

Zbigniew BARECKI

Antoni JANKOWSKI

## BADANIE ZJAWISK ELEKTROSTATYCZNYCH W HAMULCOWYCH PARACH CIERNYCH

**Streszczenie.** W opracowaniu dokonano przeglądu literatury dotyczącej zagadnień elektryzacji w parach ciernych; przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zjawiska elektryzacji oraz weryfikację wpływu oddziaływań elektrostatycznych na zjawiska tribologiczne, odbierając jako ich przedmiot parę cierną: tworzywo hamulcowe - stal.

## WSTĘP

Tarciu hamulcowych materiałów ciernych po stali towarzyszą złożone mechaniczne i fizyko-chemiczne procesy przebiegające w warstwie wierzchniej obu elementów ciernych lub na ich powierzchni tarcia, które prowadzą do zmian: współczynnika tarcia, intensywności zużycia i innych własności [9]. W wyniku tarcia na powierzchniach metali tworzą się błonki o dużej rezystancji elektrycznej; lepiszcze tworzyw ciernych ulega destrukcji, zachodzą utleniająco-redukujące reakcje wypełniaczy z produktami destrukcji lepiszcza, następuje przechodzenie metalu na powierzchnię tworzywa ciernego i inne zjawiska.

Badania wskazują na istnienie korelacji między własnościami tribologicznymi pary cierniej a jej własnościami elektrostatycznymi [3]. Wykazano związek między rezystancją powierzchniową błonek elektroizolacyjnych, tworzących się na stali, a zużyciem wagowym elementów ciernych. Badania wykazały także związek między znakiem elektrycznych ładunków gromadzących się na powierzchni tworzyw a kierunkiem przenoszenia [1] oraz wpływ zewnętrznego źródła prądu na siłę tarcia [3, 6].

## PODSTAWY TEORETYCZNE ELEKTRYZACJI

Prawie każdemu wzajemnemu przemieszczaniu dwóch ciał towarzyszy pojawienie się elektryczności statycznej. Mimo, że zjawisko znane jest od najdawniejszych czasów to do chwili obecnej nie opracowano teorii objaśniającej całościowo przyczyny występowania tego zjawiska. Jest to wywołane tym, że generowanie ładunków elektrycznych spowodowane jest nie jednym a wieloma różnymi, ze względu na fizyczną istotę, procesami. Elektryzacja statyczna obejmuje wszystkie procesy prowadzące do rozdziału dodatnich i

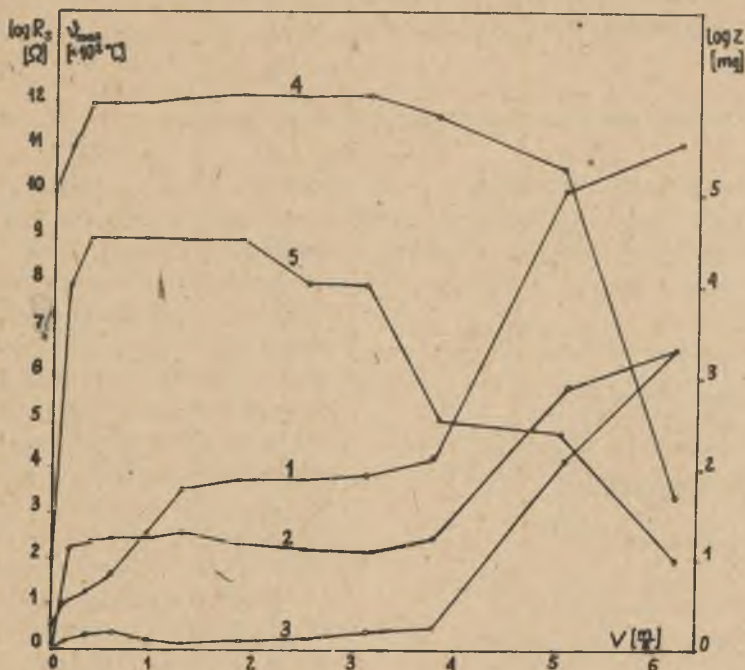
ujemnych ładunków elektrycznych, w rezultacie: mechanicznych deformacji i działania fal naprężeń mechanicznych, czyli efektu akustoelektrycznego [4], przenoszenia nośników ładunku wywołanego powstaniem podwójnej warstwy elektrycznej [7, 10], wystąpieniem różnicy potencjałów kontaktowych przy styku dwóch ciał [7], gwałtownego rozrywania ciał stałych lub styku dwóch ciał [2]. Do procesów tych należą także zjawiska: piezoelektryczne, piroelektryczne i inne [7, 8, 10]. Istnieje szereg różnorodnych teorii opisujących omawiane procesy. Wszystkie te teorie zgodnie stwierdzają, że elektryzacja jest zjawiskiem czysto powierzchniowym, przy czym na granicy styku dwóch różnych ciał powstaje podwójna warstwa elektryczna, natomiast gdy styk ustaje następuje separacja ładunku. Poszczególne teorie wyrażają jednak różne poglądy na sam mechanizm powstawania warstwy podwójnej, której konsekwencją jest naelektryzowanie powierzchni.

#### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROSTATYCZNYCH W PROCESIE TARCIA W HAMULCACH

Elektrycznie naładowane okładziny hamulców w wyniku tarcia mogą przyciągać z otoczenia pyły i inne zanieczyszczenia, cząsteczki zużycia przeciwnika, a przy zbliżaniu szczęki do uziemionego metalu mogą nastąpić iskrowe elektryczne rozładowania, elektryczne starzenie lepiszcza i elektroerozja metali. Na podstawie zmian rezystancji powierzchniowej tworzyw ciernych pracujących przy współpracy ze stalą można uzyskać przybliżone informacje o warunkach tarcia i zużycia oraz zmianach innych własności tworzyw (rys. 1). Badania eksploatacyjne okładzin hamulcowych [3] wykazały, że tworzywa o rezystancji właściwej ponad  $10^{10} \Omega \text{ m}$  silnie uszkadzają bieżnię hamulcową, gdyż mogą długo zachowywać znaczny ładunek. Stwierdzono, że tworzywa o rezystancji właściwej, równej lub mniejszej od  $10^4 \Omega \text{ m}$ , są "bezpieczne", gdyż nie akumulują ładunków. Tak więc środkiem zapobiegającym gromadzeniu się elektrycznych ładunków jest obniżenie rezystancji materiałów, dlatego celowe jest stosowanie napełniaczy obniżających rezystancje, np.: sady, metalowych proszków.

Eksperymenty prowadzone z tworzywami o dobrej przewodności elektrycznej wykazały, że zewnętrzne źródło prądu może wywołać zwiększenie, jak i obniżenie siły tarcia [3, 6]. Istota wzrostu siły tarcia polega na zwiększeniu normalnej siły przyciągania między powierzchniami znajdującymi się w polu elektrycznym.

Stwierdzono związek między znakiem elektrycznym ładunków gromadzących się na powierzchni tworzyw przy współpracy z metalami a kierunkiem przenoszenia [1]; czyli znając elektrostatyczną charakterystykę pary ciernej można prognozować wystąpienie zjawiska metalizacji tworzywa w trakcie tarcia lub tworzenie błon organicznych na powierzchni metalu. Wszystkie elektrotropne tworzywa intensywniej zużywają metal niż elektrododatnie [1].



Rys. 1. Przebieg zmian temperatury powierzchni "q" (1), zużycia masowego "z" tworzywa (2) i żeliwa (3) oraz rezystancji "Rs" tworzywa (4) i żeliwa (5) w funkcji prędkości poślizgu "v" (stosowano nacisk jednostkowy około  $1,5 \frac{MN}{m^2}$ ) [3]

Zużyciu stali elektroujemnymi tworzywami towarzyszy namazywanie metalu na powierzchnię tworzywa. Elektrododatnie tworzywa namazując się na metal tworzą parę tworzywo-tworzywo.

Wytworzone w czasie tarcia, lub zewnętrzne, pole elektrostatyczne może ograniczać lub przyspieszać adsorbowanie wodoru na powierzchni stalowej bieżni hamulcowej, wydzielającego się podczas mechanicznej i termicznej destrukcji tworzywa w czasie tarcia. Nawodorowienie powierzchni stalowej bieżni hamulcowej, jak wykazały badania [5, 9], jest jedną z przyczyn metalizacji. Elektryczny dodatni potencjał na próbce stalowej będzie odpychał dodatnie jony wodoru  $H^+$  i odwrotnie, ładunek ujemny będzie zwiększał adsorpcję wodoru na stali i jego koncentrację w warstwie wierzchniej bieżni hamulca.

