

DIAGNOZOWANIE GIGACYKLOWYCH PROCESÓW ZMĘCZENIOWYCH W PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Marcin JASIŃSKI, Stanisław RADKOWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

Celem pracy jest opracowanie, dla materiałów o wysokiej wytrzymałości, metody prognozowania i analizy gigacyklowej trwałości zmęczeniowej (10^8 - 10^9 cykli) na podstawie badania sygnału wibroakustycznego. W metodzie proponuje się wykorzystać wyniki analizy sygnału wibroakustycznego, uzyskiwane podczas przyspieszonych badań zmęczeniowych, prowadzonych na specjalnie do tego celu skonstruowanym i zbudowanym stanowisku badawczym, pracującym w zakresie częstotliwości rzędu 20 kHz, który odpowiada częstotliwości drgań własnych próbek.

Metody diagnostyki wibroakustycznej umożliwiają nie tylko detekcję uszkodzeń powierzchniowych, ale również wykrycie uszkodzeń występujących w rdzeniu próbki. Możliwym staje się podjęcie próby poznania natury zwiększonej trwałości zmęczeniowej oraz próby wykorzystania w prognozowaniu gigacyklowej trwałości zmęczeniowej cech sygnałów wibroakustycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, gigacyklowe procesy zmęczeniowe, generatory piezoelektryczne.

DIAGNOSIS OF THE GIGACYCLE FATIGUE PROCESSES IN THE GEAR

Summary

The main goal of this work is develop, for high-strength materials, a method of gigacycle fatigue life's (10^8 - 10^9 cycles) forecasting and analysis on the basis of vibroacoustic signal investigation. In this method we propose to use results of the vibroacoustic signal analysis, obtained during the fatigue tests on a test bed, especially designed and build for this purpose, operating within 20 kHz range – corresponding to eigen frequency of specimen.

Methods of vibroacoustic diagnostics enable not only detection of surface failures, but also detection of failures appearing in the specimen's core. It's possible making an attempt of learning of the extension fatigue life nature and using it in forecasting gigacycle fatigue life's features of vibroacoustic signals

Keywords: vibroacoustic diagnostic, gigacycle fatigue processes, piezoelectric generators.

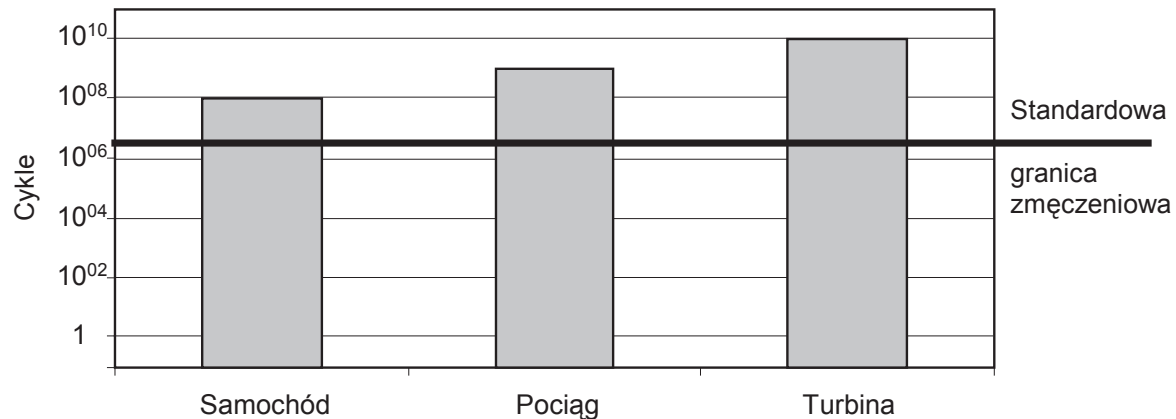
1. WPROWADZENIE

W latach 60-tych i wczesnych latach siedemdziesiątych w projektowaniu konstrukcji poddanych działaniu zmiennych obciążeń, które mogłyby wywołać efekt zmęczeniowego zniszczenia najczęściej stosowano rozwiązania eksponujące możliwość kontrolowania wzrostu pęknięć i wad wstępnie istniejących w materiale konstrukcyjnym. W innym podejściu zakładano, że istniejące pęknięcia propagują jedynie do założonej wartości progowej. Obydwie te metody odwołują się do zasad i modeli wywodzących się z mechaniki pękania. Rozwój pojazdów szybkobieżnych

i maszyn wysokoobrotowych oraz coraz szersze zastosowanie nowych materiałów, szczególnie materiałów wysokowytrzymałościowych, ogólnie określanych jako „High Performance Materials”, spowodowały konieczność weryfikacji XIX-wiecznych założeń odnośnie możliwości wystąpienia nieskończonej trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych. Przede wszystkim okazało się, że w przypadku tego typu materiałów nie jest spełnione założenie o asymptotycznym przebiegu krzywej Wöhlera po przekroczeniu granicy 10^6 - 10^7 cykli, co może być przyczyną wystąpienia krytycznych uszkodzeń i katastrof o rozległych konsekwencjach, bowiem w wielu

przypadkach zaobserwowano zmęczeniowe uszkodzenia tych materiałów po przekroczeniu $10^8 \div 10^9$ cykli.

