

MODEL ROZWOJU PITTINGU DLA POTRZEB DIAGNOSTYKI W PRZEKŁADNIACH ZĘBATYCH

Jerzy TOMASZEWSKI
Ośrodek Badawczo – Rozwojowy REDOR
ul. I. Paderewskiego 11 A, 43-300 Bielsko - Biala

1. Wstęp.

Pitting jest procesem zużycia (nazywany też zużyciem guzłkowatym) zmęczeniowego, spowodowany cyklicznym oddziaływaniem naprężeń kontaktowych w granicach naprężeń Hertza, powstających w warstwach wierzchnich skojarzeń trybologicznych podczas toczenia z poślizgiem kół zębatych przy styku smarnym. Charakterystycznym obrazem powierzchni uszkodzonej pittingiem są liczne jamki o dość regularnym, często kropłowym kształcie i ostrych krawędziach ścian. Liczba i rozmiary jamek pittingowych mogą ulegać zmianom (zwiększać się lub zmniejszać – pitting przemijający.) Dla potrzeb diagnostyki w niniejszej pracy zajęto się formą tzw. pittingu liniowego i lawinowego. Miarą rozwoju pittingu jest przyrost powierzchni uszkodzeń bocznej powierzchni zęba w określonej jednostce czasu. Z reguły, jeśli ten przyrost jest liniowy lub progresywny, to taka forma rozwoju pittingu prowadzi do uszkodzenia łożysk lub wylamania zęba przekładni. Praktyka eksploatacyjna przekładni dużych mocy (cementownie, hutnictwo, energetyka) wskazuje na dość częste przypadki koniecznego ze względów ekonomicznych eksploataowania przekładni a wyraźnymi śladami pittingu liniowego i nawet początkowego stadium pittingu progresywnego. Dla tych przypadków eksploatacji przekładni, konieczny jest nadzór diagnostyczny, pozwalający ocenić zagrożenie wystąpienia lawinowej formy pittingu, prowadzącego w konsekwencji do konieczności wyłączenia z eksploatacji urządzenia.

2. Diagnostyczny model rozwoju pittingu

Ogólny model diagnostyczny rozwoju pittingu ma postać [1]

$$\frac{dx}{dt} = f(x, l, \sigma, t) \quad (1)$$

$$s(t) = S(t) \cdot x(t) + v(t)$$

gdzie : x – wektor uszkodzenia, l – wektor logistyczny, σ - naprężenie, $S(t)$ macierz symptomu, $v(t)$ – wektor zakłóceń pomiarowych. Warunkiem skorzystania z równania (1) jest konieczność wyznaczenia funkcji $f(x, l, \sigma, t)$, oraz znajomości macierzy $S(t)$. Opis postaci funkcji i doświadczalnej metodyk wy-

znaczenia jej parametrów jest przedmiotem niniejszego artykułu.

3. Model opisu narastania pittingu

Do opisu uszkodzenia bocznej powierzchni zęba pittingiem, wykorzystano metodę opisu kumulacji uszkodzeń pod wpływem zmieniających się przebiegów naprężeń. Do opisu makroskopowego $D(t)$ wewnętrznej degradacji materiału przy izotropowości uszkodzenia, jego miarę w przypadku pittingu można zdefiniować wykorzystując prace Kachanowa, w następujący sposób [2]:

$$D(t) = \frac{A}{A_0}, \quad 0 \leq D(t) \leq 1 \quad (2)$$

Dla takiej funkcji $D(t)$, przy jednokierunkowym obciążeniu, równanie kinetyczne ma następującą postać [3]:

$$\frac{dD}{dt} = C \cdot \left[\frac{\sigma}{1-D} \right]^n \quad (3)$$

gdzie : $C > 0$ i $n > 0$ są stałymi materiałowymi. Wprowadzając oznaczenie X zamiast D , równanie (3) przyjmie postać

$$\frac{dX}{dt} = C \cdot \left[\frac{\sigma}{1-X} \right]^n \quad (4)$$

Ponieważ proces narastania pittingu na powierzchni zęba jest losowy, więc do opisu tego procesu można zastosować metodę randomizacji [3] empirycznego równania (4). Randomizacja równania (4) polega na włączeniu odpowiedniego procesu stochastycznego $Y(t, \gamma)$. Równanie (4) przyjmie postać :

$$\frac{dx}{dt} = C \cdot \left[\frac{\sigma}{1-x} \right]^n \cdot Y(t, \gamma) \quad (5)$$

