

Andrzej KOTNAROWSKI¹

**KONSTYTUOWANIE WARSTW OCHRONNYCH KINEMATYCZNYCH
WĘZŁÓW MASZYN Z WYKORZYSTANIEM ZJAWISKA
BEZZUŻYCIOWEGO TARCIA**

Artykuł dotyczy aplikacji osiągnięć tribologii w eksploatacji kinematycznych węzłów maszyn. Została w nim przedstawiona metoda konstituowania warstw ochronnych na współpracujących tarczy powierzchniach elementów węzłów kinematycznych, minimalizująca niekorzystne skutki tarcia, takie jak opory ruchu i zużycie. Zaproponowano wykorzystanie zjawiska Garkunowa do wytwarzania tych warstw bezpośrednio w początkowym okresie procesu eksploatacji urządzenia technicznego. Skuteczność proponowanej metody dokumentują zaprezentowane w artykule wyniki badań własnych.

**GENERATION OF PROTECTIVE LAYERS OF KINEMATIC FRICTION
JOINTS USING NO-WEAR EFFECT**

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

¹ 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

zużywaniu polega głównie na pokrywaniu współpracujących tarciowo powierzchni warstwami ochronnymi.

Rodzaj stosowanych powierzchniowych warstw ochronnych, które mogą być konstytuowane zarówno jako warstwy wierzchnie, jak i powłoki, zależy od przewidywanych warunków eksploatacji skojarzeń tarciowych. 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 konstytuowanie warstw powierzchniowych w procesach eksploatacji. Jednym ze sposobów uzyskiwania eksploatacyjnych warstw ochronnych jest realizacja w styku tarciowym 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. 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.

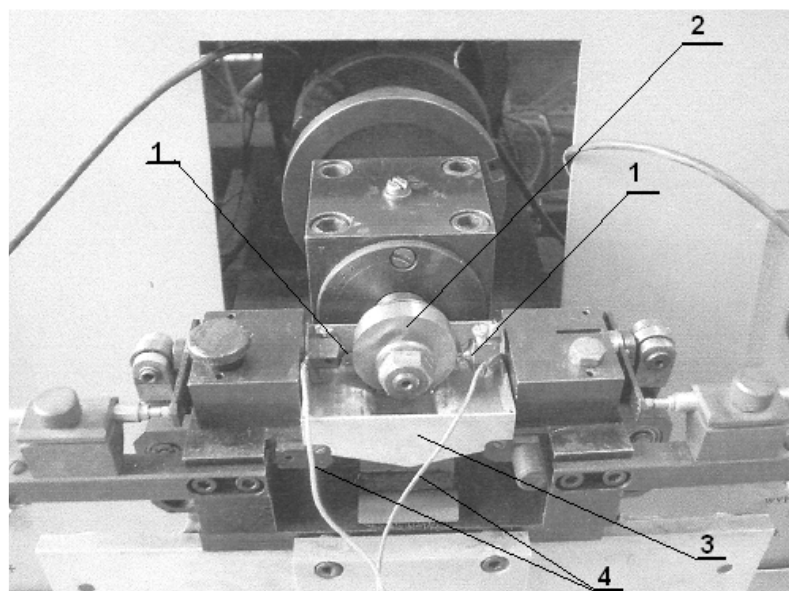
Należy podkreślić, że w publikacjach na temat zjawiska Garkunowa [1-5] nie odnotowano prób jego wywołania w skojarzeniach stali z czystą miedzią. Niniejszy artykuł omawia wyniki wstępnych badań autora nad możliwością generowania tego zjawiska w takim układzie materiałowym, stosowanym, miedzy innymi,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

