ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: GÓRNICTWO z. 83 Nr kol. 551

Bronisław FOLWARCZNY
Jacek SPAŁEK

POPRAWA TRWAŁOŚCI UZĘBIENIA PRZEKŁADNI MASZYN GÓRNICZYCH POPRZEZ MODYFIKACJĘ ZARYSU ZĘBÓW

Streszczenie. W referacie omówiono problemy poprawy trwałości uzębienia przekładni maszyn górniczych ze szczególnym zwróceniem uwagi na korzystny wpływ modyfikacji zarysu zębów.

Wpływ modyfikacji zarysu rozpatrzono w aspekcie poprawy trwałości uzębienia ze względu na zmęczeniowe złamania i zmęczeniową wytrzymałość stykową zębów.

1. Wstęp

Przekładnie zębate napędu maszyn górniczych są zespołami maszynowymi, decydującymi w zasadniczy sposób o niezawodności działania mechanicznych systemów technologicznych kopalni.

Ze względu na trudne warunki eksploatacyjne maszyn górniczych, charakteryzujące się silnymi stochastycznymi obciążeniami z dużym udziałem obciążeń dynamicznych oraz niekorzystnym oddziaływaniem środowiska kopalnianego (zapylenie i podwyższona wilgotność), występuje często przedwczesna utrata trwałości poszczególnych elementów przekładni.

Przeprowadzone obserwacje eksploatacyjne i analiza awaryjności napędu ścianowych przenośników zgrzebłowych i strugów [10] wykazują, że około 30% awarii tych przekładni stanowią uszkodzenia uzębienia.

W ogólności podstawowymi formami uszkodzeń uzębienia są:
- zmęczeniowe przełomy zębów,
- zmęczeniowe wykruszenia warstwy wierzchniej zębów (pitting),
- zużycie ścierne,
- zużycie adhezyjno-termiczne (zatarcie).

Poprawa trwałości uzębienia z uwagi na wymienione formy zniszczeń może być rozpatrywana zarówno w fazie konstruowania i wykonania, jak też w fazie użytkowania przekładni. Poprawa trwałości ze względu na kryterium zużycia ściernego i zatarcia może być w znacznym stopniu osiągnięta w czasie eksploatacji maszyn przez stosowanie odpowiedniego oleju smarującego [9] jak również zachowanie odpowiedniej jego czystości poprzez stosowanie właściwych uszczelnień i filtrowania względnie częstszej jego wymiany.

Zastosowanie oleju z dodatkami przeciwzatarciowymi może podnieść obciążenie zatarcia czterokrotnie [8], a zachowanie odpowiedniej czystości ole-

ju może zmniejszyć intensywność zużycia tarciowego zębów przekładni maszyn ścianowych rzędu 2-3-krotnie [1].

Natomiast poprawa trwałości z uwagi na złamania i zmęczenie stykowe zębów może być osiągnięta głównie poprzez zabiegi konstrukcyjno-technologiczne zmierzające do obniżenia stanu obciążenia eksploatacyjnego zębów.

Jednym ze sposobów zwiększenia trwałości zazębienia może być obniżenie nadwyżek dynamicznych poprzez modyfikację zarysu zębów ewolwentowych. Sposoby nanoszenia modyfikacji oraz ustalania ich wartości przedstawiono w [3, 6].

2. Teoretyczne uzasadnienie wzrostu trwałości zazębienia modyfikowanego ze względu na naprężenia u podstawy zęba

Powszechnie uznawane i stosowane metody obliczania wytrzymałościowego zazębienia uwzględniają w zależnościach na naprężenia u podstawy zęba współczynnik sił dynamicznych. Ponieważ dla dalszych rozważań nieistotne jest, w oparciu o którą z metod obliczeniowych prowadzona będzie analiza, wybrano bez dodatkowych uzasadnień metodę L. Müllera [6]. Według tej metody naprężenia u podstawy zęba opisane są zależnością:

$$\sigma_z = \frac{P}{b\,m}\, q_\varepsilon \cdot q \cdot K_p \cdot K_r \cdot K_s \cdot K_d, \tag{1}$$

gdzie:

- P - siła obwodowa działająca na ząb,
- b - szerokość koła zębatego,
- m - moduł zęba koła zębatego,
- q_ε - współczynnik podziału obciążenia w zazębieniu w zależności od wskaźnika przyporu,
- q - współczynnik kształtu zęba,
- K_p - współczynnik przeciążenia,
- K_s - współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia po wysokości zęba,
- K_d - współczynnik sił dynamicznych.

