ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Mirosław WITASZEK, Kazimierz WITASZEK

LABORATORYJNA OCENA ZUŻYCIA STALI SZYNOWEJ GATUNKU 900A PRZY SUCHYM TARCIU ŚLIZGOWYM

Streszczenie. Zużywanie szyn kolejowych wywiera znaczący wpływ na koszty transportu kolejowego. Jest ono skutkiem tarcia pomiędzy kołami a szynami kolejowym, które są niezbędne do funkcjonowania transportu szynowego. Tarcie i zużywanie elementów pary koło – szyna są przedmiotem szerokiego programu badań, prowadzonych w Katedrze Eksploatacji Pojazdów Politechniki Śląskiej. Niniejszy artykuł przedstawia ich fragment dotyczący badań wpływu wybranych warunków współpracy na zużycie stali szynowej, gatunku 900A, przy suchym tarciu ślizgowym. Laboratoryjne badania zużycia zostały przeprowadzone w celu symulowania współpracy skojarzenia: obrzeże koła kolejowego – bok główki szyny. Ich wyniki pozwoliły na określenie wpływu wybranych warunków współpracy, tj. obciążenia i prędkości ślizgania, na intensywność zużywania próbek modelujących szyny w badanym skojarzeniu.

LABORATORY WEAR ASSESSMENT OF A RAIL STEEL GRADE 900A IN DRY SLIDING CONDITIONS

Summary. Wear of rails significantly influences the costs of railroads operation. This wear is caused by a wheel – rail friction, which is necessary to railway transport running. Friction and wear in wheel – rail system is a subject of wide – ranged research programme conducted in the Chair of Vehicle Service of Silesian University of Technology. In the present work its part has been presented In this part the influence of selected working conditions on the dry sliding wear of a rail steel grade 900A is studied. Laboratory wear tests have been carried out to simulate a tribological pair wheel flange – rail side. Their results enabled to determine the influence of selected working conditions i.e. load and sliding velocity, on the wear rate of elements that modelled rails in the simulated pair.

1. WPROWADZENIE

Od najdawniejszych czasów tarcie jest podstawowym zjawiskiem wykorzystywanym w transporcie. Tarcie pomiędzy kołami kolejowymi a szynami umożliwia funkcjonowanie transportu szynowego. Wprawdzie już w 1933 roku niemiecki inżynier Hermann Kemper

(1892–1977) wpadł na pomysł budowy kolei magnetycznej, która nie wykorzystywała i nadal nie wykorzystuje ww. zjawiska, jednak jak dotąd istnieje tylko jedna, komercyjna linia tej kolei [1, 2]. Łączy ona centrum Szanghaju z nowym lotniskiem Pudong. Została zbudowana przez niemiecką firmę Transrapid International. Długość tej trasy wynosi około 30 km. Pociąg pokonuje ją w niecałe 8 minut, rozwijając maksymalną prędkość 430 km/h [2, 3].

O możliwości konkurowania kolei tradycyjnej z magnetyczną świadczy osiągnięcie w dniu 03.04.2007 roku przez francuski pociąg TGV prędkości 574,8 km/h [4]. Rekord prędkości pociągu magnetycznego, ustanowiony w 2003 roku na torze doświadczalnym w Japonii jest tylko nieznacznie wyższy i wynosi 581 km/h [3]. Jak zatem widać, transport kolejowy oparty na zjawisku tarcia odgrywa nadal ważną rolę.

Tarciu towarzyszy zużywanie tribologiczne współpracujących elementów. Jak podają autorzy pracy [5], zużycie szyn wywołuje wysokie koszty eksploatacji linii kolejowych. Szczególne znaczenie ma zużycie boków główek szyn umieszczonych w łukach torów. Pracują one w warunkach tarcia suchego, przy największym udziale ruchu ślizgowego [6, 7]. Do symulowania skojarzenia boku główki szyny znajdującej się w łuku z obrzeżem koła często są wykorzystywane stanowiska badawcze zużycia, przy suchym tarciu ślizgowym [5, 6, 8, 9]. Zużywanie to zależy między innymi od warunków współpracy [10]. Obejmują one obciążenie, drogę tarcia i prędkość ruchu [11]. W niniejszej pracy przeprowadzono badania wpływu ww. czynników na zużycie próbek wykonanych z wybranej stali szynowej.