Tymczasem zwraca się uwagę [1], że wymagana trwałość zmęczeniowa współczesnych silników samochodowych wynosi 10^8 cykli, dużych silników o zapłonie samoczynnym stosowanych na statkach lub lokomotywach szybkobieżnych 10^9 cykli, a niektóre elementy silników turbinowych (np. wał wirnika) powinny wykazywać wytrzymałość zmęczeniową rzędu 10^{10} cykli (rys. 1).



Rys. 1. Wytrzymałość zmęczeniowa maszyn i ich elementów

Równocześnie, badacze podejmujący próby prowadzenia tego typu badań wskazują [2], że 90% okresu rozwoju procesu gigacyklowego zmęczenia materiałów to okres nukleacji pęknięć. Z oczywistych względów wyznaczenie jednoznacznej granicy pomiędzy nukleacją pęknięcia a fazą propagacji nie jest proste. Z jednej strony liczba dostępnych wyników badań jest ograniczona: bowiem prowadząc badania na klasycznej maszynie zmęczeniowej pracującej z częstotliwością 100 Hz liczbę 10^7 cykli można osiągnąć po prawie 30 godzinach, natomiast osiągnięcie liczby 10^9 cykli będzie wymagało prowadzenia badań przez praktycznie 3000 godzin. Równocześnie przyrosty pęknięć są trudno mierzalne a na dodatek, wczesnym fazom powstawania defektów towarzyszą małe przyrosty pęknięć. W literaturze [1] wskazuje się, że mimo iż średni przyrost pęknięcia w procesie zmęczenia gigacyklowego leży często poniżej tzw. progowego przyrostu pęknięcia zmęczeniowego (fatigue crack growth threshold) wynoszącego $10^{-11} \div 10^{-12}$ m/cykl to zjawisko tego typu zniszczenia zmęczeniowego jednak występują. Oznacza to, że stosowane dotychczas w mechanice zależności przyrostu pęknięcia od intensywności naprężeń i wartości naprężeń nie uzyskały w warunkach zmęczenia gigacyklowego pełnej akceptacji i na obecnym etapie badań podlegają procesowi weryfikacji. Z tego punktu widzenia istnieje potrzeba rozwoju nowych metod badawczych, adekwatnych modeli

diagnostycznych oraz doboru odpowiednich metod detekcji informacji diagnostycznej.

Uwzględniając wymienione zagadnienia coraz częściej podejmowane są próby prowadzenia przyspieszonych testów zmęczeniowych przy wykorzystaniu piezoelektrycznych lub magnetostrykcyjnych generatorów i przetworników wysokiej częstotliwości z przedziału $10 \div 30$ kHz, co pozwala sprowadzić okres badań nad procesem zmęczenia gigacyklowego do rozsądnych okresów (odpowiednio 10^9 cykli można uzyskać w czasie wspomnianych 30 godzin).

Jednak ograniczona moc sygnału wymaga prowadzenia badań w paśmie drgań rezonansowych próbki, w odróżnieniu od drgań wymuszonych, jakim poddana jest próbka na klasycznych, niskoczęstotliwościowych urządzeniach testowych.

Przykładowe wymiary próbek, dla określonych częstotliwości drgań własnych oraz wymiar czasu (godziny) trwania eksperymentu dla założonej liczby cykli zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Czas trwania eksperymentu [h]

Długość próbki [mm]	Częstotliwość wymuszenia [Hz]	Liczba cykli		
		10^6	10^8	10^9
85000	30	93	9259	92593
12700	200	14	1389	13889
127	20000	–	14	139
13	200000	–	–	14

Uwzględniając częstotliwości drgań własnych prowadzenie badań gigacyklowego procesu zmęczenia materiałów wymaga rozwiązania szeregu zagadnień z zakresu dynamiki maszyn, wyznaczania zakresu drgań własnych próbki w zależności od dynamicznych właściwości materiału, typu zamocowania i geometrii próbki oraz budowy i analizy miar wibroakustycznych charakteryzujących się dużą wrażliwością na poszczególne fazy procesu zmęczeniowego.

Pierwsze próby wyjaśnienia zjawiska zniszczenia w gigacyklowym zakresie trwałości zmęczeniowej odwołują się do modeli i zdobytego

doświadczenia w badaniach nisko- i wysokocyklowej trwałości zmęczeniowej. Można tu wskazać na próby wykorzystania metod współczynnika intensywności naprężeń [2], wykorzystania ocen naprężeń residualnych w strefie przed pęknięciem, efekty cyklicznego umocnienia i osłabienia [1]. Równolegle rozwijane są różne sposoby dotarcia do informacji o zachodzących procesach degradacyjnych poczynając, od zastosowania interferometrów laserowych do pomiaru przyrostu pęknięcia na jednostkę czasu odpowiadającą przyjętej liczbie cykli.

