



Mechanizmy zniszczeń kół zębatach w napędach maszyn roboczych i ich diagnostyka w warunkach eksploatacyjnych

Daniel Adamecki – Politechnika Śląska

Wojciech Grzegorzek – Politechnika Śląska

Jarosław Mikula – Politechnika Śląska

Stanisław Mikula – Politechnika Śląska

Streszczenie: Rozdział dotyczy podstawowych procesów niszczących uzębienia kół przekładni zębatach w układach napędowych maszyn roboczych oraz możliwości ich diagnostyki w warunkach poligonowych. W rozdziale opisano etapy rozwoju zmęczeniowych złamań zębów oraz procesy niszczące generowane tarciem, a więc zużycie ściernie i wykuszanie warstwy wierzchniej zębów kół zębatach. Zaproponowano adaptację metody magnetyczno-proszkowej w wariantcie mokrym dla potrzeb eksploatacyjnej diagnostyki głównych procesów niszczących kół zębatach stosowanych w napędach maszyn roboczych, w szczególności maszyn górniczych oraz maszyn użytkowanych w warunkach poligonowych. Przedstawiono koncepcję specjalnego induktora do stosowania w diagnostyce magnetyczno-proszkowej kół zębatach.

Słowa kluczowe: maszyny robocze, przekładnia zębata, diagnostyka uszkodzeń, metoda magnetyczno-proszkowa

Wear mechanisms in toothed wheels of gears in drives of the machines and their diagnostics in field conditions

Abstract: The chapter concerns the main processes of gearboxes wear in driving systems of the machines as well as possibility of their diagnostics in *in-situ* conditions. The stages of gearbox teeth break and wear processes in the result of friction, i.e. abrasive wear and chipping of gearbox teeth surfaces, are described. It has been suggested to adapt the magnetic-powder method in the wet variant for the purpose of diagnostics of the main wear processes of gears used in the drives of operating machines, especially the mining machines, in *in-situ* conditions. A concept of a special inductor for use in magnetic particle inspection of gears, is presented.

Keywords: heavy machinery, gearbox, damage diagnostics, Magnetic Particle Inspection (MPI)

1. Wprowadzenie

Przekładnie zębata wykorzystywane w napędach maszyn roboczych, zwłaszcza górniczych, budowlanych, drogowych i rolniczych pracują najczęściej jako wielostopniowe reduktory stosowane w celu uzyskania na wyjściu przekładni dużych momentów obrotowych przy umiarkowanej prędkości obrotowej. Dla wszystkich wspomnianych zastosowań charakterystyczna jest duża zmienność, na ogół wysokich obciążeń eksploatacyjnych, silne oddziaływanie ściernie i korozyjne, obecność pyłowych zanieczyszczeń mineralnych w środowisku pracy. Występuje też zmienność przestrzennego położenia przekładni, utrudniająca warunki smarowania i generująca dodatkowe obciążenia o zmiennej konfiguracji w przestrzeni. Warunki pracy przekładni zębatach we wspomnianych maszynach roboczych ograniczają skutecznie stosowanie typowych metod diagnostyki eksploatacyjnej oraz utrudniają możliwości właściwego serwisowania. Jednocześnie niezawodność działania tych maszyn ma szczególnie duże znaczenie, gdyż wymuszone postoje awaryjne skutkują na ogół bardzo znacznymi stratami, dużym nakładem pracy przy usuwaniu skutków awarii oraz są często źródłem zagrożenia bezpieczeństwa ludzi i procesów technologicznych. Duże wymiary gabarytowe i znaczące masy układów napędowych maszyn roboczych dodatkowo utrudniają warunki pracy obsługi. Wspomniane



prace serwisowe często wykonywane muszą być w warunkach poligonowych, w miejscu użytkowania, bez zabezpieczenia niezbędnej infrastruktury serwisowej i diagnostycznej.

Chociaż warunki pracy wielu wspomnianych maszyn roboczych są bardzo zróżnicowane, co wywołuje zróżnicowanie występujących uszkodzeń eksploatacyjnych, to wiele procesów niszczących występujących w napędowych przekładniach zębatych tych maszyn ma analogiczne cechy. Pozwala to na formułowanie wspólnych, ogólnych prawidłowości i wytycznych odnoszących się do przekładni zębatych niezależnie od rodzaju maszyn, w których są użytkowane. Wspólne dla większości maszyn roboczych są podstawowe mechanizmy zniszczeń eksploatacyjnych przekładni zębatych, których poznanie pozwala na ich bardziej racjonalne wykorzystanie w większości maszyn roboczych oraz podejmowanie właściwych, uprzedzających działań zaradczych w oparciu o skuteczną diagnostykę eksploatacyjną, czyli ocenę stanu obiektu w czasie jego pracy, stosując różne techniki diagnozowania [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Opisane warunki użytkowania maszyn roboczych powodują, że podstawowymi procesami niszczącymi kół zębatych są zmęczeniowe złamania zębów oraz procesy związane z tarciem i dużymi obciążeniami stykowymi zębów, a więc ich zużycie ściernie i wykruszanie warstwy wierzchniej. Zniszczenia kół zębatych wynikające z zacierania w rozpatrywanych przypadkach stosowania przekładni zębatych mają miejsce w wyjątkowych sytuacjach, głównie dzięki umiarkowanym prędkościom obrotowym kół zębatych w maszynach roboczych. W tym opracowaniu zniszczenia przez zatarcie będą pominięte jako zdecydowanie rzadziej występujące we wspomnianych napędach.