2. BADANIA WŁASNE

Celem laboratoryjnych badań zużycia było określenie wpływu obciążenia i prędkości ruchu względnego na intensywność zużycia próbek wykonanych ze stali szynowej, gatunku 900A. Przeprowadzono je w warunkach suchego tarcia ślizgowego. Skład chemiczny i twardość badanego materiału przedstawiono w tabeli 1.

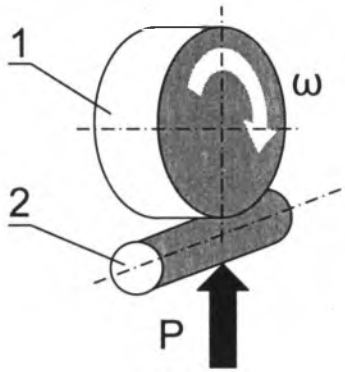
Tabela 1

Skład chemiczny i twardość badanej stali gatunku 900A

Skład chemiczny									Twardość
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	HB
0,73	1,04	0,3	0,019	0,013	0,02	0,01	0,03	0,003	280

Badania zużycia przeprowadzono na zmodyfikowanym stanowisku Timkena, w układzie dwóch walców o osiach prostopadłych (rys. 1). Układ ten zapewniał uzyskanie punktowego styku skoncentrowanego, jaki często występuje w skojarzeniu koło - szyna. Próbki wykonano z badanej stali w kształcie walców o średnicy 10 mm i wysokości 40 mm. Przeciwpróbkę stanowił zewnętrzny pierścień łożyska stożkowego typu 30204A, o średnicy 47 mm, wykonany ze stali 102Cr6 (ŁH15), o twardości 62 HRC. W trakcie badania pierścień wykonywał ruch obrotowy, podczas gdy próbka pozostawała w spoczynku. Próbka była obciążona siłą P, która stanowiła jeden z parametrów każdego badania, co pokazano na rys. 1. Pozostałymi parametrami badania były prędkość ślizgania (prędkość liniowa przeciwpróbki w miejscu styku z próbką v) i droga tarcia L. Wartości tych parametrów podano w tabeli 2.

W wyniku współpracy na próbce powstawał ślad zużycia (rys. 2), którego wymiary służyły do określania objętości zużytego materiału metodą optyczną, opisaną w pracy [12]. Metoda ta pozwalała również na wyznaczenie nominalnej powierzchni styku, co umożliwiało obliczenie nacisku w obszarze styku próbki z przeciwpróbką w momencie zakończenia badania.



Rys. 1. Schemat układu badawczego [9]: 1 – przeciwpróbka; 2 – próbka, P – obciążenie, ω – prędkość kątowa przeciwpróbki:
Fig. 1. A scheme of the research system [9]: 1 – counter-specimen; 2 – specimen, P – load, ω – angular speed of the counter-specimen

Tabela 2

Parametry badań

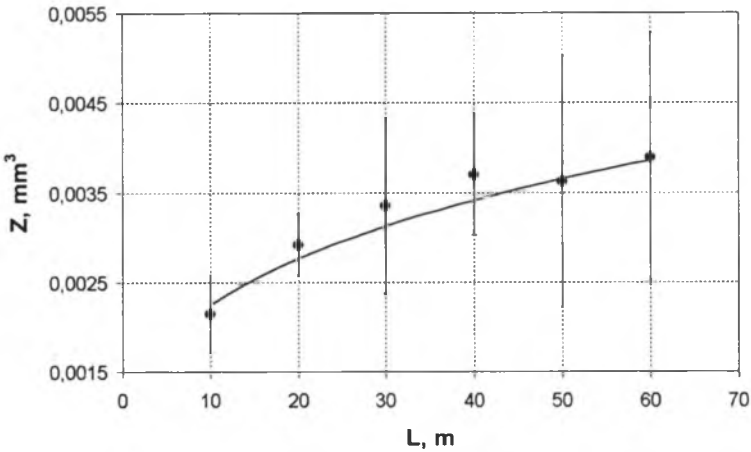
Parametr	Wartości
Obciążenie P, N	40, 63, 86, 108
Prędkość ślizgania v, $m \cdot s^{-1}$	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7
Droga tarcia L, m	10, 20, 30, 40, 50, 60

