

B. MIEDZIŃSKI, Z. OKRASZEWSKI, M. HABRYCH
Politechnika Wroclawska, Wrocław University of Technology
J. WANDZIO
KGHM Polska Miedź S.A., Zakłady Górnicze „RUDNA”, Lubin, Poland
R. V. MINAKOVA, I.I. TIMOFYEEVA, I.L. ISAYEVA, V.G. ZATOVSKY, I.N. FRANTSEVICH
Institute for Problems of Material Science NASU, Kiev, Ukraine

Analiza uszkodzeń styków ślizgowych kompozytowych (Cu-Mo) stosowanych w transporcie kopalnianym

Failure analysis of sliding contacts made of Cu-Mo composition used in mining transportation

W artykule przedstawiono i przedyskutowano wyniki analizy uszkodzeń styków kompozytowych Cu-Mo wykorzystywanych w układach transportu kopalnianego zasilanego prądem stałym. Na podstawie analizy morfologii powierzchni stykowych oraz wyników badań makro- i mikrostruktury obszarów zestyków uszkodzonych sformułowano wnioski odnośnie do przyczyn zaistniałych uszkodzeń.

Paper presents and discusses the results of failure analysis of Cu-Mo composition used as a material in sliding power contacts DC for mining transportation. On the basis of the investigated results of the contact surface morphology and inspection of macro and microstructure of degraded areas the conclusions on reasons of the contact degradations are formulated.

1. WSTĘP

W trakcji kopalnianej stałoprądowej używane są powszechnie styki ślizgowe wykonane z materiału na bazie grafitu. W rzeczywistych trudnych warunkach pracy kopalni (wysokie zapylenie środowiska duże wartości stałego prądu obciążenia oraz mała prędkość ruchu) oraz znaczne wartości strat mocy w zestykach, stosowane styki grafitowe ulegają szybkiemu zużyciu. Zachodzi zatem potrzeba zastąpienia ich innym materiałem stykowym bardziej odpornym na zużycie. Na podstawie uzyskanych wstępnych wyników badań stwierdzono, że materiał kompozytowy wykonywany przy wykorzystaniu wiązki elektronowej z odpowiednią kondensacją par metali może być odpowiednim zamiennikiem. Pewne jednak zestyki kompozytowe wykazywały niekiedy nadmierne uszkodzenia w trakcie eksploatacji.

1. INTRODUCTION

In mining transportation still graphite as a basic component of a contact material is used in power slippers DC. However, due to accelerated wear under heavy conditions (highly polluted environment, heavy DC load and low speed) and a high power loss rate in the contact unit this material is not considered as a good. Therefore, there is an urgent need to replace the graphite by much more resistive to wear, suitable contact material. On the basis of the experimental results we have found that material of copper-molybdenum composition obtained by application of technology of electron beam high-rate evaporation-condensation can be used as a choice [1]. However, for some contact samples unexpected damages of the contacting surfaces were found under operation.

Z uwagi na fakt, iż uszkodzenia tego typu mogą znacznie zmniejszyć niezawodność pracy zestyków ślizgowych zaszła konieczność wyjaśnienia przyczyn występujących uszkodzeń. Przeprowadzono zatem odpowiednią analizę przyczyn uszkodzeń bazując zarówno na obserwacjach mikroskopowych powierzchni stykowych, w obszarach nadmiernego zużycia, badaniach ich morfologii i mikro- oraz makrostruktury, stosując spektroskopię elektronową, analizę rentgenologiczną oraz mikroskopię optyczną.

Na podstawie uzyskanych wyników określono przyczyny uszkodzeń ślizgowych zestyków kompozytowych (na bazie Cu-Mo) oraz sformułowano wnioski dotyczące odpowiedniej właściwej kontroli procesu technologicznego podczas wytwarzania.

2. STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI TRYBOLOGICZNE KOMPOZYTU Cu-Mo

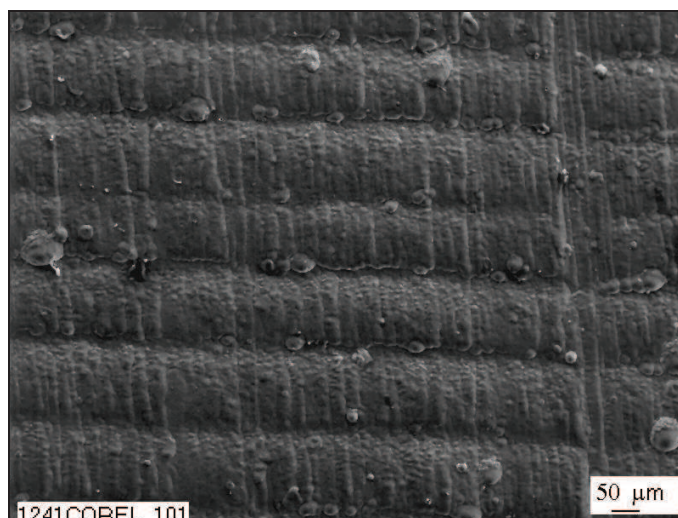
Zastosowanie technologii wiązki elektronowej o dużej intensywności naporowywania z kondensacją par metali w próżni jest jedną z najnowocześniejszych technologii służących do wytwarzania bardzo cienkich warstw (do około 5 μm) wykorzystywanych w mikro- i makrotechnologii, w tym również jako powłoki ochronne i zabezpieczające przed nadmiernym zużyciem. Zastosowanie zatem tej samej technologii do wytwarzania materiałów kompozytowych stykowych w miejsce dotychczasowych, produkowanych metodą spiekania drobnociąstek proszków, wydaje się być jak najbardziej uzasadnione. Niezbędne jest jednak podjęcie w tym zakresie odpowiednich działań technologicznych zmierzających do m.in. wyeliminowania metali szlachetnych. Badania laboratoryjne umożliwiające wytwarzanie materiałów kompozytowych o grubościach próbek około 12 mm, o strukturze dyspersyjnej wielowarstwowej są prowadzone w licznych laboratoriach światowych, w tym Instytucie Elektrycznego Zgrzewania (im. E. O. Patona) Ukraińskiej Akademii Nauk w 1970 roku [1,2]. Jednak do chwili obecnej nie udało się wdrożyć technologii przemysłowej do masowego wytwarzania tego typu materiałów przeznaczonych do zastosowań w zestykach elektrycznych. Materiał kompozytowy Cu-Mo opracowany w firmie „Gekont” (przedsiębiorstwie naukowo-produkcyjnym) charakteryzuje się obniżoną wartością współczynnika tarcia oraz zwiększoną odpornością na zużycie [2,3]. Spełnienie jednak wszystkich wymagań odnośnie do zastosowań w zestykach ślizgowych jest możliwe jedynie na drodze zapewnienia odpowiedniej technologii ich wykonania. Naporowywane materiały Cu-Mo tworzące strukturę laminowaną wykazują pewną niejednorodność chemiczną w zależności od grubości warstwy [1]. Powierzchnia stykowa materiału odzwierciedla gładkość i strukturę powierzchni podłoża, co widać na rys. 1.

Since it can result in maloperation of the sliding contact with following decrease in its life therefore, to explain the degradation reasons the respective failure analysis was performed. It was done on the basis of inspection of the contact surface and investigations of its morphology as well as analysis of both macro- and microstructure of the damaged areas using X-ray spectroscopy, ESM and optical microscopy.

Thus, the conclusions about reasons of the contact degradation and about proper control of manufacturing technology of the Cu-Mo compositions are formulated.

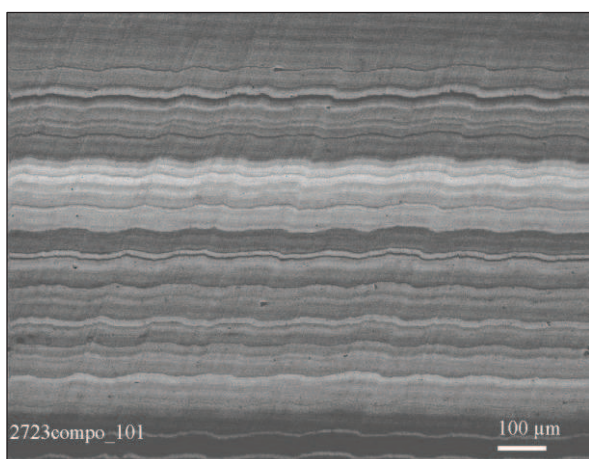
2. STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Cu-Mo COMPOSITION

Electron beam high-rate evaporation with following condensation in vacuum is one of the prominent techniques used for obtaining both fine films (up to about 5 μm) in micro and nanotechnology and thick films (more than 5 μm) as protective and wear-resistant coatings. The use of the same idea to produce the composite materials for electrical contacts instead of these made by the method of fine powder metallurgy seems to be of great significance. However, to develop and to apply in practice the new composite materials not containing noble metals a lot of different technical and technological problems were necessary to solve. Laboratory samples of the composite materials of thickness up to about 12 mm of dispersion-strengthened and microlayer types were prepared and investigated in a number of the research laboratories among others in E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine since 1970s [1,2]. But, up to now there is no information about mass production of such the materials for electric contacts. The composition Cu-Mo developed in Research and Production Company “Gekont” in Vinnitsa, Ukraine were found to characterize by decreased friction coefficient and increased resistance to wear [2,3]. However, to meet requirements in sliding contacts these materials have to be properly fabricated. The vapor-phase Cu-Mo compositions display a laminar structure with a gradient of chemical composition in thickness [1]. The contact surface quality depicts the surface finish of the substrate and can look like this shown for example in Fig. 1.