2. Zmęczeniowe złamania zębów kół zębatych

Złamania zębów przekładni zębatych, niezależnie od tego czy są to przełomy doraźne w wyniku gwałtownych przeciążeń, czy też pęknięcia zmęczeniowe stopniowo rozwijające się do rozmiarów krańcowych, w eksploatacji maszyn roboczych mają szczególnie krytyczny charakter. Powodują one zwykle nagłe, niespodziewane awarie, często bez wyraźnych wcześniejszych objawów, które pozwoliłyby na działania uprzedzające. Nagłe awarie przekładni napędowych maszyn powodują duże straty postojowe oraz często stanowią zagrożenie dla ich obsługi. Wszystkie inne rodzaje procesów niszczących uzębienia kół zębatych mają charakter stopniowo narastający, ponadto często towarzyszą im wyraźne symptomy dzięki temu są łatwiejsze do praktycznego diagnozowania w toku eksploatacji. Stąd też szczególną uwagę należy poświęcać trwałości zmęczeniowej uzębień kół zębatych napędów maszyn roboczych. Zmęczeniowe złamania zębów przekładni zębatych w toku eksploatacji rozwijają się etapowo z różnym wiodącym procesem niszczącym na każdym z etapów.

2.1. Etap I: Inkubacja mikropęknięć zmęczeniowych zębów

Zapoczątkowanie pęknięć zmęczeniowych zębów kół zębatych, prowadzących ostatecznie do pełnego przełomu zębów, najczęściej postępuje od ognisk zmęczeniowych usytuowanych w warstwie wierzchniej u podstawy zębów. Rolę ognisk zmęczeniowych pełnią różnego rodzaju defekty powierzchniowe zlokalizowane w strefie maksymalnego stopnia wyężenia materiału kół. W inicjacji pęknięć zmęczeniowych główne znaczenie mają naprężenia rozciągające w warstwie powierzchniowej zęba, a pochodzące od zmiennego momentu zginającego wywoływanego siłami międzyzębnymi. Ogniskami mikropęknięć zmęczeniowych mogą być rysy obróbcze, wtrącenia niemetaliczne powierzchniowe i podpowierzchniowe, pęknięcia hartownicze i przypalenia szlifierskie oraz wady strukturalne materiału. Z reguły u podstawy zęba istnieje bardzo wiele potencjalnych ognisk zmęczeniowych i często inkubacja mikropęknięć ma miejsce jednocześnie w wielu ogniskach. Zwykle jedno z tych mikropęknięć w toku dalszej pracy daje początek sukcesywnemu rozwojowi pęknięcia o rozmiarach makroskopowych. Niekiedy można na przełomie zęba obserwować rozwijanie się

ostatecznego pęknięcia zęba, inicjowanego od więcej niż jednego ogniska. Zwykle na pewnym etapie pracy zębów te, nawet liczne mikropęknięcia łączą się stanowiąc jedno niszczące pęknięcie w końcowym etapie eksploatacji koła zębatego. Okres inkubacji mikropęknięć może mieć różny udział w całym okresie pracy zębów. Zależy to od szeregu czynników, z których główne to amplituda naprężeń zmiennych, rodzaj i rozmiar wad powierzchniowych (przede wszystkim ich głębokość), rodzaj i wielkość naprężeń własnych w strefie ogniska zmęczeniowego oraz własności mechaniczne materiału koła. Na pierwszym etapie powstają mikroszczeliny o rozmiarach submikroskopowych.

2.2. Etap II: Rozwój pęknięć zmęczeniowych zębów kół zębatych

Gdy rozmiar (głównie głębokość) mikropęknięć, które zostały zainicjowane w trakcie etapu I osiągnie wielkość progową rozpoczyna się okres stopniowego rozwoju pęknięcia. Prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych dobrze opisuje prawo Parisa, którego najczęściej spotykany zapis ma postać równania różniczkowego [1]:

$$\frac{dl}{dN} = C_0 (K_I^m - K_{Ip}^m) \quad (1)$$

gdzie:

dl/dN – przyrost głębokości pęknięcia zmęczeniowego odniesiony do liczby cykli zmian obciążenia,

C_0 – stała materiałowa wyznaczana doświadczalnie,

K_I – amplitudalna wartość współczynnika intensywności naprężeń:

$$K_I = \sigma_a \sqrt{l} \quad (2)$$

σ_a – naprężenie amplitudalne cyklu zmęczeniowego,

l – bieżąca głębokość pęknięcia,

K_{Ip} – progowa wielkość współczynnika intensywności naprężeń, poniżej której pęknięcia zmęczeniowe nie rozwijają się,

m – wykładnik potęgowy zależny od rodzaju materiału i jego struktury, zwykle dla stali $m = 2 \div 3$ [1].

Pęknięcie zmęczeniowe rozwija się według zależności (1) do chwili osiągnięcia wartości K_I równej krytycznej wielkości intensywności naprężeń K_{Ic} , która to wielkość jest cechą materiałową określaną w znormalizowanych warunkach [1]. Im wyższa wielkość K_{Ic} tym wyższa trwałość zmęczeniowa elementu w tych samych warunkach.