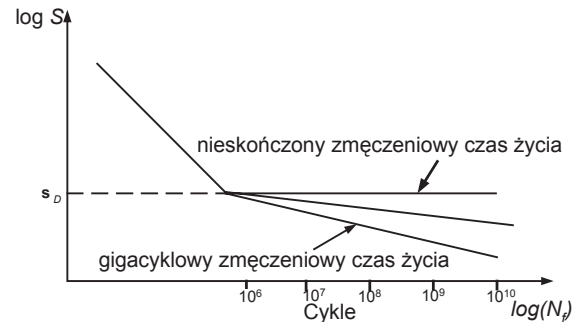
Podejmowane są próby bliższego poznania fizycznej strony gigacyklowego procesu zniszczenia zmęczeniowego. Na przykład w pracy [3] przy omawianiu wyników badań laboratoryjnych zwraca się uwagę na duży rozrzut uzyskanej trwałości zmęczeniowej. Jako główną przyczynę otrzymania takich rezultatów badań wskazuje się różne mechanizmy procesu inicjacji pęknięć: występowanie wtrąceń zakłócających jednorodną strukturę materiału jest powodem inicjacji pęknięcia w zakresie dużych wartości naprężeń maksymalnych, natomiast w przypadku mniejszych wartości maksymalnych naprężeń za przyczynę powstania pęknięcia na powierzchni próbki uznaje się wtrącenia lub uszkodzenia powierzchni. Dodatkowe czynniki mające wpływ na przebieg procesu zmęczeniowego rozwoju uszkodzenia powodują, że trudno prognozować kształt krzywej naprężenie – zmęczeniowe zniszczenie w przedziale 10^8 – 10^9 cykli (rys. 2).

W rzeczywistych warunkach funkcjonowania krytycznych węzłów kinematycznych na trwałość zmęczeniową elementów będą miały wpływ czynniki skorelowane z mechanizmem zmian parametrów warstwy wierzchniej, a tym samym będą miały zróżnicowany wpływ na proces generacji sygnału wibroakustycznego. Dla przykładu przeanalizujemy poszczególne typy uszkodzeń zmęczeniowych występujących w przekładni zębatej.

2. TYPY USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

2.1. Docieranie i zużycie ściernie

Zauważmy, że podstawowym mechanizmem odpowiedzialnym za zużycie jest niewystarczająca grubość filtra olejowego, powodująca bezpośredni kontakt współpracujących powierzchni zębów. Z tego punktu widzenia docieranie najczęściej pojawia się wtedy, gdy relatywnie wolnoobrotowe przekładnie zębate pracują z dużym udziałem czasowym bezpośredniego kontaktu powierzchni zębów, powodującym polerowanie powierzchni zębów, prawie aż do wykończenia na połysk lustrzany. Późniejsze zużycie przebiega z bardzo małą prędkością i dlatego zużycie polerskie czasami nie jest traktowane jako uszkodzenie.



Rys. 2. Wykres naprężenie – zmęczeniowe zniszczenie

Zużycie umiarkowane jest spowodowane przez niewystarczającą grubość filtra olejowego. Kiedy zużycie jest proporcjonalne do prędkości poślizgu i prędkość poślizgu nie jest równa zero na linii przyporu i osiąga maksimum na krańcach kontaktu, wtedy występuje wzmoczone zużycie stopy i głowy zęba, i praktycznie brak zużycia na linii przyporu. Umiarkowane zużycie w swej istocie nie jest postrzegane jako uszkodzenia, jest jednak wstępem do nadmiernego zużycia i tym samym może prowadzić do całkowitego zniszczenia zęba. Prędkość zużycia może być zmniejszana poprzez zwiększenie lepkości oleju, zwiększanie dokładności wykonania powierzchni zębów lub poprzez zmianę geometrii zębów w celu zmniejszenia prędkości poślizgu.

Niekontrolowane zużycie umiarkowane powoduje nadmierne zużycie, w którym oryginalny profil zęba jest niszczonej i najczęściej prowadzi do złamania zęba [4, 5] z powodu:

- zmniejszonego współczynnika wytrzymałości zęba na zginanie;
- rozwoju pęknięcia zmęczeniowego zainicjowanego uszkodzeniami powierzchni;
- dużymi obciążeniami dynamicznymi występującymi przy uszkodzeniu profilu zęba.

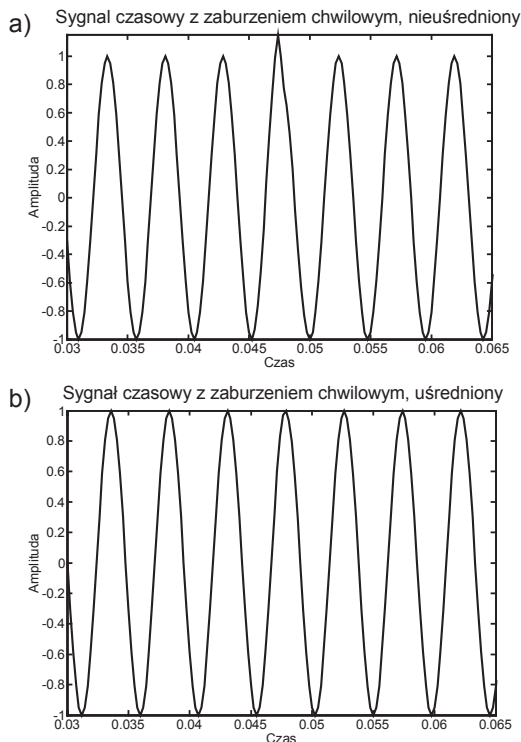
Innym przykładem zużycia jest zużycie ściernie, które jest powodowane wtrąceniami w oleju, mającymi twardość zbliżoną lub większą niż twardość warstwy wierzchniej oraz średnicę równą lub większą od grubości filtra olejowego. Aby uniknąć zużycia ściernego, niezbędne jest utrzymanie czystości oleju, poprzez zastosowanie filtrów lub częstsze wymiany oleju. Wtrącenia w oleju mogą się pojawić jako wynik innego typu uszkodzenia (np. uszkodzenia łożyska).