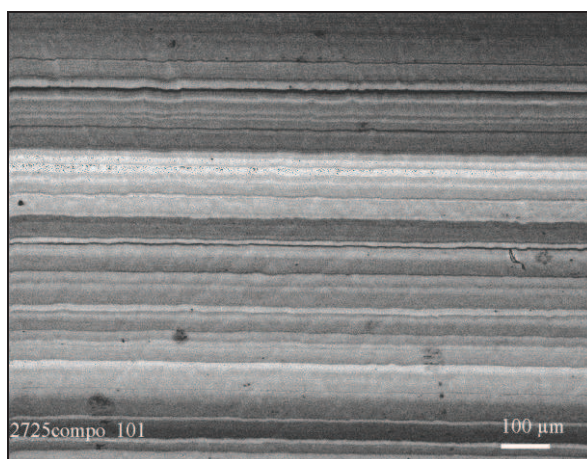


Rys. 1. Wygląd powierzchni stykowej wykonanej z kondensatu Cu-Mo
 Fig. 1. View of the contact surface made of the Cu-Mo condensate

a)



b)



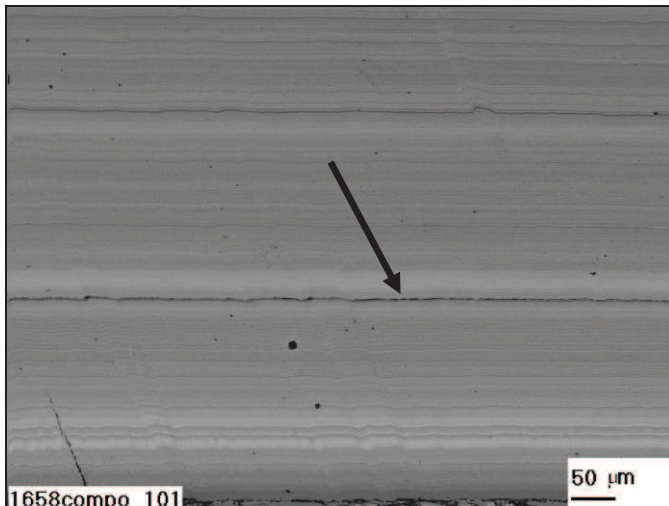
Rys. 2. Mikrostruktura kondensatu Cu-Mo w objętości styku:
 a) w przekroju prostopadłym do powierzchni próbki, b) w przekroju wzdłuż próbki
 Fig. 2. Microstructure of Cu-Mo condensate inside the contact volume;
 a) in a cross section perpendicular to the surface strips, b) in cross section along the strips

Struktura warstwowa (laminarna) jest widoczna w przekroju poprzecznym styku, co można zobaczyć na rys. 2.

Dzięki odpowiedniemu właściwemu sterowaniu zawartością molibdenu, wewnątrz warstw 4-5% aż do około 20-25% całkowitej warstwy zestyku możliwe jest uzyskanie odpowiedniego gradientowego materiału kompozytowego [1,2]. W przypadku jednak użycia materiałów wyjściowych o tak zwanej „czystości technicznej” i przeprowadzenia procesu napyłania (oksydacji) w warunkach „próżni technicznej” możliwe jest występowanie technologicznych rozwarstwień (szczelin) jak pokazano strzałką na rys. 3.

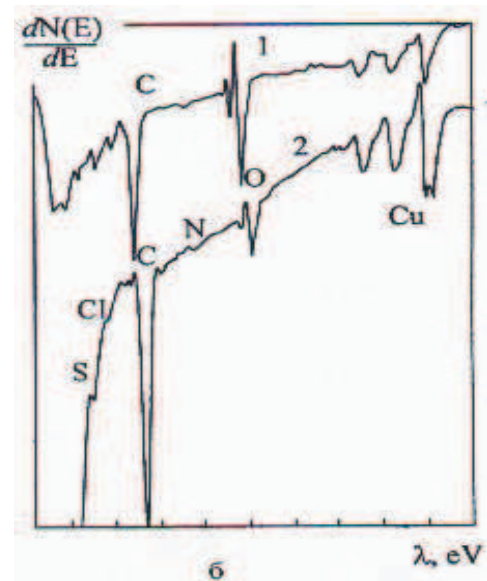
The laminar structure is visible in a cross section of the contact volume what can be compared from Fig. 2.

