

Andrzej KOTNAROWSKI<sup>1</sup>

## **NIEKONWENCJONALNE METODY ZWIĘKSZANIA TRWAŁOŚCI WĘZŁÓW KINEMATYCZNYCH URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH**

*Artykuł dotyczy aplikacji niekonwencjonalnych metod zwiększania trwałości węzłów kinematycznych urządzeń technicznych. Została w nim przedstawiona eksploatacyjna metoda konstituowania warstw ochronnych na współpracujących tarciowo powierzchniach elementów węzłów kinematycznych. Warstwy te, o właściwościach niskotarciowych i przeciwzużyciowych, minimalizujących niekorzystne skutki tarcia, takie jak opory ruchu i zużycie. Zaproponowano wytwarzanie tych warstw w początkowym okresie procesu eksploatacji urządzenia technicznego z wykorzystaniem do tego celu zjawiska Garkunowa. Skuteczność proponowanej metody dokumentują zaprezentowane w artykule wyniki badań własnych.*

## **UNCONVENTIONAL METHODS OF LIFE INCREASE OF TECHNICAL EQUIPMENT KINEMATIC JOINTS**

*The paper concerns application of tribology achievements in operation of machines kinematic joints. The method of protective layers constituting on rubbing surfaces of kinematic joints elements were presented which minimize adverse effects of friction like motion resistance and wear. The idea was proposed of Garkhunov effect application in order to these layers generation directly at the initial period of technical equipment operation process. Effectiveness of proposed method is proved by the results of author's own examination presented in the paper.*

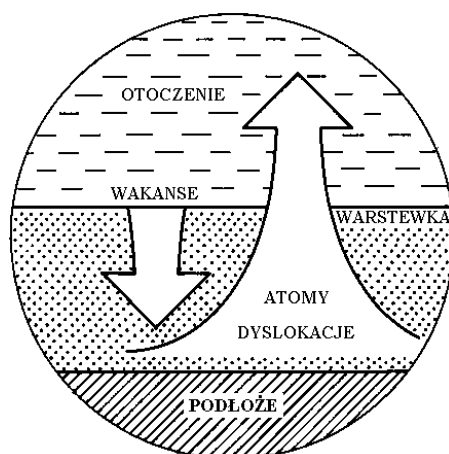
### **1. WSTĘP**

Procesy zużywania tribologicznego smarowanych kinematycznych węzłów maszyn w warunkach normalnej, stabilnej pracy przebiegają bardzo wolno – tak, że nie mają one praktycznego wpływu na trwałość. Zużywanie tribologiczne nasila się znacząco w warunkach zaburzenia funkcjonowania warstewki płynu, rozdzielającej współpracujące powierzchnie elementów. Zjawisko to występuje podczas każdego uruchamiania i zatrzymywania, gdy współpracujące ze sobą powierzchnie pracują w warunkach tarcia mieszanego, a nawet – w skrajnych przypadkach – suchego. Zapobieganie nadmiernemu zużyciu polega głównie na pokrywaniu współpracujących tarciowo powierzchni warstwami ochronnymi.

---

<sup>1</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.  
Tel: 606-714-696, Fax: + 48 48 361-76-44, e-mail: a.kotnarowski@pr.radom.pl

