

INFLUENCE OF THE FORM OF COPPER IN THE FRICTION MATERIAL OF DISC BRAKES ON THE COEFFICIENT OF FRICTION AND WEAR IN RIG TESTS

ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI¹, ARTUR GOŁOWICZ², RYSZARD MICHALSKI³

Motor Transport Institute (ITS)

Summary

More than 15 components occur in the friction materials for disc brake pads. Copper in the form of powder or fibres is counted among reinforcers and it plays an important role in the braking process. The brake pads tested, reinforced with a 2% admixture (by weight) of copper powder or fibres, were manufactured in a normal production process at the TOMEX Company. The tests were carried out on a T-11 ("pin-on-disc") test machine for small specimens prepared from the friction material under consideration and on a Kraus test machine, where finished brake pads were examined. The test conditions were close to the normal brake operation conditions. The brake discs used as counter-specimens were made of grey cast iron with flake graphite.

According to the test results obtained from both test machines, the values of the coefficient of friction were higher and the wear was bigger for the material reinforced with fibres as against those recorded for the material where powder was used as the reinforcer.

Observations of the material structure carried out on a scanning microscope JEOL JSM-6360LA and the nature of the material wear observed on an optical profiler BRUKER Contour GT have confirmed the test results.

Keywords: friction materials, friction pair, friction, wear

1. Introduction

The material components used to manufacture friction materials for motor vehicle applications are classified into five groups: reinforcers, binders, fillers, friction materials proper (abrasives), and lubricants. Copper in most cases is counted among reinforcers, which give adequate mechanical strength to the friction material. Apart from copper, other materials such as aramid glass fibre, metals (steel, brass), and ceramic materials are also

¹ Motor Transport Institute, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: andrzej.wojciechowski@its.waw.pl, ph. +48 22 438 51 37

² Motor Transport Institute, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: artur.golowicz@its.waw.pl, ph. +48 22 438 53 36

³ Motor Transport Institute, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: ryszard.michalski@its.waw.pl, ph. +48 22 438 52 36

used as reinforcers. Copper in friction materials has the form of fibres or powder. It has good heat conduction characteristics, which help to reduce temperature in the contact area; unlike steel fibres, it has good corrosion resistance properties [5], [8].

2. Purpose of the work

The work was undertaken to determine the conditions of interaction between the friction material and a brake disc made of grey cast iron with flake graphite, depending on the form of copper used in the friction material [7].

3. Materials used at the tests

3.1. Material of the test specimens

The test specimens were made on the production process line of the TOMEX Company, based on friction material 14A reinforced with Cu fibres (specimen 1a) and Cu powder (specimen 2a).

The test specimens made from friction material samples and prepared for tests were subjected to identification carried out with the use of a scanning microscope JOEL JSM-6360LA, which offered a possibility of observations at 30 kV with a resolution of 3 nm and 4 nm in the high vacuum and low vacuum mode, respectively (Fig. 1) [1].

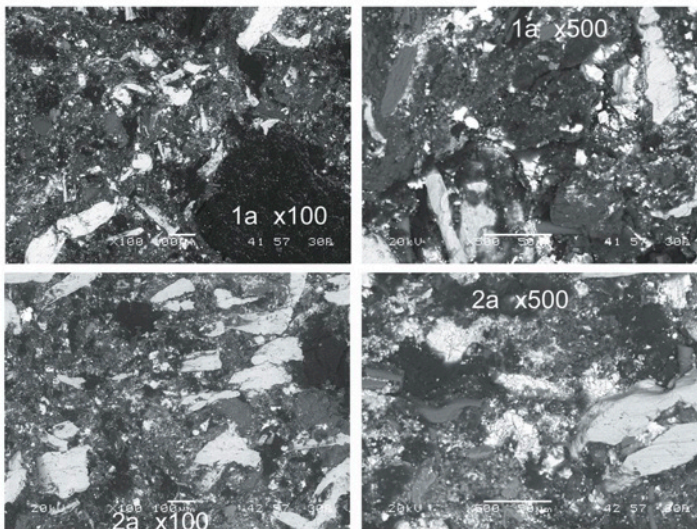


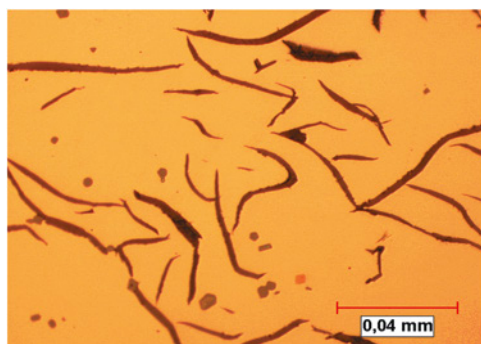
Fig. 1. Structures of specimens 1a and 2a, magnification: 100× and 500×

3.2. Material of the counter-specimens

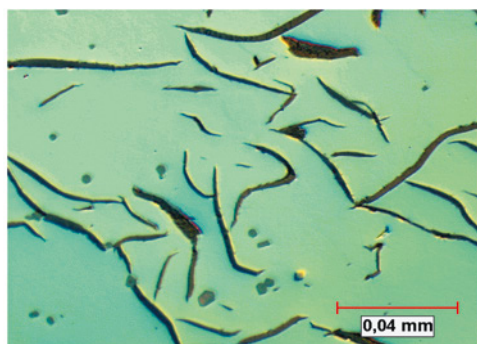
Brake discs are most frequently made of cast iron, which is an alloy with iron matrix and 2.0–3.8% carbon content, with Si, Mn, P, and S also used as alloy additions.

Grey cast iron with flake graphite is the most conventional material among the cast iron grades used for the manufacturing of brake discs.

The counter-specimens prepared were subjected to microscopic observations without etching (Fig. 2) [6], [7].



Conventional light, magnification 500×, unetched specimen



Phase contrast, magnification 500×, unetched specimen

Fig. 2. Grey cast iron with flake graphite (Br)

4. Tests

The tests to determine the friction properties of the materials under examination were carried out at the micro-scale on a T-11 ("pin-on-disc") test machine and at the natural (full-size) scale on a Krauss test machine.

4.1. Micro-scale examining of friction properties on a T 11 ("pin-on-disc") test machine

The T-11 test machine of the "pin-on-disc" type is used to determine tribological properties of materials for friction pairs in micro-scale tests aimed at preliminary assessment of e.g. friction materials. The vertical load was applied to the test specimen with the use of test weights and the friction force was measured with a dynamometer. The values of these quantities provide a basis for determining the coefficient of friction of the friction pair under test. During the tests, the friction force, temperature, and friction path of the friction pair were continuously recorded. For the test conditions to be made as close to the natural conditions as possible, test specimens with diameter changed to 8 mm were allowed thanks to the use of a specially designed adapter, with the counter-specimen

diameter being also changed so that the friction radius was 9.5 mm (Fig. 3). The specimen was loaded with a vertical force of up to 50 N.

