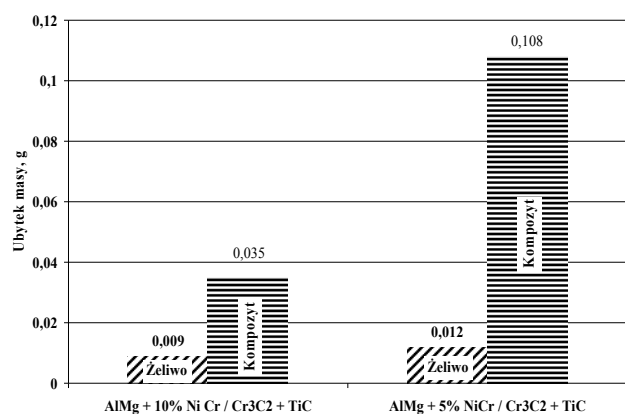
Na rysunku 7 przedstawiono widoki tarczy kompozytowej AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC oraz żeliwnego trzpienia. Można zauważyć, że ślady zużycia współpracujących elementów mają kształt dość nieregularny. Produkty zużycia powstałe wskutek tarcia miały postać zarówno drobnego brązowego proszku, jak również

srebrzystych wiór, których powstania nie zarejestrowano we wcześniejszej próbie. Powstały na powierzchni kompozytowej tarczy ślad wytarcia był wyraźnie głębszy niż w badaniu wcześniejszym.



Rys. 7. Widok elementów pary ciernej żeliwo-kompozyt AIMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC: a) tarcza Al5 NiCr, b) żeliwny trzpień

Fig. 7. View of the frictional couple cast iron-AIMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite: a) Al5 NiCr disk, b) cast iron pin

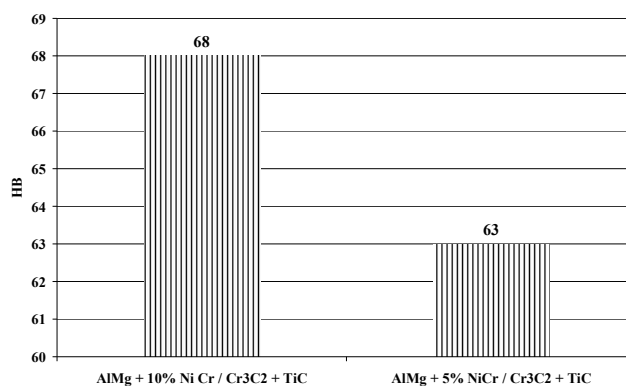


Rys. 8. Ubytek masy żeliwnej przeciwpróbki i kompozytowej tarczy po współpracy w warunkach tarcia technicznie suchego na dystansie 5000 m

Fig. 8. The loss of cast iron counter sample mass after collaboration in dry sliding conditions at the 5000 m distance

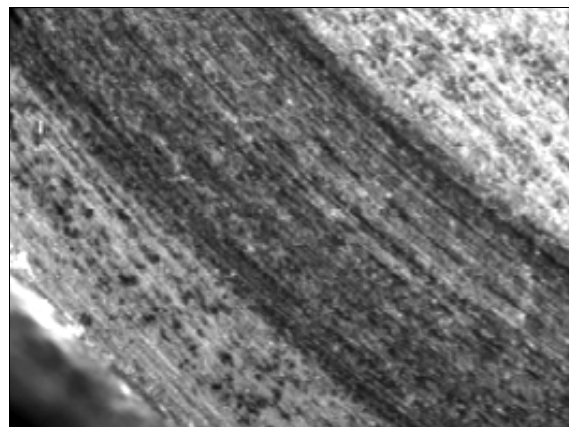
Po przeprowadzeniu badań tribologicznych powstały na powierzchniach współpracujących ślad wytarcia poddano analizie mikroskopowej. Analizę przeprowa-

dzono, wykorzystując stereoskopowy mikroskop marki Nikon typu SMZ 1000 wyposażony w obiektyw ED Plan 2*WD 32,5, który współpracował z aparatem cyfrowym tej samej marki. Podczas badań zastosowano program do analizy obrazu Lucia Net. Aby scharakteryzować rodzaj i charakter zużycia tribologicznego, dla każdej z próbek zarejestrowano szereg obrazów z kilku różnych miejsc śladu wytarcia, a dzięki możliwościom mikroskopu stereograficznego oceniono głębokość tego śladu. Dla pełnej analizy zjawisk odpowiedzialnych za zużycie badanych skojarzeń tribologicznych przeprowadzono badania ubytku masy (rys. 8) współpracujących elementów oraz pomiar twardości warstw kompozytowych (rys. 9).