Rodzaj stosowanych powierzchniowych warstw ochronnych, które mogą być konstituowane zarówno jako warstwy wierzchnie, jak i powłoki, zależy od przewidywanych warunków eksploatacji skojarzeń tarciovych. Z tego powodu ich liczba jest znaczna, nawet jeśli ograniczy się ją poprzez dobieranie jednego rodzaju warstwy powierzchniowej do całej grupy podobnych zastosowań. Należy zauważyć, że wysoki stopień techniki wytwarzania większości warstw powierzchniowych wpływa w znacznym stopniu nie tylko na bezpośrednie koszty uzyskiwania tych warstw, ale również na inne koszty społeczne, związane chociażby z zatruciem środowiska, czy z nadmiernym rozwojem gałęzi przemysłu, produkujących coraz większą liczbę niezbędnych urządzeń technicznych. Tym niekorzystnym zjawiskom można zapobiegać poprzez konstituowanie warstw powierzchniowych w procesach eksploatacji. Jednym ze sposobów uzyskiwania eksploatacyjnych warstw ochronnych jest realizacja w styku tarciovym zjawiska bezzużyciowego tarcia, zwanego też od nazwiska jednego z odkrywców zjawiskiem Garkunowa [1]. Zjawisko to zostało najlepiej zbadane w skojarzeniach, w których współpracują ze sobą element stalowy z elementem stalowym, żeliwnym lub ze stopu miedzi, przy czym w przypadku braku elementu ze stopu miedzi, metal ten może zostać dostarczony do węzła tarcia w środku smarowym. W najogólniejszym ujęciu, polega ono na funkcjonowaniu systemu tribologicznego w warunkach bezzużyciowego tarcia – stanu charakterystycznego dla stawów organizmów żywych (od stawonogów poczynając a na ssakach kończąc), które są systemami tribologicznymi zamkniętymi, dobrze izolowanymi od wpływów zewnętrznych. Zasadniczym warunkiem wystąpienia tego zjawiska jest umiejscowienie procesu tarcia w cienkiej warstewce metalicznej, zdolnej do dyssypacji energii i materii [1,5]. Zdolność taką posiada również warstewka olejowa, jednak tylko w warunkach smarowania hydrodynamicznego. Cienka, metaliczna warstewka może posiadać taką zdolność w warunkach smarowania granicznego, gdy z jej powierzchni uwalniane są atomy, a dyslokacje wychodzą z jej wnętrza na powierzchnię. Dyssypację można przedstawić jako zachodzącą w tej warstewce wzajemną absorpcję dwóch, skierowanych w przeciwnych kierunkach, strumieni dyfuzyjnych (rys. 1).



Rys. 1. Procesy absorpcyjne zachodzące w warstewce lokalizującej proces tarcia [1]

Strumień dyslokacji i atomów porusza się w kierunku powierzchni warstewki, a strumień wakansów porusza się od powierzchni w głąb warstewki. Funkcjonowanie takiego systemu tribologicznego w warunkach równowagi jest możliwe dzięki oddziaływaniu sprzężenia zwrotnego. W przypadku, gdy przy pewnym potencjale chemicznym ilość tworzących się dyslokacji przekroczy ilość wakansów, tworzy się skupienie dyslokacji. Kumulacja dyslokacji prowadzi do wzrostu oporów tarcia, powodujących z kolei wzrost temperatury i zmianę potencjału chemicznego, co nasila selektywne uwalnianie atomów z powierzchni warstewki, w wyniku czego zwiększa się znów ilość wakansów. Dzięki opisanemu wyżej działaniu sprzężenia zwrotnego odtwarzana jest równowaga systemu tribologicznego, a sam proces tarcia przebiega w sposób oscylacyjny.

D.N. Garkunow po raz pierwszy zaobserwował zjawisko minimalizacji zużycia przypadkowo, w wysokoobciążonych węzłach tarcia ślizgowego (smarowanych mieszaniną spirytusu z gliceryną), w których stal współpracowała z brązem [1]. Późniejsze badania dowiodły, że ochronna warstewka miedziana powstaje w takim układzie materiałowym dzięki elektrochemicznemu oddziaływaniu gliceryny oraz jej właściwościom redukcyjnym, w stosunku do tlenków miedzi [5]. Początkowo składniki stopowe przechodzą selektywnie na drodze elektrochemicznej z elementu wykonanego z brązu do gliceryny. W rezultacie warstwa powierzchniowa brązu zawiera głównie nieutleniającą się i aktywną miedź, podatną ze względu na swobodne wiązania do szepiania ze stalą, dzięki czemu powierzchnia elementu stalowego również pokrywa się miedzią. Proces selektywnego usuwania składników stopowych z powierzchniowej warstwy brązu i pokrywania powierzchni stali miedzią trwa do czasu osiągnięcia przez warstewki miedzi na obydwu współpracujących powierzchniach grubości  $1\div 2\ \mu\text{m}$ . Przebiegające w ten sposób zjawisko nazwano selektywnym przenoszeniem.

Stwierdzono, że zjawisko Garkunowa może zachodzić w różnych układach materiałowych: stal lub żeliwo – stop miedzi, stal lub żeliwo – stal lub żeliwo, przy czym w układach, w których żaden ze współpracujących tarciowo elementów nie zawiera miedzi, musi zostać ona dostarczona w inny sposób, na przykład, w środku smarowym.

