

Wpływ wybranych czynników na trwałość pasów zębatach napędu rozrządu silnika spalinowego

ANDRZEJ PAKUŁA

Politechnika Krakowska

W niniejszej publikacji zostały przedstawione wybrane czynniki wpływające na trwałość pasów zębatach napędu rozrządu. Przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej wpływu różnicy podziałki, elastyczności pasa, podatności zęba, współczynnika tarcia, na rozkład obciążenia w zazębieniu. Przedstawiono również wyniki analizy korzystnych i niekorzystnych kombinacji liczby zębów kół i pasa rozrządu ze względu na przyjęte kryterium powtarzalności obciążenia w zazębieniu.

1. Wprowadzenie

Aktualnie toczy się szeroka dyskusja, wykorzystująca badania naukowe, nad zastosowaniem rodzaju napędu układu rozrządu silnika spalinowego: pas zębata, łańcuch. Głównym parametrem decydującym o wyborze rodzaju przeniesienia napędu układu rozrządu jest jego trwałość i niezawodność. Na podstawie badań wstępnych w niniejszym artykule przedstawiono wpływ wybranych czynników na trwałość pasów zębatach stosowanych w układach rozrządu silników spalinowych.

Okresową wymianę pasa zębatego napędu rozrządu przeprowadza się wykorzystując kryterium nie przekroczenia dopuszczalnej, granicznej wartości błędu podziałki zębów pasa, co związane jest z wydłużeniem pasa na skutek przebiegających w jego materiale procesów reologicznych.

Oprócz przekroczenia dopuszczalnej wartości błędu podziałki zębów pasa związanego z jego wydłużeniem może dojść do naruszenia sprzężenia kształtowego przekładni na skutek zniszczenia elementów pasa zębatego (rys. 1). Podstawowymi mechanizmami prowadzącymi do zniszczenia pasów zębatach napędu rozrządu silnika spalinowego są;

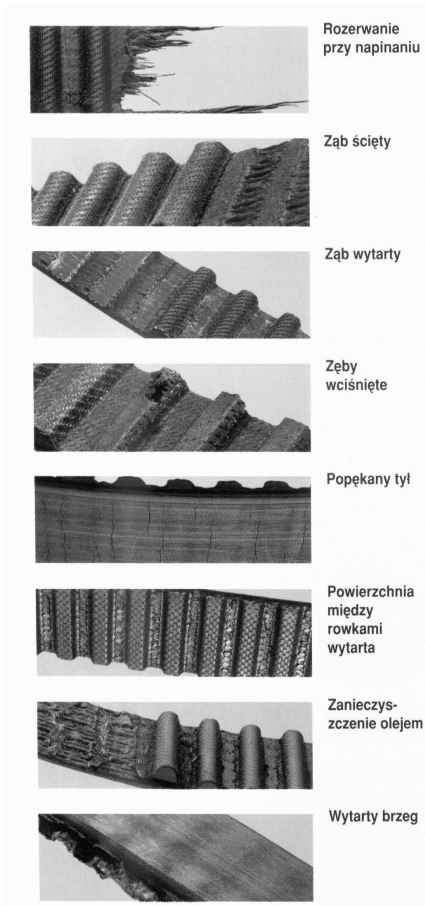
- cierne zużycie boków zębów,
- zmęczeniowe pęknięcie zębów pasa u podstawy.

Oba te mechanizmy prowadzą do naruszenia sprzężenia kształtowego przekładni cięgnowej, co w konsekwencji może spowodować uszkodzenia elementów silnika: zaworów, dźwigni zaworowych a nawet układu korbowo-tłokowego.

Inne mechanizmy zniszczenia pasa napędu rozrządu to:

- zerwanie pasa
- rozwarstwienie.
- Zerwanie pasa może być spowodowane:
 - błędami eksploatacyjnymi,
 - montażowymi
- Natomiast rozwarstwienie pasa może być spowodowane:
 - błędami wykonawczymi,
 - lub pracą przekładni zanieczyszczonej olejem silnikowym lub płynem chłodzącym.

