

Jan BURCAN*

PROBLEMY TARCIA WIERTNEGO W STYKU SKONCENTROWANYM

THE QUESTIONS OF SPINNING FRICTION IN AN ELASTIC POINT OF CONTACT

Słowa kluczowe:

tarcie suche technicznie, styk punktowy, struktura powierzchni, rozkład naprężeń, ślady współpracy

Key-words:

technical dry friction, contact point, surface structure, distribution of stresses, traces of mating elements

Streszczenie

Opisano model skoncentrowanego styku punktowego uwzględniający naprężenia styczne wynikające z tarcia zewnętrznego. Naprężenia styczne zmieniają charakter i wielkość wypadkowych naprężeń w warstwie wierzchniej. Wartości zredukowanych naprężeń mogą wzrosnąć w stosunku do wartości nacisków nawet o 100%, zaś obszar zalegania o 30%. Powoduje to występowanie odkształceń plastycznych na współpracujących powierzchniach oraz ich intensywne zużywanie podczas tarcia.

* Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: janburcan@gmail.com.

WPROWADZENIE

W węzłach, w których występuje styk punktowy podczas obrotu wokół wspólnej normalnej do współpracujących powierzchni, wystawionej w punkcie ich styku, występuje tarcie wiertne. Zazwyczaj, z uwagi na złożony charakter ruchu, jest ono jednym z sumarycznych oporów tarcia występujących w danym węźle. Duże straty wywołane tarciem wiertnym występują w ciernych przekładniach talerzowych i grzybowych, o zmiennym przełożeniu, podczas toczenia się rolki po tarczy. W toczyńskich poprzecznych opór tarcia wiertnego kulek po bieźni występuje przy kącie działania różnym od zera, a więc przy obciążeniu wzdłużnym. Tarcie wiertne występuje także w ślizgowych łożyskach kulowych zarówno z panewką kulistą, jak i z panewką stożkową, w łożyskach kielkowych, we wzdłużnych łożyskach nakrywkowych mechanizmów zegarowych itp.

Pomimo różnic konstrukcyjnych w wymienionych wyżej rozwiązaniach zachodzi pewne podobieństwo zjawisk występujących podczas obrotu jednego ciała względem drugiego, wokół wspólnej normalnej w punkcie ich największego zbliżenia, granicznie, w punkcie ich styku. Zwykle w pierwszym podejściu analizowany jest model węzła ciernego składającego się z dwu ciał o idealnie gładkich powierzchniach sferycznych, współpracujących w ruchu wirowym.

Zależność oporów ruchu od obciążenia dla styku skoncentrowanego z tarciem wiertnym jest słabo poznana. W dostępnej literaturze wyraźnie brakuje danych pozwalających na sformułowanie uogólniających wniosków. Publikowane wyniki dotyczą zwykle specyficznych rozwiązań bądź też wąskiego zakresu pracy łożyska.

Rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej, w przypadku styku walca z powierzchnią płaską, uwzględniający naprężenia styczne wynikające z tarcia zewnętrznego (dla przypadku toczonego łożyska wałeczkowego), jest dość dobrze poznany teoretycznie i potwierdzony eksperymentalnie. W dostępnych opracowaniach literaturowych brak jest publikacji analizujących rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej dla przypadku styku kuli z powierzchnią płaską, wykonującej obrotowy ruch wiertny dookoła wspólnej normalnej w punkcie styku. Naprężenia styczne wynikające z tarcia zewnętrznego zmieniają charakter i wielkość jednostkowych obciążeń występujących w warstwie wierzchniej. Wartości zredukowanych naprężeń mogą wzrosnąć, w stosunku do wartości nacisków, nawet o 100%, zaś obszar zalegania o 30%. Powoduje to występowanie od-

kształceń plastycznych współpracujących powierzchni oraz ich intensywne zużywanie podczas tarcia.