Należy podkreślić, że w publikacjach na temat zjawiska Garkunowa [1-5] nie odnotowano prób jego wywołania w skojarzeniach stali z czystą miedzią. Niniejszy artykuł omawia wyniki wstępnych badań autora nad możliwością generowania tego zjawiska w takim układzie materiałowym, stosowanym, między innymi, w kolejowej trakcji elektrycznej, w przypadku skojarzenia tarciowego pomiędzy wkładką ślizgową pantografu, a elektrycznym przewodem trakcyjnym.

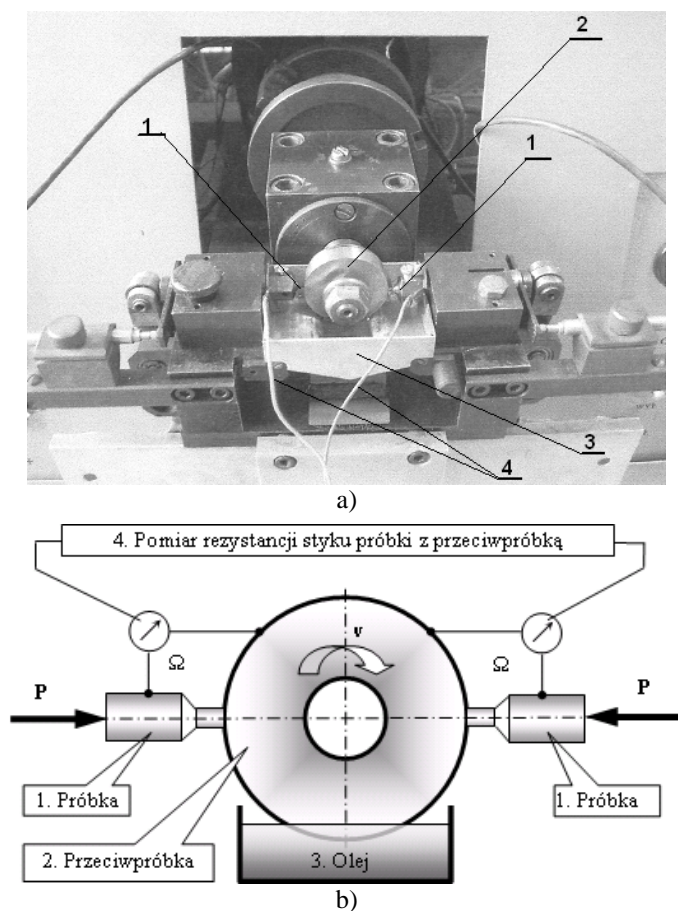
## **2. BADANIA MOŻLIWOŚCI WYWOŁANIA ZJAWISKA GARKUNOWA**

### **2.1. Badania tribologiczne**

Celem identyfikacji możliwości generowania zjawiska selektywnego przenoszenia w ślizgowych skojarzeniach tribologicznych, wykonano badania tarciove z wykorzystaniem skojarzenia materiałowego stal – miedź i środka smarowego w postaci gliceryny, sprzyjającego temu zjawisku. Do badań wykorzystano, skonstruowaną w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej, maszynę tarciową MT-2 (rys. 1), umożliwiającą pomiar zarówno oporów tarcia (momentu tarcia), jak i rezystancji styku

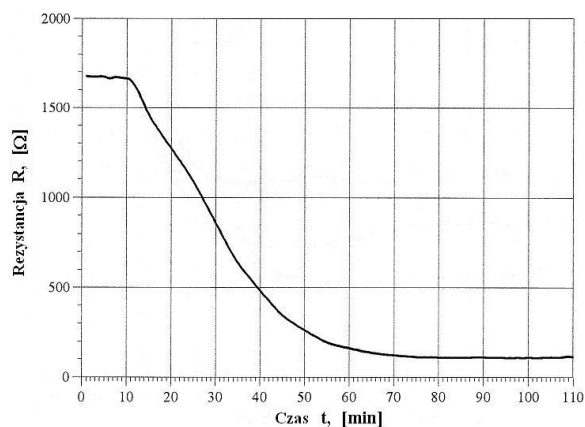
tarciowego. Pojawienie się w warunkach narastającego obciążenia niskiej wartości rezystancji stanowiło dowód wystąpienia styku metalicznego pomiędzy współpracującymi ślizgowo powierzchniami, świadczącego o przejściu od tarcia płynnego do tarcia mieszanego, w których to warunkach może zachodzić zjawisko Garkunowa.