Rys. 2. Przykłady śladów zużycia na powierzchni próbki ze stali 900A przy obciążeniu 63 N, prędkości ślizgania 0,5 $m \cdot s^{-1}$ i drodze tarcia 20 m
Fig. 2. Examples of wear scars obtained on a specimen made of a steel grade 900A for a load of 63 N, sliding speed of 0.5 $m \cdot s^{-1}$ and sliding distance of 20 m

3. ANALIZA WYNIKÓW

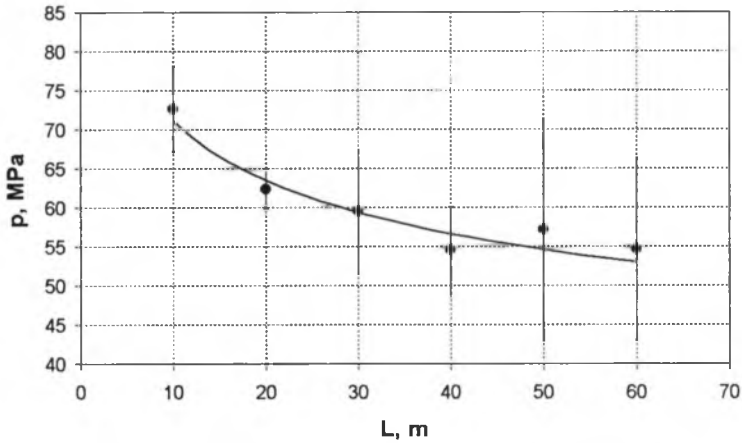
Na rys. 3 przedstawiono wpływ drogi tarcia na zużycie objętościowe badanej stali szynowej, przy obciążeniu 86 N i prędkości liniowej równej 0,3 $m \cdot s^{-1}$. Punktami zaznaczono na nim zużycie, będące średnią z trzech pomiarów. Na tym rysunku przedstawiono także odchylenie standardowe zużycia. Z rys. 3 wynika, że wydłużenie drogi tarcia wywołuje powiększenie zużycia, podobnie jak ma to miejsce w przypadku innych, badanych stali [9, 13]. Proces zużycia najintensywniej przebiega na początku drogi tarcia, gdy powierzchnia śladu współpracy jest najmniejsza. Elementy testowe pracują wówczas w warunkach dużego

nacisku, który zmniejsza się w trakcie eksperymentu (rys. 4). Zjawisko to jest charakterystyczną cechą licznych węzłów tarcia o styku skoncentrowanym, pracujących w warunkach tarcia ślizgowego [14]. Zmiana nacisku podczas badania znacząco wpływa na intensywność zużywania w badanym skojarzeniu.



Rys. 3. Wpływ drogi tarcia na zużycie objętościowe stali 900A, przy obciążeniu 86 N i prędkości 0,3 m · s^{-1}

Fig. 3. The influence of sliding distance on wear volume of steel grade 900A, for a load of 86 N and sliding speed of 0.3 m · s^{-1}



Rys. 4. Wpływ drogi tarcia na nacisk w styku między przeciwpróbką i próbką ze stali 900A, przy obciążeniu 86 N i prędkości 0,3 m · s^{-1}

Fig. 4. The influence of sliding distance on the pressure in a contact between a counter-specimen and a specimen made of steel grade 900A, for a load of 86 N and sliding speed of 0.3 m · s^{-1}

W celu skorelowania uzyskanych wyników badań (rys. 3 i 4) przeprowadzono aproksymację za pomocą funkcji potęgowej opisanej zależnością:

$$y = a \cdot L^{b}, \tag{1}$$

gdzie:

y – aproksymowana wielkość (tj. zużycie objętościowe albo nacisk),

L – droga tarcia,
a, b – współczynniki liczbowe określone za pomocą regresji.

Aproksymację przeprowadzono oddzielnie dla każdej, badanej pary warunków pracy: obciążenie – prędkość. Funkcje te, uzyskane dla obciążenia równego 86 N i prędkości 0,3 $m \cdot s^{-1}$ przedstawiono na rys. 3 i 4. Należy zaznaczyć, że są one ważne jedynie w badanym zakresie drogi tarcia. Zatem za ich pomocą nie należy określać zużycia i nacisku dla drogi tarcia spoza badanego zakresu, a zwłaszcza dla L < 10 m.