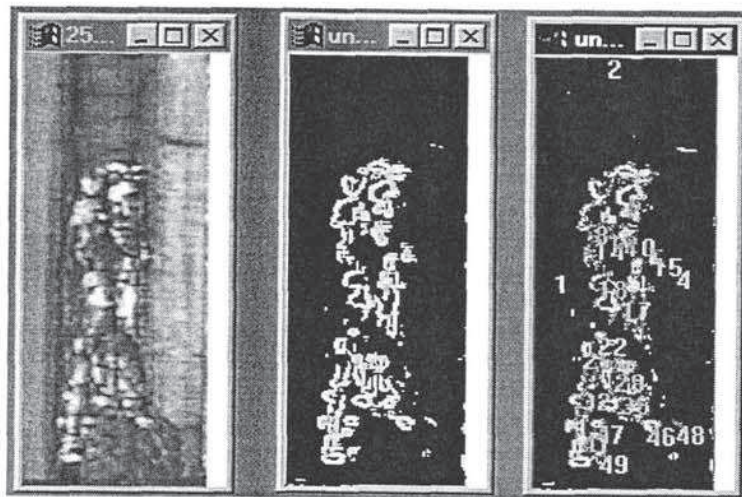
gdzie: $Y(t, \gamma)$ oznacza nieujemny proces stochastyczny, charakteryzujący łączne skutki oddziaływania nieznanymi czynnikami losowymi, powodujących rozrzut prędkości narastania powierzchni spittingowanej. Przyjmuje się, że proces $Y(t, \gamma)$ jest gaussowskim białym szumem. Jak więc widać, obecność szumu modyfikuje zachowanie się powierzchni spittingowanej ; jest to analogiczne do zjawiska występującego w fizyce statystycznej znanego jako przejście fazowe powodowane szumem. Jeśli współczynniki występujące w stochastycznym równaniu (5) spełniają odpowiednie warunki, to rozwiązanie

$X(t)$ jest ciągle z prawdopodobieństwem jeden i jest ono dyfuzyjnym procesem Markowa, a gęstość prawdopodobieństwa przejścia $p(X,t/X_0,t_0)$ spełnia równanie Fokera-Planka-Kolmogorowa [4].

4. Wyznaczenie stałych modelu diagnostycznego

Parametry modelu diagnostycznego (5), wyznaczono dla koła zębatego o zębach prostych o modle $m=4$, liczbie zębów $z_1 = 27$, wykonanego ze stali 40HN,

azotowanego jonowo na głębokość 0,8 mm. Koło pracowało przy obciążeniu momentem $M=610$ Nm. W czasie pracy okresowo rejestrowano za pomocą kamery powierzchnię spittingowaną zębów. Ponadto prowadzono rejestrację on-line wartości RMS i RMS yerk drgań korpusu przekładni, przy użyciu programu DASY-LAB wersja 3.5. Obliczenie powierzchni spittingowanej zęba koła zrealizowano za pomocą programu Image Pro Plus.



Rys.1. Etapy obróbki obrazu powierzchni spittingowanej zęba nr.27.

Obraz powierzchni uzyskany z kamery (rys.1a), poddano filtracji filtrem typu variance o parametrach 3×3 , następnie zastosowano maksymalne wyostrenie γ , oraz ściemniono obraz uzyskując efekt wg rys.1b. Poszczególne etapy obróbki obrazu pokazano na rys.1. Pomiar powierzchni spittingowanej wykonano automatycznie, po zaznaczeniu obszarów wg. rys.1 c. W tabelicy 1 podano przykładowo wartości obliczonej spittingowanej powierzchni zębów o numerach 1,7,10,15.