The tests of the T 11 machine [2] were carried out at predetermined test parameters specified in Table 1.

Table 1. Test parameters

Dimensions		Rubbing area	Test parameters	
Specimen diameter	Friction radius			
8 mm	9.5 mm	50.26 mm ²	Rotational speed:	525 rpm
			Rubbing speed:	0.522 m/s
			Friction path:	3 130 m
			Unit contact pressure:	about 1 N/mm ²
			Ambient temperature	25±5 °C



Fig. 3. Specimen (a) and counter-specimen (b), in the form of a pin and a disc, respectively

4.1.1. Test program

During the tests on the T-11 machine, the friction pair elements were to rub continuously against each other, according to the test program adopted. Based on previous experience, the time of a single test run was decided to be 6 000 s, with the friction pad bedding-in period taking the first 2 000 s of that.

4.2. Natural-scale examining of friction properties on a Krauss test machine

The natural-scale tests of friction properties of the materials under tests were carried out on a Krauss test machine at the TOMEX Company. The machine design makes it possible to test full-size brake mechanisms. The friction material test loading conditions in a brake mechanism are simulated with the use of a DC motor. The Krauss test machine is commonly used by friction material manufacturers for ongoing production quality assessment in accordance with the requirements laid down in Annex 9 to UN ECE Regulation No. 90 [4].

Dynamic tests on inertia dynamometers, which enable the obtaining of a wide range of test parameters, are usually carried out within the process of developing new friction materials.

Parameters of the machine testing (Annex 9 to UN ECE Regulation No. 90):

Disc or drum rotational speed without load	660±10 rpm
Disc or drum rotational speed with full load	min. 600 rpm
Rubbing speed	about 0.9 m/s
Hydraulic pressure acting on the piston	0.9 MPa
Number of brake applications	50 (in the brake fade test cycle)
Cooling air supply rate	600±60 m ³ /h

4.2.1. Test program

The test program covered four test cycles (bedding-in, cold performance test, fade test, and recovery). Each brake application lasted 5 seconds, which was followed by a brake release for 10 seconds.

The program of the test carried out on the Krauss test machine has been presented in Table 2.

During each brake application, the quantities recorded were brake disc temperature and brake torque converted into the coefficient of friction. The friction properties of the friction pairs under tests were evaluated during the fade test cycle. The parameters subject to evaluation were operational coefficient of friction (μ_{op}), maximum coefficient of friction (μ_{max}), and minimum coefficient of friction (μ_{min}).

Table 2. Test program

Cycle No.	Cycle	Number of brake applications in the cycle	Brake disc temperature at the beginning of the first brake application [°C]	Maximum brake disc temperature [°C]	Forced cooling
1	D – bedding-in	2×(5×3)	100	300	yes
2	Z – cold performance test	1×10	50	–	no
3	F – fade test	5×10	100	–	no
4	R – Recovery	1×10	100	–	yes

The friction pair consisted of a brake pad with 2 275 mm² rubbing area and a ventilated brake disc with 239 mm diameter for the Daewoo Lanos passenger car (Fig. 4).



Fig. 4. Brake pad and brake disc for the Daewoo Lanos passenger car

4.3. Wear examinations

The T-11 test machine made it possible to record the linear wear of the friction pair. The wear was evaluated after bedding-in of the friction pair, for the test period from 2 000 s to 6 000 s.

On the Krauss test machine, the friction material wear was determined by mass.

4.4. Qualitative examination of the working surface of the friction pair

For the specimens tested on the T-11 test machine, the working surface of the friction pair was qualitatively examined with the use of a BRUKER profiler, model Contour GT (Fig. 5), at the Motor Transport Institute (ITS).



Fig. 5. Optical profiler BRUKER Contour GT

5. Test results

5.1. T-11 test machine

The evaluation of friction and wear characteristics was based on the average values of the measurement results recorded during the test period from 2 000 s to 6 000 s. The parameters subject to evaluation were the coefficient of friction and the total wear of the friction pair.

The test results have been shown in Fig. 6.

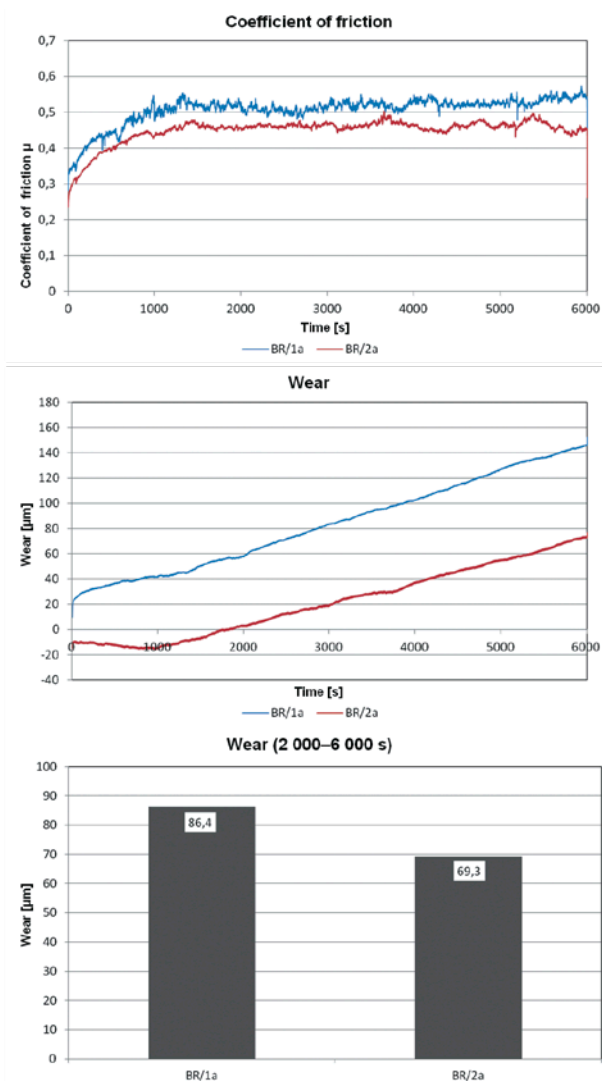


Fig. 6. Results of the tests carried out on the T-11 test machine

As it can be seen in the graphs in Fig. 6, the coefficient of friction vs. time curves had a similar nature in both cases. The values of the coefficient of friction for the material with copper fibres exceeded those determined for the material with copper powder by about 10 %. The linear wear values measured, taken for the specimen and counter-specimen in aggregate, were found for the former material to be higher by 20 % than those for the latter [3, 4].