Omawiane zaburzenia współpracy mają losowy charakter i rzadko występują w sposób okresowy (rys. 3a). Tym samym stosując procedury uśredniania eksponujące efekty okresowe tracimy informację o tego typu uszkodzeniach (rys. 3b).

2.2. Powstawanie wżerów

Frosting (kostkowanie), powstawanie wżerów (scoring), zacieranie się (scuffing) powstają wskutek chwilowego zgrzania się powierzchni

zębów spowodowanych rozerwaniem spoiny i z tego powodu mają zupełnie inny wpływ na przebieg procesu zmęczeniowego zniszczenia zębów. Występuje wtedy, kiedy złożenie wpływu obciążenia, prędkości poślizgu i temperatury osiąga wartość krytyczną powodującą zanik filtra olejowego separującego powierzchnie zębów. Wynikiem tego jest kontakt metal-metal i jeżeli nacisk powierzchniowy oraz prędkość poślizgu są wystarczająco wysokie, następuje powstanie spoiny.



Rys. 3. Sygnał czasowy z zaburzeniem chwilowym: a) nieuśredniony, b) uśredniony synchronicznie

Frosting występuje wtedy, kiedy obszar zgrzania jest tylko taki jak wielkość wystających wtrąceń na powierzchni, w następstwie czego są one wyłamywane z małymi uszkodzeniami. Na powierzchni zębów powstaje widok podobny do zamrożonych kryształów, jest to spowodowane mikropittingiem powierzchniowym, bez widocznych pęknięć w kierunku poślizgu. Frosting początkowy (wyrwanie wtrąceń z powierzchni zęba) może powiększać powierzchnie kontaktu powierzchni, zmniejszając nacisk powierzchniowy, dzięki czemu przekładnia może pracować przez długi czas bez żadnych uszkodzeń. Jeśli to konieczne frosting może być usunięty poprzez polerowanie uszkodzonego obszaru.

Różnica pomiędzy frostingiem a powstawaniem wżerów leży w wielkości zgrzania i efektów rozerwania spoiny. Powstawanie wżerów jest obserwowane jedynie w szybkoobrotowych, wysokoobciążonych pracujących z olejami syntetycznymi o zbyt małej lepkości.

Kiedy złożenie wpływu obciążenia, prędkości poślizgu i temperatury przekracza wartość krytyczną powstają wżery na skutek chwilowego zgrzania się powierzchni zębów spowodowanych rozerwaniem spoiny następuje wzajemne rysowanie się profili zęba i powierzchni zęba. Niekontrolowane powstawanie wżerów zazwyczaj powiększa się i może prowadzić do zniszczenia profilu zęba. Zazwyczaj pomaga polerowanie uszkodzonej powierzchni. Czasami lekkie lub umiarkowane powstawanie wżerów (np. frosting) może zakończyć się lub zaniknąć w momencie cyklicznej redukcji wtrąceń powierzchniowych.

Jeżeli wspomniane warunki pracy przekraczają wartość krytyczną powstawania wżerów lub przyczyniają się do przyspieszonego powstawania wżerów, wtedy występuje faza niszczącego powstawania wżerów. Kiedy liczba powstających wżerów jest proporcjonalna do prędkości poślizgu, następuje wzmożone powstawanie wżerów na linii przyporu. Nagromadzenie materiału usuniętego z wżerów oraz koncentracja obciążenia w punkcie przyporu może powodować powstanie pittingu lub spallingu na linii przyporu. Długoterminowymi konsekwencjami niszczącego powstawania wżerów jest powstawanie drobin metalicznych, zniszczenie profilu zęba i złamanie zęba.

Niejednostajne obciążenie powierzchni zęba, spowodowane np. niewspółosiowością lub lokalnymi błędami profilu zęba, mogą generować lokalne powstanie wżerów. Przekładnie z małą ilości lokalnych wżerów mogą kontynuować pracę bez późniejszych uszkodzeń pod warunkiem, że wżery usunęły powód niejednorodnego obciążenia (np. wystające miejsce na profilu zęba) i pozostała powierzchnia kontaktu jest w stanie przenosić całkowite obciążenie. W niektórych przypadkach początkowe lokalne powstanie wżerów może wskazywać na bardziej zasadniczy problem jak np. niewspółosiowość, która może prowadzić do poważniejszych uszkodzeń. Z przedstawionego opisu wynika, że wpływ wżerów na strukturę sygnału wibroakustycznego jest zależny od tego, jaka była fizyczna przyczyna powstawania i rozwoju uszkodzenia. Stąd parametr diagnostyczny może mieć charakter okresowy lub losowy.