Thus by proper control of the molybdenum amount inside the layers from 4-5% up to about 20-25% of total mass it is possible to produce the gradient composite material [1,2]. However, when use starting materials of a “technical” purity and conduct the oxidation process under “technical” vacuum conditions some technological interspaces are able to be created what is indicated by arrow in Fig. 3.



Rys. 3. Rozwarstwianie się kondensatu Cu-Mo (o warstwach macro $\geq 10^3 \mu\text{m}$ oraz micro $< 10^3 \mu\text{m}$ i jeszcze mniejszych) z ewidentnym technologicznym pęknięciem wskazanym strzałką

Fig. 3. Stratification of the Cu-Mo condensate (macro $\geq 10^3 \mu\text{m}$, micro $< 10^3 \mu\text{m}$ and submicrolevel) with evidence of technological interspaces indicated by arrow



Rys. 4. Różnego rodzaju zanieczyszczenia na powierzchni granicy warstw (1 – węgiel w postaci grafitu, 2 – jako karbid) oraz inne elementy
Fig. 4. Different impurities at surfaces of the macrolayers boundary (1 – carbon as graphite, 2 – as carbide) and other elements

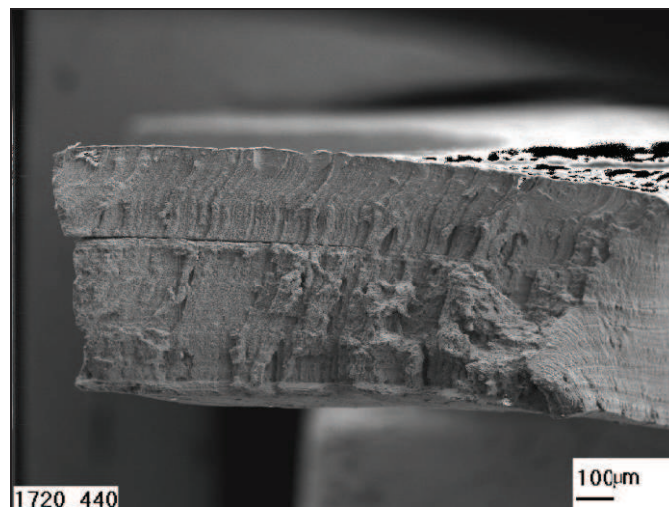
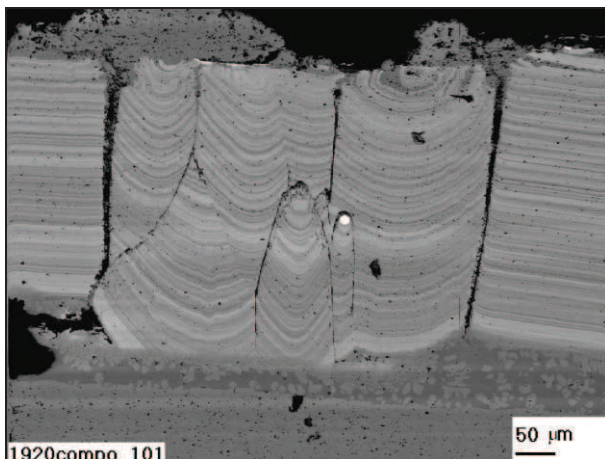


Fig. 5. Stratification of the Cu-Mo condensate under mechanical stress
Rys. 5. Rozwarstwienie się kondensatu Cu-Mo pod wpływem naprężenia mechanicznego

Tego typu szczeliny są natychmiast wypełniane przez różnego rodzaju zanieczyszczenia i prowadzą w efekcie do rozwarstwienia się materiału stykowego. Przy zastosowaniu spektroskopu Auger wykryto takie elementy zanieczyszczeń jak: S, C, N, O i Cl, w tym również różne postacie przekształcenia węgla z grafitu (patrz krzywa 1 na rys. 4) do karbidu (krzywa 2 na rys. 4) w efekcie wzajemnego oddziaływania z molibdenem. Tak więc podczas występowania naprężeń mechanicznych, tego typu materiały kompozytowe Cu-Mo natychmiast ulegają rozwarstwieniu (rys. 5).

These interspaces are immediately filled up with different impurities and result as a matter of fact in delamination of the contact material. Using Auger spectroscopy such elements like S, C, N, O and Cl were detected, and transformation of carbon from graphite (see curve 1 in Fig. 4) to carbide (curve 2 in Fig. 4) due to interaction with molybdenum was found. When exert a tensile stress to the specimen made of such composite Cu-Mo material its degradation revealed by the stratification can be visible (see Fig. 5).



Rys. 6. Uszkodzenie kondensatu Cu-Mo podczas wyrzucania kropli metalu z materiału wyjściowego w procesie technologicznym

Fig. 6. Failure of the Cu-Mo condensate due to ejection of the metal drops from the bath-vaporizer under processing

Należy tutaj podkreślić, że w przypadku niewłaściwego sterowania procesem technologicznym zamiast efektu naporowywania na powierzchni można zauważyć wyrzucane krople roztopionego metalu. Następuje wówczas natychmiastowe uszkodzenie się materiału w jego objętości, takie jak pokazano na rys. 6.