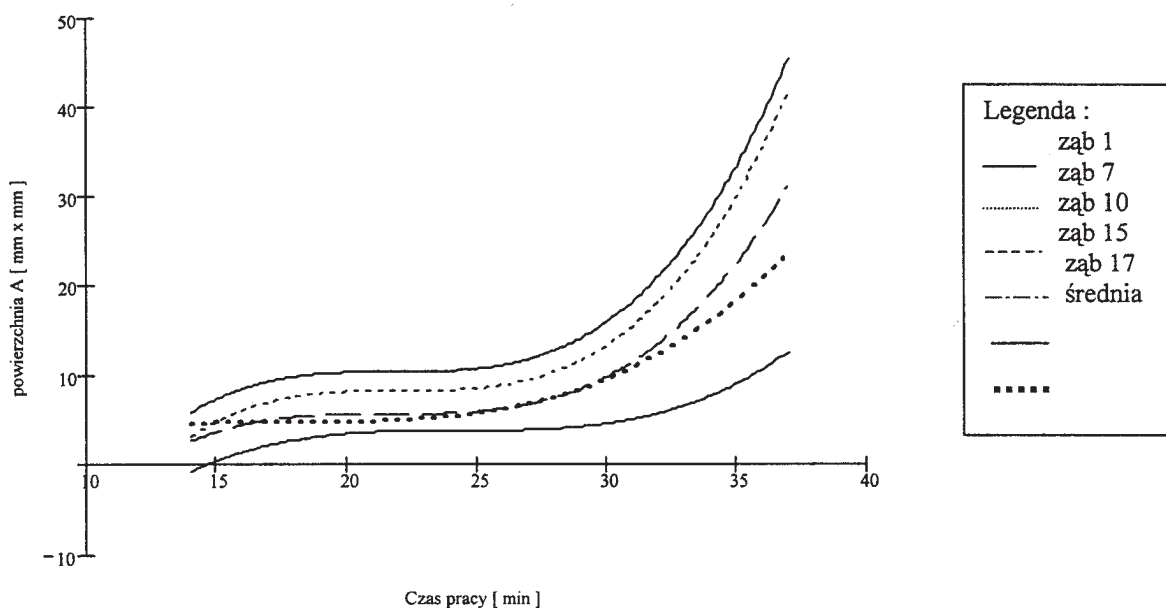
Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów powierzchni spittingowanej kilku zębów koła.

| Czas pracy [min] | Nr zęba / powierzchnia spittingowana [mm x mm] | | | |
|------------------|--|------|-------|-------|
| | 1 | 7 | 10 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 2,7 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 3,45 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 5,08 | 3,15 | 2,72 | 0 |
| 17 | 5,58 | 6,09 | 3,84 | 4,0 |
| 21 | 10,02 | 7,87 | 5,26 | 4,06 |
| 26 | 10,87 | 9,93 | 7,52 | 5,64 |
| 31 | 12,88 | 15,4 | 11,26 | 7,21 |
| 37 | 26,53 | 42,1 | 31,24 | 18,77 |

Na rys.2 pokazano wykresy narastania powierzchni spittingowanej, w funkcji czasu pracy przekładni, z zaznaczeniem wartości średniej zużycia 27 zębów przekładni.

W początkowym stadium rozwoju pittingu, następuje nagły szybki skok powierzchni spittingowanej, po którym od pewnego przedziału czasowego następuje powolny liniowy jego rozwój. Po przekroczeniu określonego czasu, następuje tzw. lawinowa forma pittingu, która w końcowej fazie błyskawicznie prowadzi do zużycia całej powierzchni zęba. Można tu znaleźć analogię do rozwoju szczeliny zmęczeniowej, która po przekroczeniu wartości granicznej prowadzi do . bardzo szybkiego eksplozyjnego jej rozwoju.

