POWRÓT

Paweł PIEC*, Grzegorz ZAJĄC*

WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE ANALIZY PROCESU TARCIA

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF FRICTION PROCESS

Słowa kluczowe:

wstawki hamulcowe, zużycie, hałas

Key words:

brake inserts, wear, noise

Streszczenie

Przedstawiona w pracy analiza zjawisk kontaktowych towarzyszących procesowi tarcia bazuje na wynikach badań eksploatacyjnych, stanowiskowych i laboratoryjnych przy szerokiej aplikacji programów komputerowych. Wspomaganie komputerowe procesu tarcia pozwala na selektywne wyodrębnienie szerokiej gamy parametrów mających wiodący wpływ na inicjowanie i rozwój podstawowych zjawisk towarzyszących procesowi tarcia. Ingerencja komputerowa w opis i analizę zjawisk towarzyszących tarciu pozwala na wydzielenie mikroprocesów, które kształtują makroobraz

* Politechnika Krakowska.

zmian w warstwie wierzchniej współpracujących elementów i zespołów maszyn i pojazdów. Całość pracy oparta jest na wynikach własnych badań, popartych wizualną symulacją komputerową.

Praca zawiera wybrane wyniki badań wpływu właściwości tribologicznych elementów trących, wstawki klocka hamulcowego i koła, na poziom emisji hałasu. W badaniach uwzględniono wstawki żeliwne stosowane w pojazdach szynowych oraz wstawki kompozytowe i prasowane z proszków metali

WPROWADZENIE

W procesie tarcia suchego wyróżnia się zakres względnego spoczynku (tarcie spoczynkowe) oraz zakres makroskopowego ruchu (tarcie ślizgowe).

Podział tarcia na spoczynkowe i ślizgowe bazuje na zasadzie wzajemnego zaczepiania ciał sztywnych. Przyjęta zasada dla ciał sztywnych pozwala na jednoznaczny rozdział między spoczynkiem i poślizgiem. Natomiast w przypadku ciał rzeczywiście elastycznych, w obszarze spoczynku, w chwili zadziałania siły stycznej występują pewne mikroprzesunięcia. Pomiary tarcia spoczynkowego są więc w pewnym zakresie pomiarami tarcia ślizgowego przy małych prędkościach i z tego też powodu niektórzy autorzy nie uwzględniają tarcia spoczynkowego (Simkins (1967) **[L. 9]**, Sargent (1974) **[L. 8]**). Podział na obszary przyczepności i poślizgu jest więc idealnym rozważaniem – pewnym przybliżeniem rzeczywistych właściwości. Tarcie ślizgowe wynika z ruchu względnego warstw wierzchnich dwóch elementów pozostających w kontakcie. Według elementarnej teorii Coulomba współczynnik tarcia ślizgowego μ jest niezależny od wartości prędkości względnej. Wektor $\vec{F}_T$ siły tarcia ma kierunek działania, zależny od kierunku działania prędkości względnej $\vec{v}_r$:

$$\vec{F}_T = -\mu \cdot F_N \cdot \mathrm{sgn}\left(\frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|}\right) \tag{1}$$

którego wartość liczbową oblicza się wg wzoru (4.2):

$$F_T = -F_N \cdot \mathrm{sgn}(v_r) \tag{2}$$

Tarcie ślizgowe określone jest przede wszystkim przez procesy adhezji oraz sprężyste i plastyczne deformacje. Podczas względnego ruchu

dochodzi do sprężystych i plastycznych deformacji w warstwach wierzchnich nierówności, rozrywania mostków zgrzewanych na zimno, jak również ścinanie wzniesień materiału. Wszystkie składowe mechanizmy powstające w miejscu styku powodują powstawanie siły oporu. W następstwie rozpraszania energii w miejscu styku dochodzi do podwyższenia temperatury, która oddziałuje na siłę tarcia. Zależność siły tarcia od prędkości względnej i siły normalnej dla quasistacjonarnych warunków opisuje równanie (2).