W pracach [4, 6, 7] wykazano, że dla zębów modyfikowanych współczynnik sił dynamicznych K_{dm} jest mniejszy co do wartości od współczynnika K_d dla zębów niemodyfikowanych. Ponieważ praktycznie wartości pozostałych współczynników są jednakowe dla zębów modyfikowanych i bez modyfikacji, można zapisać nierówność:

$$\sigma_{zm} < \sigma_z, \tag{2}$$

gdzie:

$$\sigma_{zm} = \frac{P}{b\,m}\,q_{\varepsilon} \cdot q \cdot K_p \cdot K_r \cdot K_s \cdot K_{dm}, \qquad (3)$$

przy czym: σ_{zm} - naprężenie u podstawy zęba modyfikowanego.

W czasie eksploatacji przekładni górniczych obserwuje się złamania zmęczeniowe zębów, będące dowodem na to, że obciążenia eksploatacyjne odpowiadają warunkom pracy w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Taki stan obciążenia wynika ze znacznych chwilowych przeciążeń, nie uwzględnianych w fazie projektowania przekładni. Fakt pracy zazębienia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej uzasadnia przy analizie trwałości zębów wykorzystanie znanej zależności pomiędzy naprężeniami oraz liczbą cykli zmian obciążenia:

$$\sigma_z^n \cdot N = c, \qquad (4)$$

gdzie:

c,n - stała zależna głównie od rodzaju materiału kół zębatych.

Korzystając z zależności (1) oraz (3) i wykonując niezbędne przekształcenia otrzymuje się zależność na współczynnik zwiększenia trwałości zazębienia ze względu na naprężenia u podstawy zęba:

$$K_z = \frac{N_m}{N} = \left(\frac{K_d}{K_{dm}}\right)^n, \qquad (5)$$

gdzie:

N_m - liczba cykli zmian obciążenia do wystąpienia złamania zmęczeniowego zęba modyfikowanego,

N - liczba cykli zmian obciążenia do wystąpienia złamania zmęczeniowego zęba niemodyfikowanego,

K_{dm}, K_d - współczynnik sił dynamicznych odpowiednio dla zębów modyfikowanych i niemodyfikowanych.

Ponieważ $K_{dm} < K_d$, wynika stąd, że $K_z > 1$. Tym samym udowodniono, że trwałość zazębienia modyfikowanego będzie większa od trwałości zazębienia niemodyfikowanego.

3. Teoretyczne uzasadnienie wzrostu trwałości zazębienia modyfikowanego ze względu na naprężenia stykowe

Podobnie jak złamania zmęczeniowe, obserwuje się w czasie eksploatacji przekładni górniczych wykruszenia warstwy wierzchniej tzw. pitting. Dowo-

dzi to, że również pod tym względem przekładnie pracują w zakresie ograniczonej zmęczeniowej wytrzymałości stykowej. Dlatego też i w tym przypadku można w analizie trwałości zazębienia korzystać ze znanej zależności pomiędzy naprężeniami stykowymi σ_H opisanymi wzorem Hertza a liczbą cykli zmian obciążenia:

$$\sigma_H^A \cdot N = C, \tag{6}$$

gdzie:

A oraz C - stałe zależne głównie od rodzaju materiału i czynnika smarującego.

Ze względu na fakt, że w praktyce projektowania kół zębatych, częściej używany jest wskaźnik naprężenia stykowego Stribecka "k", określany jako:

$$k = \frac{P_n \cdot K_r \cdot K_s \cdot K_p \cdot K_d}{2 \cdot \varrho \cdot b}, \tag{7}$$

wygodniej jest korzystać z innej postaci zależności (7), a mianowicie:

$$k^a \cdot N = c, \tag{8}$$

gdzie:

P_n - siła normalna działająca na ząb,

ϱ - zastępczy promień krzywizny zębów,

a oraz c - stałe zależne, podobnie jak A oraz C, lecz przyjmujące inne wartości.