2.3. Zmęczenie powierzchniowe

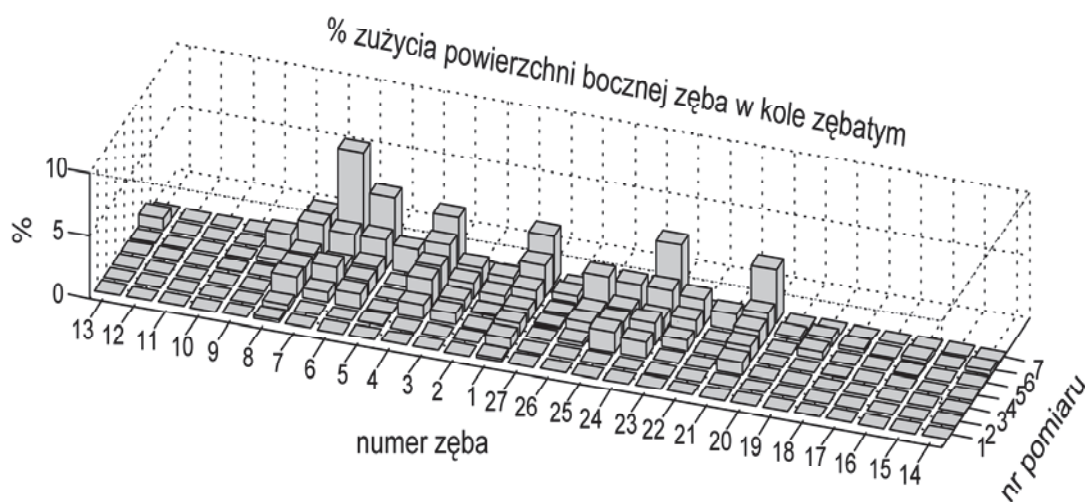
Zmęczenie powierzchniowe powstaje wskutek powtarzającego się zadawania i usuwania obciążenia powierzchni zęba, które prowadzi do uszkodzenia, jeśli przekroczy się wytrzymałość zmęczeniową materiału. Typy uszkodzeń związane z zmęczeniem powierzchniowym to pitting i spalling (łuszczenie). Wytrzymałość zmęczeniowa przekładni zależy od wielkości obciążenia i ilości cykli, którym została poddana. W przypadku gigacyklowych badań zmęczeniowych ząb poddaje się dużo wyższym niż nominalne obciążeniom. Większość uszkodzeń zmęczeniowych jest inicjowana zmianami w strukturze głęboko pod

powierzchnią zęba, ale są one określane uszkodzeniami zmęczeniowymi powierzchniowymi, ponieważ to powierzchnia zęba jest niszczona w czasie rozwoju uszkodzenia.

Lokalne koncentracje obciążenia mogą powodować małe wgłębienia w powierzchni zęba albo równomiernie w poprzek linii przyporu albo na krawędzi zęba. Początkowo pitting zazwyczaj rozwija się jeśli lokalnie występuje przekroczenie warunków granicznych, czasami powierzchnia powraca do stanu pierwotnego, to zjawisko nazywane jest „samonaprawą” lub „pittingiem korygującym”. Pitting w początkowej fazie na ogół nie jest postrzegany jako uszkodzenie, czasami jeśli się nie zakończy może rozwinąć się do kolejnego etapu pittingu. Niestety nie ma jasno określonej drogi do określenia, czy pitting w fazie początkowej zniknie, czy też przekształci się w kolejną fazę pittingu.

Jeśli pitting na początku nie zatrzyma się lub nie zniknie, zmieni się w pitting, który może zniszczyć profil zęba. Na rysunku 4, przytoczonym za pracą

[5], można zauważyć, że uszkodzenie powierzchni rozwija się wzdłuż profilu a przede wszystkim obejmuje coraz większą liczbę sąsiednich zębów. Pitting występuje w momencie, gdy następuje przekroczenie nominalnych naprężeń odpowiadających wytrzymałości zmęczeniowej materiału, w wypadku zadawania zbyt dużego momentu lub złego rozkładu obciążenia zęba lub kilku par zębów. Nawęglane, azotowane lub indukcyjne hartowane koła zębate zazwyczaj pracują w warunkach krytycznych zmęczeniowo, czasami te procesy prowadzą do odkształcenia koła zębatego a szlifowanie lub docieranie jest okresowo wymagane do zlikwidowania odkształcenia. Kiedy pod wpływem odkształcenia nie występuje pełen kontakt, wtedy maleje efektywna wytrzymałość zmęczeniowa. Na ogół, pitting rozwija się przez długi okres czasu i generuje znaczną ilość okruchów metalicznych zanim zmieni się w poważne uszkodzenie, takie jak złamanie zęba z powodu koncentracji naprężeń.



Rys. 4. Rozwój pittingu na poszczególnych zębach zębniaka

Pitting jest zazwyczaj nazywany spallingiem i vice versa, z powodu podobnego wyglądu w późniejszych etapach uszkodzenia, jednakże jest on powodowany za pomocą innego mechanizmu powstawania uszkodzenia. Spalling jest powodowany poprzez złożenie wpływu wysokich naprężeń powierzchniowych i relatywnie wysokich prędkości poślizgu, które powodują zmianę struktury powierzchni zęba. W początkowym etapie spallingu, pęknięcia inicjują się na powierzchni zęba i rozszerza się spiralnie od uszkodzenia początkowego. Czasami część materiału jest usuwana z powierzchni, dając duże podobieństwo do pittingu niszczonego, w którym wgłębienia są zgrupowane razem w formie złuszczonego obszaru. Spalling zazwyczaj występuje jedynie w nawęglanych kołach zębatych ponieważ jest to związane zarówno z naprężeniami

powierzchniowymi i poślizgiem. Ochrona przez spallingiem polega na redukcji wielkości poślizgu lub współczynnika tarcia poprzez przesunięcie profilu zęba, polepszenie wykończenia powierzchni lub zmianę typu oleju.