WARUNKI SMAROWANIA

Warunkiem powstawania hydrodynamicznego ciśnienia w smarowanym węźle z tarciem wiernym jest, obok istnienia ruchu, dobór odpowiednich kształtów współpracujących partnerów, w taki sposób, aby krzywizny współpracujących powierzchni spełniały warunek:

$$(R_x - R_y) \neq 0 \quad (1)$$

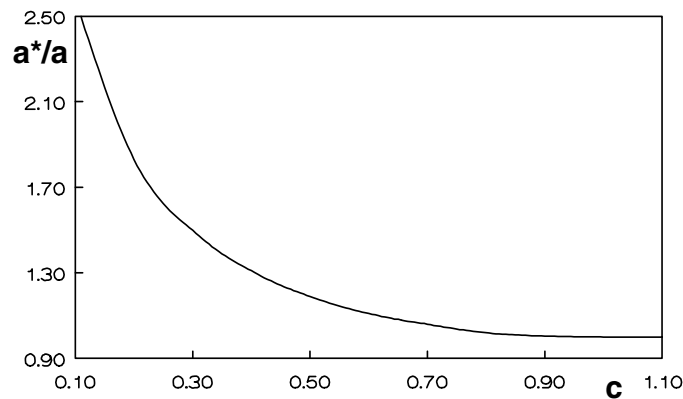
Spełnienie powyższego warunku jest możliwe tylko wtedy, gdy co najmniej jedna z współpracujących powierzchni nie jest osiowo-symetryczna względem wspólnej normalnej, wokół której następuje wirowanie. I tak, w przypadku wirowania dwu ciał w kształcie czasz kulistych wokół wspólnej normalnej, niezależnie od innych warunków, nie może powstać inne ciśnienie hydrodynamiczne, ponieważ: $R_x = R_y$. Podobnie, wirowanie czaszy kulistej na płaszczyźnie nie może wywołać powstawania ciśnienia hydrodynamicznego. Zatem dla tych przypadków, bez względu na inne warunki, nie może powstać klin smarny.

W łożyskach tocznych podczas współpracy kulek z rowkami bieżni w ruchu wirowym może powstać klin smarny z ciśnieniem hydrodynamicznym, ponieważ rowek bieżni nie jest osiowo-symetryczny względem wspólnej normalnej w punkcie największego zbliżenia powierzchni.

WARTOŚCI NACISKÓW W STYKU

Warunki pracy takich węzłów są bardzo trudne, gdyż skoncentrowane naciski osiągają bardzo duże wartości, a uzyskanie warunków smarowania płynnego nie jest możliwe [L. 1, 2]. Powoduje to intensywne zużywanie współpracujących powierzchni oraz duże opory ruchu (współczynnik tarcia zwykle osiąga wartości z zakresu od współczynników tarcia technicznie suchego do fizycznie suchego [L. 3], często $\mu > 1$). Wartości nacisków w styku są porównywalne z granicą plastyczności. Jednoczesne występowanie naprężeń stycznych powoduje znaczne przekroczenie tej granicy i plastyczne płynięcie materiału w miejscu współpracy. Wzrasta promień i powierzchnia pola styku oraz opory ruchu. Na **Rys. 1** przedstawiono przykładowo względną zmianę wartości promienia styku a^*/a

w funkcji współczynnika obciążenia c . Wartości względnego promienia styku można wyznaczyć z zależności (2).



Rys. 1. Zależność względnego promienia styku a^*/a w funkcji współczynnika obciążenia c

Fig. 1. Dependence of relative radius of contact a^*/a in the function of the load factor c

$$a^*/a = \sqrt{\frac{2}{c(3-c^2)}} \quad (2)$$

gdzie: a^* – promień pola styku w przypadku odkształceń sprężysto-plastycznych, a – promień pola styku w przypadku odkształceń sprężystych (przy założeniu, że granica plastyczności dąży do nieskończoności).

Wzór (2) wyprowadzono zakładając elipsoidalny rozkład naprężeń oraz przyjmując, że materiały mają wyraźną granicę plastyczności.

Współczynnik c określa zależność (3).