Poznanie i analiza zjawisk trybologicznych w przekładni napędu rozrządu pozwala na określenie granicznych wartości zużycia pasów, jest to ważne ze względu na duże koszty ewentualnej naprawy silnika, jak również w przypadku zniszczenia pasa ze względu na bezpieczeństwo ruchu. Przeskok osłabionych zębów pasa zębatego może spowodować gwałtowne zablokowanie silnika skutkujące w skrajnych przypadkach zablokowaniem kół samochodu i wpadnięciem pojazdu w poślizg.



Rys. 1. Rodzaje zużycia pasa zębatego [6].

Fig. 1. Toothed belt wear types [6].

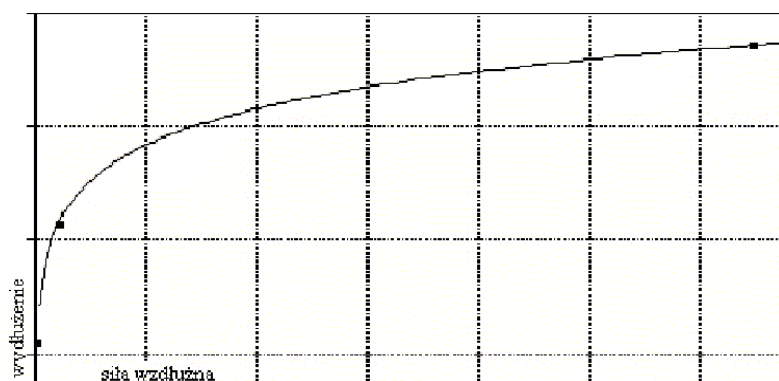
2. Współpraca pasa z kołem pasowym zębatym

W czasie pracy przekładni w zębach i grzbiecie pasa powstają cykliczne naprężenia, powodujące odpowiadające im odkształcenia. Powierzchnia pętli histerezy naprężeń zależy od sprężystych charakterystyk kordu, gumy (lub innego polimeru), kierunku i wielkości deformacji, częstotliwości cykli obciążenia.

W czasie eksploatacji w materiale pasa zachodzą procesy reologiczne skutkujące trwałym wydłużeniem pasa. W związku z tym dla zachowania warunku zazębienia niezbędne jest określenie dopuszczalnego odkształcenia elementów podczas pracy i dopuszczalnej wartości błędu podziałki zębów pasa.

W związku z tym, że zdolność pasa do pracy jest związana przede wszystkim z możliwością przeniesienia obciążenia przez zęby, konieczne jest określenie rozdziału obciążenia między zębami na obwodzie zazębienia. Obniżenie nierównomierności rozdziału obciążenia między zęby uzyskuje się przez zwiększenie sprężystości grzbietu i podatności zębów. Jednocześnie zwiększenie podatności zębów znacznie zmniejsza dopuszczalną siłę obwodową przekazywaną pasem, którą określa się z warunku zachowania zazębienia. W takim przypadku wpływ zmiany podatności zębów jest znacznie większy, w związku z tym należy zwiększyć sprężystość kordu i zębów pasa. Charakterystyki sprężyste elementów pasa określone są przez współczynnik podatności. Współczynnik podatności λ (w mm/N) definiowany jest jako wielkość liniowego przemieszczenia w wyniku sprężystej deformacji pod działaniem obciążenia (rys. 2). W procesie obciążania kordu pasa początkowo poszczególne nici odkształcają się niezależnie od siebie. Przy określonym obciążeniu, odpowiadającym wstępnemu naprężeniu kordu, sprężystość kordu szybko wzrasta.

Współczynnik podatności grzbietu pasa określa się przez współczynnik podatności kordu i liczbę jego czynnych zwojów.



Rys. 2. Zależność między siłą działającą wzdłuż pasa i odkształceniem [5].