W badanym węźle tarciovym, z przeciwpóbką wykonaną ze stali C45 współpracowała próбка z miedzi tlenowej M1E, wycięta z przewodu trakcyjnego (rys. 1b). W trakcie badania obciążenie węzła tarcia narastało w sposób skokowy.



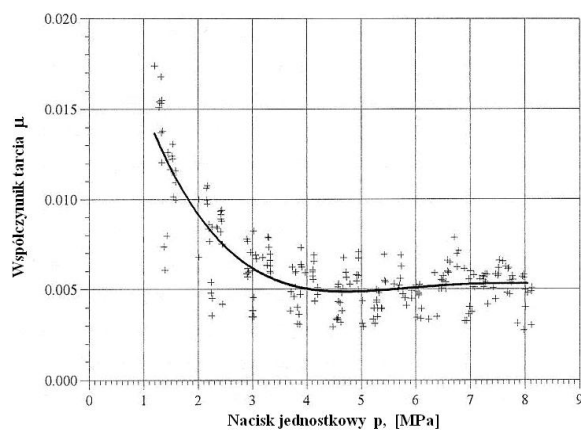
Rys. 1. Maszyna tarciova MT-2: a) widok czołowy; b) schemat węzła tarcia

Podczas badań skojarzenia tarciovego stal C45 – miedź tlenowa M1E, smarowanego gliceryną, dokonano jednoczesnych pomiarów wartości rezystancji styku tarciovego oraz oporów tarcia, zmieniających się wraz z narastającym obciążeniem. Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Przebieg rezystancji styku tarcowego w funkcji czasu dla miedzi tlenowej M1E

Z rysunku 2 wynika, że rezystancja styku tarcowego pomiędzy próbką i przeciwpróbką wykazuje stałą tendencję malejącą już po 10 minutach testu, czyli po zastosowaniu drugiego z kolei obciążenia, wywołującego nacisk jednostkowy o wartości 0,8 MPa. Po zastosowaniu siódmego z kolei obciążenia, odpowiadającego naciskowi jednostkowemu w styku tarcowym wynoszącemu 5,2 MPa, wartość rezystancji osiąga wartość minimalną, świadczącą o wystąpieniu styku metalicznego pomiędzy próbką i przeciwpróbką. Wartość współczynnika tarcia (rys. 3) od początku badania wykazuje tendencję malejącą, osiągając minimum, wynoszące 0,005, co w aspekcie braku smarowania płynnego, czyli warstewki olejowej, rozdzielającej współpracujące tarciowo powierzchnie, świadczy o wystąpieniu w badanym skojarzeniu zjawiska selektywnego przenoszenia.

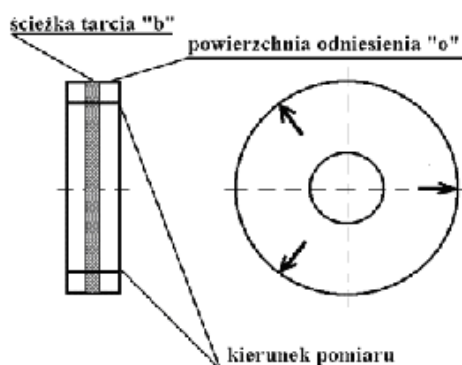


Rys. 3. Przebieg współczynnika tarcia w funkcji nacisku jednostkowego dla miedzi modyfikowanej M1M

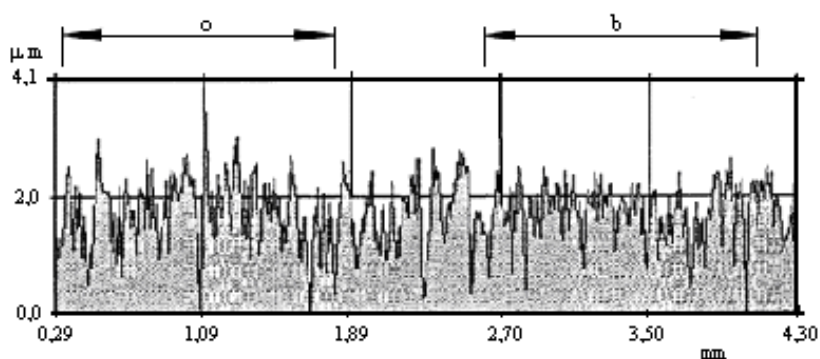
## 2.2. Badania struktury geometrycznej powierzchni tarcia