5.2. Krauss test machine

At the tests carried out on the Krauss machine, the friction pair performance was evaluated during the fade test cycle because of the most severe operating conditions encountered by the friction pair in such a case. This part of the test consisted of 5 cycles of 10 brake applications each at a constant rubbing speed of $v = 0.7$ m/s and a constant hydraulic line pressure of 0.9 MPa. The brake disc temperature at the beginning of each cycle of brake applications was 100 °C. During each brake application, the brake disc temperature and coefficient of friction were recorded.

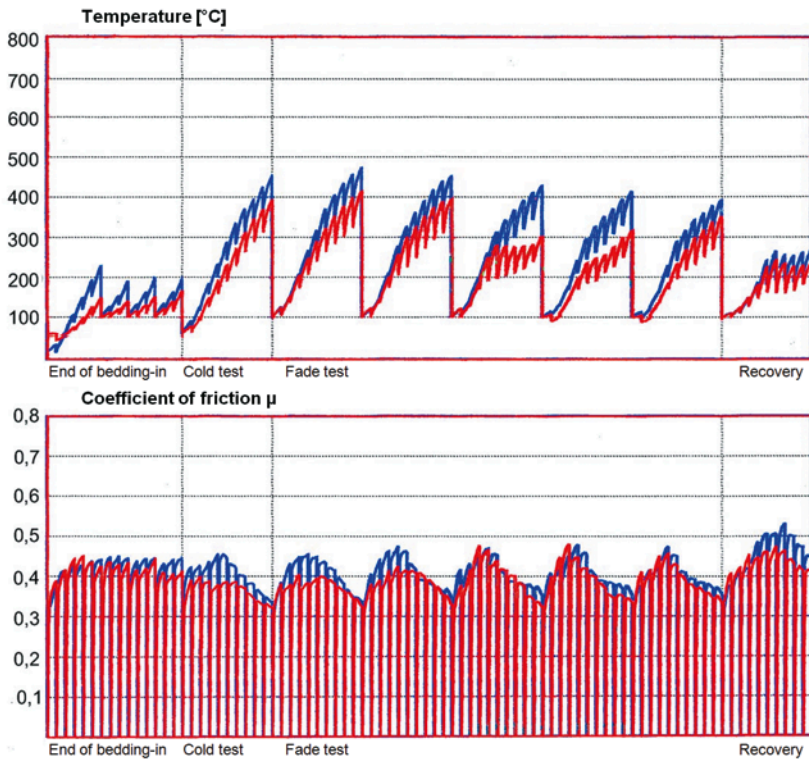
The test results have been presented in Fig. 7, where the time histories of friction characteristics have been shown in the graphs and the values of the coefficient of friction have been tabulated.

The test results have confirmed the fact observed at the micro-scale tests that the coefficient of friction for the material with copper fibre reinforcer exceeded that of the material reinforced with copper powder.

The wear of the friction materials was measured by mass. For the friction material with copper fibre reinforcer, the loss in mass was 0.89 %, while the loss of mass for the material with copper powder was lower by about 30 %.

5.3. Examination of the counter-specimen surface

For the influence of the form of copper additive in the friction material on the counter-specimen wear to be determined, the counter-specimen surface was examined with the use of a BRUKER Contour GT optical profiler (Fig. 5). The surface roughness was measured at selected cross-sections and quantitative evaluation of the roughness over the bearing area (S_a) was carried out. The examination results, concerning cross-section 1 (Fig. 8), have been presented in Figs. 9 and 10.



Coefficient of friction		Specimen 1a	Specimen 2a	Difference [%] (1a = 100 %)
Operational	μ_{op}	0.322	0.321	-0.3
Cold performance	μ_{zimno}	0.369	0.325	-12
Minimum	μ_{min}	0.311	0.311	0
Maximum	μ_{max}	0.531	0.480	-10