Fig. 2. Relationship between longwise force and belt elongation [5].

Funkcjonalna zależność między siłą działającą wzdłuż pasa i odkształceniem w początkowej fazie obciążania jest nieliniowa, w miarę wzrostu obciążenia podatność pasa tak jak materiału kompozytowego stabilizuje się, a zależność odkształcenia od siły staje się liniowa.

3. Wpływ dokładności podziałki pasa

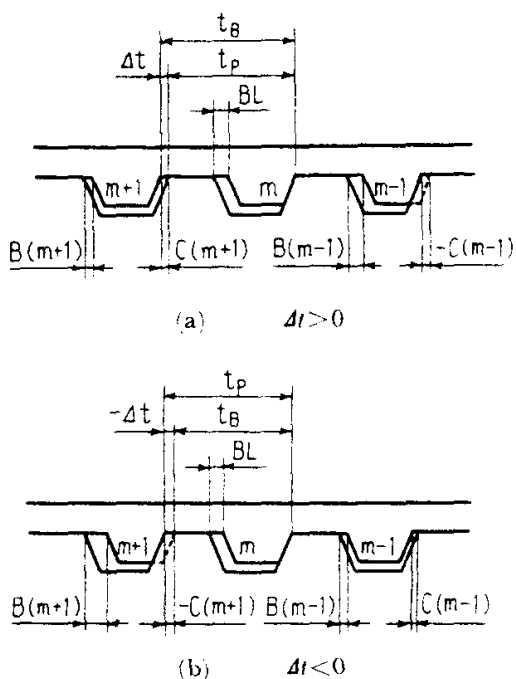
Wpływ różnicy podziałki (czyli celowo wprowadzonego błędu podziałki – rys. 3), napięcia ciągną biernego, napięcia ciągną czynnego, modułu elastyczności pasa, po-

datności zęba, współczynnika tarcia, na przeniesienie obciążenia przez pas zębany jest bardzo znaczny.

Gdy różnica podziałki jest równa zero lub "dodatnia" obciążenie działające na zazębiony z kołem ząb pasa zmniejsza się wraz ze wzrostem numeru zęba. Na kole napędzającym osiąga wartość maksymalną na pierwszym zazębiającym się zębie, a minimum na ostatnim.

W przypadku "ujemnej" różnicy podziałki, maksimum obciążenia występuje na pierwszym lub ostatnim zębie, a minimum obciążenia przesuwa się w kierunku pierwszego zęba wraz ze zmniejszaniem się różnicy podziałki.

Im mniejsze jest obciążenie na pierwszym lub ostatnim zębie tym mniejsze może być zużycie zębów pasa przy początku zazębienia. Zalecane więc byłoby przyjęcie różnicy podziałki mniejszej od zera w przypadku koła napędzającego i większej od zera w przypadku



Rys. 3. Różnica podziałki pasa i koła [5].
Fig. 3. Belt and pulley pitch difference [5].

koła napędzanego. Ze względu na wytrzymałość zębów na ścinanie korzystne jest, by rozkład obciążenia był jednorodny, a obciążenie maksymalne było niskie. Dla pasów o identycznych wymiarach i wykonanych z tego samego materiału rozkład obciążenia zależy od napięcia czynnego i biernego cięgna pasa oraz liczby zazębionych zębów. Należy więc ustalić najwłaściwszą "ujemną" różnicę podziałek zapewniającą dużą trwałość pasa.

Dla napędów rozrzędu ustalono na drodze symulacyjnej, że ze względu na obciążenie zębów, najkorzystniej jest, aby różnica podziałki wynosiła około -0.005, ząb był możliwie podatny, sztywność rozciągania średnia lub wysoka (duża sztywność nie powoduje znacznego wzrostu obciążenia). Symulacja wykazała też, że współczynnik tarcia ma nikły wpływ na rozkład i wielkość obciążeń zębów.