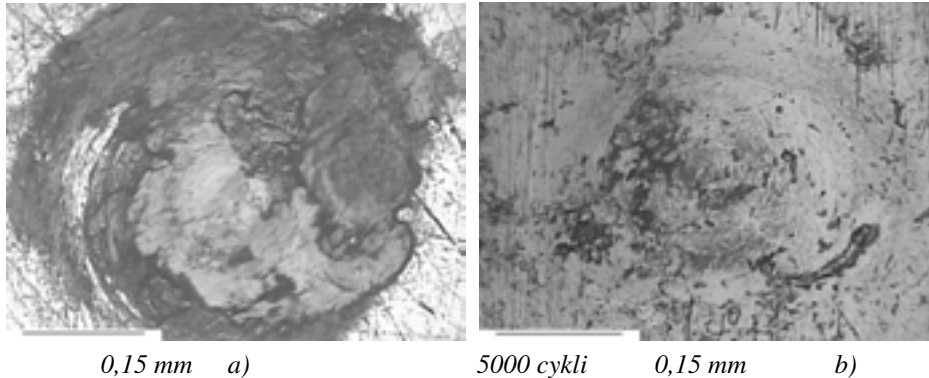
$$c = p_{pl}/p \quad (3)$$

p – maksymalne naprężenia występujące na powierzchni styku

p_{pl} – naprężenia powodujące plastyczne odkształcenie styku.

Powyższe spostrzeżenia potwierdzają obserwacje śladów zużycia, których wymiary są znacznie większe niż wyznaczone teoretycznie ze wzorów Hertza (**Rys. 2**).

Badania uwzględniające chropowatość powierzchni dowiodły, że wartości nacisków w mikronierównościach przekraczają o rząd i więcej wartości liczone dla styku idealnie gładkich powierzchni, a rzeczywiste pole styku stanowi kilka procent pola nominalnego (obliczonego ze wzorów Hertza dla styku idealnie gładkich powierzchni) [L. 1, 4]. Współczynnik c osiąga lokalnie wartości rzędu 0,1 lub mniej. Taki stan obciążeń, obok złożonego charakteru ruchu, może stanowić główną przyczynę znacznego zwiększania pola styku podczas tarcia.



Rys. 2. Ślady współpracy czopa stalowego z ŁH15 z płytką wykonaną: a) z brązu B1010, b) stali C45

Fig. 2. Traces of mating steel pivot and the plate made of a) B1010 bronze, b) C45 steel

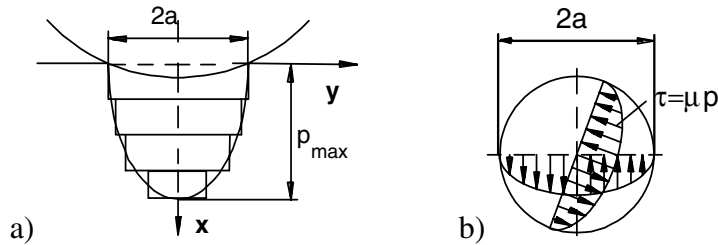
MODEL OBLICZENIOWY

Dla pełnego wyjaśnienia przyczyn powiększania pola styku w stosunku do jego wymiarów wyznaczonych ze wzorów Hertza opracowano model węzła łożyskowego, który uwzględnia działanie naprężeń stycznych wynikających z tarcia zewnętrznego. Jego graficzną ilustrację przedstawiono na **Rys. 3**. W przypadku styku kuli z powierzchnią płaską rozkład nacisków ma kształt elipsoidy obrotowej o półosiach a i p_{max} (**Rys. 3a**).