Analiza zapisu prawa Parisa wskazuje, że rozmiar pęknięć zmęczeniowych ma charakter stale monotonicznie rosnący przy prędkości postępu pęknięcia wzrastającej wykładniczo. W warunkach eksploatacji przekładni zębatych występują bardzo liczne dodatkowe wpływy, które powodują, że przebieg pęknięcia zmęczeniowego odbiega, czasem znacznie, od „modelowego” rozwoju pęknięcia opisanego prawem Parisa. W szczególności w pracy przekładni maszyn roboczych występują okresy znaczącego zmniejszenia obciążenia, co może skutkować okresowym zahamowaniem rozwoju pęknięcia. Znajduje to często wyraźne odzwierciedlenie na obrazie powierzchni całkowitego przełomu zębów w postaci tzw. linii przystankowych (rys. 1). Również krótkotrwałe przeciążenia przekładni odbijają się na przebiegu rozwoju pęknięcia. Przeciążenia, jeśli nie są długotrwałe i nadmiernie duże, skutkują często wystąpieniem na czole pęknięcia zmęczeniowego strefy odkształceń plastycznych. Powoduje ono często wystąpienie efektu lokalnego umocnienia plastycznego w strefie czoła pęknięcia, co może na pewien okres zahamować rozwój pęknięcia wskutek uformowania się znacznych naprężeń własnych ściskających. Gdy pęknięcie „pokona” strefę lokalnie umocnioną następuje silny, skokowy

wzrost prędkości postępu pęknięcia, niekiedy wtedy występuje też zmiana kierunku głównego pęknięcia. Stąd też powierzchnia przełomów rzeczywistych zębów kół zębatych często ma złożony charakter, z licznymi uskokami, zmianami kierunku pęknięcia, tworząc obraz charakterystycznych „dorzeczy”.



Rys. 1. Obraz powierzchni eksploatacyjnego przełomu zęba przekładni zębatej. Widoczne ogniska zmęczeniowe, linie przystankowe pęknięcia zmęczeniowego i strefa dołomu zęba [opracowanie własne]

Generalnie ze wzrostem pęknięcia zwykle zmienia się ziarnistość przełomu, od powierzchni drobnoziarnistej w bezpośrednim sąsiedztwie ognisk zmęczeniowych do gruboziarnistej w strefie bliskiej końcowego dołomu. Mikroskopowo można wyróżnić swoiste prążki zmęczeniowe odpowiadające kolejnym przyrostom pęknięcia od kolejnych cykli zmian obciążenia (obrotów koła). Prążki zmęczeniowe mają zróżnicowaną szerokość w zależności od stopnia postępującego pęknięcia, z reguły wzrastającą w miarę postępu procesu zmęczeniowego. Rzeczywiste obrazy pęknięć zmęczeniowych zębów kół zębatych są często bardzo złożone, gdyż oprócz opisanych czynników, silny wpływ ma stan obróbki cieplnej, a zwłaszcza cieplno-chemicznej kół zębatych – konstytuujący złożony stan naprężeń własnych zwłaszcza w warstwie wierzchniej zębów. Pewien wpływ ma również sztywność zębów z zaistniałymi pęknięciami, zmniejszająca się w miarę postępującego pęknięcia, co powoduje, że stale zmienia się rozkład obciążeń na poszczególne zęby będące w jednoczesnym zazębieniu oraz rozkład obciążenia po długości linii zębów [6].

Wykonawcze odchyłki geometryczne kół zębatych, zwłaszcza błędy kąta pochylenia linii zębów, odchyłki technologiczne gniazd łożyskowych, ugięcia sprężyste wałów zależne od chwilowego przenieszonego obciążenia oraz gradienty temperatury różnych stref przekładni zębatych powodują, że w praktyce zawsze mają miejsce większe lub mniejsze nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii zębów. To powoduje, że największe jednostkowe obciążenia mają miejsce najczęściej na jednym lub drugim końcu linii zęba. W tej strefie więc najczęściej ma swój początek rozwój pęknięć zmęczeniowych zębów. Ząb lub jego część, w której rozpoczęło się pęknięcie zmęczeniowe wykazuje zwiększoną podatność, uchyla się w rosnącym stopniu od przenoszenia obciążenia, powodując znaczne przeciążenia zębów sąsiednich, będących w jednoczesnym przyporze. Przyspiesza to pęknięcie zmęczeniowe zębów sąsiednich. Stąd też w eksploatacji obserwuje się wskrośne pęknięcia zmęczeniowe części zęba oraz często zniszczenia zmęczeniowe większej liczby zębów w bezpośrednim sąsiedztwie tego zęba, w którym pęknięcie się rozpoczęło (rys. 2). Procesowi rozwoju pęknięcia lub wielu pęknięć zmęczeniowych towarzyszy na ogół zwiększony hałas generowany przez przekładnię. Jest to

sygnał diagnostyczny, który może być skutecznie zidentyfikowany metodami diagnostyki drganiowo-akustycznej, natomiast w praktyce jest trudny do ujawnienia bez odpowiedniej aparatury.



Rys. 2. Jednoczesne zmęczeniowe złamania częściowe dwóch zębów przekładni zębatej. Widoczne również zmęczeniowe wykruszenia warstwy wierzchniej współwystępujące ze zmęczeniowym wyłamaniem części zęba (po prawej stronie)
[opracowanie własne]

Obecność środków smarnych w przekładniach zębatych powoduje, że środki te mają dodatkowy, złożony wpływ na proces pękania zmęczeniowego. Z reguły przy współczesnych środkach smarnych, zawierających wiele modyfikujących dodatków wpływ olejów przekładniowych powoduje, że zmienia się prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych, najczęściej w kierunku przyspieszenia pękania w obecności powierzchniowo aktywnych cieczy [1]. Zjawisko to, zwane efektem Rebindera, ciągle nie jest dostatecznie zbadane, jeśli chodzi o aktywność licznych dodatków w stosowanych współcześnie środkach smarnych, zwłaszcza gdy środki te zmieniają wyraźnie swoje własności w toku eksploatacji w wyniku zjawisk starzenia, zanieczyszczenia olejów pyłami, wilgoci i innych czynników.