**Fig. 7. Results of the tests carried out on the KRAUSS test machine:
blue - specimen 1a; red - specimen 2a**

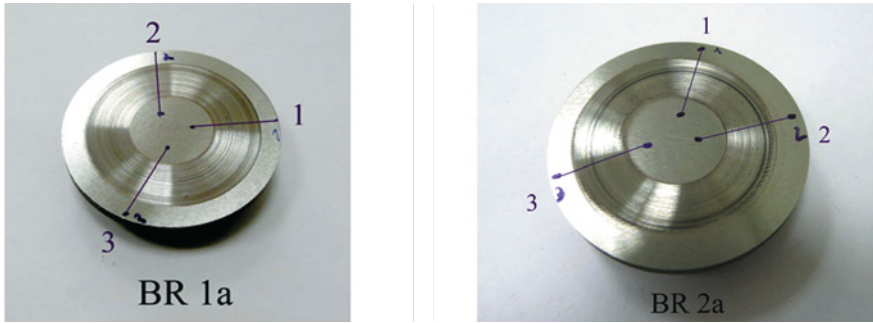


Fig. 8. Counter-specimens after tests with specimen 1a and specimen 2a

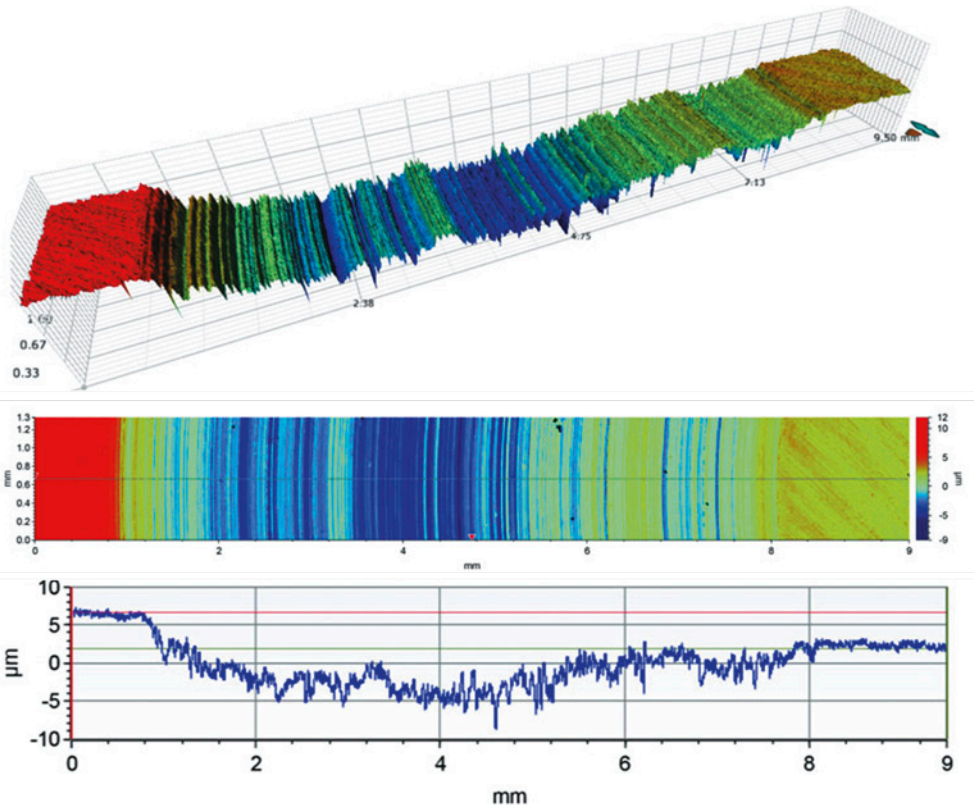


Fig. 9. Counter-specimen after tests with specimen 1a – surface structure

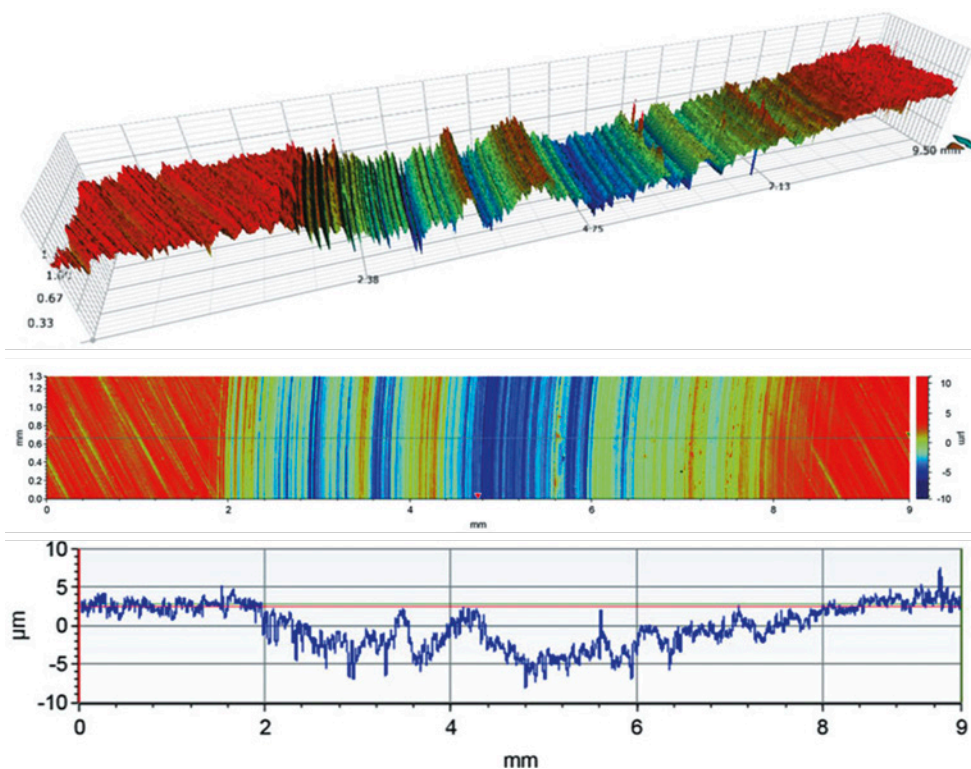


Fig. 10. Counter-specimen after tests with specimen 1b - surface structure

The examinations of the surface wear degree have shown that the counter-specimen mating the specimen reinforced with copper powder was less worn than the one used with the specimen with copper fibres. Based on an analysis of the surface profile, the surface roughness of the former counter-specimen was estimated at about 5 μm while for the specimen with copper fibres, the counter-specimen surface roughness was about 8 μm .

6. Conclusions

In result of the tests described above, the following was ascertained:

- The coefficient of friction (at the cold performance test), determined from the tests carried out on both the KRAUSS and T-11 test machines, was lower by 10-12 % for the friction pair with copper having the form of powder.
- The maximum coefficient of friction, determined from the tests carried out on both the KRAUSS and T-11 test machines, was lower by about 10 % for the friction pair with copper having the form of powder.

- The specimen and counter-specimen wear, determined from the tests carried out on the KRAUSS and T-11 test machines, was lower by about 30% and about 20%, respectively, for the friction pair with copper having the form of powder.

References

- [1] K. PIETRZAK, K. MAKOWSKA, D. RUDNIK, A. WOJCIECHOWSKI, A. EMINGER, R. MICHALSKI: *Mikrostrukturalne uwarunkowania odporności na zużycie wybranych par ciernych stosowanych w układach hamulcowych (Microstructural factors affecting the wear of selected friction pairs used in braking systems)*. Transport Samochodowy, 3/2011, pp. 51-63, Wydawnictwo ITS (Publishing House of the Motor Transport Institute).
- [2] A. WOJCIECHOWSKI, R. MICHALSKI, A. GOŁOWICZ, A. EMINGER: *Badanie procesów tarcowych na urządzeniu T-11 metodą trzpień-tarcza wybranych skojarzeń ciernych w hamulcach tarczowych pojazdów samochodowych (Research on friction processes in selected friction pairs in disc brakes of motor vehicles on a T-11 test machine with the use of the "pin-on-disc" method)*. The 32nd All-Polish Tribological Conference, Kudowa Zdrój 2012.
- [3] Joint publication: *Optymalizacja materiałów w węźle tarcia hamulca tarczowego kompozytowego w samochodzie kategorii M1 (Optimization of the friction pair materials in a composite-based disc brake of a motor vehicle of M1 category)*. Report No. 6821/CBM/ITS, pp. 30–32, ITS (Motor Transport Institute) 2009.
- [4] UN ECE Regulation No. 90 concerning the approval of replacement brake lining assemblies for power-driven vehicles of M1 and N1 categories.
- [5] M. IDZIOR, *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymagań ekologii*, MOTROL, 2007, 9, 72-87 Pol. Pozn.
- [6] PN-EN ISO 945:2009 Określenie mikrostruktury żeliwa. Część 1, Klasyfikacja grafitu na podstawie analizy wizualnej.
- [7] J. SOBCZAK, A. WOJCIECHOWSKI *Atlas of cast metal-matrix composites structures*, ITS, IOD, Warszawa 2007.
- [8] www.hamulcebosch.pl

WPŁYW POSTACI MIEDZI W MATERIALE CIERNYM HAMULCÓW TARCZOWYCH NA WSPÓŁCZYNNIK TARCIA I ZUŻYCIE W BADANIACH STANOWISKOWYCH

ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI¹, ARTUR GOŁOWICZ², RYSZARD MICHALSKI³

Institut Transportu Samochodowego

Streszczenie

W materiałach ciernych stosowanych na nakładki hamulców tarczowych występuje przeszło 15 komponentów. Miedź w postaci proszku lub włókien zaliczana jest do grupy wzmacniaczy i spełnia w procesie hamowania istotną rolę. Nakładki cierne wzmocnione włóknem i proszkiem miedzi w ilości 2% (wagowo), wykonano w procesie produkcyjnym w firmie Tomex. Badania przeprowadzono na małych próbkach na stanowisku T-11 (pin on disc) i na nakładkach ciernych na stanowisku Krauss w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Tarcze hamulcowe stanowiące przeciwpróbkę wykonano z żeliwa szarego z grafitem w postaci płatkowej.