Celem badań była ocena wpływu procesu tarcia na strukturę geometryczną powierzchni (SGP) tarcia przeciwpółki stalowej. Przeprowadzono je w Pracowni Warstwy Wierzchniej i Przejściowej Ciała Stałego Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie przy użyciu profilometru TALYSURF 5M 120, sprzężonego z mikrokomputerem. Mikrokomputer wykorzystano do sterowania pomiarami, rejestracji i analizy danych pomiarowych oraz prezentacji wyników. Profilometr wyposażony był w specjalny stolik skanujący, umożliwiający rejestrację mikrosterometrii powierzchni metodą skaningu rastrowego.

Pomiary SGP wykonano na powierzchni walcowej krążka stalowego wzdłuż jego tworzącej. Odcinki profilogramu przechodzące przez ścieżki tarcia oznaczono literą "b", zaś odcinki na powierzchni odniesienia (nie uczestniczących w procesie tarcia) oznaczono literą "o". Pomiary przeprowadzono wzdłuż trzech tworzących, rozmieszczonych na obwodzie co 120°. Ilustruje to rysunek 4. Rysunek 5 przedstawia odwzorowany profil chropowatości przeciwpółki wzdłuż jednej z tworzących, a w tabelicy 1 przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe wyznaczonych parametrów



Rys. 4. Obszary krążka analizowane w badaniach SGP



Rys. 5. Profil chropowatości krążka

Tablica 1. Wyniki pomiarów parametrów SGP badanego krążka

Powierzchnia poddana analizie		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Sk	Rku	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	Rm [ $\mu\text{m}$ ]	D [1/mm]	Sm [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{r}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta q$
o	śr.	0,52	0,66	-0,1	2,8	1,8	3,7	34,5	70,8	12,7	0,17
	$\sigma$	0,03	0,05	0,1	0,1	0,0	0,1	1,1	1,2	1,8	0,01
b	śr.	0,42	0,52	-0,7	3,3	1,1	2,9	33,7	68,6	16,9	0,13
	$\sigma$	0,02	0,02	0,1	0,2	0,1	0,0	0,7	0,9	1,1	0,01

Analizując przedstawione w tablicy 1 wyniki pomiarów SGP można stwierdzić, że parametry opisujące cechy wysokościowe mikronierówności badanych powierzchni (Ra, Rq, Rp, Rm), wyznaczone na ścieżce tarcia (b), zawsze mają niższe wartości niż te same parametry wyznaczone na powierzchni wyjściowej (o). Świadczyć to może zarówno o spłaszczeniu wierzchołków chropowatości, jak i o wypełnieniu dolin wtartą miedzią.

Zauważa się również, że wartości współczynnika skośności profilu chropowatości (Sk) są zawsze mniejsze na ścieżce tarcia niż na powierzchni wyjściowej. Natomiast wartości kurtosis rozkładu odchyłeń profilu od linii średniej (Rku), wyznaczone na ścieżce tarcia, są na ogół większe niż na powierzchni wyjściowej. Takie różnice pomiędzy wartościami Sk i Rku, zmierzonymi na ścieżce tarcia i na powierzchni odniesienia, świadczą o zmianie kształtu (spłaszczeniu) mikronierówności w wyniku tarcia.

