

# TARCIE ORAZ JEGO WPŁYW NA STABILNOŚĆ PRACY WYBRANYCH WIRUJĄCYCH ZESPOŁÓW MECHANICZNYCH CZ. I

*Opracowanie traktuje o zjawisku tarcia, jego klasyfikacji oraz wpływie na stabilizację pracy wirujących zespołów mechanicznych. Rozważono przypadek wałów korbowych wielocylindrowych silników spalinowych, które na skutek absorbowanych obciążeń wykazują skłonność do drgań skrętnych. Brak tłumienia drgań zagraża zjawiskiem rezonansu oraz uszkodzeniem zespołu. Dla osiągnięcia i utrzymania stanu statecznej pracy wałów korbowych rozpatruje się możliwość rozpraszania energii drgań z wykorzystaniem tarcia wewnętrznego w płynach (olejach silikonowych), które współtworzą pasywne, wiskotyczne tłumiki drgań skrętnych.*

## WSTĘP

Tarcie jest jednym z podstawowych zjawisk towarzyszących pracy urządzeń mechanicznych, które poprzez swą obecność, wpływa bezpośrednio na charakter i efektywność ich pracy. Wywoływane tarcie zmiany (rozpraszanie) energii mechanicznej sprawiają, że każdorazowo powinno się go uwzględniać w procesach projektowania i eksploatacji maszyn.

W większości przypadków oddziaływanie tarcia ma negatywny wpływ na konstrukcje (zużycie lub pęknięcia powierzchni współpracujących, straty energii). Istnieją natomiast aplikacje w których tarcie nie pogarszając funkcjonalności przyczynia się do stabilizacji pracy i zwiększenia żywotności mechanizmów. Przykład tego mogą być tłumiki drgań skrętnych stosowane w wielocylindrowych silnikach spalinowych. Tarcie jest w nich wykorzystywane do ograniczania drgań wywołanych cyklicznymi obciążeniami, które często doprowadzają do zmęczeniowych uszkodzeń wałów (Rys.1).

## 1. TARCIE

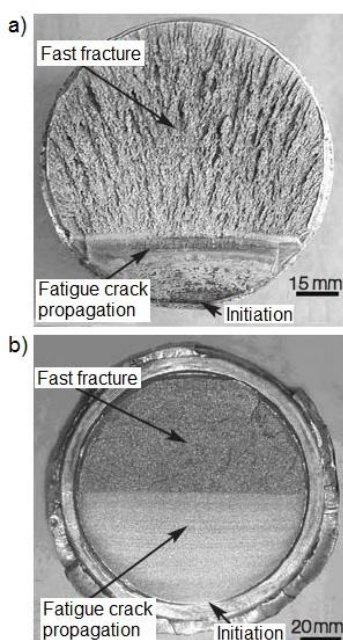
Analiza zagadnień związanych z tarcie, mimo iż rozwijana na przestrzeni kilku ostatnich wieków, wciąż pozostaje nie w pełni określona i nie posiada uniwersalnego opisu matematycznego. Udoskonalane metody badań wspierane stosowną aparaturą pomiarową pozwalają co prawda na dogłębne poznanie natury tarcia, jednak opracowane w ten sposób zależności sprawdzają się na ogół jedynie w określonych warunkach. Na tym gruncie powstawały kolejne hipotezy tarciove. Te najważniejsze, odnoszące się do tarcia suchego, to:

- *teoria mechaniczna* Amontonsa-Coulomba i Bowdena
- *teoria molekularna* Tomlinsona i Dieragiaga
- *teoria molekularno-mechaniczna* Kragielskiego

Różnią się one między sobą interpretacją mechanizmów wpływających na generowany opór w ruchu względnym ciał (atomów, cząsteczek) oraz towarzyszący mu proces rozpraszania energii. To z kolei determinuje konieczność wielowymiarowego podejścia do kwestii tarcia i postrzegania go jako grupy wzajemnie przenikających się zjawisk w obszarze styku przemieszczających się ciał. Zjawiskom tym towarzyszą powstające opory ruchu, mierzone wartością siły tarcia uzależnionej proporcjonalnie od współczynnika tarcia. W zależności od rodzaju występującego tarcia (charakteru ruchu względnego ciał) wyróżnia się odpowiednio współczynniki tarcia ślizgowego, tocznego lub statycznego. Z kolei z uwagi na miejsce występowania, tarcie dzielimy na:

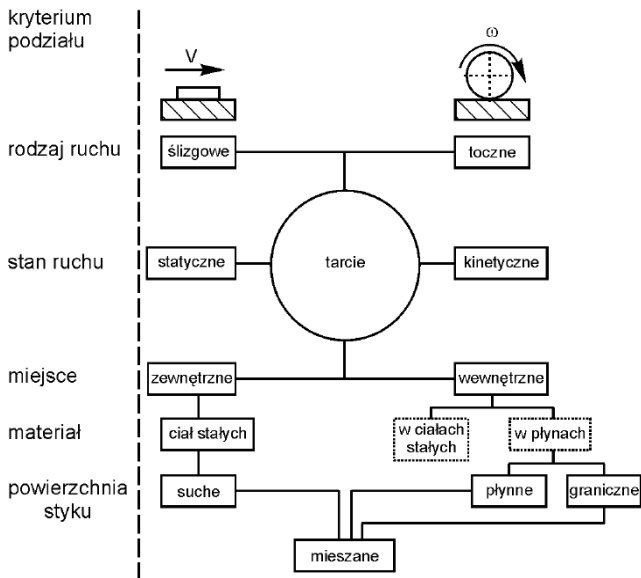
- wewnętrzne* – powstające wewnątrz jednego ciała, w którym przemieszczają się względem siebie atomy, grupy atomów bądź cząsteczki chemiczne
- zewnętrzne* – powstające przy styku ciała stałego z innym ciałem stałym lub płynem (cieczą albo gazem)

Spore odległości pomiędzy sąsiednimi cząsteczkami sprawiają że tarcie wewnętrzne w gazach jest niewielkie, natomiast wzrasta dla cieczy oraz ciał stałych z tytułu znacznych sił spójności pomiędzy ich pojedynczymi atomami. Analogicznie, największe tarcie zewnętrzne daje się obserwować w przypadku kontaktu dwóch ciał stałych pomiędzy którymi nie ma w ogóle środka smarującego. Opór ruchu względnego powierzchni trących w takim przypadku jest wynikiem zaczepiania się nierówności powierzchni oraz ich szczytowania adhezyjnego. Przyjmuje się, że od 80 do 95% traconej ener-



**Rys. 1.** Przekłomy zmęczeniowe wałów powstałe na skutek długotrwałych, cyklicznych obciążeń [16].

gii mechanicznej jest dla takiego przypadku rozpraszane w postaci ciepła. Pozostała część energii jest przeznaczana na tworzenie defektów, pęknięć, deformację plastyczną powierzchni kontaktowych, ścieranie materiałów, elektryzowanie powierzchni, emisję fotonów bądź wibracje. Dowiedziony doświadczalnie wpływ parametrów fizycznych na charakter i wartość bezwzględną tarcia, determinuje jego podział ze względu na rozważane kryteria, np. dotyczące rodzaju ruchu (Rys. 2, Rys. 3).



Rys. 2. Różne kryteria podziału tarcia [7].

Kryterium podziału	Rodzaje tarcia		
Ruch	Tarcie spoczynkowe		
	Tarcie kinetyczne	Tarcie ślizgowe	Tarcie toczne
Lokalizacja	Zewnętrzne	Tarcie suche	
	Wewnętrzne	W płynach	Tarcie płynne
			Tarcie graniczne
		W ciałach stałych	Odkształcenia plastyczne
Odkształcenia sprężyste			

Rys. 3. Klasyfikacja tarcia ze względu na jego lokalizację oraz kinetykę powierzchni kontaktowych [8].

Poza ściśle dedykowanymi aplikacjami jak np. hamulce, sprzęgła i przekładnie ciernie, transportery czy napędy linowe, ze względu na odnotowywane spore straty energii oraz postępujące zużycie współpracujących powierzchni, tarcie zewnętrzne w obszarze konstrukcji maszyn jest postrzegane jako zjawisko negatywne. Kontakt fizyczny powierzchni nie oddzielonych medium smarującym obniża zakładaną żywotność mechanizmów, dlatego tam gdzie jest to możliwe należy dążyć do całkowitego wyeliminowania tarcia suchego (Rys. 4). Chcąc ograniczyć negatywne skutki tarcia (zużycie i uszkodzenia powierzchni, obniżenie sprawności, wydzielanie ciepła) stosuje się środki smarne, wzmacnia powierzchnie współpracujące dodatkowymi powłokami o niskiej chropowatości i wysokiej odporności na ścieranie (np. teflon, ceramika, hartowanie, nawęglanie) lub też odpowiednio kształtuje ich strukturę geometryczną. Intensywność zużycia współpracujących powierzchni komponentów zależy zarówno od charakteru tarcia, jak też od wartości przyłożonego obciążenia. Zasadniczym wyzwaniem przy projektowaniu