2. BADANIA MOŻLIWOŚCI WYWOŁANIA ZJAWISKA GARKUNOWA

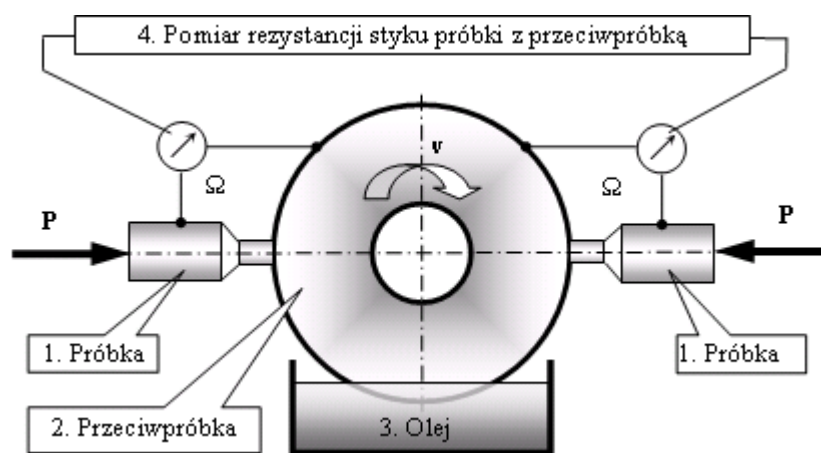
2.1. Badania tribologiczne

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 węzle tarciowym, z przeciwpróbką wykonaną ze stali C45 współpracowała próbka z miedzi tlenowej M1E, wycięta z przewodu trakcyjnego (rys. 1b).



a)

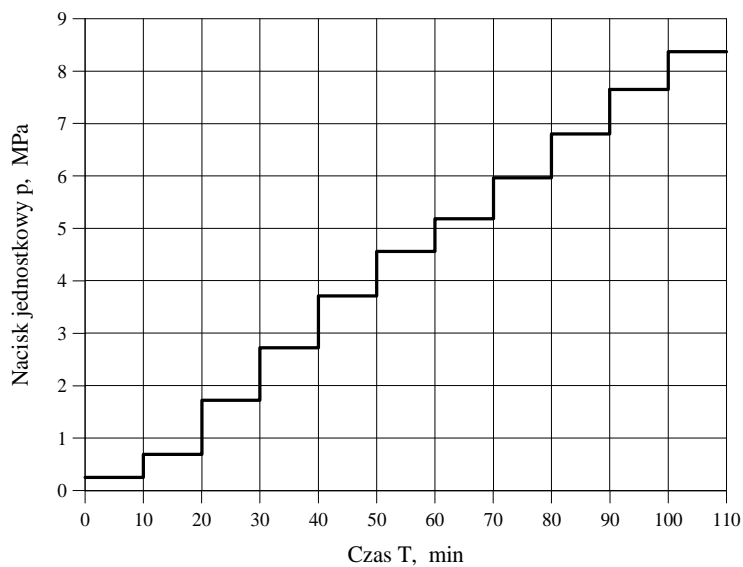


b)

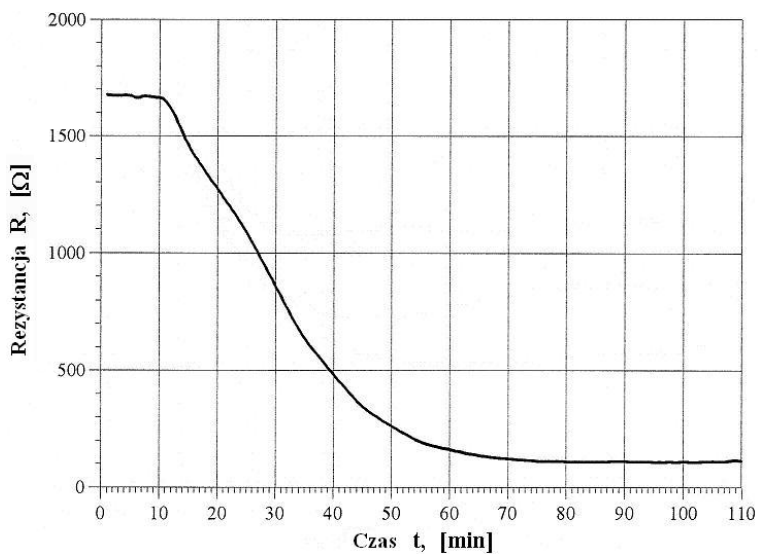
Rys. 1. Maszyna tarciova MT-2: a) widok czołowy; b) schemat węzła tarcia

W trakcie badania obciążenie węzła tarcia narastało w sposób skokowy (rys. 2).

