

Tomasz BIK

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

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

Wirujące zespoły mechaniczne, w tym układy korbowe silników spalinowych, są często na skutek obciążeń roboczych narażone na nieustalone stany pracy jak np. drgania skrętne. Cykliczne odkształcenia komponentów pokrywające się w pewnych zakresach z częstotliwościami wymuszeń prowadzą do rezonansu drgań, a w konsekwencji nawet do zniszczenia zespołu wirującego. Dlatego tak ważne są zabiegi zorientowane na wytłumienie vibracji pojawiających się w okolicach krytycznych prędkości obrotowych wałów. Służą do tego tłumiki drgań skrętnych, których jedną z odmian są tłumiki wiskotyczne.

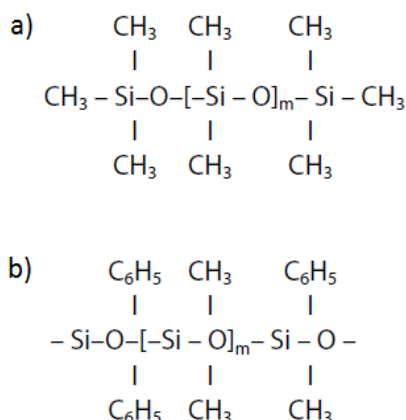
1. TŁUMIKI WISKOTYCZNE

Wiskotyczne tłumiki drgań skrętnych to w większości przypadków pasywne eliminatory drgań instalowane w obszarze wirujących zespołów wykazujących skłonności do drgań obwodowych. Z uwagi na pasywny charakter pracy, dla poszczególnych aplikacji tłumiki dobierane są indywidualnie, tak aby szczyt ich zdolności tłumienia drgań trafiał w zakres krytycznych prędkości obrotowych wałów. Budowa typowego, pasywnego tłumika wiskotycznego zobrażona została na Rys. 1.



Rys. 1. Wiskotyczny tłumik drgań skrętnych [13].

Zgodnie z informacjami przedstawionymi w I części opracowania, eliminowanie drgań skrętnych wałów przy użyciu tłumików wiskotycznych odbywa się z wykorzystaniem tarcia wewnętrznego w cieczy wypełniającej ich objętość. Energia mechaniczna drgań zamieniana jest zatem poprzez tarcie na energię cieplną, która z kolei jest oddawana (rozpraszana) do otoczenia. Tarcie wewnętrzne w cieczy wzmaga wirujący w jej objętości pierścień bezwładnościowy (zamachowy). Aby jednak nastąpiło jego przemieszczenie obwodowe, amplituda drgań wału musi przekroczyć ściśle określoną wartość wzbudzając stosowny bezwładnościowy moment skręcający. Ilość rozproszonej przez tłumik energii odpowiada energii tarcia wewnętrznego cieczy oraz wydzielonego z układu ciepła. Jako że parametry pracy tłumików zależą od wypełniających je cieczy, bardzo istotne okazują się ich własności fizyczne, w tym lepkość (sięga nierzadko 1 000 000 cSt). Ciecze wypełniające tłumiki drgań skrętnych to najczęściej oleje silikonowe – ciekłe polimery, o w pełni nieorganicznym trzonie polisiloksanowym w którym atomy krzemu są łączone przez atomy tlenu, natomiast do atomów krzemu dołączane są grupy metylowe (-CH₃) tzw. metylosilikony lub analogiczne związki w których część grup metylowych zastąpiona została grupami fenylowymi (-C₆H₅) – tzw. fenylsilikony (Rys. 2).



Rys. 2. Oleje silikonowe: a – metylosilikony, b – fenylsilikony [8].

Oleje silikonowe charakteryzują się unikalnymi właściwościami wynikającymi z asymetrii budowy cząsteczki oraz odporności chemicznej podstawników: hydrofobowością, stabilnością chemiczną,

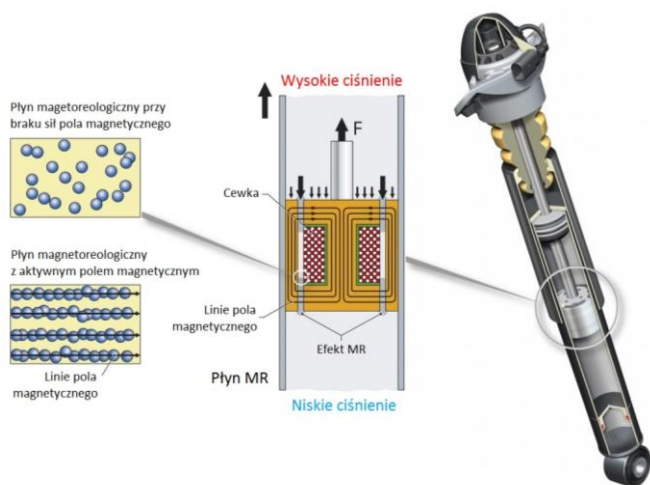
dużym wskaźnikiem lepkości, niską temperaturą płynięcia i szerokim zakresem dopuszczalnej temperatury pracy:

- oleje metylosilikonowe ($-60^{\circ}\text{C} \dots 200^{\circ}\text{C}$)
- oleje fenylosilikonowe ($-50^{\circ}\text{C} \dots 250^{\circ}\text{C}$)

Oleje metylosilikonowe podlegają rozkładowi termicznemu w temperaturze powyżej 300°C , zaś oleje fenylosilikonowe powyżej temperatury 350°C . Powyżej tych temperatur polimeryzują, tworząc substancje żelowate. Jako inhibitory utlenienia siloksanów są stosowane niektóre związki żelaza i ceru, natomiast jako substancje przeciwdziałające żelowaniu, związki telluru oraz seleniu [8].

Modyfikując strukturę chemiczną cieczy wypełniającej tłumik jesteśmy w stanie wpływać na parametry jej tarcia wewnętrznego, a poprzez to również na zdolność równoważenia niestabilnej pracy wirujących zespołów korbowych, opisywanych w pierwszej części opracowania.

W praktyce inżynierskiej stosowane są konstrukcje w których tłumiki będąc bezpośrednio sprzężonymi z wałem korbowym silnika pełnią jednocześnie rolę napędu dla osprzętu, np. alternatora czy pompy wody. W takich przypadkach piasta lub zewnętrzna obudowa tłumika są kształtowane w sposób który pozwala im pełnić rolę koła napędowego przekładni pasowej. Niewątpliwą zaletą tłumików wiskotycznych jest ich wysoka niezawodność. Z kolei wąskie i niezmiennicze pasmo możliwych do wytłumienia częstotliwości drgań sprawia, że zakres ich stosowania jest ograniczony i zależy wprost od korelacji pomiędzy lepkością oleju a fizycznymi gabarytami tłumika. Ograniczając drgania skrętne wałów wpływa się nie tylko na wzrost trwałości układu korbowego, zwiększana jest bowiem także żywotność całej jednostki napędowej. Aby jednak tłumik pracował poprawnie, pierścień bezwładnościowy musi być odseparowany od obudowy warstwą cieczy. Gdy silnik nie pracuje, bezwładnik pod wpływem siły grawitacji opada znajdując wsparcie na piście (obudowie). Uruchamiając silnik wprawiamy w ruch wał korbowy, a z nim zespół tłumika. Tarcie suche (toczne lub ślizgowe) dzięki powstającemu klinowi smarmemu przechodzi w tarcie mieszane w początkowej fazie rozruchu, a następnie zamieniane jest w tarcie płynne. Możliwe jest to dzięki zbieżności przestrzeni pomiędzy pierścieniem a piastą oraz osiągnięciu pewnej granicznej prędkości obrotowej zespołu. Powierzchnie tarcie oddzielone zostają warstwą środka smarowego o grubości zapewniającej brak kontaktu wierzchołków mikronierówności obu powierzchni.



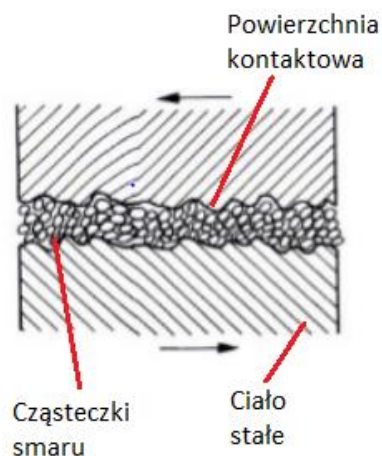
Rys. 3. Półaktywny tłumik drgań wykorzystujący ciecz magnetoreologiczną [2].