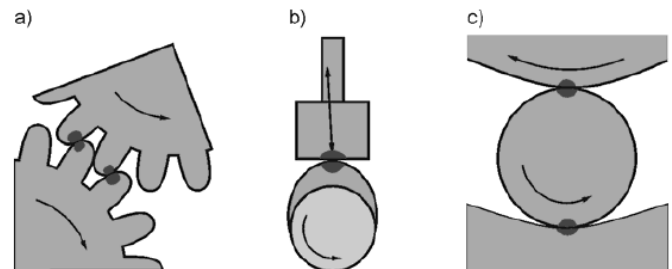
współczesnych węzłów kinematycznych jest więc zapewnienie ciągłej pracy mechanizmów w warunkach tarcia płynnego, przez co wpływa się na wzrost ich trwałości. Zależnie od metody powstawania warstwy smarującej rozróżnia się smarowanie hydrostatyczne (wytworzenie w środku smarnym przy użyciu urządzeń zewnętrznych ciśnienia które pozwoli skutecznie rozdzielić współpracujące powierzchnie) oraz hydrodynamiczne (niezbędna warstwa cieczy smarnej powstaje w wyniku ruchu względnego obu współpracujących elementów). Największe zagrożenie powstania uszkodzeń powierzchni współpracujących obserwowane jest podczas rozruchu, kiedy to wysoko obciążone powierzchnie tocząc lub ślizgając się jedna względem drugiej mogą doprowadzić do powstawania rys a nawet wrywania fragmentów powierzchni. Zatem jedynymi zalecanymi rodzajami tarcia są:

**tarcie graniczne** – między powierzchniami trącymi stykających się ciał występuje warstwa smaru zapewniająca częściowe ich odseparowanie (powierzchnie kontaktują się jedynie wierzchołkami występow)

**tarcie płynne** – współpracujące powierzchnie skojarzenia trącego są całkowicie rozdzielone przez środek smarny



Rys. 4. Elementy układu korbowego silnika uszkodzone na skutek niedostatecznego smarowania powierzchni kontaktowych w węzłach kinematycznych [14].



Rys. 5. Przykłady występowania styku liniowego (a – przekładnia zębata, b – mechanizm krzywkowy) i punktowego (c – kulka pomiędzy bieżniami tożyska) [8].

Analizując zagadnienia tarcia należy zwrócić uwagę na fakt, iż dla zadanej wartości obciążenia, parametry tarcia, jego rodzaj i

intensywność są ściśle powiązane z kształtem geometrycznym współpracujących ze sobą elementów skojarzenia trącego. Podstawowa klasyfikacja wyróżnia tutaj:

*styk punktowy* (np. dwie kule, kula i płaszczyzna, dwa skrzyżowane walce)

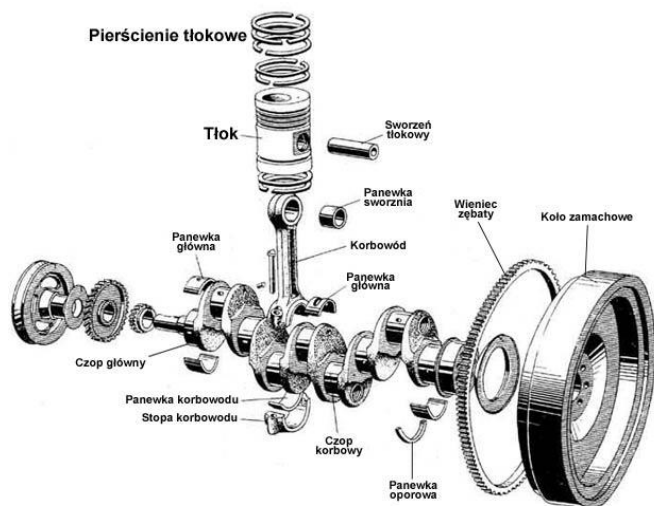
*styk liniowy* (np. dwa walce, walec z powierzchnią, współpracujące koła zębate - styk może być linią krzywą)

*styk powierzchniowy* (np. zespoły sprzęgieł, profilowane przewodnice, przekładnie cierne lub pasowe)

Przy jednakowym obciążeniu, z uwagi na odmienną powierzchnię przez którą jest ono przenoszone, każdy z trzech wymienionych typów kontaktu generuje odmienną postać koncentracji naprężeń w materiale bazowym. Największe naprężenia występują przy styku punktowym, mniejsze przy styku liniowym, a najmniejsze dla przypadku kontaktu powierzchniowego. W rzeczywistości jednak, maksymalne naprężenia styku punktowego i liniowego są nieco niższe od obliczonych teoretycznie z uwagi na ograniczenia dokładności wykonania elementów (każdy rodzaj kontaktu jest przybliżeniem kontaktu powierzchniowego).