Ze wzrostem prędkości względnej czas kontaktu stykających się obszarów warstwy wierzchniej ulega zmniejszeniu, co powoduje spadek siły tarcia. Zależność tę ujmuje Kragielski (1968) **[L. 4]** równaniem (3), wyrażającym współczynnik tarcia w funkcji prędkości $\mu = \mu(v_r)$:

$$\mu = 0{,}6 \cdot \frac{16 \cdot k + 100}{80 \cdot k + 100} \cdot \frac{100}{30 \cdot v + 100} \tag{3}$$

gdzie: k – docisk klocka żeliwnego do koła w MPa, v – prędkość w km/h.

W pracach Bowdena i Lebena (1939) **[L. 2]** oraz Bowdena i Tabora (1939) **[L. 1]** zwrócono uwagę na fakt, że poślizg sztywnego ciała po podłożu nie odbywa się w sposób płynny, ale skokowy. Jeżeli wzrasta siła tarcia wraz ze spadkiem prędkości względnej, to powstają drgania samowzbudne, nazywane drganiami stick-slip (przyleganie-poślizg).

Wiele przeprowadzonych badań wskazuje na istotny wpływ właściwości tribologicznych materiałów par ciernych klockowego układu hamulcowego na parametry wibroakustyczne pojazdu szynowego. Odniesienie poziomu natężenia dźwięku, podczas hamowania pojazdu, do charakterystyk tarciowo-zużyciowych materiałów, stosowanych na wstawki hamulcowe, wykazało istniejącą zależność tego zjawiska od cech konstrukcyno-technologicznych wstawki hamulcowej. Znając te zależności, można stymulować zużyciem oraz natężeniem emitowanego dźwięku, który jest nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym procesowi tarcia podczas hamowania pojazdu.

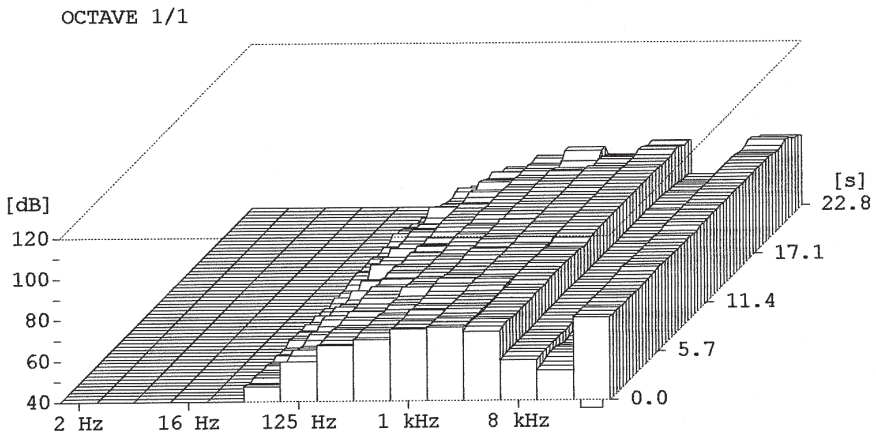
BADANIA WPŁYWU MATERIAŁU WSTAWKI HAMULCOWEJ NA POZIOM HAŁASU

Jak zauważono we wcześniejszych doświadczeniach czynnikiem bardzo istotnie wpływającym na poziom emisji hałasu podczas procesu hamowania są własności materiału wstawki hamulcowej. Dlatego podczas badań

tribologicznych przeprowadzonych przy użyciu testera T-05, **(Rys.1)** dokonano pomiaru poziomu dźwięku mikrofonem pojemnościowym typu SV 02/C4 z przedwzmacniaczem mikrofonowym 1/2" typu SV01A podłączonym do cyfrowego analizatora i miernika dźwięku typu SVAN 912 AE.

Rys. 1. Stanowisko badawcze tester T-05 z aparaturą pomiarową
Fig. 1. Test bench tester T-05 with measuring equipment