Dla poprawy skuteczności eliminowania drgań skrętnych w układach napędowych stosuje się między innymi mechatroniczne metody aktywnego / półaktywnego regulowania drgań mechanicz-

nych. Ich istota opiera się na użyciu cieczy sterowalnych (cieczy smart), zmieniających swoje własności na skutek oddziaływania zewnętrznych pól fizycznych [3]. Wyróżnia się sterowalne cieczce elektromagnetyczne (ER), zmieniające własności mechaniczne (lepkość, granica płynięcia) na skutek oddziaływania sił pola elektrostatycznego, oraz podgrupę cieczy magnetoreologicznych (MR), zmieniających swoje własności pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego. Podstawą aktywnego sterowania poziomem drgań jest wytworzenie dodatkowej siły lub momentów oporowych przeciwdziałającym przeciążeniom dynamicznym. Urządzenia półaktywne, w przeciwieństwie do tłumików aktywnych, nie generują żadnych sił i momentów sił zewnętrznych w rozpatrywanym układzie. Ich zadaniem jest wytwarzanie zależnej od sygnału sterowania biernej siły tłumienia, która przeciwdziała przemieszczaniu się układu. Szerzej o tematyce aktywnego tłumienia drgań traktują pozycje: [1], [9], [2], [3].

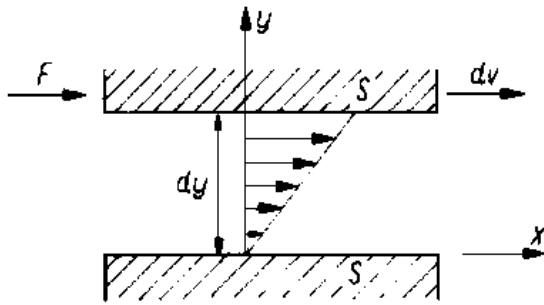
2. TARCIE WEWNĘTRZNE CIECZY

Tarcie płynne obserwowane w trakcie pracy wiskotycznych tłumików drgań skrętnych to przykład typowego tarcia wewnętrznego cieczy. Zwyczajowo występuje ono w obszarach gdzie normalnie stykające się ciała zostały rozdzielone warstwą substancji smarującej (Rys. 4). Aby jednak doszło do całkowitego odseparowania elementów węzła kinematycznego, grubość warstwy smarującej musi przewyższać sumę chropowatości obu powierzchni kontaktowych. Przyjmuje się, że dla całkowitego oddzielenia nierówności powierzchni w trakcie pracy, grubość warstwy powinna co najmniej pięciokrotnie przewyższać sumę chropowatości R_a współpracujących powierzchni.



Rys. 4. Tarcie płynne w skojarzeniu dwóch współpracujących powierzchni.

Tarcie wewnętrzne cieczy wypełniającej tłumik zastępuje tarcie zewnętrzne pary pierścieni bezwładnościowy - piasta, redukuje intensywność zużycia ich powierzchni, a przede wszystkim pełni rolę eliminatora drgań. Energia drgań rozpraszana jest bowiem w trakcie płynięcia (ścianania) poszczególnych warstw cieczy. Przepływając przez obszar tarcia, substancja smarująca wspomaga odprowadzanie ciepła, produktów zużycia a także przeciwdziała korozji.



Rys. 5. Ruch cieczy pomiędzy płytkami [17].

Prędkość ścinania cieczy jest funkcją naprężenia stycznego i wyrażana jest jako stosunek odkształcenia warstwy cieczy do czasu w którym ono nastąpiło. W oparciu o Rys. 5 przedstawiający warstwę cieczy pomiędzy dwiema równoległymi płytkami o powierzchniach S , naprężenie ścinające (τ) możemy zdefiniować jako:

$$\tau = F / S$$

F – siła działająca na płytkę, której ruch wywołuje ruch cieczy

Dla cieczy newtonowskich, dla których naprężenie styczne (τ) jest proporcjonalne do gradientu prędkości warstwy cieczy (dv/dy), ogólne równanie reologiczne ma postać:

$$\tau = \eta * (dv/dy)$$

η – dynamiczna lepkość newtonowska

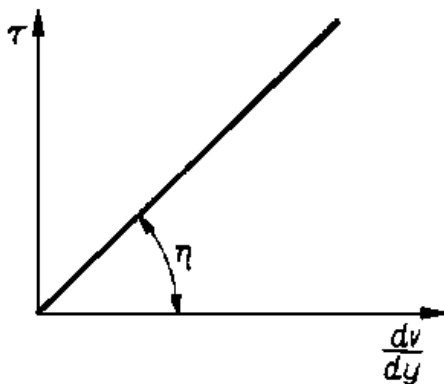
Skąd:

$$\eta = F / S * (dy/dv)$$

W obliczeniach hydrodynamicznych najczęściej wykorzystywaną wielkością jest natomiast lepkość kinematyczna (ν), która dodatkowo powiązana jest z gęstością cieczy (ρ):

$$\nu = \eta / \rho$$

ν – lepkość kinematyczna



Rys. 6. Zależność naprężenia ścinającego od gradientu prędkości dla cieczy newtonowskiej [17].