Podczas gdy nacisk może zostać obliczony bezpośrednio z zależności (1), to określenie intensywności zużywania wymaga jego zróżniczkowania względem drogi:

$$I_V = \frac{dZ}{dL}, \tag{2}$$

gdzie:
I_V – intensywność zużywania, m^3/m,
Z – zużycie objętościowe, m^3.

Uniwersalną wielkością charakteryzującą zużywanie jest liniowa intensywność zużywania [15], zwana w dalszej analizie „intensywnością zużywania". Jest ona stosunkiem objętościowej intensywności zużywania do nominalnej powierzchni styku:

$$I = \frac{I_V}{A}, \tag{3}$$

gdzie:
I – liniowa intensywność zużywania, m/m,
A – nominalna powierzchnia styku, m^2.

Wpływ nacisku i prędkości ślizgania na intensywność zużywania został opisany za pomocą następującej funkcji:

$$I = \exp(c_0 + c_1 \cdot p + c_2 \cdot v + c_{11} \cdot p^2 + c_{22} \cdot v^2 + c_{12} \cdot p \cdot v), \tag{4}$$

gdzie:
p – nacisk, MPa,
v – prędkość ślizgania, $m \cdot s^{-1}$,
c_0, c_1, c_2, c_{11}, c_{12} c_{22} – współczynniki liczbowe określone za pomocą regresji, podane w tabeli 3.

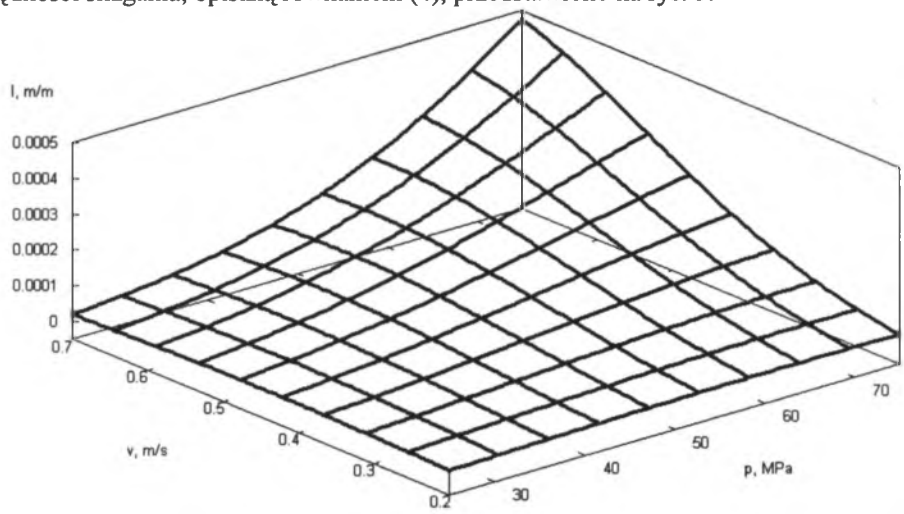
Tabela 3

Współczynniki liczbowe równania (4)

Współczynnik	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Prawdopodobieństwo, że $c_{ij} = 0$
c_0	-12,75	0,57	$2,46 \cdot 10^{-39}$
c_1	-0,00046	0,00015	0,0037
c_2	-7,96	1,15	$5,06 \cdot 10^{-10}$
c_{11}	0,038	0,018	0,035
c_{22}	4,81	1,37	0,0007
c_{12}	0,103	0,016	$6,47 \cdot 10^{-9}$

W tabeli 3 zamieszczono wartości średnie i odchylenia standardowe współczynników liczbowych c_{ij} równania (4) wraz z wartościami prawdopodobieństwa zdarzenia, że dany współczynnik wynosi 0. Jak wynika z tej tabeli dla każdego, wyznaczonego współczynnika prawdopodobieństwo to jest niewielkie, zatem w dalszej analizie uwzględniono je wszystkie. Jakość regresji oceniono za pomocą współczynnika korelacji, który wynosił 0,91, co

pozwoliło na wykorzystanie wyznaczonej funkcji (4) do analizy wpływu badanych warunków współpracy na intensywność zużywania badanej stali. Zależność tej intensywności od nacisku i prędkości ślizgania, opisaną równaniem (4), przedstawiono na rys. 5.