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 (zgodnie z rys. 2). Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 3 i 4.



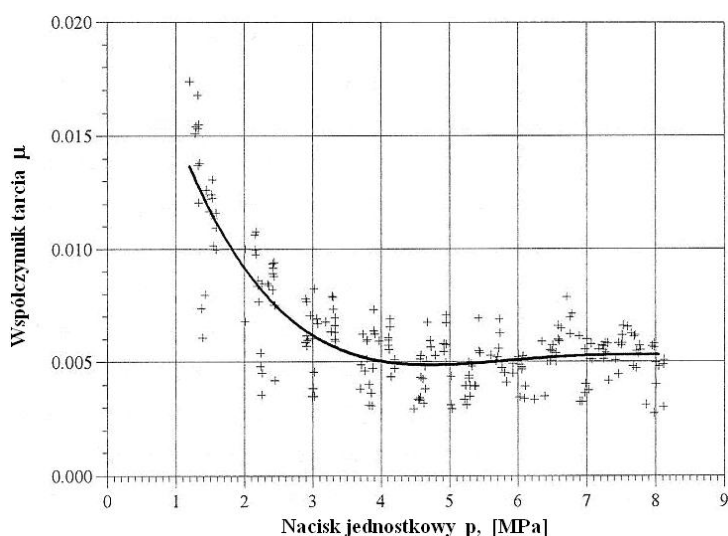
Rys. 2. Przebieg obciążenia węzła tarcia maszyny MT-2 w funkcji czasu



Rys. 3. Przebieg rezystancji styku tarcowego w funkcji czasu dla miedzi tlenowej MIE

Z rysunku 3 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, świadcząca o wystąpieniu styku metalicznego pomiędzy próbką i przeciwpróbką. Wartość współczynnika tarcia (rys. 4) 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.

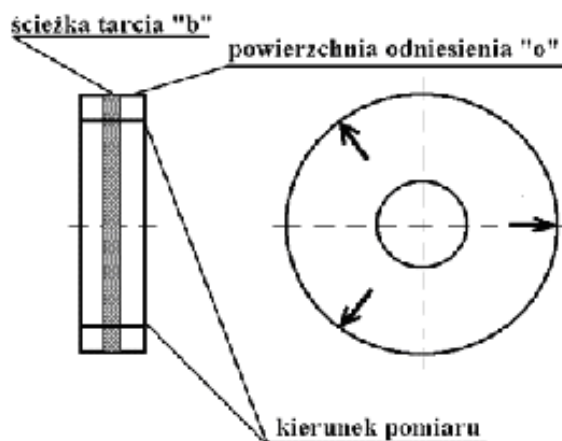


Rys. 4. Przebieg współczynnika tarcia w funkcji nacisku jednostkowego dla miedzi modyfikowanej MIM

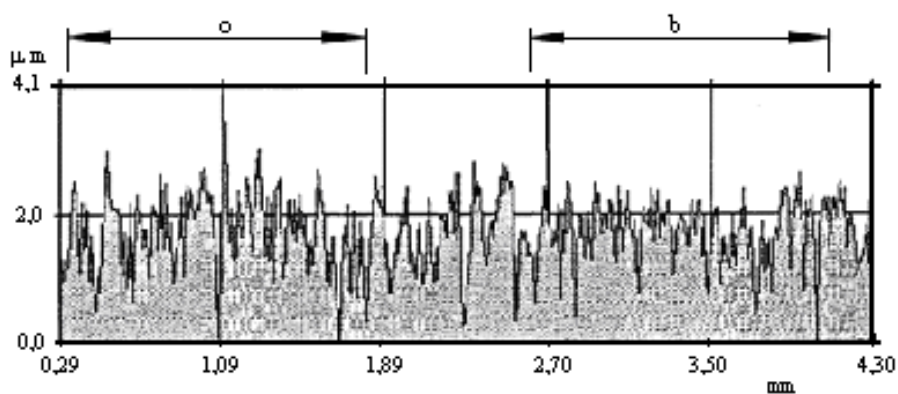
2.2. Badania struktury geometrycznej powierzchni tarcia