Wykruszanie warstwy dyfuzyjnej, które występuje tylko w nawęglanych kołach zębatych, jest spowodowane przez pęknięcia głęboko pod powierzchnią zęba lub blisko relatywnie miękkiego rdzenia zęba. Te pęknięcia wynikają z twardości rdzenia (i skutkiem tego wytrzymałości na ścinanie) zmniejszającej się szybciej niż naprężenia ścinające, ponieważ warstwa dyfuzyjna jest zbyt cienka. Pęknięcie propaguje także wewnątrz rdzenia lub na połączeniu rdzenia i warstwy dyfuzyjnej, bez oznak stanu zagrożenia, aż do uszkodzenia dużej części rdzenia, załamania i oderwania się. Wygląd zewnętrzny uszkodzenia

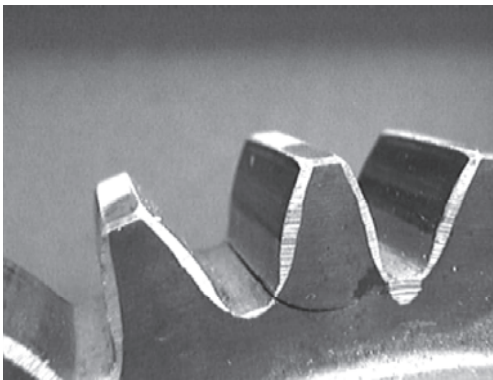
powierzchni jest często mylony z pittingiem niszcącym lub spallingiem, jednakże wykruszanie warstwy dyfuzyjnej zazwyczaj występuje raptownie na jednym lub dwóch zębach, a pitting lub spalling rozwija się stopniowo i zazwyczaj jest widoczny na wielu zębach.

2.4. Złamanie zęba

Złamanie jest prawdopodobnie najpoważniejszym typem uszkodzenia przekładni zębatej. Odmienne niż typy uszkodzeń przedstawione wcześniej, które się rozwijają na dość długim okresie czasu pomiędzy okresem początkowym a poważnym uszkodzeniem, złamanie wywołuje natychmiastową niezdolność do użytkowania lub znacznie ogranicza zdolność przenoszenia mocy. Może mieć również katastrofalne skutki, uwzględniając zranienie lub zabicie ludzi, w maszynach takich jak: śmigłowce, dźwigi osobowe, żurawie, wyciągarki itp., w których zdolność do przekazywania lub ograniczania prędkości obrotowej jest krytyczna. Złamanie może wystąpić na wiele sposobów z różnych powodów.

Klasyczne uszkodzenie zmęczeniowe w wyniku naprężeń gnących występuje wtedy, kiedy obciążenie wywołuje pewien poziom naprężeń w podstawie powierzchni przejściowej zęba, szczególnie blisko punktu styczności powierzchni przejściowej i profilu zęba, który przekracza dopuszczalny poziom dla zakładanego czasu życia.

Gigacyklowe badania zmęczeniowe najczęściej powodują rozwój pęknięcia zmęczeniowego i złamanie zęba (rys. 5).



Rys. 5. Zębniak z widocznym pęknięciem zmęczeniowym

Zazwyczaj pęknięcie inicjalizuje się blisko podstawy zęba i rośnie wykładniczo, jak pęknięcie rośnie, sztywność zęba maleje, wpływając na przyspieszenie rozwoju pęknięcia.

Dodatkowo może wystąpić tzw. złamanie przypadkowe, zarówno zmęczeniowe jak i spowodowane przeciążeniem, jest zazwyczaj inicjowane przez zjawiska takie jak wtrącenia powierzchniowe lub podpowierzchniowe, pęknięcia spowodowane obróbką cieplną, uszkodzenia fizyczne, nadmierny pitting i/lub spalling, pęknięcia

w czasie szlifowania, i inne naprężenia. Przynajmniej jedna z tych przyczyn, że mogą wystąpić gdziekolwiek na zębie i zazwyczaj powodują stratę części zęba, która mimo, że strata mocy może nie wystąpić, może prowadzić do większego uszkodzenia.

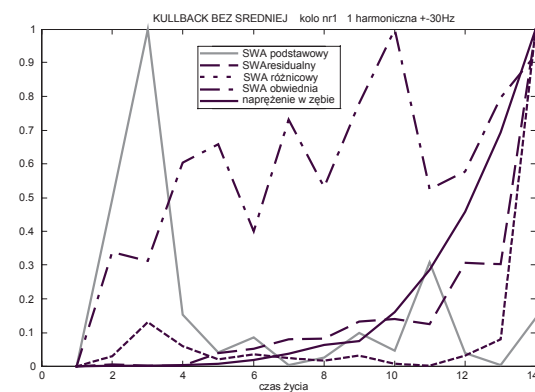
W przypadku klasycznego zmęczenia w wyniku naprężeń gnących uznaje się, że ząb posiada sztywny rdzeń, w związku z czym dominują efekty spowodowane zginaniem. Jednakże, jeżeli wieniec podtrzymujący koło zębate jest cienki, zginanie wienca będzie zauważalne, a pęknięcie zmęczeniowe, zazwyczaj rozwijające się w podstawie zęba, może zainicjować się w stopie zęba i przejść na wieniec.