Aby zatem uzyskać stykowy materiał kompozytowy Cu-Mo o bardzo dobrej jakości należy zapewnić odpowiednio wysoką precyzję sterowania procesem technologicznym.

3. ZACHOWANIE SIĘ MATERIAŁU KOMPOZYTOWEGO CU-MO W ZESTYKACH ŚLIZGOWYCH TRAKCJI KOPALNI MIEDZI

Przeprowadzone badania testowe z zastosowanymi stykami ślizgowymi wykonanymi z kompozytu miedź-molibden wykazały znaczne obniżenie się wartości rezystancji przejścia zestyku (o około rząd) w porównaniu do styków grafitowych. W efekcie uległy zmniejszeniu straty mocy w samym zestyku z około 1,2 kW do wartości poniżej 80 W (dla 200 A, 500 V), co istotnie zmniejsza temperaturę nagrzewania się zestyku i wydłuża czas eksploatacji. Wygląd powierzchni stykowej tego typu styków (Cu-Mo) po ponad półrocznej eksploatacji w trakcji kopalnianej kopalni miedzi można zaobserwować na rys. 7. W pewnych jednak przypadkach stwierdzono występowanie nadmiernego zużycia powierzchni stykowej, zwłaszcza w jej części czołowej, z równoczesnym rozwarstwieniem się zastosowanego materiału (rys. 8).



Rys. 7. Wygląd powierzchni styku ślizgowego z kompozytu Cu-Mo po około półrocznym okresie eksploatacji w trakcji kolejowej kopalni miedzi

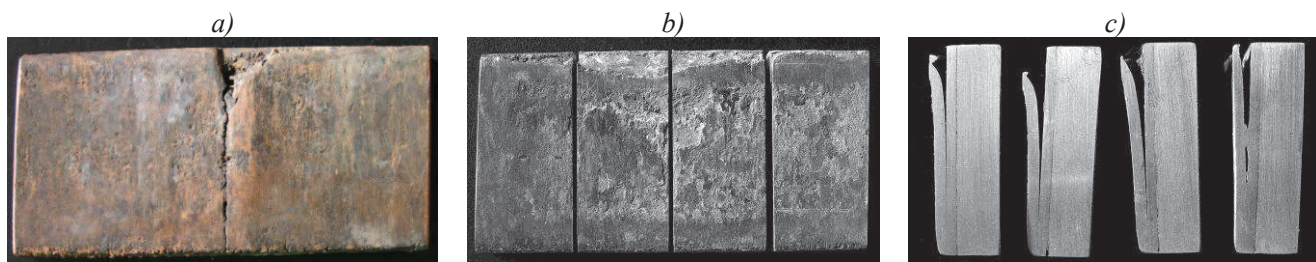
Fig. 7. View of the sliding contact made of the Cu-Mo condensed material after half-year operation in a copper mine

It is worth to know that in a case of fail in control of technological process the spurious liquid drops can be sputtered (instead of vapour) onto the substrate what disturb the condensation process tremendously. One can find immediately the specimen damages like these shown in Fig. 6.

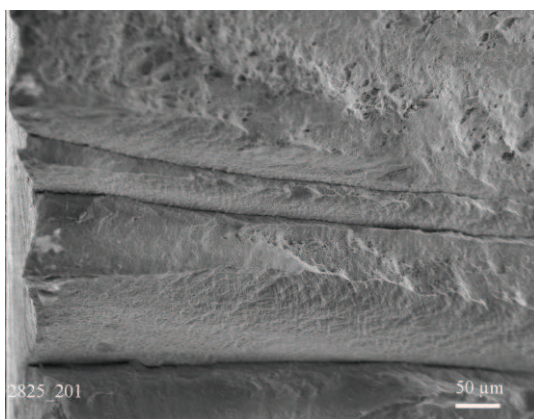
Therefore, to obtain a high quality composite Cu-Mo contact material the electron beam high-rate evaporation with following condensation processing has to be controlled and performed carefully.

3. PERFORMANCE OF CU-MO CONDENSATE MATERIAL IN SLIDING CONTACTS OF COPPER MINE TRANSPORTATION

The tests carried out with the slides made of the copper-molybdenum composite demonstrated significant reduction in the contact resistance value (by about one order of magnitude) with compare to the graphite ones [4]. As a result the power loss at the contacts area is reduced from about 1.2 kW to below 80 W (at 200 A, 500 V) what decreases level of contacts heating and extends their life time respectively. Surface state of the Cu-Mo composite sliding contact after over a half-year operation under normal conditions in a copper mine can be compared from Fig. 7. However, for some contact samples their unexpected excessive wear was found. It was revealed by their degradation at a frontal part with following stratification what is demonstrated for example in Fig. 8.