Ponieważ modyfikacja zarysu nie wprowadza zmian krzywizny w miejscu występowania pittingu, a pozostałe współczynniki również nie zmieniają praktycznej wartości, po wprowadzeniu modyfikacji zęba zachodzi związek:

$$k_m < k, \tag{9}$$

gdzie:

$$k_m = \frac{P_n \cdot K_r \cdot K_s \cdot K_p \cdot K_{dm}}{2 \cdot \varrho \cdot b} \tag{10}$$

Korzystając z zależności (7) oraz (10) i wykonując niezbędne przekształcenia, otrzymuje się zależność na współczynnik zwiększenia trwałości zazębienia ze względu na zmęczeniową wytrzymałość stykową:

$$K_k = \frac{N_m}{N} = \left(\frac{K_d}{K_{dm}}\right)^a. \tag{11}$$

Z zależności (11) wynika, że $K_k > 1$. Świadczy to o wzroście trwałości zazębienia modyfikowanego w stosunku do niemodyfikowanego ze względu na naprężenia stykowe.

4. Współczynnik zwiększenia trwałości zazębienia przy stosowaniu modyfikacji zarysu głowy zęba koła

W pracach [2, 5] przedstawiono metody projektowania zębów modyfikowanych.

Ze względu na trudności technologiczne w wykonywaniu modyfikacji u podstawy zęba w pracy [3] zaproponowano uproszczoną modyfikację, polegającą na zmianie zarysu głowy zęba koła. Zaletą tej modyfikacji jest stosunkowo prosta technologia nacinania zębów. Wyniki badań dynamiki tego typu zazębienia dla zakresów obciążeń i prędkości stosowanych w górniczych przekładniach zębatych wykazały obniżenie obciążeń dynamicznych. Dla prędkości $V = 5$ m/s współczynnik sił dynamicznych $K_{dm} = 0,9\ K_d$ a dla prędkości $V = 11$ m/s $K_{dm} = 0,85\ K_d$. Przebieg badań i wyniki szczegółowe przedstawiono w [3].

Biorąc pod uwagę powyższe oraz zależności (5) i (11) ustalić można zakres współczynników zwiększenia trwałości zazębienia z modyfikacją głowy zęba koła w przedziale prędkości od 5 do 11 m/s.

$$(1,11)^n \leq K_z \leq (1,18)^n \tag{12}$$

$$(1,11)^a \leq K_k \leq (1,18)^a \tag{13}$$

Na podstawie dostępnej literatury, między innymi [5] można stwierdzić, że wartość wykładnika potęgowego n dla różnych materiałów zmienia się w granicach $6 \leq n \leq 10$, a jako wartość zalecaną można przyjąć 6,8. Należy bowiem zaznaczyć, że brak jest w literaturze bliższych danych dotyczących wartości wykładnika potęgowego n dla materiałów stosowanych na koła zębate. Wartości wykładnika potęgowego "a" dla niektórych materiałów zestawiono w tablicy 1 na podstawie [1], po uprzednim znalezieniu odpowiedników stali produkcji krajowej oraz na podstawie badań własnych [8].

Przyjmując skrajne wartości dla wykładników potęgowych "n" oraz "a" otrzymuje się zakresy zmian wartości współczynników zwiększenia trwałości dla tego typu modyfikacji w przedziale prędkości $5\ \text{m/s} \leq V \leq 11\ \text{m/s}$

$$(1,11)^6 \leq K_z \leq (1,18)^{10}$$

$$(1,11)^{4,78} \leq K_k \leq (1,18)^{17,76}$$

czyli:

$$1,9 \leq K_z \leq 5,3 \ : \ 1,6 \leq K_k \leq 18,5$$

Tablica 1

Wartości wykładnika potęgowego "a", dla niektórych rodzajów stali stosowanych na koła zębate

Rodzaj stali	a
20 130-150 HB	4,78
45 G2 hartow. indukcyjnie 45-58 HRC	8,51
40 HM ulepszana cieplnie 350-370 HB	17,76
50 HGM ulepszana cieplnie 270-300 HB	11,56
40 HGNM hartowana indukcyjnie 50-58 HRC	14,02
50 HG 270-300 HB	8,30
45 H ulepszana cieplnie 300 HB	5,38

Powyższe przedziały ustalone zostały jedynie w celu zobrazowania efektów, jakie uzyskać można, stosując modyfikację zarysu głowy zęba koła. Dla konkretnych przekładni należy każdorazowo przeprowadzić obliczenia, ustalając K_{dm} na podstawie [4] lub innych prac z tego zakresu.