Wyniki badań na obu stanowiskach wykazały, że dla materiału wzmocnionego włóknem uzyskano wyższe wartości współczynnika tarcia i większe zużycie niż dla materiału wzmocnionego proszkiem.

Obserwacje struktur na mikroskopie skaningowym JOEL JSM – 6360LA oraz charakter zużycia obserwowany na profilometrze optycznym firm BRUKER Contour GT, potwierdzają uzyskane wyniki badań.

Słowa kluczowe: materiały cierne, para cierna, tarcie, zużycie

1. Wprowadzenie

W materiałach ciernych stosowanych w pojazdach samochodowych stosuje się komponenty zaliczane do 5 grup: wzmacniacze, spoiwa, wypełniacze, materiały cierne (ścierne) i smary. Miedź najczęściej zaliczana jest do grupy wzmacniaczy, które zapewniają odpowiednią wytrzymałość mechaniczną materiału ciernego. Poza miedzią stosuje się też inne materiały takie jak: włókno szklane aramidowe, metale (stal, mosiądz), materiały ceramiczne. Miedź występuje w materiałach ciernych w postaci włókien lub proszku, posiada dobre

¹ Institut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: andrzej.wojciechowski@its.waw.pl, tel. 22 438 51 37

² Institut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: artur.golowicz@its.waw.pl, tel. 22 438 53 36

³ Institut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, e-mail: ryszard.michalski@its.waw.pl, tel. 22 4385 236

właściwości przewodnictwa cieplnego, które wpływa na obniżenie temperatury w strefie kontaktu, oraz posiada dobre właściwości antykorozyjne w przeciwieństwie do włókien stalowych.

2. Cel pracy

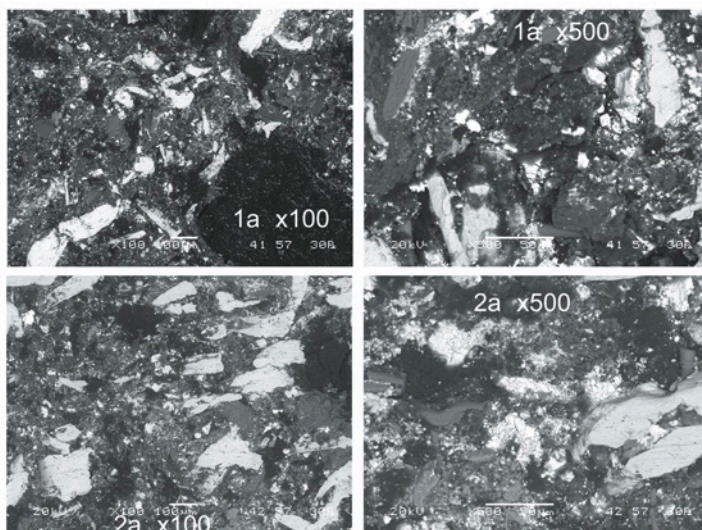
Celem pracy było określenie warunków współpracy materiału ciernego z tarczą hamulcową wykonaną z żeliwa szarego (z grafitem płatkowym) w zależności od zastosowanej postaci miedzi w materiale ciernym.

3. Materiały stosowane w badaniach

3.1 Materiał próbek

Próbki zostały wykonane na linii produkcyjnej firmy TOMEX na bazie z materiału ciernego I4A wzmocnionego włóknami Cu (próbka 1a) oraz proszkiem Cu (próbka 2a).

Przygotowane i wykonane próbki poddano identyfikacji za pomocą mikroskopu skaningowego JEOL JSM-6360LA umożliwiającym obserwację przy 30 kV z rozdzielczością 3nm w trybie próżni wysokiej oraz 4nm w trybie próżni niskiej (rys. 1) [1].



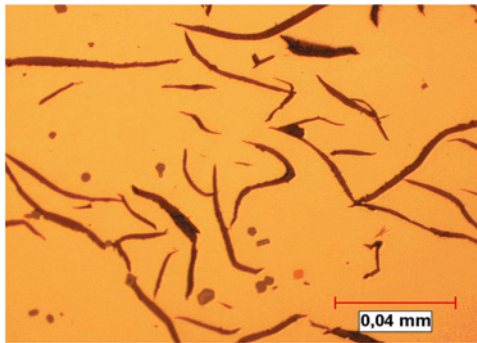
Rys. 1. Struktury próbek 1a i 2a pow. x100 i x500

3.2 Materiał przeciwpróbki

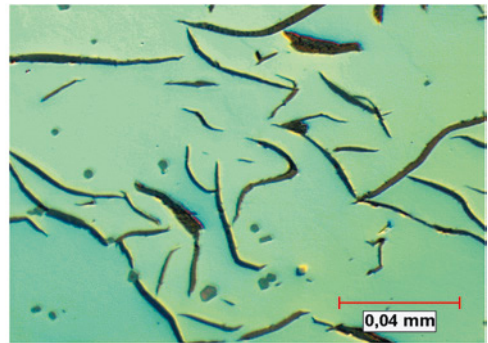
Najczęściej stosowanym materiałem na tarcze hamulcowe jest żeliwo, będące stopem na bazie żelaza o zawartości węgla 2,0–3,8% i zawierającym dodatki: Si, Mn, P i S.

Najbardziej klasycznym spośród zastosowanych gatunków żeliwa na tarcze hamulcowe jest żeliwo szare z grafitem płatkowym.

Przygotowane próbki poddano obserwacjom mikroskopowym w stanie nie trawionym (rys. 2).



światło zwykłe, pow. 500x, stan nie trawiony



kontrast fazowy, pow. 500x, stan nie trawiony

Rys. 2. Żeliwo szare z grafitem płatkowym (Br)

4. Badania

Badania charakterystyk ciernych wykonano w skali mikro na stanowisku T11 (pin on disc) oraz w skali rzeczywistej na stanowisku Krauss.

4.1 Badania charakterystyk ciernych w skali mikro na stanowisku T-11 (pin on disc)

Urządzenie T-11 typu trzpień-tarcza używane jest w celu określania tribologicznych właściwości materiałów stosowanych na węzły tarcia. Badania prowadzi się w skali mikro, w celu wstępnej oceny np. materiałów ciernych. Obciążenie pionowe próbki realizowane było przez obciążniki a pomiar siły tarcia za pomocą dynamometru. Wartości te pozwalają określić współczynnik tarcia w węzle. Ponadto w trakcie badania rejestrowano w sposób ciągły siłę tarcia, temperaturę oraz drogę tarcia pary cierniej. W celu zbliżenia warunków badań do rzeczywistych zmieniono poprzez zaprojektowany adapter średnicę próbki do 8 mm oraz przeciwpróbki uzyskując promień tarcia 9,5 mm (rys. 3). Próbkę obciążono maksymalną siłą pionową wynoszącą 50N.