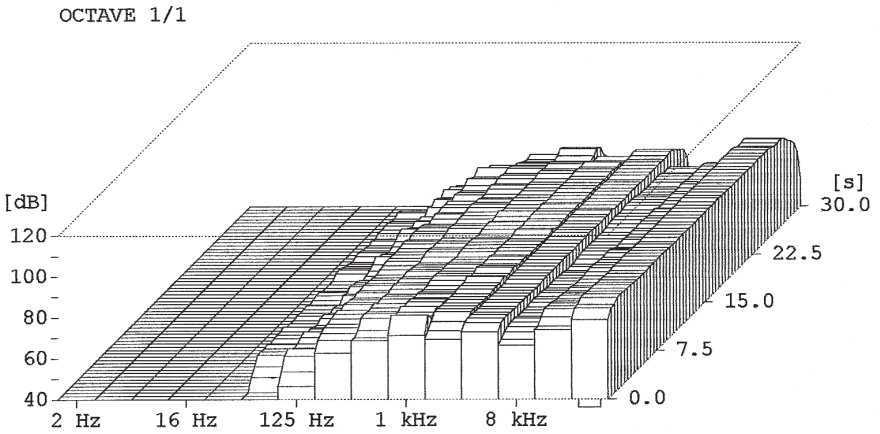
Pomiar przeprowadzano dla włączonego filtru typu A, charakterystyki dynamicznej oznaczonej F, oraz liniowego uśrednienia. Mikrofon umiejsco-



Rys. 2. Analiza oktawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka kompozytowa, prędkość względna 8.8 m/s, nacisk 1 MPa
Fig.2. Noise level octave analysis in function of time for composite insert: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

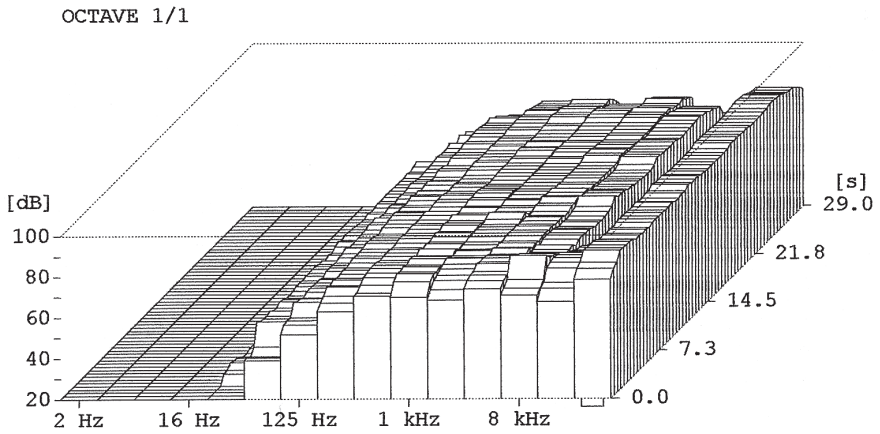
wiony w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu obręczy zamocowano na statywie w odległości ok. 10 mm od miejsca współpracy klocka z obręczą.

Na **Rys. 2**, **Rys. 3** i **Rys. 4** zamieszczono wyniki analizy oktawowej poziomu hałasu w funkcji czasu – kolejno dla wstawki kompozytowej, z materiału spiekanego oraz wstawki żeliwnej.



Rys. 3. Analiza oktawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka z materiału spiekanego, prędkość względna 8.8 m/s, nacisk 1 MPa

Fig.3. Noise level octave analysis for insert from sintered material: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

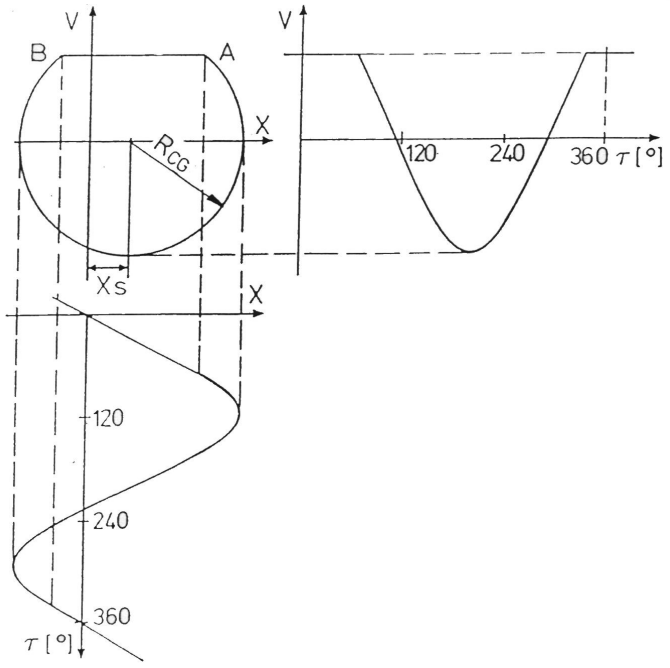


Rys. 4. Analiza oktawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka żeliwna,prędkość względna 8.8 m/s nacisk 1 MPa