2.3. Etap III: Gwałtowny rozwój pęknięć zmęczeniowych zębów kół zębatych

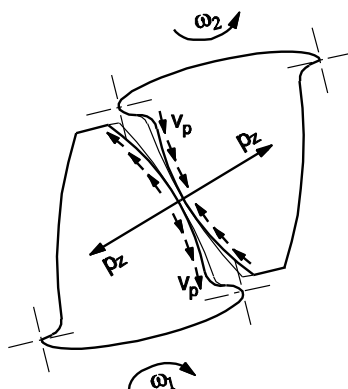
Gdy rozmiar pęknięcia zmęczeniowego określonego zęba koła zębatego osiągnie rozmiar krytyczny, rozwój procesu pękania zmęczeniowego gwałtownie przyspiesza. Na tym etapie nie obowiązuje już prawo Parisa, a proces zniszczenia koła zębatego nieuchronnie zmierza do końcowego przełomu ze wszystkimi tego skutkami. Na tym etapie proces pękania opisany może być zależnościami mechaniki pękania. Końcowa strefa pęknięcia zmęczeniowego zwana dołomem na ogół diametralnie zmienia swój charakter, co ma swoje odbicie w obrazie przełomu (rys. 2). Pełne złamanie zęba może na tym etapie nastąpić nawet po niewielkiej liczbie cykli (obrotów) koła zębatego. Często strefa dołomu zębów kół zębatych nosi wyraźne cechy kruchego pęknięcia, a jego powierzchnia charakteryzuje się na ogół dużo większą ziarnistością, wyraźnie odcinając się swoim wyglądem od strefy sukcesywnego rozwoju pęknięcia opisanego w etapie II. Wyłamany na tym etapie pojedynczy ząb lub większa ich liczba, często gwałtownie blokuje przekładnię doprowadzając do zniszczenia innych zębów oraz do uszkodzenia łożysk, wałów lub połączeń obrotowych. Następuje gwałtowne awaryjne zatrzymanie układu maszynowego z dużymi skutkami technicznymi i zagrożeniem bezpieczeństwa obsługi.

3. Procesy niszczące warstwę wierzchnią zębów kół zębatych

Duże i zmienne obciążenia przenoszone przez koła zębate napędów maszyn roboczych wywołują wysokie naciski stykowe na powierzchniach roboczych zębów. Jest to przyczyną rozwijania się procesów intensywnego zużycia ściernego i wykruszania warstwy wierzchniej, zwłaszcza w sytuacji współwystępowania zanieczyszczeń środków smarnych pyłami mineralnymi o dużej twardości oraz często wzmożonej aktywności chemicznej.

Mechanizm zużycia ściernego kół zębatach jest bardzo złożony i silnie uzależniony od właściwości mechanicznych materiałów użytych do wytwarzania kół i zastosowanych zabiegów technologicznych oraz własności środków smarnych. Z reguły koła zębatach maszyn roboczych wykonywane są ze stali stopowych i poddawane obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej dla uzyskania możliwie dużej odporności na powierzchniowe procesy zużyciowe. Zużycie ściernie i wykruszanie warstwy wierzchniej (pitting) w toku eksploatacji kół zębatach pozostają we wzajemnych złożonych relacjach, często o charakterze synergicznego wzajemnego wzmacniania się i przyspieszania destrukcji kół. W procesie zużycia ściernego i wykruszania warstwy wierzchniej często można wyróżnić dwa charakterystyczne etapy, na których dominujący jest określony mechanizm niszczenia.

Etap I: Na tym pierwszym, początkującym etapie eksploatacji przekładni zębatach wielkość ubytków zużyciowych zębów jest bezpośrednio ściśle związana z wielkością poślizgów na głowach i stopach zębów. Profil zębów na tym etapie pozostaje w przybliżeniu odpowiadający zarysowi ewolwentowemu. Maleje jedynie promień krzywizny zębów, głównie w strefie średnicy tocznej. Dla koła napędzającego większe ubytki zużyciowe obserwuje się na głowie zębów, nieco mniejsze na stopie, natomiast dla koła napędzanego ubytki zużyciowe są większe na stopie zębów. W strefie średnicy tocznej ubytki zużyciowe są minimalne i zwiększają się w miarę oddalania się od punktu tocznego w stronę głowy i stopy zębów (rys. 3). Powierzchnie robocze zębów na tym etapie nie wykazują znaczących zmian chropowatości, brak również wyraźnych lokalnych defektów w postaci rys, wgłębień czy mikropęknięć. W tym okresie można zaobserwować mniej lub bardziej wyraźny efekt docierania się uzębień. W wyniku zużycia bywa, że łagodzony jest rozkład lokalnych nacisków stykowych wzdłuż linii zębów. Występuje w tej sytuacji spadek nadwyżek dynamicznych, zmniejszanie poziomu drgań i hałaśliwości przekładni. Niekiedy występuje też pewien wzrost sprawności mechanicznej objawiający się spadkiem temperatury pracy przekładni w ustalonych warunkach. Wspomniane korzystne zjawiska ulegają następnie zahamowaniu, osiągając swoje ekstremum, po którym sytuacja się stabilizuje a następnie stopniowo się pogarsza przechodząc płynnie do II etapu.