Badania na stanowisku T 11 [2] przeprowadzono według ustalonych parametrów badań (Tabela 1).

Tabela 1. Parametry badań

Wymiary		Powierzchnia tarcia	Parametry badań	
Średnica próbki	Promień tarcia			
8 mm	9.5 mm	50.26 mm ²	prędkość obrotowa:	525 obr/min
			prędkość tarcia:	0.522 m/s
			droga tarcia:	3130 m
			naciski jednostkowe:	ok. 1 N/mm ²
			temp. otoczenia:	25±5 °C



Rys. 3. a – próbka (trzcienie); b – przeciwpróbka (krążek)

4.1.1 Program badań

Program badań na urządzeniu T-11 przewidywał ciągłą współpracę pary ciernej. Czas pojedynczej próby został, na podstawie wcześniejszych doświadczeń określony na 6000 s w tym przez 2000 s następowało docieranie.

4.2 Badania charakterystyk ciernych w skali rzeczywistej na stanowisku Krauss

Badania właściwości tarcowych wykonano w firmie TOMEX na stanowisku Krauss. Stanowisko posiada konstrukcję, która umożliwia badania pełnowymiarowego hamulca. Symulowanie warunków obciążenia badanego materiału ciernego w mechanizmie hamującym następuje za pomocą silnika prądu stałego. Stanowisko Krauss jest powszechnie stosowane przez producentów materiałów ciernych dla oceny jakości bieżącej produkcji, zgodnie z wymaganiami opisanymi w Załączniku 9 Regulaminu ONZ nr 90 [4]. Badania na stanowiskach dynamicznych bezwładnościowych umożliwiające uzyskanie szerokiej skali parametrów badań, prowadzone są zwykle w procesie opracowywania nowych materiałów ciernych.

Parametry badań na stanowisku (Załącznik 9 Regulaminu ONZ nr 90):

prędkość obrotowa tarczy/bębna bez obciążenia	660 ± 10 obr/min
prędkość obrotowa tarczy/bębna z obciążeniem	min. 600 obr/min
prędkość poślizgu	ok. 7 m/s
ciśnienie hydrauliczne przed tłokiem	0,9 MPa
ilość zahamowań	50 (w cyklu fadingu)
wydatek chłodzenia powietrzem	600 ± 60 m ³ /h

4.2.1 Program badań

Program badań obejmuje cztery cykle badawcze (docieranie, na zimno, fading, regeneracja). Każde zahamowanie trwa 5 sekund, po którym hamulec zostaje zwolniony i pozostaje w takim stanie przez 10 sekund.

Program badań na stanowisku Krauss przedstawiono w Tabeli 2.

Podczas każdego zahamowania rejestrowana jest temperatura tarczy hamulcowej oraz moment hamowania przeliczony na współczynnik tarcia. Ocenę właściwości ciernych badanych par przeprowadzono w cyklu fadingu. Ocenianymi parametrami były: operacyjny współczynnik tarcia – μ_{op} ; maksymalny – μ_{max} ; minimalny – μ_{min} .

Tabela 2. Program badań

Nr cyklu	Cykl	Liczba hamowań w cyklu	Temp. tarczy na początku pierwszego hamowania [°C]	Temp. maksymalna tarczy [°C]	Wymuszone chłodzenie
1	D - docieranie	2×(5×3)	100	300	tak
2	Z - na zimno	1×10	50	-	nie
3	F - fading	5×10	100	-	nie
4	R - regeneracja	1×10	100	-	tak

Parę cierną stanowiła nakładka do samochodu Daewoo Lanos o powierzchni tarcia 2275 mm² oraz wentylowana tarcza hamulcowa o średnicy 239 mm (rys. 4).



Rys. 4. Nakładka cierna i tarcza hamulcowa do samochodu Daewoo Lanos

4.3 Badania zużycia

Stanowisko T-11 umożliwiło rejestrację liniowego zużycia pary ciernej. Ocenę zużycia wykonano po dotarciu w zakresie 2000-6000 s.

Na stanowisku Krauss oceniono masowe zużycie materiału cierneho.

4.4. Badania jakościowe powierzchni pary ciernej

Badania jakościowe powierzchni pary ciernej wykonano dla próbek T-11 za pomocą profilometru firmy BRUKER typ Contour GT w Instytucie Transportu Samochodowego (rys 5).



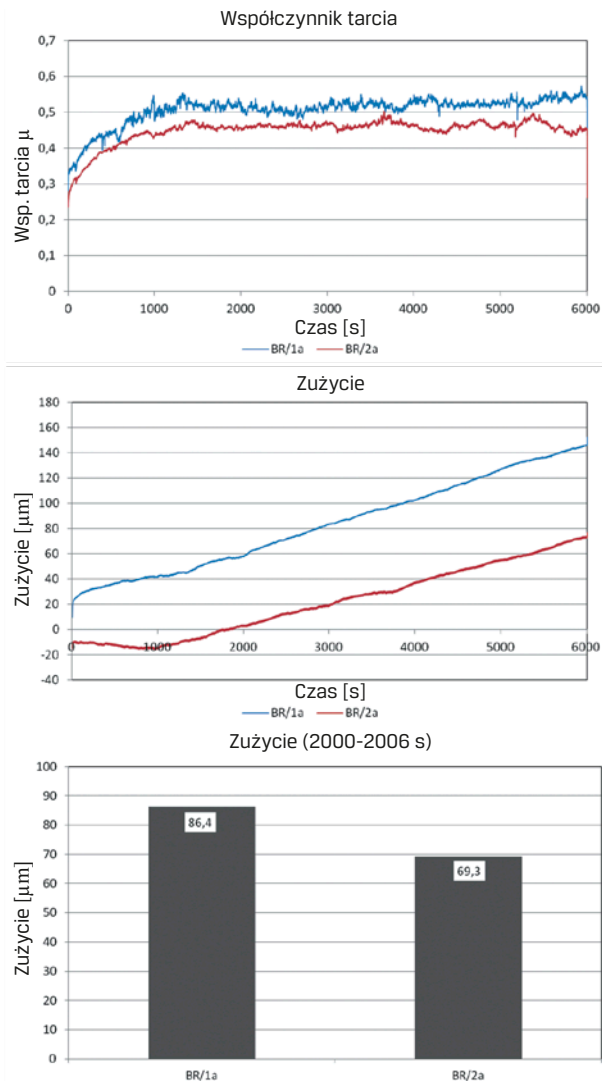
Rys 5. Profilometr optyczny BRUKER Contour GT

5. Wyniki badan

5.1 Stanowisko T-11

Ocenę charakterystyki ciernej i zużycia dokonano w oparciu o średnie wartości z zarejestrowane w przedziale czasu między 2000 a 6000 s. Ocenianymi parametrami był współczynnik tarcia μ oraz zużycie sumaryczne pary.

