

Grzegorz DOMEK

e-mail: gdomek@whm.pl

Instytut Techniki, Wydział Matematyki Fizyki i Techniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz

Dobór cech materiałowych pasów zębatych w aspekcie cyklu działania pasa

Wstęp

Materiały, z których wytwarzane są pasy zębate, to różnego rodzaju tworzywa polimerowe i kompozyty o nieuporządkowanej przestrzennej sieci wiązań [1]. W spotykanych opracowaniach traktuje się je jako ciała liniowo sprężyste, dostrzegając liniowe odkształcenie na krótkim odcinku charakterystyki materiału. Liczne badania doświadczalne, wykazały diametralnie inne właściwości tych materiałów zależne od zastosowanego polimeru, struktury kompozytu czy też technologii produkcji. Przyjmowany do tej pory model fizyczny i w konsekwencji model matematyczny nie pozwalają na symulowanie i obliczanie parametrów technicznych pasów [2]. Materiały stosowane w produkcji pasów zębatych mają silnie rozwinięte właściwości nieliniowo sprężyste i anizotropowe oraz reologiczne. W materiałach tych zachodzą charakterystyczne procesy reologiczne: pelzanie, relaksacja naprężeń, nawrót sprężysty, silne tarcie wewnętrzne i dyssypacja energii, orientacja struktury wewnętrznej i jej stabilizacja mechaniczna. Pamięć materiałowa, historia obciążenia i odkształcenia, relaksacja chemiczna, zmiana właściwości i zmiana budowy struktury wewnętrznej pod wpływem wzrostu temperatury dodatniej lub ujemnej to jedne z podstawowych cech materiałów wielkocząsteczkowych wykorzystywanych w produkcji pasów napędowych. Siły przyciągania międzycząsteczkowego *van der Waals* w tych materiałach mają istotny wpływ na kształtowanie się właściwości mechanicznych i reologicznych np. od doraźnej granicy wytrzymałości na zerwanie R_m , do zmiennych wartości modułów sprężystości. Celem pracy jest próba odpowiedzi na pytanie: czy wiele podstawowych zjawisk istotnych dla sprzężenia ciernego przekładni pasowej, np. tarcie konstrukcyjne i poślizgi obwodowe i promieniowe, rozkład sił w ciągu pasa na łuku opasania lub zmiana kształtu przekroju poprzecznego pasa, powstaje w wyniku ilościowo i jakościowo różnych odkształceń pasa.

Jak zbadano [3] cykliczna deformacja przekroju poprzecznego pasa podczas zginania na kołach ma istotny wpływ na wartość strat energii na skutek tarcia wewnętrznego w materiale pasa oraz na podnoszenie się temperatury w pasie. Największe tarcie wewnętrzne i dyssypacja energii występuje w warstwach ścisiskanych, poniżej osi obojętnej. Te uwarunkowania wpłynęły na nową interpretację zjawisk zachodzących podczas sprzężenia kształtowo ciernego oraz na kierunki rozwoju konstrukcji pasów zębatych.

Model zależności w przekładni z pasem zębatym

Podstawową metodą projektowania przekładni z pasem zębatym jest dobór odpowiedniego materiału pasa i kordu. Wydłużenie kordu na łuku opasania warunkuje wielkość kąta opasania, na którym zęby pasa zębatego są odkształcone. Również, w zależności od wielkości podziałki, będzie odkształcana różna liczba zębów [4]. Przystępując do ustalenia modelu jakościowego sprzężenia geometrycznego pasa zębatego z kołami należy wziąć pod uwagę odkształcenie i liczbę zębów pasa biorących udział w sprzężeniu. Sprzężenie rozpatrywane w dłuższym okresie czasu możemy zapisać w postaci równania:

$$\frac{S_1}{S_2} = f\left(\sum_{z=1}^{z_0} \frac{\Delta l_z}{P}\right) \quad (1)$$

gdzie:

 S_1, S_2 – naprężenia w ciągach czynnym i biernym, z_0 – liczba zębów pasa biorących udział w sprzężeniu na łuku opasania koła, Δl_z – odkształcenie kolejnego zęba pasa w sprzężeniu z kołem, P – podziałka pasa.

W przedstawionym modelu sprzężenia pasa uwzględnione zostaje odkształcenie wszystkich zębów biorących udział w sprzężeniu. Przedstawiony model pozwala na rozpatrywanie odmiennych zjawisk zachodzących na kołach czynnym i biernym. Odkształcenie zębów uzależnione jest od materiału pasa oraz od zużycia objętościowego i energetycznego zębów. Sumaryczna deformacja zębów na łuku opasania uzależniona jest także od cech geometrycznych pasa jak np. współczynnik wykorzystania podziałki. Szerszy model sprzężenia zapisać można w postaci równania:

$$\frac{S_1}{S_2} = f(\sigma_k, \sigma_p, K_W, A_{kp}, Y, Z) \quad (2)$$

gdzie:

 K_W – współczynnik wykorzystania podziałki pasa, σ_k – odkształcenie kordu wydłużenie i skręcenie, σ_p – odkształcenie materiału pasa powodujące zmianę wysokości zębów σ_{ph} oraz zmianę szerokości σ_{pb} i kształtu σ_{pA} , A_{kp} – wartość współczynnika adhezji kordu i materiału pasa i materiałów dodatkowych, Y – stosunek podziałki pasa zębatego do podziałki koła pasowego, Z – zużycie pasa i koła, objętościowe Z_v i energetyczne Z_e .