Rys. 9. Twardość HB kompozytowych warstw poddanych procesowi ścierania

Fig. 9. The hardness of HB composites layers under the process of wear

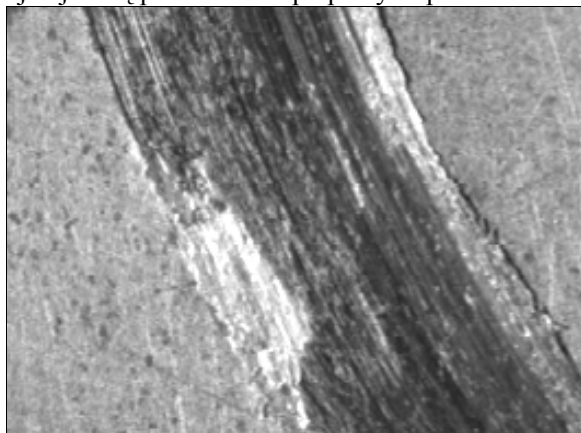


Rys. 10. Widok śladu zużycia kompozytu AIMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC, pow. 50x

Fig. 10. Erosion rack on the AIMg+10%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite layer, magn. 50x

Na rysunku 10 przedstawiono obraz śladu wytarcia powstały na próbce Al10NiCr. Widoczne na całej powierzchni tarcia równomierne brzdowanie świadczy wyraźnie, że za proces zużycia odpowiada w tym przypadku mechanizm abrazyjny. Ślad wytarcia jest równomierny i niezbyt głęboki, co potwierdziły badania mikroskopowe oraz badania ubytku masy (rys. 8). W tym

przypadku nastąpiło trwałe odkształcenie w miejscu wytarcia, a następnie wypchnięcie nadmiaru materiału na zewnątrz wytworzonej bruzdy, jak również częściowe jego ścieranie. Obszar zbrojenia jest na tyle duży, że obejmuje całą przestrzeń współpracy trzpienia z tarczą.



Rys. 11. Widok śladu zużycia kompozytu AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC, pow. 50x

Fig. 11. Erosion rack on the AlMg+5%NiCr/Cr₃C₂+TiC composite layer, magn. 50x

Na rysunku 11 przedstawiono obraz śladu wytarcia próbki Al10NiCr. Obserwowany ślad wytarcia świadczy o połączeniu w tym przypadku zużycia abrazyjnego ze zużyciem adhezyjnym. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne na brzegach śladu wytarcia, gdzie nastąpiło odkształcenie plastyczne. Odkształcenie plastyczne obserwowane na brzegach śladu wytarcia mogło powstać wskutek zbyt małej szerokości warstwy kompozytowej w stosunku do średnicy żeliwnego trzpienia. Ślad pozostawiony przez żeliwny trzpień jest głębszy w porównaniu do śladu powstałego na powierzchni wcześniej analizowanej próbki, a ubytek masy tarczy kompozytowej był blisko trzy razy większy (rys. 8). Kierunek bruzdowania jest zgodny z kierunkiem ruchu, jednak jest bardzo nieregularny, a brzegi śladu wytarcia są nierówne i poszarpane.

PODSUMOWANIE

Porównując wyniki badań tribologicznych, skojarzeń żeliwo-kompozyt o heterofazowym charakterze zbrojenia, zaobserwowano istotny wpływ udziału objętościowego proszku kompozytowego, zastosowanego jako zbrojenie, na przebieg i poziom zużycia. Przy zastosowaniu 5% udziału mieszaniny proszku NiC/Cr₃C₃-TiC zarejestrowano wyższy poziom zużycia kompozytu niż w przypadku kompozytu, w którym zastosowano 10% udział mieszaniny proszku.

Zwiększone zużycie kompozytu o niższym udziale faz zbrojących w obszarze tarcia wynika z faktu pojawienia się w trakcie jego eksploatacji dwóch mechanizmów zużycia, adhezyjnego i abrazyjnego. Połączenie

mechanizmów zużywania wyraźnie intensyfikuje poziom zużycia, dając blisko trzykrotny jego wzrost w porównaniu z materiałem o większym udziale heterofazowego zbrojenia. Zwiększenie udziału fazy zbrojącej pozwoliło wyeliminować zjawiska związane z adhezyjnym zużywaniami. Jednocześnie nie zmieniło to wartości współczynnika tarcia, który w obu analizowanych przypadkach po okresie docierania stabilizował się na poziomie $\mu = 0,4$. Zwiększenie udziału faz zbrojących nie wpłynęło również na zwiększenie zużycia żeliwnego partnera tarcia. Zatem można stwierdzić, iż dopiero przy 10% udziale fazy zbrojącej mamy do czynienia z jednorodnym mechanizmem zużywania, wpływającym korzystnie na eksploatację węzła tribologicznego żeliwo-kompozyt heterofazowy.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007, projekt badawczy KBN 3 T08D 024 28.