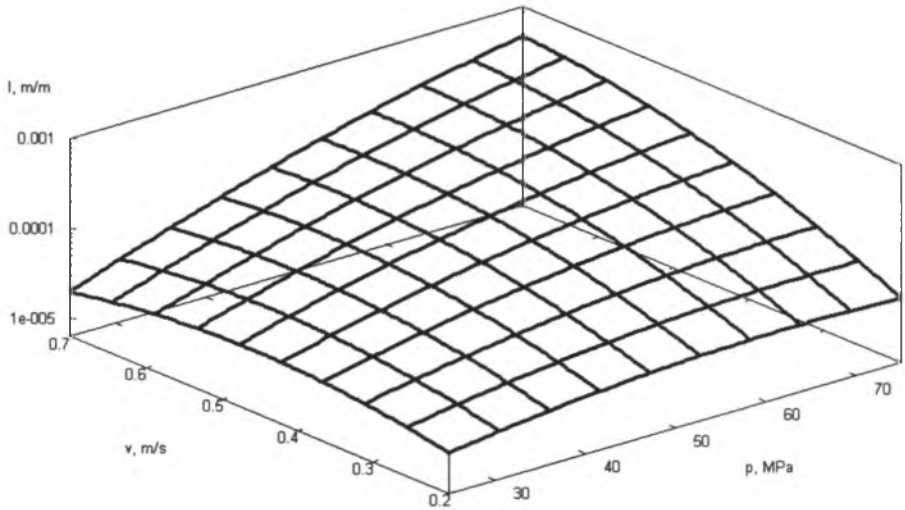
Rys. 5. Wpływ nacisku i prędkości ślizgania na intensywność zużywania stali szynowej gatunku 900A

Fig. 5. The influence of pressure and sliding speed on wear rate of the rail steel grade 900A

Z rys. 5 wynika, że badana stal 900A, wykazuje niewielką intensywność zużywania zarówno dla najniższego nacisku, jak i minimalnej prędkości w testowanym zakresie. W tych warunkach wykazuje ona tzw. zużywanie słabe [15 – 17]. Obecność tlenków na współpracujących powierzchniach przeciwdziała wówczas powstawaniu kontaktów metalicznych nierówności, a tym samym adhezji [16, 17]. Zastosowana na rys. 5 liniowa skala intensywności zużywania nie pozwala na zaobserwowanie zależności intensywności zużywania od nacisku i prędkości w zakresie zużywania słabego. Dlatego funkcję z rys. 5 przedstawiono na rys. 6, wykorzystując logarytmiczną skalę intensywności zużywania.

Z rys. 6 wynika, że w zakresie badanych prędkości, w tym przy zużywaniu słabym, zwiększenie nacisku wywołuje podwyższenie intensywności zużywania. Przyczyną tego może być intensywne wykruszanie się tlenków pod wpływem większych naprężeń [16]. Jednak przy niewielkiej prędkości wykruszanie nie powoduje powstawania kontaktów metalicznych nierówności powierzchni i adhezji, która jest jednym z podstawowych mechanizmów zużywania intensywnego [16], występującego dopiero przy większych wartościach prędkości v i nacisku p (rys. 5).

Zwiększenie prędkości ślizgania wywołuje podwyższenie temperatury w obszarze styku współpracujących elementów. Z jednej strony może to prowadzić do zmniejszenia twardości materiału warstwy wierzchniej, co sprzyja kruszeniu się tlenków i ich usuwaniu, intensyfikując zużywanie [16]. Z drugiej strony wyższa temperatura sprzyja utlenianiu powierzchniowemu [16, 17], co jak już wspomniano przeciwdziała adhezji i obniża intensywność zużywania. Zjawisko to jest widoczne w niewielkim stopniu na rys. 6, zwłaszcza przy małym nacisku i dużej prędkości. Przy dużym nacisku widoczny jest niekorzystny wpływ prędkości na intensywność zużywania. Jest on tym wyraźniejszy, im wyższy jest nacisk (rys. 5 i 6).