Rys. 3. Schemat powstawania ubytków zużyciowych na głowach i stopach współpracujących zębów koła zębatego. Strzałkami zaznaczono kierunki poślizgów na powierzchniach roboczych zębów (ω_1 – prędkość kątowa koła napędzającego, ω_2 – prędkość kątowa koła napędzanego) [opracowanie własne]

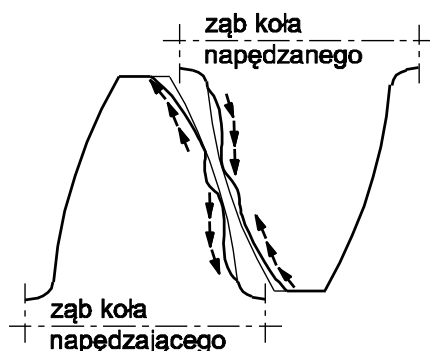
Etap II: Na tym etapie zużycie zębów przekładni zębatach pogłębia się wyraźnie, wykazując przyspieszenie procesu degradacji uzębień. Ubytki zużyciowe występują wtedy na całej wysokości zębów, rośnie również wyraźnie stopień skażenia profilu ewolwentowego. W strefie średnicy tocznej pojawiają się lokalne odkształcenia plastyczne. Sprzyja temu zmniejszanie się promieni krzywizny profilu zębów współpracujących kół, przez co wzrastają lokalne naciski stykowe. Rosną ponadto nadwyżki dynamiczne, gdyż pogarsza się dokładność kinematyczna przekładni zębatach. Pojawiają się lokalne skażenia powierzchni roboczych zębów w postaci rys i zagłębień. W warstwie wierzchniej

zębów występują zmęczeniowe pęknięcia przechodzące następnie w wykruszenia warstwy wierzchniej (tzw. jamki pittingowe), obejmujące rosnącą wraz z narastającą liczbą cykli obciążenia (obrotów kół) coraz większą powierzchnię przy rosnącej ich głębokości.

Gdy zakres wykruszeń warstwy wierzchniej jest jeszcze niewielki, możliwy jest proces zahamowania procesu niszczenia, co może mieć miejsce przy wydatnym czasowym zmniejszeniu obciążenia. Wtedy zaistniałe już objawy niszczenia mogą być w pewnym zakresie łagodzone (tzw. pitting przemijający). Gdy obciążenie ponownie wzrasta, zmęczeniowe wykruszanie warstwy wierzchniej znacznie przyspiesza, wzrastają nadwyżki dynamiczne, rosną drgania i wzmagają się hałasowanie przekładni. Gwałtowne przyspieszenie zniszczenia uzębień następuje, gdy w wyniku zużycia eliminowana jest warstwa o większej twardości zębów, ukształtowana poprzez obróbkę powierzchniową, taką jak nawęglanie, azotowanie lub umocnienie zgniotem powierzchniowym.

Wyraźny wzrost poziomu drgań i hałaśliwości przekładni jest dogodnym sygnałem diagnostycznym i powinien stanowić przesłankę podjęcia decyzji co do dalszego użytkowania przekładni, gdyż kontynuowanie eksploatacji w tych warunkach może prowadzić do nagłych awarii. Rozleglejsze wykruszenia warstwy wierzchniej zębów, zwłaszcza te o większej głębokości mogą być ogniskiem rozwoju wskrośnych pęknięć zmęczeniowych zębów z całkowitym ich wyłamaniem, gdyż stanowią one silne koncentratory naprężeń, od których pęknięcia zmęczeniowe rozwijają się z dużą prędkością (patrz. rys. 2). Istotne znaczenie na tym etapie ma również wyraźny spadek sprawności mechanicznej przekładni, co skutkuje rosnącymi stratami energii. Ujawnia się to nadmiernym grzaniem się przekładni. Wynikający ze spadku sprawności wzrost temperatury pracy przekładni stanowi niekiedy istotne zagrożenie pożarowe oraz przyspiesza procesy degradacji środków smarnych i uszczelnień, zwłaszcza obrotowych.

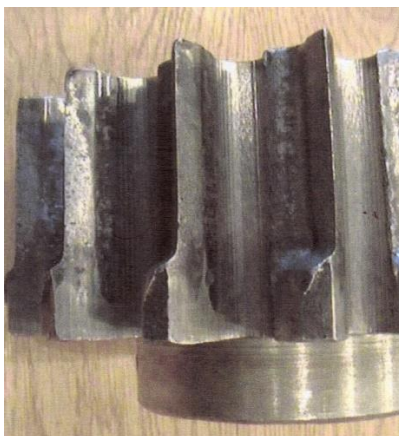
Opisany niejako „modelowy” przebieg procesu niszczenia kół zębatych w praktyce może wykazywać szereg odstępstw. Przykładowo, gdy oba współpracujące koła zębate mają obniżoną, taką samą lub zbliżoną twardość i pracują przy umiarkowanych prędkościach obwodowych i dużych obciążeniach, może wystąpić bardzo specyficzna postać zużycia współpracujących zębów [2]. Na kole napędzającym w strefie średnicy tocznej pojawić się może wyraźny rowek wzdłuż linii zęba, natomiast na kole napędzanym może powstać charakterystyczny garb. Wspomniany garb usytuowany na średnicy tocznej i rozciągający się wzdłuż linii zęba wynika stąd, że materiał zęba z obu stron garbu zostaje zużyty w większym stopniu. Takiemu obrazowi zużycia towarzyszą wyraźnie widoczne strefy odkształceń plastycznych, które mają również swój udział w formowaniu się wspomnianego garbu (rys. 4). W trakcie dalszej eksploatacji przekładni opisany garb i rowek ulegają stopniowej eliminacji, zwłaszcza, gdy następuje rozwój zmęczeniowego wykruszania warstwy wierzchniej zębów.