Podziękowanie

Autorzy artykułu składają podziękowanie drowi inż. B. Formankowi za udostępnienie proszków wykorzystanych w badaniach.

LITERATURA

- [1] Deuis R.L., Subramanian C., Yellup J.M., Dry sliding wear of aluminium composites - a review, *Composites Science and Technology* 1997, 57, 415-435.
- [2] Zhang J., Alpas A.T., Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys, *Materials Science Engineering* 1993, A 161, 273-284.
- [3] Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Właściwości tribologiczne kompozytowych materiałów o osnowie stopu aluminium AK12 zbrojonych cząstkami ceramicznymi, *Kompozyty (Composites)* 2002, 1, 2, 207-210.
- [4] Posmyk A., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Reibungs- und Schmierungsverhalten von Aluminium - legierungen mit einem verstärkten Oberflächenbereich, *Technische Akademie Esslingen, 12th International Colloquium, January 11-13 2000, Tribology 2000 - Plus.*
- [5] Song J.I., Bae S.I., Ham K.C., Han K.S., Abrasive Wear Behavior of Hybrid Metal Matrix Composites, *Key Eng. Mat.* 2000, 183-187, 1267-1272.
- [6] Yoshimi Watanabe, Tatsuru Nakamura, Microstructures and wear resistances of hybrid Al-(Al₃Ti+Al₃Ni) FGMs fabricated by a centrifugal method, *Intermetallics* 2001, 9, 33-43.
- [7] KBN nr 3T08D02428: Kształtowanie funkcjonalnej, warstwowej struktury odlewów kompozytowych zawierających zbrojenie heterofazowe.
- [8] Myalski J., Wieczorek J., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Dyzia M., Tribologiczne właściwości kompozytów zbrojonych mieszaniną cząstek ceramicznych i węgla szklatego, *Inżynieria Materiałowa* 2005, 3, 93-104.
- [9] Lakshmi S., Lu L., Gupta M., In situ preparation of TiB₂ reinforced Al based composites, *Journal of Materials Processing Technology* 1998, 73, 160-166.

- [10] Fraś E., Janas A., Wierzbński S., Kolbus A., Odlewane aluminiowe kompozyty *in situ*, umacniane węglnikami tytanu, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa Zapewnienie jakości w odlewnictwie 2000, Krzepnięcie Metali i Stopów PAN, 2000, 2, 43, 167-176.
- [11] Zyska A., Braszczyńska-Malik K.N., Struktura kompozytów Al-(TiB₂+Al₂O₃)_p wytwarzanych metodą *in situ*, Kompozyty (Composites) 2004, 4, 11, 236-240.
- [12] Formanek B., Szymański K., Szczucka-Lasota B., Bierska B., Kompozytowe proszki i natryskiwane cieplnie powłoki z osnową NiCr i fazami międzymetalicznymi, Inżynieria Materiałowa 2003, 6, 137, 412-416.
- [13] Formanek B., Szymański K., Szczucka-Lasota B., Structure of composite powders with Ni-Cr matrix and FeAl phases, carbides and aluminium oxide, Kompozyty (Composites) 2002, 5, 278-282.
- [14] He J., Ice M., Lavernia E.J., Synthesis and characterization of nanostructures Cr₃C₂-NiCr, Elsevier Science, Nanostructure Materials 1998, 10, 8, 1271-1283.
- [15] Schuster J.C., Du Y., Thermodynamic description of the system Ti-Cr-C, Calphad 1999, 23, 3, 393-408.
- [16] Dolata-Grosz A., Ślężiona J., Formanek B., Aluminium matrix cast composite (AMCC) with hybrid reinforcement, Archives of Foundry 2005, 5, 15, 70-78.
- [17] Dolata-Grosz A., Formanek B., Ślężiona J., Wieczorek J., Struktura heterofazowych aluminiowych odlewów kompozytowych zawierających węgliki chromu i tytanu, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 3, 81-85.
- [18] Dolata-Grosz A., Formanek B., Ślężiona J., Aluminium alloy reinforcement NiCr-Cr₃C₂-TiC Composites powder, 10th International Conferences Aluminium 2005, Kliczków, 12-14 October 2005, wydanie na CD.
- [19] Velgosova O., Besterce M., Influence of stain rate and temperature on fracture mechanism of dispersion strengthened Al-12Al₄C₃ system, Materials Letters 2003, 57, 4014-4017.

Recenzent
Michał Szweycer