Dotychczasowe rezultaty przyspieszonych badań na stanowisku mocy krążącej [6] wskazują na konieczność analizowania ewolucji rozkładu prawdopodobieństwa amplitud w wybranych pasmach częstotliwości. Przykład wykorzystania miary zmienności rozkładu prawdopodobieństwa w postaci miary Kullbacka przedstawiono na rysunku 6. Miara Kullbacka ma następującą postać:

$$\begin{aligned} K(\theta_1, \theta_0) &= E\{s(y)\} = \\ &= \sum_{j=1}^n p_{j\theta_1} \left(\log \frac{1}{p_{j\theta_0}} - \log \frac{1}{p_{j\theta_1}} \right) = \\ &= \sum_{j=1}^n p_{j\theta_1} \log \frac{p_{j\theta_1}}{p_{j\theta_0}} \end{aligned}$$

gdzie: $s(y) = \ln \frac{p_{\theta_1}(y)}{p_{\theta_0}(y)}$,

jest logarytmicznym stosunkiem rozkładów gęstości prawdopodobieństw znalezienia się w określonym stanie (awarii lub zdatności), przy założeniu wystąpienia zmiany z rozkładu p_{θ_0} do rozkładu p_{θ_1} .

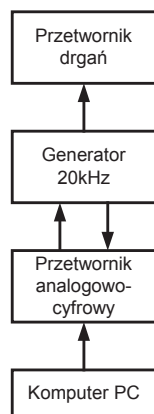


Rys. 6. Zmiana znormalizowanej wartości miary Kullbacka podczas eksperymentu [6]

3. STANOWISKA LABORATORYJNE DO BADAŃ GIGACYKLOWYCH PROCESÓW ZMĘCZENIOWYCH

Do chwili obecnej nie ma norm dotyczących sposobu przeprowadzania badań gigacyklowych procesów zmęczeniowych. Laboratoria zajmujące się tego typu badaniami, np. w Stanach Zjednoczonych, w Austrii, we Francji [1], w Chinach, w Japonii i w Słowacji, są na etapie opracowania własnych procedur badawczych. Pomimo tego, że same maszyny do badań trwałościowych są w tych laboratoriach inne, mają one kilka cech wspólnych. Najważniejsze z nich to (rys. 7):

1. wysokoczęstotliwościowy generator, który generuje elektryczny sinusoidalny sygnał o częstotliwości 10÷20kHz, zazwyczaj jest zasilany napięciami od 100÷1000V;
2. piezoelektryczny (lub magnetostrykcyjny) przetwornik, który przetwarza sygnał elektryczny w drgania mechaniczne, standardowe parametry to skok 5-20 μm , częstotliwość rezonansowa powyżej 20 kHz;
3. jednostka sterująca – komputer PC, który umożliwia sterowanie częstotliwością generatora oraz w zależności w jakie jeszcze dodatkowe systemy jest wyposażone stanowisko badawcze umożliwia sterowanie temperaturą, ciśnieniem, wartością siły, kierunkiem drgań itp.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Pierwsze tego typu urządzenia pozwalały jedynie na jednokierunkowe badania ze stałą amplitudą, najnowsze pozwalają na badania ze zmiennym obciążeniem i regulowaną amplitudą przy wysokiej lub niskiej temperaturze, badania skrętne lub w kilku kierunkach.

Wysokoczęstotliwościowe systemy badań zmęczeniowych pracują zazwyczaj przy częstotliwości 20 kHz. W ich skład według [7] wchodzi następujące części:

- a) Generator (zazwyczaj o mocy 1000÷2500 W), który zapewnia sinusoidalny sygnał o częstotliwości 20 kHz;

- b) Piezoelektryczny (lub magnetostrykcyjny) przetwornik (przetwarza sygnał elektryczny w drgania mechaniczne) oraz wzmacniacz wysokoczęstotliwościowy drgań mechanicznych;
- c) Jednostka sterująca umożliwiająca:
 - pomiar przemieszczeń i naprężeń, sterowanie amplitudą i częstotliwością, licznik cykli;
 - sterowanie komputerowe, w tym wstępne ustawianie amplitudy (konieczne zwłaszcza przy zmiennej amplitudzie obciążenia), programowanie impulsów siły, klasyfikację i zapis amplitud on-line oraz sterowanie zakresem częstotliwości;
- d) Dodatkowe wyposażenie; takie jak – urządzenie chłodzące (aby zapobiec wzrostowi temperatury), komory środowiskowe (piec, komora korozyjna, basen), urządzenia do pomiaru rozwoju pęknięcia (mikroskop, kamera wideo);
- e) Rama i urządzenia do zadawania statycznych i dynamicznych ściskających lub rozciągających obciążeń (moda I, $R \neq -1$) lub zadawania obciążeń ścinających (moda II lub III).