Fig. 4. Noise level octave analysis for cast iron insert in function of time: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

Z przeprowadzonych badań wynika, iż najwyższym poziomem hałasu, niezależnie od prędkości względnej i nacisku, charakteryzowały się wstawki wykonane z żeliwa P10. Generowały one hałas na poziomie kilka dB wyższym od wstawek wykonanych z materiałów kompozytowych.

Zamieszczone w pracy **[L. 5, 6]** wyniki badań **(Rys. 5)** dowodzą, że wykonując wstawki hamulcowe z materiału o charakterystyce współczynnika tarcia „$\mu_s = \mu_k ; \mu_k = \text{const}$" (jakim charakteryzują się niektóre materiały kompozytowe) możemy wpływać na proces zjawisk kontaktowych typu stick-slip – eliminując w tym przypadku fazę stick, czyli odcinek „A–B" przybiera kształt łuku o promieniu R_{CG}. Przeciwdziała się w ten sposób powstawaniu drgań samowzbudnych. W efekcie wyeliminowania drgań samowzbudnych, w strefie tarcia koła z klockiem hamulcowym, przeciwdziałamy powstawaniu zużycia falistego koła, a tym samym wpływamy na obniżenie poziomu emisji hałasu – tak podczas hamowania jak i normalnej jazdy pojazdu szynowego.



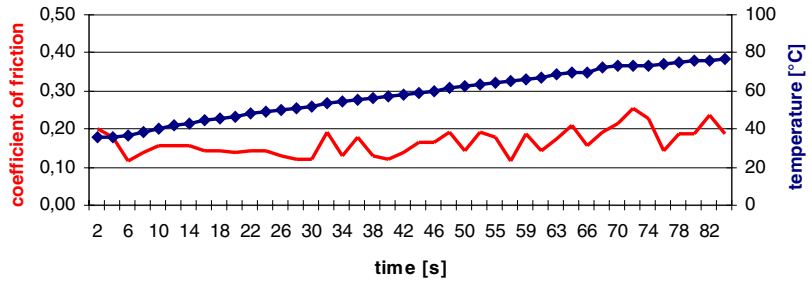
Rys. 5. Scghemat poglądowy cyklu granicznego analizowanego układu mechanicznego[6]

Fig. 5. Diagram of boundary cycle of the investigated mechanical system

BADANIA TRIBOLOGICZNE

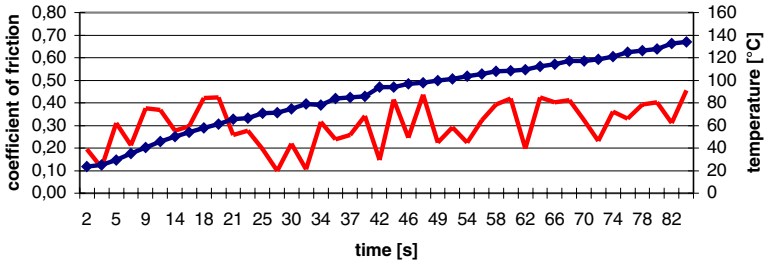
Na stanowisku badawczym tester T-05 wyznaczono wartości i przebiegi zmian współczynnika tarcia ślizgowego w funkcji:
– prędkości,
– czasu,
– temperatury,
– obciążenia.
oraz zmian temperatury wstawki hamulcowej i obręczy w funkcji:
– czasu,
– prędkości,
– obciążenia.

W pracy zamieszczono wybrane przebiegi zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu, **Rys. 6** i **Rys. 7**, dla wstawki kompozytowej i żeliwnej.