Celem badań była ocena wpływu procesu tarcia na strukturę geometryczną powierzchni (SGP) tarcia przeciwpróbkki 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 mikrostereometrii 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 5. Rysunek 6 przedstawia odwzorowany profil chropowatości przeciwpróbkki wzdłuż jednej z tworzących, a w tabelicy 1 przedstawiono wartości średnie i odchylenia standardowe wyznaczonych parametrów



Rys. 5. Obszary krążka analizowane w badaniach SGP



Rys. 6. Profil chropowatości krążka

Tab. 1. Wyniki pomiarów parametrów SGP badanego krążka

Powierzchnia poddana analizie		Ra	Rq	Sk	Rku	Rp	Rm	D	Sm	\bar{r}	Δq
		[μm]	[μm]			[μm]	[μm]	[1/mm]	[μm]	[μm]	
o	śr.	0,52	0,66	-0,1	2,8	1,8	3,7	34,5	70,8	12,7	0,17
	σ	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
	σ	0,02	0,02	0,1	0,2	0,1	0,0	0,7	0,9	1,1	0,01

Analizując przedstawione w tabelicy 1 wyniki pomiarów SGP można stwierdzić, że parametry opisujące cechy wysokościowe mikronierówności badanych powierzchni (R_a , R_q , R_p , R_m), 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.

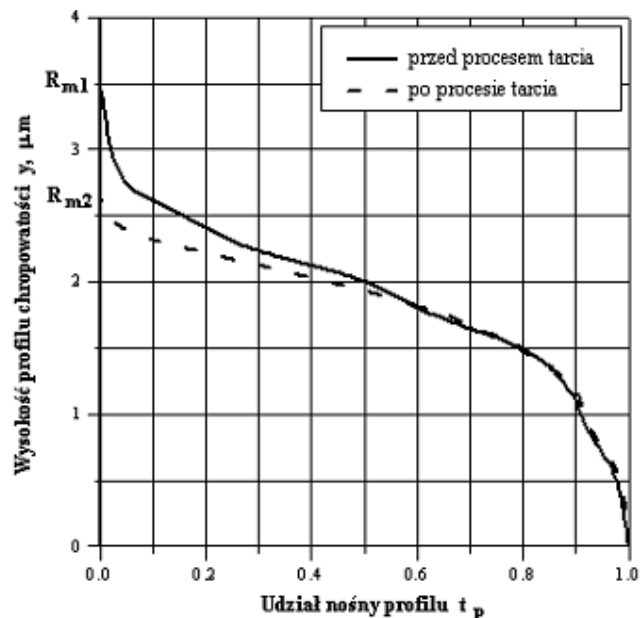
Zauważa się również, że wartości współczynnika skośności profilu chropowatości (S_k) są zawsze mniejsze na ścieżce tarcia niż na powierzchni wyjściowej. Natomiast wartości kurtosis rozkładu odchyłeń profilu od linii średniej (R_{ku}), wyznaczone na ścieżce tarcia, są na ogół większe niż na powierzchni wyjściowej. Takie różnice pomiędzy wartościami S_k i R_{ku} , 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 Δq) dokumentują wzrost średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności \bar{r} i zmniejszenie średniego kwadratowego pochylenia profilu Δq 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 (S_m 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 7.

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 warstwą miedzi.



Rys. 7. Krzywa nośności powierzchni krążka

3. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że:

1. Możliwe jest uzyskanie zjawiska Garkunowa w skojarzeniu tarciovym stal/miedź.
2. Proces tarcia w warunkach zjawiska Garkunowa prowadzi do zmiany wertykalnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni, dostarczają również dowodu na pokrycie dolin mikronierówności warstewką miedzi.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Garkunov D. M.: Tribotechnology: Wear and No-wear. 4th 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.