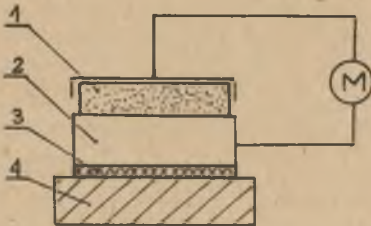
Większość współczesnych badań dowodzi, że w ogólnej ocenie własności pary ciernej tworzywo - metal nie można pominąć zjawisk elektrycznych,



które w tej parze w trakcie tarcia występują, jak również należy wykorzystać informacje uzyskane z pomiarów elektrycznych własności ciał dla predykcji ich własności tribologicznych.

#### BADANIA EKSPERYMENTALNE ELEKTRYZACJI TWORZYW CIERNYCH

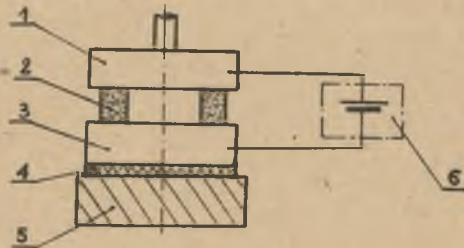
W celu dokonania weryfikacji eksperymentalnej wpływu oddziaływań elektrostacyjnych na zjawiska tribologiczne wykonano cykl badań [11], obejmując jako ich przedmiot parę cierną: tworzywo hamulcowe - stal. Badania elektryzacji tworzyw ciernych prowadzono na stanowisku modelującym współpracę w ruchu obrotowym, w warunkach tarcia technicznie suchego. Istotą przyjętego układu pomiarowego jest kondensator (rys. 2), który tworzą przeciwpróbka (2) oraz masa maszyny (4) odizolowana przekładką izolacyjną (3). W czasie tarcia następowało ładowanie kondensatora,



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego elektryzacji tworzyw:

1 - próbka, 2 - przeciwpróbka, 3 - przekładka izolacyjna, 4 - suport maszyny, M - elektrometr

na okładkach którego mierzono różnicę potencjałów za pomocą elektrometru, w warunkach różnych prędkości i nacisków jednostkowych. Dokonywano także pomiarów natężenia prądu elektryzacji i temperatury przeciwpróbki. Do badania wpływu oddziaływań zewnętrznego potencjału elektrycznego na siłę tarcia oraz zużycie wykorzystano tę samą maszynę tarciovą z dodatkowym zastosowaniem zasilacza prądu stałego. Pomiaru siły tarcia dokonywano za pomocą tensometrów w ustalonych warunkach prędkości i nacisku jednostkowego oraz zmiennych wartościach i zwrotach napięcia prądu stałego przyłożonego do pary cierniej.



Rys. 3. Schemat układu do badania wpływu zewnętrznego potencjału elektrycznego na zużycie:

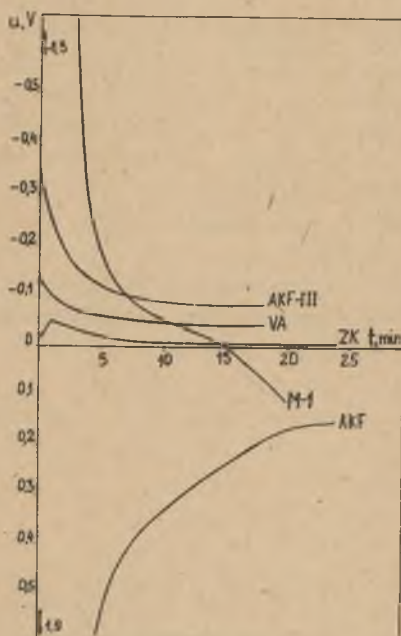
1 - uchwyt, 2 - próbki, 3 - przeciwpróbka, 4 - izolacja, 5 - suport maszyny, 6 - zasilacz

Układ elektryczny do badania wpływu elektryczności statycznej na siłę tarcia i zużycie przedstawia rys. 3. Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach wilgotności względnej powietrza, wynoszącej około 60% oraz temperaturze otoczenia 291 K.

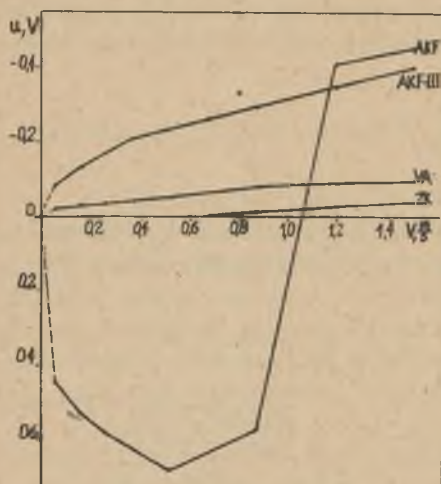
#### DYSKUSJA WYNIKÓW

Z uzyskanych przebiegów napięcia elektryzacji tworzyw w trakcie tarcia (rys. 4) wynika, że w zakresie przyjętych warunków eksperymentów tworzywa: ZK, VA, AKF-III (także M1 w dużym zakresie) elektryzują się ujemnie, jedynie tworzywo AKF uzyskuje ładunek dodatni. Spośród badanych tworzyw największą skłonnością do generowania ładunków elektrycznych charakteryzują się tworzywa AKF i M-1 (szczególnie w początkowej fazie tarcia), najmniejszą zaś tworzywo ZK.