Rys. 6. Wykres przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu – wstawka kompozytowa

Fig. 6. Diagram of coefficient of friction and temperature curves in the function of time – composite insert

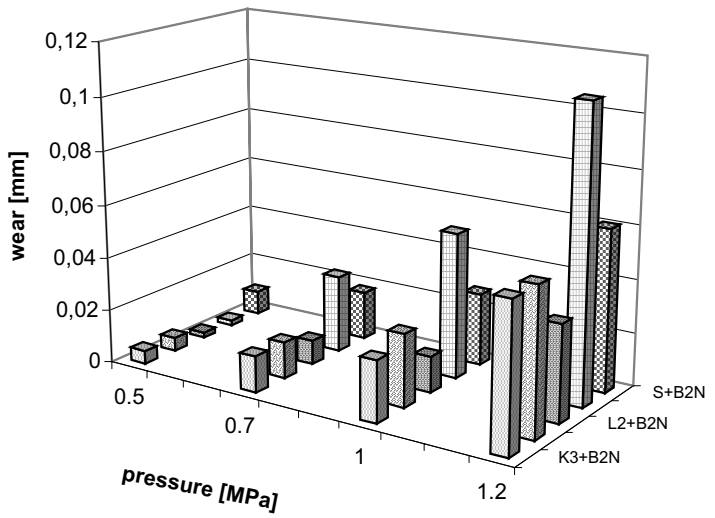


Rys. 7. Wykres przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu – wstawka żeliwna

Fig. 7. Diagram of coefficient of friction and temperature curves in the function of time – cast iron insert

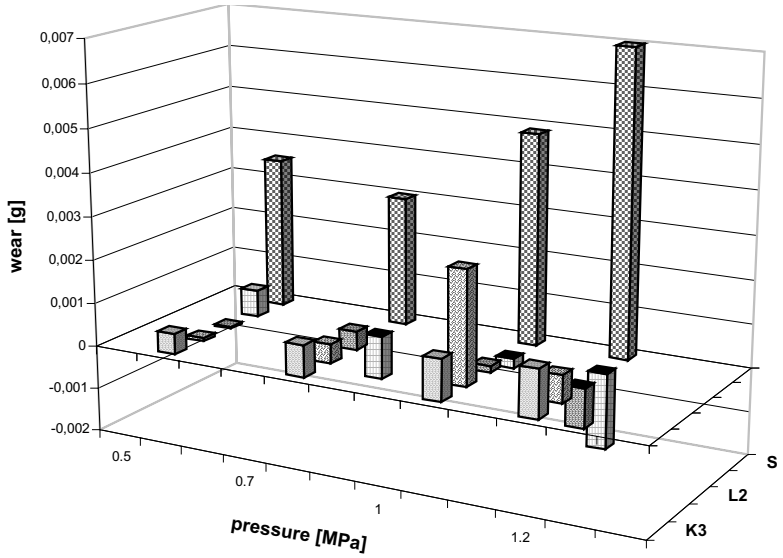
Podczas badań dokonano pomiaru zużycia ściernego dla przeciwpróbki wykonanej z materiału obręczy B2N, a hamowanej przez próbki wykonane z materiałów: żeliwa (P10), materiałów kompozytowych (K1, K3, L2) i materiału spiekanego z proszków metali (S). Stopień zużycia określono mierząc zużycie liniowe skojarzenia ciernego wstawka-obręcz oraz ważąc ubytki masowe. Przykładowe zestawienie wybranych wyników badań zużycia liniowego wstawek z materiałów K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1 i 1.2 MPa przedstawiono na **Rys. 8**. Na **Rys. 9** zamieszczono wyniki pomiaru zużycia wagowego obręczy hamowanych przez wstawki K1, K3, L2, P10 i S przy naciskach 0.5, 0.7, 1 i 1.2 MPa.

Na podstawie przeprowadzonych badań, oceny wagowego i liniowego zużycia, można stwierdzić, że największą intensywnością zużycia charakteryzuje się żeliwo P10. Ponadto przy naciskach 0.7, 1 i 1.2 MPa stwierdzono naniesienia materiału wstawki żeliwnej na powierzchnię współpracującej z nią obręczy. Najintensywniej zużywała się obręcz podczas hamowania wstawką wykonaną z materiału S. Najmniejsze zużycie wagowe jak i liniowe wykazywał materiał kompozytowy L2 oraz skojarzona z nim obręcz.