W analizowanym modelu elipsoidalny rozkład nacisków zastąpiono sumą rozkładów prostokątnych (**Rys. 3a**). Przyjętemu modelowi nacisków będzie zatem odpowiadał podobny rozkład naprężeń stycznych pochodzących od tarcia zewnętrznego wyliczony z równania (4).

$$\tau = \mu p \quad (4)$$

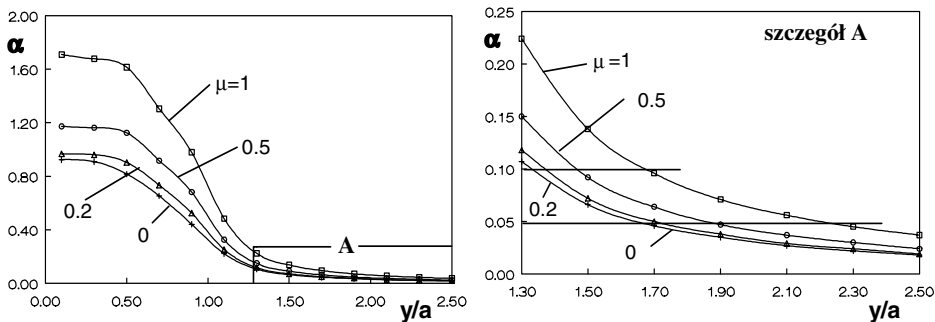
Przestrzenny rozkład naprężeń sprowadzono do rozkładu płaskiego oraz założono, że współczynnik tarcia nie zależy od wartości nacisków. Należy zauważyć, że podczas ruchu wiertnego zmienia się ustawicznie kierunek działania naprężeń stycznych (**Rys. 4b**), co komplikuje obliczenia.



Rys. 3. a) zamiana elipsoidalnego rozkładu naprężeń na prostokątny, b) kierunki działania naprężeń stycznych w tarcii wiertnym

Fig. 3. a) The change of ellipsoidal distribution of stresses for the rectangular one, b) Directions of acting the tangential stresses in the spinning friction

Przeprowadzone obliczenia, zgodnie z teorią sprężystości [**L. 5**] dowodzą, że naprężenia styczne wynikające z zewnętrznego tarcia zwiększają wartości naprężeń zredukowanych w styku. Zależność względnych naprężeń zredukowanych α od parametru y/a (dla oznaczeń przyjętych na **Rys. 3a**), przy ustalonej wartości x i dla różnych współczynników tarcia, przedstawia **Rys. 4**. Współczynnik α określa stosunek naprężeń zredukowanych w danym punkcie, w przypadku działania na powierzchni naprężeń normalnych i stycznych, do naprężeń występujących podczas działania wyłącznie nacisków normalnych.

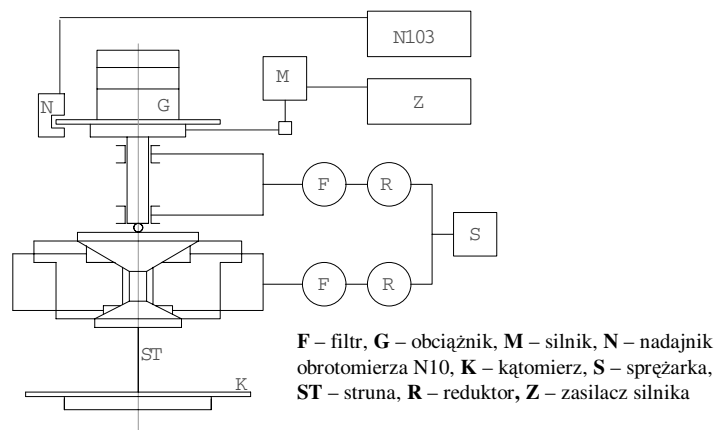


Rys. 4. Zależność względnych naprężeń zredukowanych od naprężeń zredukowanych α

Fig. 4. Dependence of reduced relative stresses on α parameter

MODELOWE BADANIA EKSPERYMENTALNE

Modelowe badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku, schemat na **Rys. 5**.