Potrzeba zmniejszenia tarcia wewnętrznego (zmniejszenie wysokości pasa i wysokości pod osią obojętną) a jednocześnie zwiększenia podatności oraz wykorzystania zalet pasów płaskich może być zrealizowany poprzez stosowanie pasów zębatych o takich samych podziałkach natomiast o różnym rodzaju kordu. Zastosowanie kordu typowego dla pasów o podziałkach (16–20) mm w pasach o podziałkach (8–10) mm uniemożliwi pracę tych pasów na kołach o małej średnicy. Jednak pasy te, na kołach o średnicach zbliżonych do minimalnych średnic kół dla podziałek dużych, będą przenosiły moment obrotowy zbliżonej wartości. Wzrost podziałki pasa powoduje zwiększenie nierównomierności pracy przekładni spowodowane zmniejszeniem współczynnika pokrycia zębów pasa na kole X oraz efektem wieloboku oraz wzrost podatności pasa na odkształcenia materiału pasa.

$$X = \frac{\sqrt{2D_p h_l - 4h^2 - h_l^2}}{2P} \quad (3)$$

gdzie:

 X – współczynnik pokrycia, D_p – średnica stóp zębów koła pasowego, h_l – wysokość zęba do osi kordu, h – wysokość zęba pasa.

Przedstawiając sprzężenie chwilowych wartości napięć, zależność przyjmie postać:

$$\frac{dS_1}{dS_2} = f(\mu_p, X_c, X_B, K_w, K_z, F_N, \varepsilon^N, d_w, dz_{co}, dz_{bo}) \quad (4)$$

Wzięto tu pod uwagę chwilową liczbę zębów na łukach opasania koła czynnego dz_{co} i koła biernego dz_{bo} która ma znaczny wpływ na zmianę sprzężenia zwłaszcza w przekładniach, w których wartość X , z równania (3), jest mniejsza od jedności. Nie bez znaczenia pozostają właściwości materiału pasa określone we wzorze (2), wskazujące wpływ odkształceń na zmiany właściwości materiału pasa. Siła napięcia wstępnego F_n ,

wpływa na charakter sprzężenia przez wpływ na dopasowanie podziałek pasa i koła pasowego, jak również na kąt α_0 , którego wielkość jest uzależniona od charakterystyki mechanicznej warstwy nośnej.

Dyskusja modelu i wytyczne doboru materiału

Działania konstruktorów mają na celu poprawianie właściwości mechanicznych i reologicznych materiałów stosowanych do budowy pasów. Najważniejsze są cechy ułatwiające sprzężenie pasa z kołami, zapewniające wysoką trwałość i niezawodność oraz zdolność przeniesienia jak największego momentu podczas największych prędkości obrotowych. Dobre sprzężenie pasa zapewnia duży współczynnik tarcia oraz odpowiednie cechy tarcia wewnętrzznego i dyssypacja energii w kierunku obciążenia: rozciągania i ściskania. O trwałości pasa decyduje jego wytrzymałość zmęczeniowa, która zależy od wrażliwości pasa na zginanie oraz dyssypację energii na skutek tarcia wewnętrznego. Ponadto, istotną cechą jest odporność materiału na inicjację odkształceń nieodwracalnych, trwałych podczas eksploatacji przekładni [5]. Duże rozproszenie energii podwyższa temperaturę w cięgnach pasa oraz obniża jego właściwości mechaniczne i reologiczne [6]. Ma wpływ na trwałość pasa i sprawność przekładni. Dlatego w konstrukcji pasów istnieje obecnie tendencja, aby zachować tarcie wewnętrzne i tłumienie energii w obszarze materiału pasa powyżej osi obojętnej. Jest ono pożyteczne, gdyż dobrze tłumí drgania mechaniczne własne i pochodzące spoza przekładni oraz polepsza podatność napędu [7]. Rozproszenie energii poniżej osi obojętnej jest szkodliwe. Dobór materiałów do konstrukcji koncentruje się na [8, 9]:

- wykorzystaniu zmodyfikowanych materiałów w produkcji pasa, materiałów z pamięcią, nowego rodzaju kordu oraz materiałów kompozytowych,
- stosowaniu materiałów z pamięcią: pasy typu *Omega* I i II, pasy RPP,
- poszukiwaniu materiałów o małej powierzchni pętli histerezy na charakterystyce naprężenie-odkształcenie: Generacja III pasów *Gates*, *Conti* itd.,
- dobór materiałów przystosowanych do zoptymalizowanej częstotliwości obciążeń (prędkości obrotowej pasów): *CXP*, *CXA*, *Black Hawk*, *White Hawk*, *RPP Gold*, *RPP Silber*,
- poszukiwaniu materiałów przystosowujących pas do określonych warunków otoczenia: pasy rozrządu materiał o podwyższonej temperaturze, pasy z materiałów dopuszczonych do kontaktu z żywnością.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych udowodniono, że uzasadnione jest stosowanie materiałów o wysokich wartościach modułów sprężystości wzdłużnej podczas rozciągania E_r i jak największej podatności określonej modulem sprężystości podczas ściskania E_c oraz wysokiej wytrzymałości doraźnej na rozciągania R_m i jak najmniejszej odkształcalności trwałej. Przykładem rozwiązań konstrukcyjnych, w których poprawiano cechy materiałowe i funkcjonalne jest nowoczesny pas klinowy. Udoskonalenie konstrukcji pasa polega na eliminowaniu z roboczej powierzchni bocznej pasa tkaninowej warstwy ochraniającej oraz wypełnienie powierzchni pod osią obojętną mieszaniną odpowiednio zorientowanej (poprzecznie – do kierunku biegu pasa) gumy z domieszką włókien syntetycznych. Dzięki temu uzyskuje się dużą elastyczność pasa w kierunku biegu (mały moment zginający) oraz wysoką sztywność w kierunku poprzecznym i odporność na ścieranie, a także zmniejszenie odkształceń trwałych. W wyniku tego pas deformuje swój trapezowy kształt na łuku opasania pod osią obojętną w minimalnym stopniu, co zmniejsza pracę tarcia wewnętrznego

i dyssypację energii. Pasy z otwartą powierzchnią boczną mają szlifowane powierzchnie boczne, przez co uzyskuje się wysoką gładkość i dokładność powierzchni. Innym przykładem niezamykania roboczej powierzchni pasa jest konstrukcja pasa zespolonego typu *Poli-V* oraz pasa klinowego o zwiększonym kącie rozwarcia klina 60° i wykonanym z poliuretanu (PTFE). Ma to wpływ na polepszenie ich charakterystyk napędowych.

Wadą elastomerów stosowanych na ciągła jest pewien udział odkształceń trwałych podczas ich deformacji. Odkształcenie trwałe można wydalnie zmniejszyć poprzez zastosowanie na warstwę nośną zamiast nici i linek z włókien naturalnych – włókien syntetycznych a na warstwę podatną syntetycznych tworzyw jak, np. poliuretan (PTFE), poliamid (PA), politereftalan etylowy (PTE), tworzywa termoutwardzalne, w tym żywice fenolowe (PF).

Podsumowanie

Problem projektowania cyklu działania pasa oraz określenia cech i kryteriów określających koniec eksploatacji nie znalazły jednoznacznego rozwiązania od czasu zastosowania pierwszych pasów zębatych. Dobór materiałów do nowoczesnych konstrukcji związany jest integralnie z ogólnym rozwojem nauki i możliwościami techniki wytwarzania. Prowadzone są działania w kierunku:

- polepszenia technicznych możliwości odpowiedniego doboru i oceny właściwości mieszanek materiałowych, termoplastów i duroplastów na poszczególnych etapach przetwarzania tych materiałów,
- nowych sposobów formowania wstępnego materiałów, specjalnych spłotów i impregnacji wstępnej kordu,
- kształtowania cech geometrycznych form do produkcji z wykorzystaniem wieloosiowych obrabiarek numerycznych (formy do pasów o zębach skośnych, łukowych i daszkowych),
- rozbudowywania konstrukcji warstwy nośnej (nierozciągliwy i trący kord, dodatkowe włókna porzeczne i tkaniny przeplatające kord).

Wszystkie te działania zmierzają do zwiększenia trwałości pasów, ale także do określenia cyklu działania pasa, w tym dokładniejsze określenie czasu i warunków eksploatacji.

LITERATURA

- [1] *M. Dudziak*: Rozprawy (Pol. Poznańska) nr 229, 167 (1990).
- [2] *Z. Osiński*: Rozprawy (Pol. Warszawska) nr B 10103, 109 (1961).
- [3] *Z. Osiński*: Zagadnienia Drgań Nieliniowych, nr 9, 85 (1968).
- [4] *M. Dudziak*: Directions in development of flexible connector belts design. In: Modelling and Simulation in Machinery Productions, pp., Inter. Conference „Modelling and Simulation in Machinery Productions” Puchov, Slovakia, 8-10 May 1997.
- [5] *M. Dudziak*: Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 4, 455 (1993).
- [6] *G. Domek, I. Malujda*: Proceedings in Applied Mathematics & Mechanics 7, nr 1, 4070045 (2007).
- [7] *G. Domek, P. Krawiec*: Technologia i Automatykacja Montażu nr 4, 15 (2007).
- [8] *M. Dudziak M., G. Domek*: Mechanics of bending of timing belts with non straight teeth, The Tenth PanAmerican Congress of Applied Mechanics, X PACAM' 08, 12, 215, Cancun 2008.
- [9] *M. Dudziak, G. Domek G.*, Model of load in timing belts, The Tenth Pan-American Congress of Applied Mechanics, X PACAM' 08, 12, 219, Cancun 2008.