Rys. 8. Średnie zużycie liniowe wstawek z materiałów K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa i drogi tarcia 1000 m

Fig. 8. Mean linear wear of inserts from materials K1, K3, L2, P10, S for pressure 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa and for 1000 m of friction distance



Rys. 9. Średnie zużycie wagowe obręczy hamowanych przez wstawki K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa i drogi tarciaa 1000 m

Fig. 9. Mean wear by weight of rims braked by inserts K1, K3, L2, P10 S for pressure 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa and for 1000 m friction distance

ZAKOŃCZENIE

Wstawki hamulcowe żeliwne, dla których wartość współczynnika tarcia maleje wraz ze spadkiem prędkości względnej podczas tarcia, generowały hałas na poziomie o kilka dB wyższym w porównaniu ze wstawkami z materiałów kompozytowych. Współczynnik tarcia wstawek kompozytowych wykazuje stałą wartość – niezależną od zmiany prędkości względnej trących elementów.

Przeprowadzone badania **[L. 3, 5, 6, 10, 11]** wykazały, a zamieszczone w pracy wyniki badań stanowiskowych i laboratoryjnych potwierdziły, że poziom natężenia dźwięku, generowany przez pojazd szynowy, zależy, w znacznym stopniu, od cech konstrukcyjno-technologicznych stosowanych wstawek hamulca klockowego. Zastosowanie kompozytowych wstawek w hamulcach klockowych pojazdów szynowych wpłynie korzystnie na komfort akustyczny podczas jazdy.

Wstawki kompozytowe, w porównaniu z wstawkami żeliwnymi, wykazują mniejszą intensywność zużycia ściernego, tak wagowego jak i liniowego, badanych materiałów wstawki hamulcowej i koła.

LITERATURA

1. Bowden F.P., Leben L.: *The nature of sliding and the analysis of friction.* „Proc. R. Soc.", A169, London 1939, pp.371-391.
2. Bowden F.P., Tabor D.: *The area of contact between stationary and between moving surfaces*. "Proc. R. Soc.", A169, London 1939, pp.91-413.
3. Ehlers H.R., Gärtner E.: Poteziale und Grenzen der klotzbremse im vergleich zur Scheibenbremse Glasers Annalen, nr. 126 6-7/2002 r.
4. Kragielski I. V.: *Trienie i iznos.* Moskwa 1968.
5. Piec P.: Analiza zjawisk kontaktowych typu stick-slip w miejscu styku koła z klockiem hamulcowym. Monografia 187, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995.
6. Piec P.: Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów szynowych. Wyd. ITE Radom, BIBLIOTEKA PROBLEMÓW EKSPLOATACJI, Wyd. ITE Radom, . Kraków, 1999 r.
7. Piec P., Zajac G.: Wpływ eksploatacji pojazdów na propagację hałasu. Wyd. ITE Radom, PROBLEMY EKSPLOATACJI, Kwartalnik, nr 1/2002 (44).
8. Sargent L.B.: A Unified Theory of Friction. „ASLE Transactions", 17(1974).
9. Simkins T.E.: *The Mutuality of Static and kinetic Friction.* Journal of the American Society of Lubrication Engineers, 23(1967).
10. Sitarz M., Piec P., Hełka A., Zając G.: Badania eksploatacyjne żeliwnych i kompozyto-wych wstawek hamulcowych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, seria TRANSPORT, z.43, 2001 r.
11. Willenbrink L.: Neurer Erkentnisse zur Schallabstrahlung von Schienenfahrzeuge. Eisenbahntechnische Rundschau, Nr 5, 1979.
12. Zalewski R.: Obecne zagrożenia środowiska naturalnego przez kolej i sposoby zaradcze. Drogi Kolejowe, nr 8, 9/1990.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

The analysis of contact phenomena that accompany the process of friction is based on the results of operational and laboratory test bench investigations aided by the application of computer programs. The computer aided analysis of the process of friction allows a selective identification of a broad range of parameters which are decisive for the initiation and propagation of the basic phenomena connected with friction. Computer interference in the description and analysis of the phenomena accompanying friction makes it possible to separate the

microprocesses which shape the macro-picture of the changes that occur in the outer layer of the interacting elements and units of machines and vehicles. The article is based on the results of the authors' research, supported by visual computer simulation.

The article includes some results of tests on the effect of tribological properties of friction elements, brake shoe insert and wheel, on the level of noise. In the experiments the inserts made from cast iron, used in rail vehicles were investigated, as well as composite inserts and pressed from metal powders.