Rys. 8. Uszkodzenia materiału zestyku kompozytowego Cu-Mo : a), b) – w jego części „aktywnej” ślizgowej, c) – w przekroju poprzecznym
 Fig. 8. Degradation of the Cu-Mo composition; a), b) – at its active sliding area, c) – at the cross section



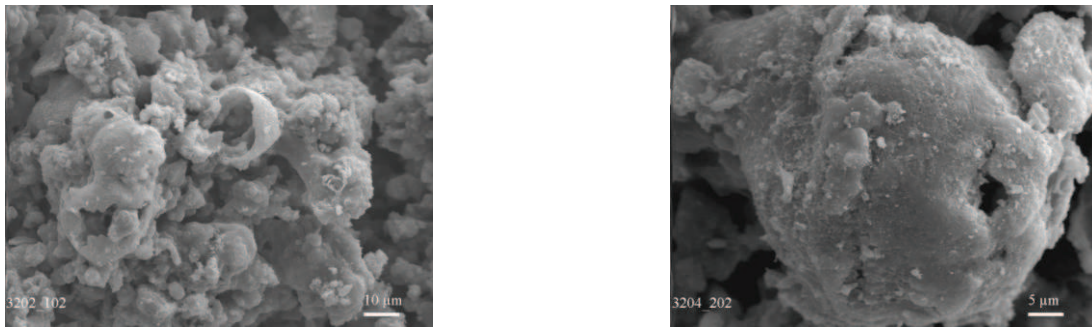
Rys. 9. Wytwarzanie się „pofałdowań” wzdłuż krawędzi materiału kompozytowego z dużą ilością zanieczyszczeń
 Fig. 9. Formation of interstices along the condensate material edges “enriched” with impurities

Analizując przyczyny uszkodzeń (korzystając z mikroskopu skaningowego oraz analizatora rentgenowskiego) stwierdzono występowanie w badanych próbkach stykowych relatywnie zbyt szerokich (w stosunku do innych) warstw miedzi „wzbogaconej” różnymi zanieczyszczeniami, takimi jak: F, Ca, N, C, O, S oraz Si, co pokazuje rysunek 9.

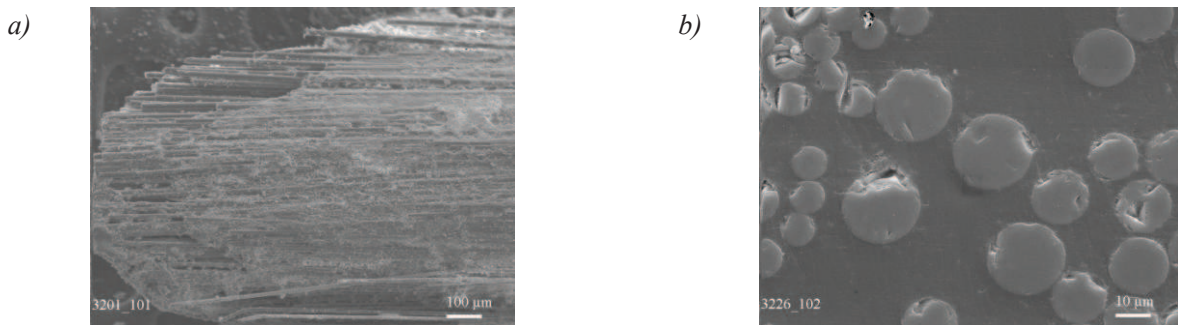
Należy w tym miejscu zauważyć, że na powierzchni krawędzi objętości materiału próbki węgiel występuje w wolnej postaci, natomiast na krawędzi warstw jest on chemicznie powiązany jako węgiel molibdenu. Stąd podczas występowania stresu mechanicznego w materiale, podczas pracy zestyku występujące mikropęknięcia wykazują istotne rozszerzanie się w efekcie czego ujawniają się dodatkowe narosty („kwitnięcia”). Tego typu narosty powierzchniowe oraz utlenianie się powierzchni stykowej są powiększane wskutek oddziaływania zanieczyszczonego środowiska oraz podwyższonej temperatury łuku elektrycznego. W efekcie stwierdzono dominujące występowanie produktów erozji i korozji, takich jak Cu-Mo(O, N). Zielony kolor proszku i innych produktów korozji dowodzi, że są to głównie związki miedzi i molibdenu (jak pokazano na rys. 10).

Under analyzing of the samples with the use of SEM and X-ray spectroscopy the appearance of too thick copper layers (between these of the condensate) “enriched” with different impurities (like F, Ca, N, C, O, S and Si) were easy identified (see Fig. 9).