Wyniki badan przedstawiono na rysunku 6.



Rys 6. Wyniki badan zużycia na stanowisku T11

Zaobserwowany na wykresach (rys. 6.) charakter przebiegu współczynnika tarcia jest podobny w obu przypadkach. Wartości współczynnika tarcia są wyższe dla materiału z miedzią w postaci włókien o ok. 10%. Zmierzone zużycie linowe (sumaryczne próbki i przeciwpróbki) wykazało o 20% wyższe wartości zużycia dla materiału ciernego z włóknami miedzi [3], [4].

5.2 Stanowisko Krauss

Ocenę pary ciernej przeprowadzono w cyklu fadingu z uwagi na najcięższe warunki pracy występujące podczas tej próby. Ta część badań polegała na wykonaniu 5 cykli po 10 zahamowań przy stałej prędkości poślizgu wynoszącej $v = \text{ok.} 7 \text{ m/s}$ oraz przy stałym ciśnieniu w układzie hamulcowym wynoszącym $p = 0,9 \text{ MPa}$. Temperatura tarczy hamulcowej na początku każdego cyklu zahamowań wynosiła 100°C . Podczas każdego zahamowania rejestrowano: temperaturę tarczy hamulcowej oraz współczynnik tarcia.

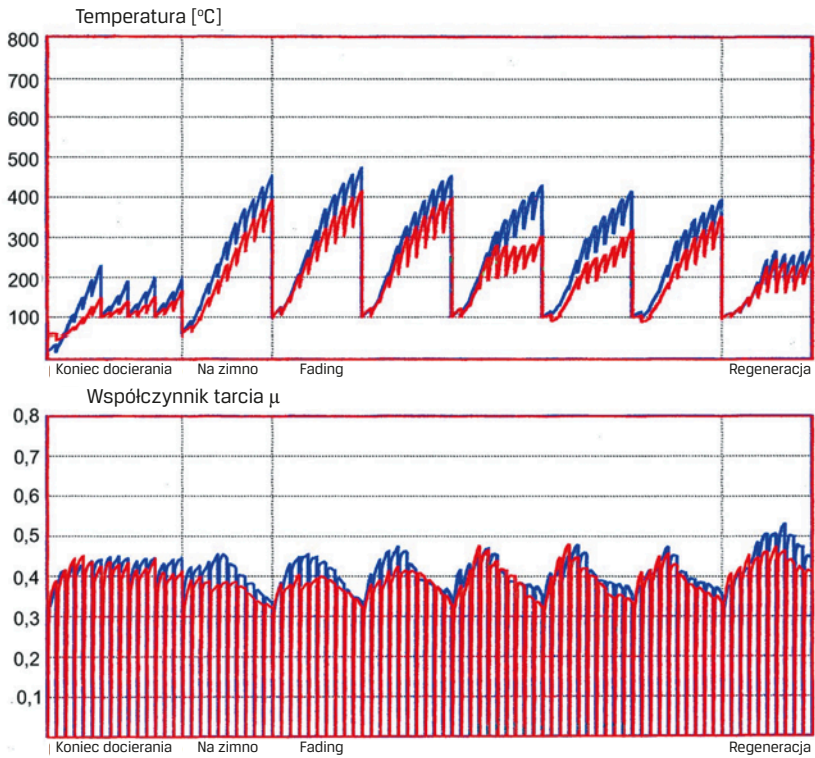
Prezentowane wyniki badań na rys 7 pokazują na wykresie przebieg charakterystyk ciernych, a w tablicy wartości współczynników tarcia.

Wyniki badań potwierdzają obserwowane w skali mikro wyższe wartości współczynnika tarcia dla materiału ciernego z dodatkiem włókien miedzi w stosunku do dodatku miedzi w postaci proszku.

Przeprowadzono pomiary masowe zużycia materiału ciernego. Materiał cierny z dodatkiem włókien wykazał ubytek masy wynoszący 0,89% a z proszkiem był niższy o ok. 30%.

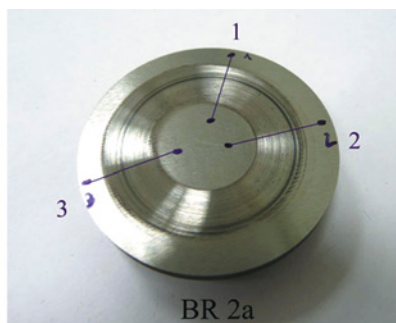
5.3 Badania powierzchni przeciwpróbki

W celu określenia wpływu postaci miedzi w materiale ciernym na zużycie przeciwpróbki przeprowadzono badania za pomocą profilometru firmy BRUKER Contour GT (rys. 5). Wykonano pomiar chropowatości powierzchni w wybranych przekrojach oraz ocenę ilościową chropowatości powierzchni śladu (S_a). Prezentowane wyniki odnoszą się do przekroju 1 (rys. 8). Wyniki przedstawiono na rys 9 i 10.