Rys. 4. Schemat tworzenia się rowka wzdłuż linii zęba koła napędzającego i garbu na zębie koła napędzanego [opracowanie własne]

Na obu opisanych etapach zużycia kół zębatach duży wpływ ma użycie właściwego środka smarnego [4]. Szczególne znaczenie ma optymalny dobór lepkości olejów smarnych do smarowania przekładni w zależności od obciążenia [5]. Przy dużym stopniu zużycia zębów często występują dodatkowe obciążenia wzdłużne kół, zwłaszcza gdy koła, nawet o zębach prostych nie są zazębione na pełnej szerokości. Na rysunku 5 pokazano taki skrajny stan zużycia ściernego koła zębatego pracującego przy dużym zanieczyszczeniu oleju smarnego pyłem mineralnym. W takiej sytuacji szczególnie silnie spada sprawność mechaniczna oraz generowane może być dodatkowo niszczenie łożyskowań przekładni prowadzące do bardziej rozległych awarii napędów.

W wielu przypadkach przekładnie zębata maszyn roboczych pracują bez wymiany środków smarnych, a jedynie przy okresowym uzupełnianiu ubytków wywołanych wyciekami przez zużyte uszczelnienia, przez które do wnętrza przekładni z kolei dostają się zanieczyszczenia pyłowe. Nawet gdy wykonywana jest wymiana środka smarnego, to w przypadku omawianych maszyn, do wyjątków należą zabiegi starannego usuwania produktów zużycia ściernego i zanieczyszczeń pyłowych osadzonych wewnątrz przekładni. Wpływa to na znaczne obniżenie trwałości eksploatacyjnej przekładni. Zagadnienie to wymaga bardziej systemowego rozwiązania.



Rys. 5. Widok skrajnego stopnia zużycia ściernego zębów koła zębatego pracującego na niepełnej szerokości koła w warunkach intensywnego oddziaływania pyłu mineralnego [opracowanie własne]

4. Eksploatacyjna diagnostyka procesów niszczenia kół zębatach

W praktyce eksploatacyjnej maszyn roboczych, zwłaszcza górniczych, wykorzystanie standardowych metod diagnostyki technicznej napotyka na duże trudności. Wibroakustyczne metody diagnozowania stanu technicznego przekładni zębatach wymagają stosowania kosztownych i złożonych układów diagnostycznych oraz wysokich kwalifikacji obsługi. Ponadto w warunkach występowania wielu zakłóceń pochodzących od innych układów mechanicznych, efektywność praktyczna metod analizy drgań i hałasów w przypadku przekładni zębatach, zwykle wielostopniowych, jest niewystarczająca.

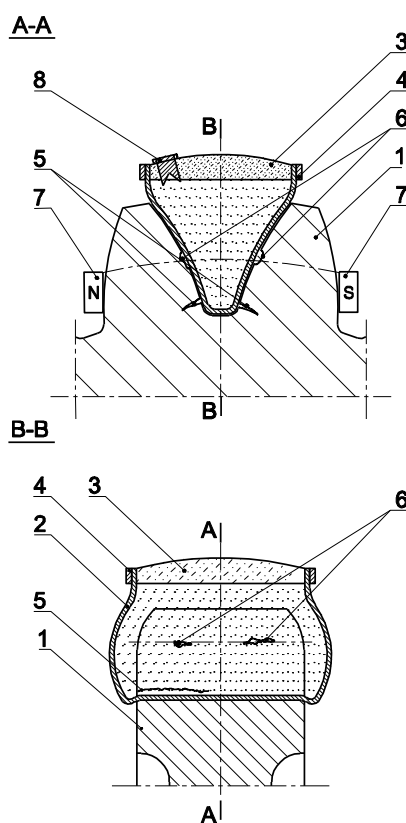
W tej sytuacji należy poszukiwać metod diagnostycznych dających się łatwo wykorzystać w trudnych warunkach eksploatacji przy minimalizacji kosztów i nakładów pracy na sam proces diagnozowania. Wczesne ujawnienie rozwijających się procesów niszczących opisanych w poprzednich punktach niniejszego rozdziału ma duże znaczenie dla zapobiegania kosztownym awariom i racjonalnej gospodarki systemami mechanicznymi.

Dla ujawnienia pęknięć zmęczeniowych zębów przydatne jest stosowanie specjalnie do tego celu opracowanych ciekłych penetrantów, którymi pokrywa się analizowaną powierzchnię zębów. Po ich

wytarciu z powierzchni, ta część penetrantu, który wniknie w szczeliny zmęczeniowe lub w inne defekty powierzchniowe jest dobrze widoczna, zwłaszcza przy oświetleniu lampą ultrafioletową. Krótki czas oceny pozwala na wykonanie kontroli wielu zębów w czasie przerw w pracy. Prawidłowe stosowanie penetrantów nie zanieczyszcza cieczy smarnych w przekładniach zębatych. Metoda ta jednak ograniczona jest do wykrywania pęknięć i wad, które wychodzą na zewnątrz powierzchni elementów.