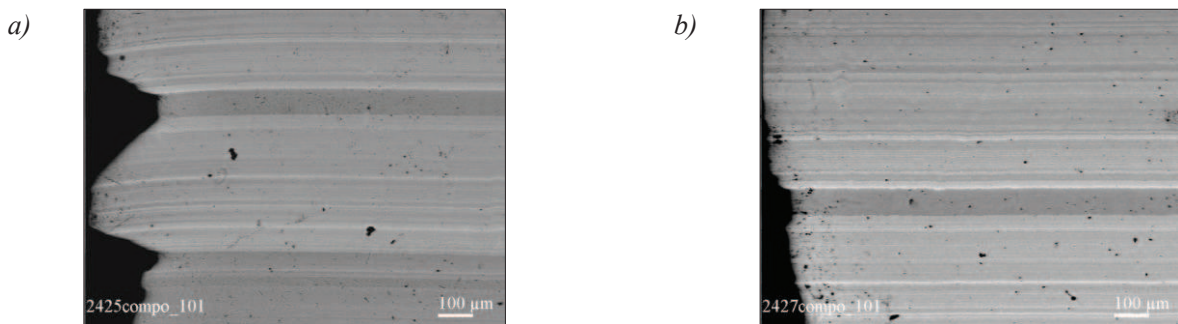
It is worth to note that at the surface of the gap edges carbon is in a free form while, at the edge of the condensate layer it is chemically bounded as the molybdenum carbide. Therefore, due to the stress relaxation of the material under the sliding contact operation these cracks tend to enlarge significantly what, results additionally in blooming. The blooming and oxidation are accelerated by the influence of environment and increased temperature related to the switching arc. As a matter of fact the influence of the element system Cu-Mo(O, N) on the corrosion and erosion products is found to be dominant. The green colour powder and other corrosive impurities represent mainly copper and molybdenums hydrides as shown in Fig. 10.



Rys. 10. Morfologia produktów korozji wewnątrz popękań materiału
 Fig. 10. Morphology of corrosive products inside the material crackings



Rys. 11. Formy włókniste produktów korozji: a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny
 Fig. 11. Fibrous form of the corrosive products: a) longitudinal, b) perpendicular cross section



Rys. 12. Struktura powierzchni w przekroju zestyku po występowaniu łuku elektrycznego: a) katoda, b) anoda
 Fig. 12. Structure of a contact cross section after the electric arc existence: a) cathode, b) anode

Wraz z przedłużającym się czasem oddziaływania pola temperaturowego oraz wyładowania łuku prądu stałego produkty korozji ulegają przekształceniu w formy włókniste (rys. 11) ze stwierdzoną obecnością: Al, Si, P, K, Ca, Fe, Br, In, Re, Au jak również prawdopodobnie Zr, Nb oraz Rh.

Uszkodzenie się powierzchni stykowej (głównie katody) jest związane również z lokalizacją wyładowczej plamki stykowej co powoduje wytwarzanie eutektycznej mieszaniny o niskiej temperaturze, tak jak to pokazano na rys. 12.

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, że technologia oraz proces przygotowywania kompozytów Cu-Mo są istotnie decydujące o stopniu degradacji powierzchni stykowej pod wpływem łuku prądu stałego w warunkach rzeczywistych (o dużym zanieczyszczeniu) pracy kopalni miedzi.

With prolonging duration of a temperature field interaction and the electric DC arc discharge the corrosive products can be converted into fibre looking form (see Fig. 11) with contain such elements like Al, Si, P, K, Ca, Fe, Br, In, Re, Au and probable Zr, Nb and Rh as well.

The contact surface degradation (mainly cathode) is also related to location of the discharge cathodic spot what results in generation of eutectic mixture of a low melting point like these indicated in Fig. 12.

On the basis of the investigated results it was found that technology and processing of the condensed Cu-Mo composition is a key factor influencing the contact surface degradation under influence of the electric DC arc discharge in polluted environment of the copper mine.

4. WNIOSKI

Zastąpienie grafitu materiałem kompozytowym miedź-molibden w zestykach ślizgowych stałoprądowej trójfazowej kopalnianej daje bardzo dobre efekty. Kompozyt wytworzony przy pomocy technologii wiązki elektronowej o dużej intensywności naporowywania z następującą kondensacją w próżni wykazuje istotne zmniejszenie (o ponad rząd wielkości) wartości rezystancji zestyku ślizgowego. W efekcie bardzo znacznie maleją straty mocy czynnej zestyku (około 1,2 kW do powyżej 80 W dla 200 A, 500 V), co ogranicza nagrzewanie się obszaru stykowego i powoduje wydatne zwiększenie niezawodności i czasu pracy zestyku. Występujące w niektórych przypadkach uszkodzenia powierzchni stykowych, podczas pracy zestyku, przejawiały się pęknięciami i rozwarstwianiem się materiału w jego objętości. Stwierdzono iż są one wynikiem wadliwie prowadzonego procesu technologicznego. W celu zatem otrzymania materiałów kompozytowych typu Co-Mo spełniających wymagania dotyczące styków ślizgowych stałoprądowych należy stosować bardzo dużą czystość wyjściowych materiałów, wysoki i stabilny poziom próżni oraz zapewnić odpowiednio precyzyjną kontrolę procesu technologicznego.