Porównanie wyników pomiarów elektryzacji różnych tworzyw w funkcji prędkości ślizgania (rys. 5) wykazało istotną różnicę między tymi tworzy-



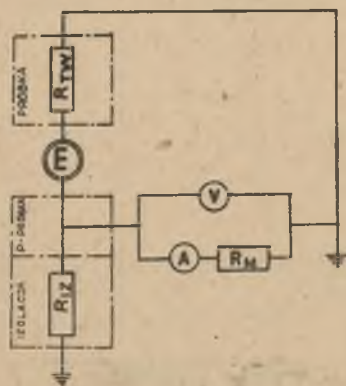
Rys. 4. Przebiegi napięcia elektryzacji tworzyw w skojarzeniu z przeciwpróbką stalową w procesie tarcia; prędkość  $V = 0,5$  m/s (dla tworzywa ZK  $V = 0,86$  m/s) nacisk jednostkowy  $p = 0,30 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$ . Przyjęto uważać wartości dodatnie napięcia dla tworzyw elektryzujących się dodatnio, odpowiednio wartości ujemne dla tworzyw elektryzujących się ujemnie



Rys. 5. Przebiegi napięcia elektryzacji różnych tworzyw w funkcji prędkości ślizgania; nacisk jednostkowy  $p = 0,3 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$

niem mocy tarcia (iloczyn  $p \cdot v$ ) [2] wskazuje, że dla wyższych parametrów, od stosowanych w badaniach, nie ulegnie jakościowej zmianie elektrostatyczna charakterystyka tworzyw.

W oparciu o uzyskane pomiary napięcia i natężenia prądu elektryzacji oraz na podstawie uproszczonego schematu elektrycznego (rys. 6) wyliczona



Rys. 6. Uproszczony schemat zastępczy układu pomiarowego:

E - źródło elektryzacji,  $R_{TW}$  - rezystancja zastępcza tworzywa,  $R_M$  - rezystancja własna elektrometru, R - rezystancja przekładki izolacyjnej



została rezystancja zastępcza tworzyw " $R_{TW}$ " oraz jej zmiany w procesie tarcia. Z prawa Ohma, przy założeniu, że  $R_{TW} \gg R_M$

$$R_{TW} = \frac{U}{I},$$

gdzie  $U$ ,  $I$  - wartości pomiarowe napięcia i natężenia prądu elektryzacji.



Rys. 7. Zależność rezystancji zastępczej tworzywa " $R_{TW}$ " od czasu trwania tarcia ( $V=0,52$  m/s  $p = 0,30 \frac{MN}{m^2}$ )

Porównanie rezystancji układu próbka - przeciwpróbka (rys. 7) potwierdza różne własności elektryczne tworzyw. Układy z tworzywami AKF-III i VA zwiększają nieznacznie swoją rezystancję zastępczą (obejmującą łącznie rezystancję skrośną i powierzchniową stykających się elementów) w czasie tarcia; prawdopodobnie wskutek tworzenia się błonek izolacyjnych na przeciwpróbce metalowej. Tworzywa AKF i M-1, które charakteryzują się największą rezystancją zastępczą - obniżają ją w trakcie tarcia, prawdopodobnie na skutek niszczenia błon powierzchniowych na powierzchni metalu oraz przenoszenia cząstek metalu i zniszczonych błon tlenkowych na powierzchnię tworzywa. Obniżenie w trakcie tarcia relatywnie niskiej rezystancji zastępczej tworzywa ZK można interpretować jako wynik procesu związanego z niszczeniem błon tlenkowych na powierzchni przeciwpróbki stalowej i namazywanie na niej warstewki wypełniacza metalowego (np. stopu miedzi). Warstewka ta, jak wykazano w pracy [9] ma własności ochronne i przeciwdziała metalizacji tworzyw. Aczkolwiek wydaje się, że zasadni-

czy wpływ na zmiany rezystancji zastępczej układu mają zmiany rezystancji stykowej to nie można pominąć wpływu zmian rezystancji skrośnej tworzywa w wyniku ogólnego podwyższenia się temperatury. Jak wynika z zamieszczonych przebiegów (rys. 4, 7) wyższa wartość rezystancji zastępczej bardziej sprzyja zjawisku elektryzacji.