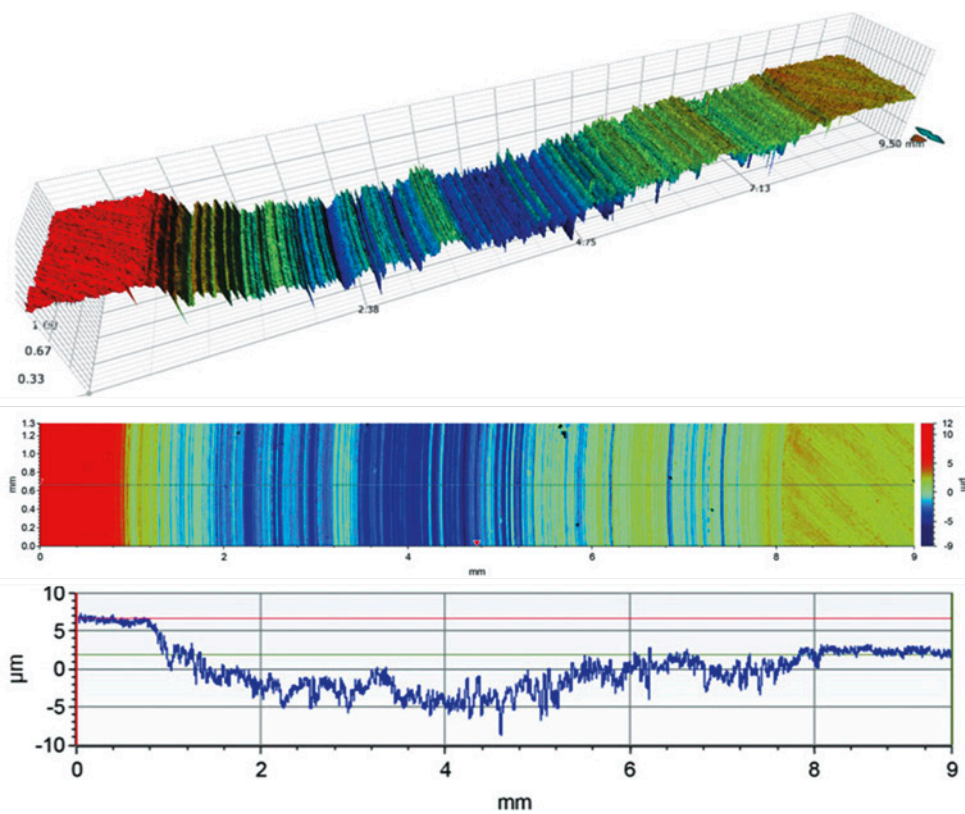


Współczynnik tarcia		Próbka 1a	Próbka 2a	Różnica (1a - 100%)
operacyjny	μ_{op}	0,322	0,321	-0,3%
na zimno	μ_{zimno}	0,369	0,325	-12%
minimalny	μ_{min}	0,311	0,311	0%
maksymalny	μ_{max}	0,531	0,480	-10%

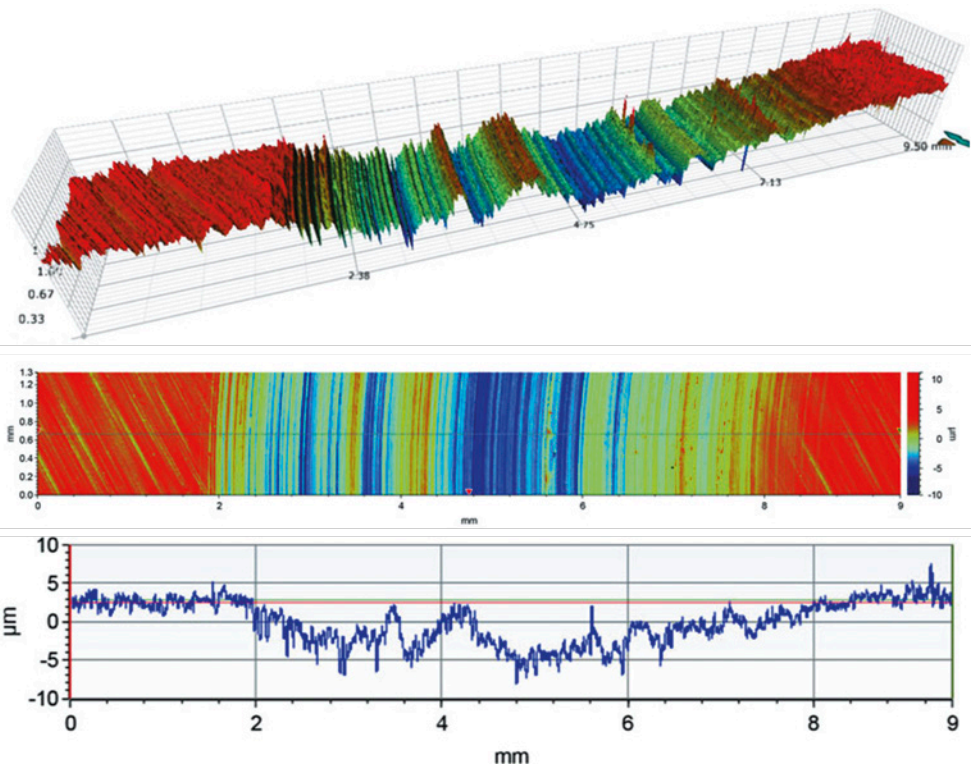
**Rys 7. Wyniki badań na stanowisku KRAUSS:
próbka 1a - kolor niebieski; próbka 2a - kolor czerwony**



Rys 8. Przeciwpółki po badaniu z próbką 1a i 2a



Rys 9. Przeciwpółka po badaniu z próbką 1a – struktura powierzchni



Rys 10. Przekiwna próbka po badaniu z próbką 2a – struktura powierzchni

Badania stopnia zużycia powierzchni wykazują mniejsze zużycie przeciwpróbki współpracującej z próbką z miedzią w postaci proszku. Chropowatość oszacowana na podstawie analizy profilu powierzchni wynosiła ok. 5 μm , a dla przeciwpróbki z miedzią w postaci włókien ok. 8 μm .

6. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono:

- mniejszy współczynnik tarcia (na zimno) dla pary ciernej z miedzią w postaci proszku o ok. 10-12% na stanowisku KRAUSS i T-11;
- mniejszy maksymalny współczynnik tarcia dla pary ciernej z miedzią w postaci proszku o ok. 10% na stanowisku KRAUSS i T-11;
- mniejsze zużycie próbki i przeciwpróbki dla pary ciernej z miedzią w postaci proszku o ok. 30% na stanowisku KRAUSS i ok. 20% na stanowisku T-11.

Literatura

- [1] K. PIETRZAK, K. MAKOWSKA, D. RUDNIK, A. WOJCIECHOWSKI, A. EMINGER, R. MICHALSKI: *Mikrostrukturalne uwarunkowania odporności na zużycie wybranych par ciernych stosowanych w układach hamulcowych* Transport Samochodowy, 3/2011, s. 51-63, Wydawnictwo ITS.
- [2] A. WOJCIECHOWSKI, R. MICHALSKI, A. GOŁOWICZ, A. EMINGER: *Badanie procesów tarciovych na urządzeniu T-11 metodą trzpień-tarcza wybranych skojarzeń ciernych w hamulcach tarczowych pojazdów samochodowych*. XXXII Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna, Kudowa Zdrój 2012.
- [3] Praca zbiorowa, Sprawozdanie Nr 6821/CBM/ITS: *Optymalizacja materiałów w węzle tarcia hamulca tarczowego kompozytowego w samochodzie kategorii M1*. s. 30-32, ITS 2009 r.
- [4] Regulamin EKG Nr 90 dotyczący homologacji zamiennych zespołów okładzin hamulcowych do pojazdów o napędzie silnikowym kategorii M1 i N1.
- [5] M. IDZIOR, *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymagań ekologii*, MOTROL, 2007, 9, 72-87 Pol. Pozn.
- [6] PN-EN ISO 945:2009 Określenie mikrostruktury żeliwa. Część 1, Klasyfikacja grafitu na podstawie analizy wizualnej.
- [7] J. SOBCZAK, A. WOJCIECHOWSKI *Atlas of cast metal-matrix composites structures*, ITS, IOD, Warszawa 2007.
- [8] www.hamulcebosch.pl