References

1. *N. I. Grechanyuk; V.A. Osokin; I.N. Grechanyuk; R. V., Minakova*: "Composite materials on base of copper and molybdenum, condensed from vapor phase, for electric contacts". *Advances in Electrometallurgy*, No 2, 2005, pp. 24-30.
2. *R. V., Minakova; N. I. Grechanyuk; M.E. Golovkova; V.A. Osokin; I.N. Grechanyuk; P.P. Kucerenko*: "Osnovy elektronno-lucevoj technologii materialov dla elektriceskich kontaktov; ich struktura, swojstwa". *Sovremennaja elektrometalurgia*, No2, 2006, pp. 9-19.
3. *V. G. Zatojskij; N. I. Grechanyuk; R. V. Minakova; G. E. Kopylova; B. Miedziński; Z. Okraszewski; J. Wandzio*: „Tribotechniceskie swojstva kondensirovannyh kompozitov na osnove medi”. *Naukovi Notatki UT. Łuck, Ukraine, 2007, vol. 20, pp. 166-170.*
4. *B. Miedziński; Z. Okraszewski; J. Wandzio; A. Michaluk*: "Influence of a sliding contact material on properties of slippers used in mining transportation". *Proc. of 15th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies. SIELA 2007, Plovdiv, Bulgaria, Vol. 1, pp. 84-91.*

Recenzent: dr inż. Witold Dzierżanowski

4. CONCLUSIONS

Replacement of graphite by condensed copper-molybdenum composition in sliding contacts DC used in mine transportation was found to be beneficial. This made by means of electron beam high-rate evaporation with following condensation in vacuum has demonstrated significant reduction (by about one order of magnitude) of the contact resistance value. As a result the power loss inside the contacts area is reduced tremendously from about 1.2 kW to below 80 W (at 200 A, 500 V) what reduces level of the contacts heating and prolongs their life time respectively. Some contact surface degradations being present under operation and revealed by the contact material cracking and stratifications are found to be result of transient lack of control under manufacturing process. Therefore, to obtain a high quality Cu-Mo composition using electron beam high-rate evaporation with following condensation in vacuum the manufacturing process as well as purity of metallic components and level of vacuum must be carefully controlled and selected.

References

1. *N. I. Grechanyuk; V.A. Osokin; I.N. Grechanyuk; R. V., Minakova*: "Composite materials on base of copper and molybdenum, condensed from vapor phase, for electric contacts". *Advances in Electrometallurgy*, No 2, 2005, pp. 24-30.
2. *R. V., Minakova; N. I. Grechanyuk; M.E. Golovkova; V.A. Osokin; I.N. Grechanyuk; P.P. Kucerenko*: "Osnovy elektronno-lucevoj technologii materialov dla elektriceskich kontaktov; ich struktura, swojstwa". *Sovremennaja elektrometalurgia*, No2, 2006, pp. 9-19.
3. *V. G. Zatojskij; N. I. Grechanyuk; R. V. Minakova; G. E. Kopylova; B. Miedziński; Z. Okraszewski; J. Wandzio*: „Tribotechniceskie swojstva kondensirovannyh kompozitov na osnove medi”. *Naukovi Notatki UT. Łuck, Ukraine, 2007, vol. 20, pp. 166-170.*
4. *B. Miedziński; Z. Okraszewski; J. Wandzio; A. Michaluk*: "Influence of a sliding contact material on properties of slippers used in mining transportation". *Proc. of 15th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies. SIELA 2007, Plovdiv, Bulgaria, Vol. 1, pp. 84-91.*

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ СКОЛЬЗЯЩИХ КОМПОЗИТНЫХ КОНТАКТОВ (Cu-Mo), ПРИМЕНЯЕМЫХ В ШАХТНОМ ТРАНСПОРТЕ

В статье представлены и обсуждены результаты анализа повреждений композитных контактов Cu-Mo, применяемых в системах шахтного транспорта, питаемого постоянным током. На основании анализа морфологии контактных поверхностей и результатов исследований макро- и микроструктуры частей поврежденных контактов формулированы выводы по причинам повреждений.