Mimo iż krzywa płynięcia dla cieczy newtonowskich przedstawiana jest jako linia prosta (Rys. 6), każda ciecz newtonowska w określonych warunkach temperaturowych i ciśnienia, zachowuje się jak ciecz nienewtonowska.

Opór wewnętrzny cieczy w tłumiku istotnie zależy od jej objętości (grubości wytworzonej warstwy) oraz prędkości ślizgania. Jej własności pozwalają ponadto stosować klasyczne prawa przepływu lepkiego, toteż głównymi parametrami wyrażającymi przydatność użytkową są: lepkość oraz gęstość. Im większa lepkość oleju wprowadzonego w skojarzenie tarcie, tym trudniejsze jest wyciśnięcie go pomiędzy trących elementów oraz większe opory tarcia wewnętrznego (większe tłumienie drgań). Dobierając lepkość oleju bierze się pod uwagę warunki jego pracy, a więc temperaturę, wartość i zmienność obciążeń w czasie oraz prędkość obrotową (ewentualnie liniową). W przypadkach w których przewiduje się wyższe temperatury pracy i obciążeń, dobiera się oleje o większej lepkości. Wraz z podwyższeniem temperatury oleju zmniejsza się jego lepkość, co przekłada się na obniżenie ciśnienia w układzie, a w konsekwencji zmianę charakterystyk dopływu oleju do obszarów tarcia. Szczególnie niebezpieczne jest to w wysokich temperaturach. Przy niskich temperaturach, gdy lepkość oleju wzrasta, uzyskanie stabilnych parametrów pracy urządzeń jest opóźnione przez potrzebę jego ogrzania. Jeżeli układ zasilany jest pompą olejową, nadmierny wzrost lepkości oleju może poważnie utrudniać jej pracę, wpływając na wydajność. Z tych względów dobór oleju o właściwej lepkości ma istotne znaczenie. Podobnie, lepkość oleju zmienia się w okresie jego eksploatacji. Wchodząc w interakcje z innymi płynami układów, co ma chociażby miejsce w przypadku silników spalinowych, po pewnym czasie obserwujemy zmniejszenie lepkości oleju. Z kolei w obliczu procesów polimeryzacji, kondensacji czy utleniania, lepkość ulega zwiększeniu [17]. Toteż w urządzeniach w których olej nie ulega rozcieńczeniu, procesy starzenia powodują stopniowy wzrost jego lepkości.

Analiza zjawisk smarowania i tarcia wewnętrznego w płynach jest w istocie złożona. Teoretyczne rozważania hydrodynamiczne opierają wyjściowo się na trzech podstawowych prawach:

- zachowania masy (równanie ciągłości)
- zachowania pędu (równanie ruchu - Naviera-Stokesa)
- zachowania energii (równanie energii)

Zasadę zachowania masy i pędu ujmuje się najczęściej jednym równaniem – tzw. równaniem Reynoldsa. W miarę potrzeb, analizy uzupełnia się także dodatkowymi równaniami charakteryzującymi własności oleju (lepkość, gęstość, przewodność cieplna) oraz odkształcenie powierzchni ograniczających jego objętość (równanie sprężystości).

PODSUMOWANIE

Rozdzielenie współpracujących powierzchni warstwą cieczy (środka smarnego) odgrywa istotną rolę w eliminowaniu oporów ich ruchu względnego oraz przeciwdziałania zużyciu się komponentów. Jednocześnie, środek smarny jako płyn odznacza się lepkością i powiązanymi parametrami tarcia wewnętrznego którego pokonanie wymaga wykonania nad układem pracy (zużycia energii). Przywołane w opracowaniu tłumiki wiskotyczne są konstrukcjami pozwalającymi wykorzystać zjawisko tarcia wewnętrznego w cieczy do rozproszenia energii mechanicznej drgań skrętnych, wykazując w ten sposób pozytywny wpływ tarcia na stabilność pracy wirujących zespołów mechanicznych. Dla przeprowadzenia kompletnej analizy stanów pracy tłumika należy jednak dogłębnie rozpoznać problematykę tarcia wewnętrznego i własności charakteryzujących ciecz (olej silikonowy) wypełniającą tłumik.

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. Pręgowska 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. Zajac P., Silniki pojazdów samochodowych. Podstawy budowy oraz główne układy mechaniczne, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2009.
12. Strona internetowa: www.blog.autka.pl
13. Strona internetowa: www.hassewrede.de
14. Strona internetowa: www.klinika-silnika.pl
15. Strona internetowa: www.mtfca.pl
16. Strona internetowa: www.totalmateria.pl
17. Strona internetowa: www.tribologia.eu

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

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