Przeprowadzone w szerokim zakresie napięcia i natężenia prądu badania z przyłożonym zewnętrznym potencjałem elektrycznym wykazały brak jego wpływu na wartość siły tarcia kinetycznego dla badanych skojarzeń ciemnych tworzywo - stal.

Badanie wpływu potencjału zewnętrznego na zużycie tworzywa VA w parze ze stałą wykazały, że zewnętrzny potencjał elektryczny nie wpływa zasadniczo na wielkość zużycia tworzywa w procesie tarcia. Przyłożony zewnętrzny dodatni potencjał elektryczny 50 V do przeciwpróbki spowodował wzrost zużycia wagowego tworzywa o 15% [11]. Otrzymane wyniki badań nie potwierdzają wniosków wyciągniętych z dotychczasowych publikacji, np.: [1].

#### WNIOSKI

1. W parze czarnej kompozytowej tworzywo czarne - stal generują się ładunki elektrostatyczne.
2. Istnieje związek między własnościami elektrycznymi tworzyw hamulcowych (skłonność do elektryzacji, rezystancja właściwa) a ich własnościami tribologicznymi (np.: wzajemne przenoszenie).
3. Zewnętrzny potencjał elektryczny przyłożony do pary czarnej hamulcowej tworzywo - stal nie ma istotnego wpływu na wartość siły tarcia kinetycznego oraz na zużycie.

#### LITERATURA

- [1] Bilik S.M., Curkan V.P.: Vlijanie napravlenija stekanija električeskich zarjadov, obrazujuščich pri trenii, na iznos metalopolimernoj pary. Teorija samozočnogo dejstvija i novye materialy. Izd. Nauka, Moskva 1965.
- [2] Cunningham R.G.: "Frictional Electrification of Belts of Insulating Materials". Journal of Applied Physics, vol 35, No 8, 1964.
- [3] Georgievskij G.A., Lebedev L.A., Borozdinskij E.M.: Issledovanie kinetiki elektrizacii pri skolženii frikcionnych plastmass po metallu. Električeskie javlenija pri trenii, rezanii i smazke tverdyh tel. Izd. Nauka, Moskva 1973.
- [4] Lebedev L.A.: Ob odnom mehanizme električeskogo vozbuždenija tverdyh tel v uslovijach trenija. Električeskie javlenija pri trenii, rezanii i smazke tverdyh tel. Izd. Nauka, Moskva 1973.
- [5] Poljakov A.A.: Issledovanie vodorodnogo iznosa. Izd. Nauka, Moskva 1977.
- [6] Savkoor A.R., Ruyter T.I.: Experimental Investigation of the Effect of Electrical Potential on Adhesive Friction of Elastomers. Advances in Polymer Friction and Wear. Plenum Press, New York 1974.
- [7] Simorda I., Staroda J.: Elektryczność statyczna w przemyśle. WNT, Warszawa 1970.
- [8] Strawson H.: Electrostatic explosions and fires. CME. No 11/1973.
- [9] Ścieszka St.: Problemy hamowania maszyn wyciągowych. Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze czarnej tworzywo hamulcowe - stal. ZN Politechniki Śląskiej, Górnictwo 75, 1976.
- [10] Vasilenok Ju.I.: Zaščita polimerov ot statičeskogo električestva. Izd. "Chimija", Leningrad 1975.
- [11] Sprawozdanie z pracy NB pt.: Badanie okładzin ciernych hamulców tarczowych i stojaków hamulcowych. Gliwice 1978.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
В ТОРМОЗНЫХ ФРИКЦИОННЫХ ПОРАХ

Р е з ю м е

В статье произведён обзор литературы, касающейся вопросов электризации в фрикционных порых: приводятся результаты экспериментальных исследований явления электризации, а также верификация влияния электростатических воздействий на трибологические явления, воспринимающие как их предмет фрикционную пору: тормозный материал - сталь.

THE INVESTIGATION OF THE ELECTROSTATIC EFFECT  
IN THE FRICTIONAL COUPLES OF THE BRAKE

S u m m a r y

The paper presents a review of literature referring to the problems of electrification in frictional couples. The results of experiments with electrification and verifying the effects of electrostatic impact on tribologic phenomenon are given. The medium was a frictional couple: braking material - steel.