## 2. NIESTABILNOŚĆ PRACY ZESPOŁÓW WIRUJĄCYCH

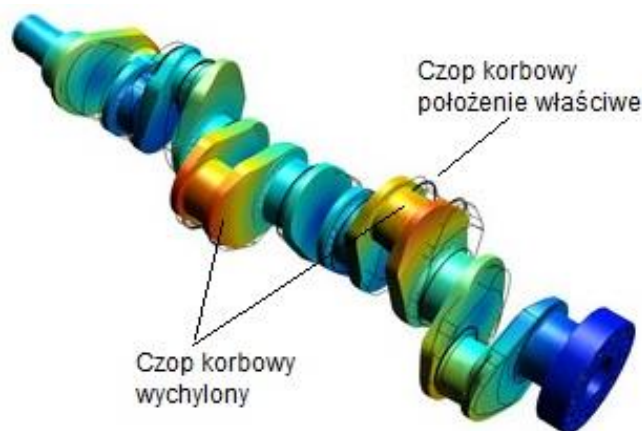
Przykładem wirującego zespołu mechanicznego doświadczanego niestabilnością absorbowanych obciążeń jest układ korbwo-tłokowy silnika spalinowego (Rys. 6). Dzięki stosownej geometrii komponentów które go współtworzą możliwa jest zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego na obrotowy. Powstające w trakcie spalania mieszanki paliwowo-powietrznej siły gazowe jak również siły bezwładności pochodzące od mas wprawianych w ruch posuwisto-zwrotny lub obrotowy, w sposób cykliczny obciążają kolejne odcinki wału stosownym momentem skręcającym [11]. Wartość momentu jest między innymi zależna od prędkości obrotowej wału.



Rys. 6. Elementy współtworzące układ korbwo-tłokowy [12].

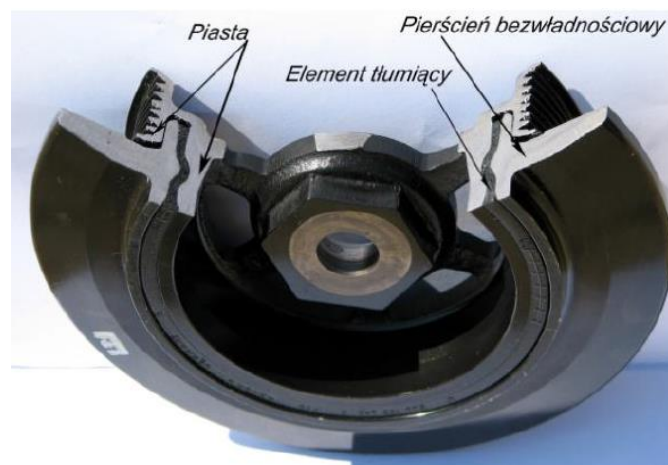
Z uwagi na charakter pracy i przenoszonych obciążeń, analiza wałów korbwych jest złożona i skupia się na ogół na zagadnieniach zwiększania ich odporności wobec uszkodzeń zmęczeniowych. Te z kolei wywołwane są najczęściej przez drgania (Rys. 7), niewyważenia bądź niewłaściwe (niedostateczne) smarowanie skojarzeń tarcowych (Rys. 4). Oprócz drgań poprzecznych i wzdłużnych, które ze względu na dużą sztywność zespołu nie mają większego wpływu na uszkodzenia, wały korbwoe ulegają deformacjom w kierunku obwodowym. Wielokrotność odkształceń w grani-

cach sprężystości materiału jest przyczyną kumulacji naprężeń, które z czasem przekraczając wartość dopuszczalną w okolicach obszarów newralgicznych (sąsiedztwo otworów i/lub korbów, podcięcia, znacząca zmiana przekroju poprzecznego) prowadzą wprost do uszkodzeń skutkujących utratą ciągłości struktury wału [5] (Rys. 1).



Rys. 7. Odkształcenia wału korbwoy drgającego skrętnie [15].