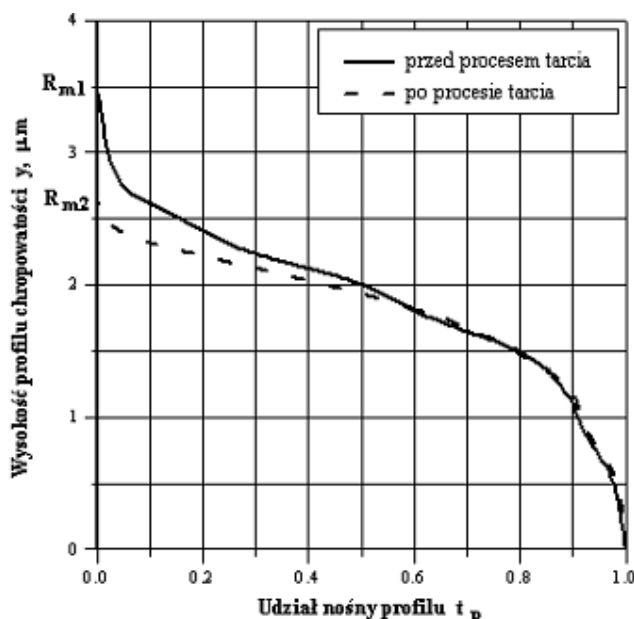
Wyniki pomiarów parametrów opisujących kształt mikronierówności ( $\bar{r}$  i  $\Delta q$ ) dokumentują wzrost średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności  $\bar{r}$  i zmniejszenie średniego kwadratowego pochylenia profilu  $\Delta q$  zboczy nierówności znajdujących się na ścieżce tarcia, w stosunku do nierówności znajdujących się na powierzchni wyjściowej. Może to być wynikiem zarówno spłaszczenia wierzchołków submikronierówności, jak i wypełniania ich zagłębien miedzią.

Porównanie wartości parametrów horyzontalnych (Sm i D), wyznaczonych na ścieżce tarcia i na powierzchni wyjściowej, nie wykazało żadnej prawidłowości, a różnice między nimi są nieznaczne. Świadczy to o tym, że proces tarcia nie spowodował całkowitej przebudowy SGP, a doprowadził jedynie do jej modyfikacji, znajdującej odbicie w zmianie parametrów wysokościowych chropowatości.

Dane tabelaryczne nie stanowią zbyt wygodnego w interpretacji i przemawiającego do wyobraźni materiału analitycznego. W celu wizualizacji wpływu procesu tarcia na strukturę geometryczną powierzchni wykreślono dla krążka krzywe nośności profilu chropowatości (wykresy Abbota - Firestona), będące reprezentacją rozkładu współczynnika długości nośnej (udziału nośnego) profilu chropowatości  $t_p$  w funkcji poziomu jego przecięcia  $y$ . Kolejne poziomy wyznaczano poczynając od bazy wspólnej dla powierzchni przed i po procesie tarcia, aby uwypuklić występujące między nimi różnice. Udział nośny profilu  $t_p$  jest równy stosunkowi sumy odcinków  $l_i$ , otrzymanych przez przecięcie profilu chropowatości linią równoległą do linii średniej, do długości odcinka elementarnego L, dla danego poziomu przecięcia  $y_i$ . Krzywe nośności, wyznaczone dla badanych fragmentów

powierzchni krążka na podstawie ich profili chropowatości (rys. 6), przedstawiono na rysunku 6.

Przebieg krzywych nośności ( $R_{m2} < R_{m1}$  oraz początkowa część krzywej po procesie tarcia, leżąca poniżej krzywej przed procesem tarcia) świadczy o obniżeniu w procesie tarcia profilu chropowatości badanej powierzchni krążka. Obserwuje się również poszerzenie profilu nierówności (odcinek krzywej nośności po procesie tarcia, leżący nieznacznie nad krzywą przed procesem tarcia), wskazujące na pokrycie dolnych części zboczy nierówności warstewką miedzi.



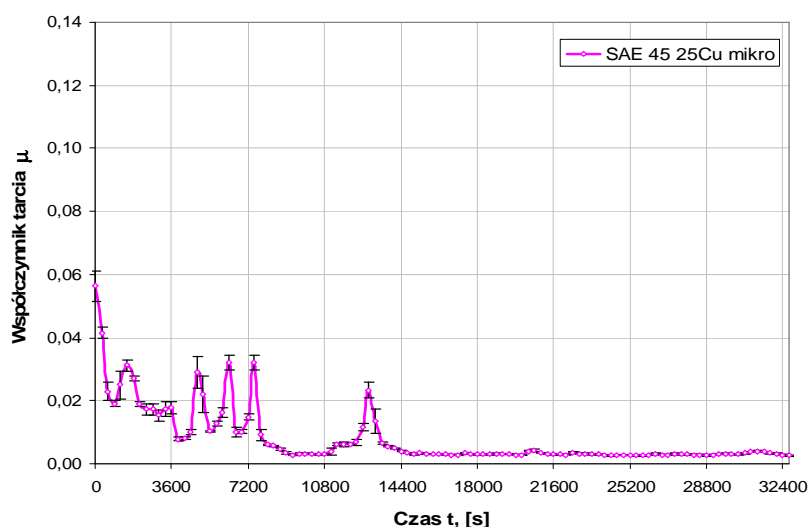
Rys. 6. Krzywa nośności powierzchni krążka