Rys. 5. Schemat stanowiska do pomiaru momentu tarcia

Fig. 5. Scheme of the research stand for the friction moment measurement

Przedmiotem badań było określenie charakterystyk łożyska typu: płytko–czasza kulista, pracującego w warunkach tarcia wiernego. Do badań użyto płytki wykonane z tworzyw sztucznych (Itamid G), stopów łożyskowych, spieków, stali, brązu, azotku tytanu. Czopy były wykonane ze stopów stali łożyskowej ŁH15 oraz szkła. Promień kulistej czaszy czopa zmieniał się co 0,5 mm od $R = 2$ do $R = 10$ mm. Podczas badań rejestrowano moment tarcia dla różnych obciążeń i prędkości kątowych, które były stabilizowane i regulowane w sposób ciągły.

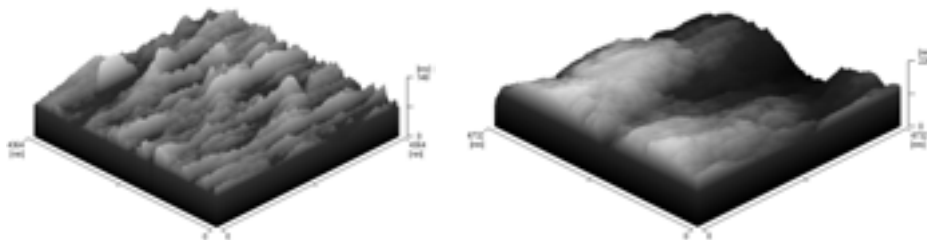
Dla materiałów czopa i płytki przewodzących prąd określano rodzaj tarcia, mierząc rezystancję w węźle ciernym. Pomiar potwierdził, dla całego zakresu prędkości kątowych i obciążeń, występowanie tarcia technicznie suchego dla różnych środków smarnych.

Rejestrowano wartości momentu tarcia i ślady zużycia pary ciekiej po określonym przebiegu. Podczas pomiarów obserwowano ślady w skali makro (**Rys. 2**) oraz ślady z mikroskopu tunelowego, w skali nano (**Rys. 6**).

OPORY TARCIA W WIRUJĄCYM STYKU PUNKTOWYM

Jak wiadomo, w przypadku wirowania powierzchni kulistej w osiowo-symetrycznym gnieździe lub płaskiej powierzchni z zasilaniem lub bez

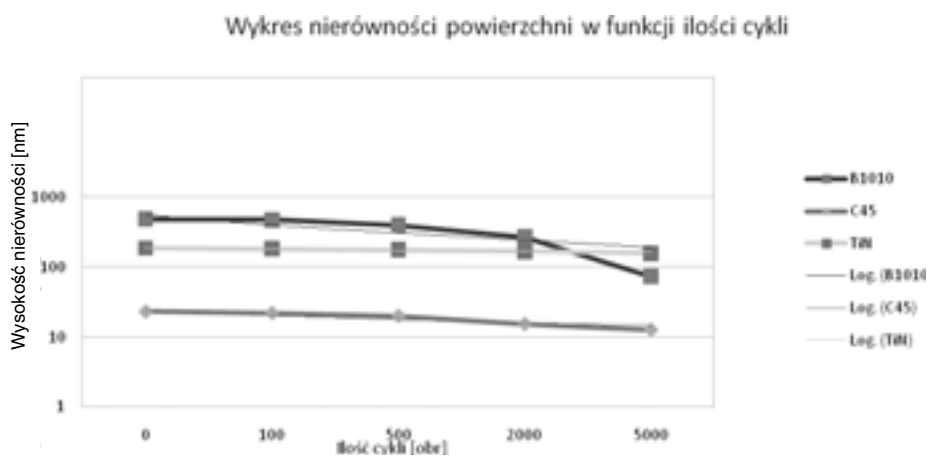
zasilania węzła z zewnątrz czynnikiem smarującym, zawsze będzie występowało tarcie suche technicznie, a w wyjątkowo sprzyjających warunkach graniczne, niezależnie od tego, ile czynnika znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie obszaru styku.