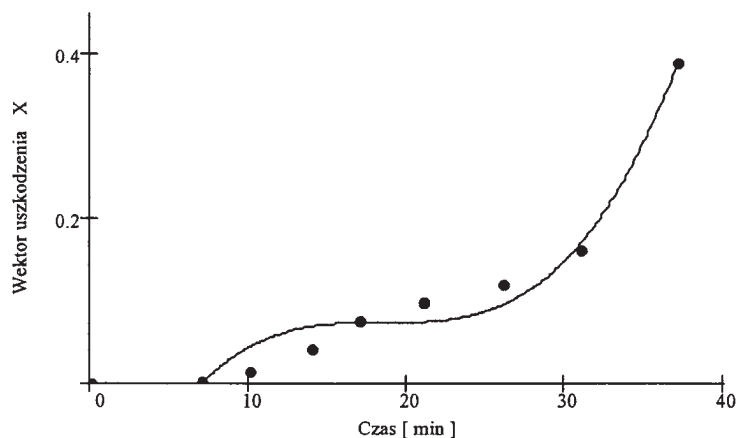
W początkowym stadium rozwoju pittingu, następuje nagły szybki skok powierzchni spittingowanej, po którym od pewnego przedziału czasowego następuje powolny liniowy jego rozwój. Po przekroczeniu określonego czasu, następuje tzw. lawinowa forma pittingu, która w końcowej fazie błyskawicznie prowadzi do zużycia całej powierzchni zęba. Można tu znaleźć analogię do rozwoju szczeliny zmęczeniowej, która po przekroczeniu wartości granicznej prowadzi do . bardzo szybkiego eksplozyjnego jej rozwoju.



Rys.2. Krzywe narastania powierzchni spittingowanej zębów przekładni badawczej.

Na rys.3 pokazano zmianę wektora uszkodzenia X , określanego jako stosunek sumy powierzchni spittingowanej wszystkich zębów do sumy czynnych

powierzchni wszystkich zębów, w funkcji czasu pracy.



Rys. 3. Zmiana wektora uszkodzenia w funkcji czasu pracy przekładni.

Krzywa pokazana na rys.3 jest podstawą do wyznaczenia parametrów modelu określonego równaniem (4). Natomiast rodzina krzywych wyznaczona dla kilku egzemplarzy kół zębatych, jest podstawą do wyznaczenia parametrów modelu określonego zależnością (5).

5. Wnioski

Proces rozwoju pittingu na zębach kół przekładni jest procesem losowym, do opisu którego należy stosować stochastyczne matematyczne modele.

Narastanie zużycia powierzchni zęba pittingiem, w początkowej fazie następuje szybko, po czym prędkość narastania maleje, przyjmując liniowy charakter. Po przekroczeniu określonej liczby cykli, liniowy charakter zużycia zmienia się na silnie nieliniowy a w końcowej fazie przyjmuje postać lawinowego rozwoju prowadzącego do całkowitej degradacji zazębienia. Metodyka pomiaru powierzchni zęba zużytego pittingiem z wykorzystaniem programów do obróbki obrazów, pozwala dosyć dokładnie i szybko wyznaczać zużycie zmęczeniowe bocznej powierzchni zębów.

6. Literatura :

1. Tomaszewski J, Osiński J : „*Diagnostyczny model rozwoju pittingu w przekładniach zębatych*”. II Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej. Warszawa 2000, str.242-243
2. Kachanov L.M :”*Introduction to Continuum Damage Mechanics*” . Martinus-Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1986.
3. Sobczyk K., Spencer Jr. B.F.: „*Stochastyczne modele zmęczenia materiałów*”. WNT, Warszawa 1996
4. Sobczyk K.: ”*Stochastyczne równania różniczkowe. Teoria i zastosowania*”. WNT, Warszawa 1996.

Praca powstała w ramach projektu badawczego nr. 7 T07B 009 16 finansowanego przez KBN w latach 1999-2001