Aby zapobiec uszkodzeniom wałów korbwych, a jednocześnie wspomóc stabilność pracy całego zespołu korbwoy, w budowie wielocylindrowych silników spalinowych stosowane są moduły eliminujące drgania – tłumiki drgań skrętnych. W praktyce wykorzystywane są zarówno tłumiki o konstrukcji pasywnej (np. cierne, sprężynowe, gumowe) jak również takie, które własności tłumiące zmieniają w sposób dynamiczny. Więcej informacji na temat poszczególnych rodzajów tłumików drgań skrętnych i charakterystyk ich pracy można znaleźć np. w opracowaniach: [1], [5], [9], [6].



Rys. 8. Gumowy, pasywny tłumik drgań skrętnych [2].

Oddzielną, wartą uwagi grupę tłumików drgań skrętnych stanowią pasywne tłumiki wiskotyczne. Zasada ich działania odwołuje się do tarcia wewnętrznego w cieczach (najczęściej olejach silikonowych) i towarzyszącej mu dyssypacji energii mechanicznej drgań. Tłumiki wiskotyczne to przykład na wykorzystanie zjawiska tarcia do poprawy stabilności i efektywności pracy wirujących zespołów mechanicznych. Szerzej o tematyce wiskotycznych tłumików drgań skrętnych traktuje II część niniejszego opracowania.

## PODSUMOWANIE

Rozróżnić można kilka rodzajów tarcia w zależności od przyjętego kryterium podziału. Z uwagi na przyczynianie się do zużycia

powierzchni współpracujących, tarcie na ogół nie jest zjawiskiem pożądanym. Istnieją jednak praktyczne aplikacje za pośrednictwem których tarcie wykorzystywane jest do stabilizacji pracy oraz zwiększenia żywotności mechanizmów, w tym wysoko obciążanych wirujących zespołów mechanicznych.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bajkowski J. Ciecze i tłumiki magnetoreologiczne. Właściwości, budowa, badania, modelowanie i zastosowanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2012.
2. Bik T., *Techniczne zastosowania cieczy ferromagnetycznych*, „Mechanik” Nr 12/2015, s. 905-909.
3. Bik T. Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w przemyśle motoryzacyjnym, „Mechanik” Nr 7/2016, s. 581-585.
4. Hebda M. Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa – Radom 2007.
5. Homik W., Szerokopasmowe tłumiki drgań skrętnych, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Rzeszów 2012.
6. Homik W., Wiskotyczne tłumiki drgań skrętnych, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
7. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G., Wstęp do tribologii i tribochemia, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
8. Poradnik firmy TOTAL – Przemysłowe Środki Smarne, Warszawa 2003.
9. Pręgoska A., Konowrocki R., Szolc T. On the semi-active control method for torsional vibrations in electro-mechanical systems by means of rotary actuators with a magnetorheological fluid, “Journal of Theoretical and Applied Mechanics” 51, 4, pp. 979-992, Warsaw 2013.
10. Szczerek M., Wiśniewski M., Tribologia i tribotechnika, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
11. Zając P., Silniki pojazdów samochodowych. Podstawy budowy oraz główne układy mechaniczne, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2009.
12. Strona internetowa: [www.blog.autka.pl](http://www.blog.autka.pl)
13. Strona internetowa: [www.hassewrede.de](http://www.hassewrede.de)
14. Strona internetowa: [www.klinika-silnika.pl](http://www.klinika-silnika.pl)
15. Strona internetowa: [www.mtfca.pl](http://www.mtfca.pl)
16. Strona internetowa: [www.totalmateria.pl](http://www.totalmateria.pl)
17. Strona internetowa: [www.tribologia.eu](http://www.tribologia.eu)

### Friction phenomenon and its influence on work stability of selected rotating mechanical modules – p. I

*This paper is devoted to a friction phenomenon, its classification and influence on work stabilization of the rotating mechanical modules. There has been considered a case of multi-cylinder engines crankshafts that are prone to torsional vibrations due to the absorbed loads. The lack of vibrations damping jeopardizes resonance and module destruction. To achieve and maintain steady work of crankshafts, the possibility of dissipating the mechanical vibrations energy in fluids (silicone oils) is considered. For that purpose, it is intended to use internal friction of the fluids that co-create the passive, viscous torsional vibrations dampers.*

#### Autor:

mgr inż. **Tomasz Bik** – Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, adres e-mail: [tomek.bik@gmail.com](mailto:tomek.bik@gmail.com)