Rys. 6. Przykładowe ślady współpracy czopa kulistego z płytką

Fig. 6. Exemplary traces of mating spherical pivot and the plate

Najbardziej intensywne zużycie następuje podczas pierwszych cykli współpracy. W miarę trwania dalszej współpracy następuje zmniejszanie oporów tarcia i pewna jego stabilizacja (**Rys. 7**).



Rys. 7. Przykładowe zmiany nierówności śladów zużycia na płytkach z różnych materiałów

Fig. 7. Exemplary changes of roughness of the wear traces on the plates made of different materials

Podobnie zmieniały się wartości współczynnika tarcia – **Rys. 8**.

Bardzo istotne różnice występowały pomiędzy parami czop stalowy–płytko metalowa, z jednej strony i parami czop szklany–płytko metalowa z drugiej strony. Pary z czopem szklanym wykazywały mniejsze wartości oporów ruchu i mniej intensywne zużywanie, przy szybszym dochodzeniu do stanu stabilizacji.



Rys. 8. Przykładowy przebieg współczynnika tarcia w funkcji liczby cykli dla płytki tytanowej

Fig. 8. Exemplary course of moment of friction in the function of cycles number for titanium plate

Badano dwa typy skojarzeń. W pierwszym kojarzono twarde czopy z miękkimi płytkami. W przypadku tym czopy nie miały zauważalnych śladów zużycia, natomiast powierzchnie płytek uległy znacznemu zużyciu. Drugim rodzajem skojarzenia było zestawienie czopów stalowych z płytkami wykonanymi z bardzo twardej ceramiki lub minerałów. Występowało wówczas wyraźnie rozmazywanie na płytce materiału czopa, który był mniej odporny na ścieranie niż płytka.

Z obserwacji śladów przedstawionych na **Rys. 5 i 6** można przypuszczać, że w strefie styku występuje wysoka temperatura. Jednak zmierzone wartości objętościowej temperatury, pomimo znacznego zminiaturyzowania płytki i umieszczeniu jej w osłonie zabezpieczającej przed utratą jej ciepła przez wirującą czaszę kulistą, nie przekraczały przyrostów 1°C . Można sądzić, że wysokie wartości temperatury, powodujące lokalne przetapianie materiału, występują lokalnie w bardzo krótkich okresach.

Moment wiertnego tarcia spoczynkowego jest równy momentowi tarcia kinetycznego.

Znajomość równania toru, po którym przemieszcza się punkt styku współpracujących ciał, jest niezbędna dla określenia własności i charakteru ruchu. Analiza równania pozwala uzyskać rozkłady prędkości przyspieszeń oraz obciążeń stycznych pomiędzy współpracującymi ciałami. Na ich podstawie możliwe jest wyjaśnienie zjawisk zachodzących w styku [L. 2, 3, 4].

LITERATURA

1. Burcan J., Krzanowski K.: Analiza warunków tarcia w styku punktowym. XVIII Jesienna Szkoła Tribologiczna, Kołobrzeg 1992: publikowane w materiałach konferencyjnych.
2. Burcan J.: Analiza styku punktowego w odniesieniu do stanu powierzchni roboczych. XVII Szkoła Tribologiczna, Bystre k. Baligrodu 1991, publikowane w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, MECHANIKA, z.28, s. 439–445.
3. Burcan J.: The Geometric Structure of Working Surface and Functional Parameters of Frictional Kinematic Pairs. TRIBOLOGIA, NR 5`90 (113), 1990, s. 4–7.
4. Burcan J.: Zagadnienia tarcia wiertnego w sprężystym styku punktowym. ZEM, zeszyt 1 1986, s. 153–164.
5. Krzyś W., Życzkowski M.: Teoria sprężystości i plastyczności, PWN, Warszawa 1962.

Recenzent:
Marek WIŚNIEWSKI

Summary

The paper presents tangential stress as a result of friction change in the stress distribution in upper surface layer. The increase of this stress may be up to 100% at field of acting greater to 30%. It causes plastic deformation of mating surfaces and their intensive wear during work.