Rys. 6. Wpływ nacisku i prędkości ślizgania na intensywność zużywania stali szynowej gatunku 900A (logarytmiczna skala intensywności zużywania)

Fig. 6. The influence of pressure and sliding speed on wear rate of the rail steel grade 900A (logarithmic scale of wear rate)

4. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Tarcie między kołami a szynami jest warunkiem funkcjonowania transportu szynowego. Jego skutkiem jest jednak zużycie kół i szyn. Zużycie zależy między innymi od warunków ich współpracy, wynikających z funkcjonowania transportu szynowego. Badania wpływu wybranych warunków współpracy na zużycie stali szynowej gatunku 900A pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Wydłużenie drogi tarcia powoduje podwyższenie zużycia. Z uwagi na geometrię elementów testowych i warunki ich względnego ruchu im większe zużycie, tym niższy jest nacisk w obszarze styku, a to wywiera wpływ na intensywność zużywania próbek.
2. Wpływ nacisku jest związany z wpływem prędkości ślizgania na intensywność zużywania próbek wykonanych z badanego materiału, przy czym:
   a) im wyższy nacisk, tym większa jest intensywność zużywania próbek;
   b) zwiększenie prędkości wywołuje podwyższenie intensywności zużywania, poza niewielkim zakresem prędkości przy małym nacisku;
   c) w tym zakresie prędkości obserwuje się nieznaczny spadek intensywności zużywania dla rosnącej prędkości, spowodowany utlenianiem się powierzchni próbki, w wyniku podwyższenia temperatury.
3. Przy niewielkim nacisku i prędkości ślizgania obecność tlenków na współpracujących powierzchniach przeciwdziała adhezji, zapewniając niską intensywność zużywania.
4. Dla dużych wartości nacisku i prędkości występuje zużywanie o wysokiej intensywności, którego wiodącym mechanizmem jest adhezja.

Jak wynika z wcześniejszych badań, opisanych w pracy [9], dobór materiału na elementy skojarzenia koło – szyna jest istotny dla prawidłowego funkcjonowania transportu szynowego. Dlatego też konieczne są dalsze badania zużywania innych gatunków stali szynowych.

Literatura

1. www.tatsachen-ueber-deutschland.de/pl/edukacja-i-nauka/inhaltsseiten/kompakt/1940-1979.html.
2. http://pl.wikipedia.org.
3. http://www.fizyka.net.pl.
4. http://wiadomosci.wp.pl.
5. Robles Hernández F.C., Demas N.G., Davis D.D., Polycarpou A.A., Maal L.: Mechanical properties and wear performance of premium rail steels. Wear, 263 (2007), s. 766-772.
6. Viáfara C.C, Castro M.I., Vélez J.M., Toro A.: Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels. Wear 259 (2005), s. 405-411.
7. Bejenka K., Marciniak Z., Medwid M.: Wpływ smarowania obrzeży kół lokomotyw spalinowych i elektrycznych na tempo ich zużycia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 14, Gliwice 1990, s. 51-58.
8. Ki Myung Lee, Polycorpou A.A.: Wear of conventional pearlitic and improved bainitic steels. Wear 259 (2005), s. 391-399.
9. Witaszek M., Witaszek K.: Laboratory wear assessment of selected elements of railway transport means. Problemy Transportu, 2 (2007) 1, s. 71-77.
10. Witaszek M., Witaszek K.: Modellieren des Verschleißes von Eisenbahnrad- und Schienenstahl. Tribologie und Schmierungstechnik 5/2005, s. 25-29.
11. Deters L., Proksch M.: Friction and wear testing of rail and wheel material. Wear 258 (2005), s. 981-991.
12. Witaszek S.: Komputerowa metody pomiaru zużycia. II Studencka Sesja Naukowa, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katowice, 04.06.2004.
13. Witaszek M., Witaszek K., Witaszek S.: Modelowanie zużycia stali 45 przy suchym tarciu ślizgowym. Biblioteka TEMAG, vol. XIV Instytutu Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Gliwice 2006, s. 219-227.
14. Kozyrev Yu.P, Ginzburg B.M., Priemskii N.D., Tochilnikov D.G., Bulatov V.P.: Express investigations of wear process by means of cylindrical counterbodies. Part I: Calculations and technique. Wear, 171 (1994), s. 71-75.
15. Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach tarcia. Praca zbiorowa pod redakcją W. Zwierzyckiego. PWN, Warszawa 1990.
16. Lim S.C., Ashby M.F., Brunton J.H.: Wear rate transitins and their relationship to wear machanisms. Acta metall. Vol. 35 (1987), nr 6, s. 1343-1348.
17. Lim S.C.: The relevance of wear - mechanism maps to mild – oxidational wear. Tribology International 35 (2002), s. 717-723.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Franciszek Binczyk

Praca wykonana w ramach BW-488/RT1/2007