Dla potrzeb ujawnienia pęknięć i defektów w szerszym zakresie, w tym i wad podpowierzchniowych przydatne jest wykorzystanie defektoskopów magnetycznych produkowanych przez wiele firm [3]. Szczególnie efektywne jest stosowanie defektoskopii magnetyczno-proszkowej w wykorzystaniem proszków magnetycznych. W wariantach suchym i mokrym defektoskopia magnetyczno-proszkowa stosowana jest w wielu dziedzinach budowy maszyn i urządzeń. Dużą praktyczną przydatność mają pojemniki aerozolowe z cieczą nośną i drobnodispersyjnym proszkiem magnetycznym. Nie mogą być one jednak stosowane w warunkach zagrożenia wybuchowego, a więc np. w podziemiach kopalń węgla kamiennego.

Do zastosowania w każdych warunkach predystynowana jest metoda magnetyczno-proszkowa w wariacie mokrym, specjalnie zaadaptowana dla kół zębatych napędów maszyn roboczych. Metodę tę opracowano w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej wraz ze sposobem jej wykorzystania do diagnozowania zniszczeń kół zębatych, co ilustruje rysunek 6.

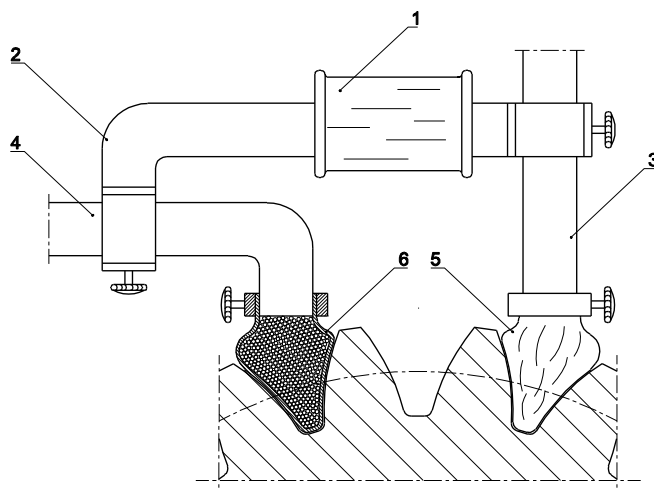


Rys. 6. Przyrząd do ujawniania uszkodzeń eksploatacyjnych kół zębatych metodą magnetyczno-proszkową mokrą (przykład dla koła zębatego przekładni nawrotnej), gdzie: 1 – badane koło zębate, 2 – naczynie z cienkiej gumy zawierające zawiesinę proszku magnetycznego w cieczy nośnej, 3 – przezroczyste wieczko przyrządu, 4 – opaska zaciskowa, 5 – typowe położenie pęknięć zmęczeniowych u podstawy zębów, 6 – położenie początkowych wykruszeń warstwy wierzchniej zębów, 7 – magnesy trwałe, 8 – korek gumowy do uzupełnienia cieczy nośnej i odpowietrzenia wnętrza przyrządu [opracowanie własne]

Przyrząd będący podstawą metody składa się z naczynia 2 wykonanego z cienkiej elastycznej gumy, wypełnionego cieczą nośną z małą ilością drobnodispersyjnego proszku magnetycznego np. magnetytu. Naczynie zamknięte szczelnie jest przezroczystym wieczkiem 3 połączonym z naczyniem 2 opaską zaciskową 4. Wieczko 3 posiada korek gumowy 8, poprzez który następuje uzupełnianie cieczy z użyciem np. strzykawki i ew. odpowietrzanie naczynia. Użycie przyrządu polega na tym, że po jego wstrząśnięciu dla uzyskania jednorodnej zawiesiny proszku magnetycznego w cieczy przyrząd układa się we wrębie międzyzębnym badanego koła zębatego 1. W wyniku swobodnej sedymentacji proszku magnetycznego na dnie naczynia proszek układa się ze zwiększonym skupieniem w tych strefach kół zębatach wykonanych ze stali, staliwa lub żeliwa, w których występują zmiany właściwości magnetycznych spowodowane np. postępującym pęknięciem lub powierzchniowym defektem materiału. Czarny proszek magnetytu jest dobrze widoczny na tle białej powierzchni wewnętrznej naczynia 2. Gdy zachodzi potrzeba opisany efekt może być wzmocniony dodatkowo przez użycie dwóch magnesów trwałych 7 lub specjalnych induktorów wytwarzających stan namagnesowania badanej strefy koła zębatego 1. Gdy brak defektów danego zęba dno naczynia przyjmuje jednolity szary kolor.

Przy użyciu przyrządu można ujawnić pęknięcia zmęczeniowe, najczęściej położone w strefie u podstawy zębów oraz pęknięcia powierzchniowe i podpowierzchniowe występujące w wyniku procesów opisanych w punkcie 3 niniejszego rozdziału. Na rysunku 6 przykładowo pokazano najczęstsze położenie pęknięć zmęczeniowych 5 i położenie pierwszych wykruszeń warstwy wierzchniej zębów 6. Przyrząd umożliwia ujawnienie również szeregu wad materiałowych w postaci powierzchniowych i podpowierzchniowych wtrąceń niemetalicznych, pęknięć hartowniczych, szlifierskich i innych defektów uzębień kół zębatach.