Natomiast ze względu na zmniejszenie zużycia boków zębów i wrębów pasa otrzymano przeciwstawne wymagania odnośnie różnicy podziałki, sztywności rozciągania i współczynnika tarcia, a zgodne w stosunku do podatności zęba. Ponieważ zużycie boku zęba jest około czterokrotnie większe niż zużycie wrębu pasa, dlatego należy rozpatrywać zużycie boku. Symulacja wskazuje na następujące wartości parametrów;

- różnica podziałki - dodatnia, około 0.010 mm,
- podatność zęba - duża, około 0.006 mm/N,
- sztywność rozciągania - duża, około 300 kN,
- współczynnik tarcia - około 0.7

4. Powtarzanie się zażębenia pasa z kołem

Zmęczenie materiału występuje na skutek oddziaływania powtarzających się cyklicznie obciążeń. W przypadku napędu rozrządu silnika spalinowego mamy do czynienia z takimi cyklicznymi obciążeniami. Najbardziej niekorzystny przypadek wystąpi wtedy, gdy powtarzające się cyklicznie maksima obciążeń będą trafiały stale na te same zęby pasa.

W publikacji [4] analizie poddany został szeroki zakres najczęściej stosowanych do napędu układu rozrządu pasów zębatych o liczbie zębów od 57 do 269 [1, 2] i małych kół rozrządu o liczbie zębów od 19 do 26, gdyż mniejszych się nie stosuje ze względu na zbyt małą średnicę (w porównaniu ze średnicą wału korbowego) a górne ograniczenie wynika z faktu, że duże koło rozrządu (o dwa razy większej liczbie zębów) zajmowałoby zbyt dużo miejsca w komorze silnika. W sumie analizie poddano 1728 kombinacji kół i pasów zębatych, wytypowano najbardziej niekorzystne (takie gdy powtórzenie zażębenia na dużym kole rozrządu występuje co 1 lub 2 obiegi pasa zębatego) kombinacje kół i pasów zębatych rozrządu. Analiza wykazała ponadto, że najkorzystniejsza możliwa kombinacja zapewnia powtarzalność zażębenia po liczbie obiegów pasa równej liczbie zębów rozważanego koła.

Rozważenie wszystkich kombinacji prowadzi do wniosku, że pewne liczby zębów kół rozrządu należałoby szczególnie zalecić ze względu na bardzo szeroki zakres możliwych do zastosowania pasów zębatych zapewniających małą powtarzalność zażębenia. Daje to duże możliwości unifikacji kół rozrządu do różnych silników, lub możliwość wprowadzania napędu dłuższym pasem zębatym dodatkowych urządzeń bez obawy o powtarzalność zażębenia. Takie szczególnie korzystne kombinacje kół rozrządu to 23 – 46 i 19 – 38.

Literatura

- [1] Katalog firmy Gates, „Power Grip. Timing System Products for Passenger Cars and Light Trucks”, marzec 2004.
- [2] Katalog firmy Quinton Hazell. “Timing Belts – Application Guide”.
- [3] PAKUŁA A.: *Pasy zębate w konstrukcji środków transportu*. Monografia 265, seria Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków 2000.
- [4] PAKUŁA A.: *Wpływ ilości zębów kół i pasa rozrządu na potencjalną awaryjność układu*. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych. PAN Oddział w Krakowie, Teka Komisji Motoryzacji, Kraków 2005.
- [5] PAKUŁA A.: *Pasy zębate w konstrukcji środków transportu*. Monografia 265, seria Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków 2000.
- [6] Poradnik firmy Gates, „Gates Auto Master”, 2004.

Selected factors influence on durability of the IC engines timing belts

S u m m a r y

In this paper selected factors affecting on durability of timing belts were presented. Simulation analysis results of the pitch difference, belt elasticity, tooth flexibility and coefficient of friction influence on load distribution in mesh were presented. As a result of the analysis favorable and unfavorable combinations of teeth number of the timing belt and pulleys with regard to criterion of the load repetition in mesh were also presented.