### 3. BADANIA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIE MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA NANOCZĄSTEK MIEDZI DO WYWOŁANIA ZJAWISKA GARKUNOWA

Warunkiem wystąpienia zjawiska Garkunowa jest, jak wspomniano we wstępie, rozdzielenie współpracujących tarciowo powierzchniach cienką warstewką miedzi o specyficznych właściwościach, umożliwiających lokalizację procesu tarcia w jej wnętrzu, podobnie jak to ma miejsce w przypadku warstewki olejowej. Warstewka taka może powstać nie tylko w rezultacie wykonania jednego z elementów systemu tribologicznego z miedzi lub jej stopu, ale z dużym prawdopodobieństwem w wyniku modyfikacji środka smarowego za pomocą dodatku mikro- lub nanocząstek miedzi. Dlatego też wykonano badanie możliwości generowania zjawiska Garkunowa w skojarzeniu stal C45/stal C45, pracującym w oleju bazowym SAE 30/95z dodatkiem mikrocząstek miedzi (rys. 7), trwające ponad 23 godziny dowodzi, że w odpowiednio długim czasie fluktuacje oporów



tarcia, reprezentowanych przez wartości współczynnika tarcia (charakterystyczne przede wszystkim dla jednoimiennych skojarzeń materiałowych), zanikają i opory te przyjmują najniższe wartości, zbliżone do wartości średniej wynoszącej 0,003. Największe zarejestrowane odchyłki od tej wartości nie przekraczają 17%. Taki przebieg charakterystyki oporów tarcia świadczy o stopniowym tworzeniu się podczas procesu tribologicznego trwałych warstwek niskotarciowych, powstających w efekcie zjawiska Garkunowa. Potwierdza to możliwość generowania tego zjawiska w wyniku modyfikacji oleju smarowego za pomocą dodatku cząstek miedzi.



Rys. 7. Charakterystyki tribologiczne skojarzenia stal C45 / stal C45, pracującego w oleju SAE 30/95 bez dodatku oraz z dodatkiem mikrocząstek miedzi, w warunkach stałego obciążenia o wartości 1150 N (celem poprawy czytelności rysunku wykres przedstawia charakterystykę w okresie 9 godz., ponieważ w dalszym okresie przebiegała na tym samym poziomie)

### 3. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że:

1. Możliwe jest uzyskanie zjawiska Garkunowa nie tylko w skojarzeniu tarciovym stal/miedź, ale także w skojarzeniu stal/stal, smarowanym olejem z dodatkiem mikrocząstek miedzi.
2. Proces tarcia w warunkach zjawiska Garkunowa prowadzi do zmiany wertykalnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni, co świadczy o pokryciu dolin mikronierówności warstwą miedzi, będącej jego niezbędnym atrybutem.

**4. BIBLIOGRAFIA**

- [1] Garkunov D. M. : Tribotechnology: Wear and No-wear. 4<sup>th</sup> ed. MAA Publishing House, Moscow 2001 (in Russian).
- [2] Filip I.: Studies and researches concerning the tribological behaviour of friction couple functioning with selective transfer. Tribology International 2006, vol. 39, issue 8, p 774.
- [3] Kotnarowski A.: Selective Transfer Phenomenon in Copper-Steel Tribological Systems. Solid State Phenomena 2009, Volume 147-149, p. 558-563.
- [4] Padgurskas J., Snitka V., Jankauskas V., Andriušis A: Selective transfer phenomenon in lubricated sliding surfaces with copper and its alloy coatings made by electro-pulse spraying. Wear 260 (2006), p. 652.
- [5] A. A. Polyakov: No wear due to friction based on coherent inter-action of dislocations and vacancies. No - wear Effect and Tribotechnologies, no. 1, 1992, p. 13.