Zastosowanie optymalnej modyfikacji zarysu zęba ze względu na obciążenia dynamiczne, zazwyczaj trudnej technologicznie do naniesienia, może przyczynić się jeszcze do większego wzrostu trwałości kół zębatych w porównaniu ze wskaźnikami trwałości uzyskanymi przy zastosowaniu tylko modyfikacji głowy zęba.

5. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wpływu modyfikacji zarysu zęba na trwałość kół zębatych wynikają następujące wnioski:

- modyfikacja zarysu zęba powoduje znaczny przyrost trwałości zazębienia w stosunku do zazębienia ewolwentowego z zębami bez modyfikacji,

- przez wprowadzenie modyfikacji zasadniczy wzrost trwałości uzyskuje się głównie ze względu na kryteria złamania zęba i zmęczenia stykowego. Jednocześnie w wyniku zastosowania modyfikacji zarysu zęba nastąpi wzrost trwałości ze względu na zużycie ścierne i adhezyjno-termiczne (zatarcie). Ilościowe ujęcie wpływu modyfikacji na te rodzaje zniszczeń wymaga jednak przeprowadzenia szerszych badań teoretyczno-doświadczalnych,
- stosowanie modyfikacji zarysu zębów wskazane jest szczególnie w przypadku przekładni zębatych maszyn górniczych, pracujących w warunkach silnych przeciążeń o charakterze dynamicznym.

LITERATURA

[1] Banatow P.S.: Iznos i powyszenije dołgowiecznosti gornych maszin. Wyd. Niedora, Moskwa 1970.

[2] Buckingham E.K.: Acceleratet gear-life tests. Machine Design nr 18/1974.

[3] Folwarczny B.: Projektowanie modyfikowanego zarysu zęba. Przegląd Mechaniczny nr 14/1970.

[4] Folwarczny B.: Wpływ modyfikacji zarysu zęba na siły dynamiczne w przekładniach. Przegląd Mechaniczny nr 24/1975.

[5] Kocanda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali, WNT, Warszawa 1972.

[6] Muller L.: Przekładnie zębate - obliczenia wytrzymałościowe, WNT, Warszawa 1970.

[7] Muller L.: Siły dynamiczne w kołach zębatych. Przegląd Mechaniczny nr 15/1975.

[8] Spałek J.: Wpływ dodatków przeciwzatarciowych w oleju na zmęczeniową wytrzymałość stykową. Technika Smarownicza nr 5/1975.

[9] Spałek J.: Wpływ olejów smarowych na trwałość kół zębatych przekładni maszyn górniczych. ZN Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 72/1976.

[10] Praca zbiorowa - Badanie nad zwiększeniem trwałości i niezawodności przekładni zębatych napędów łańcuchowych górniczych. Praca zlecona NB-325/251/RG-2/74, IMG, 1974 (praca niepublikowana).

ИСПРАВЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА ПЕРЕДАЧИ ГОРНЫХ МАШИН МОДИФИКАЦИЕЙ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ

Р е з ю м е

В докладе рассматриваются вопросы исправления прочности зубчатого венца передачи горных машин с особым вниманием на полезное влияние модификации профиля зубьев.

Влияние модификации профиля рассмотренно, принимая во внимание исправление прочности зубчатого венца из-за усталости перелома и усталости прочности касания зубьев.

IMPROVING OF TOOTJ DURABILITY IN MINING TRANSMISSIONS BY MODIFYING TOOTH OUTLINE

S u m m a r y

The paper discusses improving of mining machinery transmissions tooth durability by favourable tooth outline changes. Durability is thus being increased because of fewer wear breaks and face faults.