Dla potrzeb magnesowania zębów kół zębatach w warunkach poligonowych w i podziemiach kopalń przydatny może być induktor przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Induktor do magnesowania zębów kół zębatach dla potrzeb diagnostyki magnetyczno-proszkowej przyrządem z rys. 6, gdzie: 1 – zwojnica, 2 – rdzeń, 3 i 4 – ramiona, 5 i 6 – nabiegunniki [opracowanie własne]

Jego zwojnica 1, która może być zasilana z baterii lub przez odpowiedni zasilacz, umieszczona jest na rdzeniu 2 wykonanym z pasków blachy transformatorowej. Rdzeń 2 połączony jest z ramionami 3 i 4 w sposób zapewniający małą stratność strumienia magnetycznego. Ramiona 3 i 4 zakończone są zdejmowanymi nabiegunnikami 5 i 6 wykonanymi w postaci szczelnych pojemników z elastycznego materiału, np. gumy. Nabiegunniki wypełniane są kulkami o niecojszej średnicy z materiału ferromagnetycznego, np. stali transformatorowej oraz dodatkowo niecojszą ilością oleju o dużej gęstości.



Dzięki takiej konstrukcji nabiegunniki łatwo dostosowują się kształtem do wrębów kół zębatach różnej wielkości w tym, między innymi, do wrębów kół skośnych, stożkowych czy łukowych. Ścisłemu przyleganiu nabiegunników do magnesowanych zębów dodatkowo sprzyja działanie magnetyczne po włączeniu zasilania. Po krótkotrwałym namagnesowaniu induktor może być wyłączony i ewentualnie przeniesiony do kolejnych wrębów diagnozowanego koła zębatego.

Stosowanie opisanych przyrządów nie wymaga żadnych wstępnych przygotowań powierzchni, nie zanieczyszcza wnętrza przekładni, w tym i środków smarnych, zaś prostota i krótki czas diagnozowania pozwala na ocenę wielu zębów w czasie nawet krótkotrwałych przerw. Te same przyrządy mogą być stosowane wielokrotnie dla dużego zakresu wielkości zębów, pozwalając na śledzenie postępujących procesów niszczących w toku eksploatacji różnych przekładni zębatach. Umożliwia to podejmowanie racjonalnych decyzji w trakcie użytkowania maszyn, nie dopuszczając do kosztownych awarii przekładni napędowych maszyn roboczych.

Zaprezentowane przyrządy mogą być szczególnie przydatne w eksploatacyjnym diagnozowaniu procesów niszczących przekładni stosowanych w podziemiach kopalni węgla kamiennego i w innych trudnych warunkach.

5. Podsumowanie

W rozdziale opisano przebieg podstawowych procesów niszczących uzębienia kół przekładni zębatach maszyn roboczych, zwłaszcza maszyn stosowanych w górnictwie. Scharakteryzowane zostały etapy rozwoju zmęczeniowych złamań zębów oraz procesy niszczące generowane tarcieniem, a więc zużycie ściernie i wykuszanie warstwy wierzchniej zębów kół zębatach. Zaproponowano adaptację metody magnetyczno-proszkowej w wariantcie mokrym dla potrzeb eksploatacyjnej diagnostyki głównych procesów niszczących kół zębatach stosowanych w napędach maszyn roboczych ze szczególnym uwzględnieniem maszyn stosowanych w górnictwie węglowym oraz użytkowanych w warunkach poligonowych. Przedstawiono koncepcję specjalnego induktora do stosowania w diagnostyce magnetyczno-proszkowej kół zębatach. Zaproponowane rozwiązanie zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP pod nr P.431938 w dnia 26.11.2019 r.

Literatura

1. Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali (fatigue failure of metals in Polish) WNT, Warszawa (1985).
2. Garkunow D. N.: Tribotechnika, Maszynostrojenie, Moskwa (1985).
3. Lewińska-Romicka G.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa (2001).
4. Jaszczerycin P.L., Skorynin J. W.: Rabotosposobnost uzłow trienia maszin. Wyd. Nauka i Technika, Mińsk, 1984.
5. Spałek J.: Dobór lepkości oleju do przekładni zębatach w aspekcie trwałości uzębienia. Materiały XXII Szkoły Tribologicznej, Gliwice-Ustroń, 1998.
6. Skoć A., Światoński E.: Przekładnie zębate. PWN, Warszawa 2018.
7. Szweda S., Mikula J., Mikula S.: Magnetic-and-powder Method in Diagnostics of Welded Joints in Powered Roof Supports. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 545. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/545/1/012015. 2019.



8. Augustynowicz J., Dudek K., Figiel A.: Wykorzystanie termowizji w diagnostyce maszyn górnictwa odkrywkowego. Węgiel Brunatny 2000 wyd. spec.
9. Bartelmus W.: Diagnostyka Maszyn Górniczych. Górnictwo Odkrywkowe. Wyd. Śląsk, Katowice 1998.
10. Capdessus C., Sidahmed M., Lacoume J.L.: Cyclostationary processes: Application in gear faults early diagnosis. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No. 3, May 2000, pp. 371-385.
11. Radkowski S.: Low energy components of vibroacoustic signal as the basis for diagnosis of defect formation. Machine Dynamics Problems, vol 12, 1995.
12. Rivola A.: Crack detection by bispectral analysis. Atti XIII Congresso Nazionale Associazione Italiana di Meccanica. Teorica ed Applicata - AIMETA'97, 1997, Siena, Italia, Ed. ETS, Pisa, Italia, 2, 73-80.
13. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnozowanie wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. Diagnostyka vol. 24, 2001, s. 46–53.
14. Stachurski M.: Badania magnetyczno-proszkowe złączy spawanych, Gliwice, 2002.