W celu uzyskania określonych i wystarczająco wysokich amplitud, maszyny wysokoczęstotliwościowe muszą pracować w rezonansie. Oznacza to, że każdy drgający element, włączając w to próbkę musi mieć określoną geometrię i właściwości mechaniczne. Próbka jest zazwyczaj osiowo symetryczna (o przekroju kołowym lub kwadratowym), a jej długość musi pozwalać na powstawanie podłużnej fali stojącej przy 20 kHz z maksymalnymi naprężeniami i naciskiem w środku próbki oraz maksymalnym odkształceniem na końcach próbki. Próbka powinna mieć stały przekrój lub zmniejszony przekrój pośrodku próbki (zazwyczaj w kształcie dzwonu lub klepsydry) w celu zwiększenia amplitudy. Odkształcenie sprężyste na końcu próbki jest mierzone za pomocą tensometrów lub czujników przemieszczeń. Zmierzony sygnał jest wysyłany w pętli zwrotnej do jednostki sterującej amplitudą. Maksymalne odkształcenie ε , jest obliczane z amplitudy odkształceń lub jest mierzone w środku próbki w miejscu odkształceń maksymalnych. Jeżeli zależność naprężenia-odkształcenia jest znana (np. z prawa Hooke'a), naprężenia mogą być wyliczone z odkształceń. Jeśli próbka jest zamocowana tylko na jednym końcu, to bez zadawania obciążenia zewnętrznego, obciążenie jest rozciągająco-ściskające ($R = -1$). Sterowanie amplitudą jest realizowane poprzez regulator typu PID (całkująco-różniczkujący), który gwarantuje, że wstępnie ustawiona wartość amplitudy jest osiągana z wysoką dokładnością (99% w nowoczesnych urządzeniach). Oprócz amplitud, również częstotliwości są sterowane w celu

utrzymania rezonansu, za pomocą obwodów PLL (pętli fazowej). Monitoring częstotliwości może być użyty do wykonywania automatycznych operacji, np. wyłączenia urządzenia jeśli ma miejsce pęknięcie.

Specjalną uwagę poświęca się wzrostowi temperatury, spowodowanego wysokimi częstotliwościami zadawania obciążenia, który może być bardzo duży w zależności od amplitudy obciążenia i badanego materiału. Jedną z możliwości zapobiegania wzrostowi temperatury próbki jest zadawanie obciążenia w postaci impulsów z okresowymi przerwami. Długość impulsów 25÷100 ms (500÷2000 cykli) może być stosowana z przerwami 50 i 1000 ms. Dodatkowo może być stosowane chłodzenie za pomocą wentylatorów lub natrysku cieczy. W innym przypadku, może wystąpić np. korozja zmęczeniowa.

Stanowiska bazujące na użyciu wysokich częstotliwości mogą być stosowane nie tylko dla mierzenia zmęczeniowego czasu życia, ale mogą być także stosowane do badania procesu mechanicznego pęknięcia. W tego typu badaniach przyjmuje się obecnie, że określenie zakresu współczynnika intensywności naprężeń ΔK jest decydujące. Do określenia ΔK są wykorzystywane amplituda odkształcenia lub zmiany prędkości na końcu próbki lub naprężenia w środku próbki. Maksymalna wartość współczynnika intensywności naprężeń K_{max} , może być obliczona z amplitudy drgań u , na końcu próbki lub prędkości v , końca próbki, długości pęknięcia a , i szerokości próbki W . W praktyce, bardziej użyteczna i właściwa jest kalibracja za pomocą amplitudy odkształcenia w środku próbki (płaszczyzna pęknięcia), które może być zmierzona za pomocą odpowiednich przyrządów. Odkształcenie ε , dla hipotetycznej długości pęknięcia równej zero, które jest wprost proporcjonalne do amplitudy drgań lub prędkości drgań, określa wielkość obciążenia. Współczynnik intensywności naprężeń jest obliczany na podstawie wzoru (1), gdzie Y_u jest poprawką wykorzystywaną w momencie, kiedy sterujemy amplitudą, a poprawkę Y_v stosujemy w momencie, kiedy amplituda prędkości końca próbki jest decydująca. Różnica pomiędzy Y_u a Y_v jest spowodowana wzrostem częstotliwości rezonansowej wraz ze wzrostem długości pęknięcia, która wpływa na amplitudę prędkości końca próbki [7].

$$K = f(\varepsilon, E, a, W, Y_u, Y_v) \quad (1)$$

gdzie:

$$Y_u = f(a, W),$$

$$Y_v = f(a, W)$$

W literaturze [1] można znaleźć różne stanowiska pomiarowe w zależności od rodzaju badań.

Podstawowym parametrem, który wpływa na rodzaj układu badawczego są pomiary w ekstremalnych warunkach, mogą to być

temperatury kriogeniczne (77°K lub 20°K) [8], wysokie temperatury (do 1000°C) [9] lub przy wysokim ciśnieniu (do 30 MPa). W tego typu badaniach mamy do czynienia z jednostronnie zamocowanym układem generującym drgania do testów zmęczeniowych oraz dodatkowym układem (zazwyczaj pośrodku próbki), który umożliwia zadanie ekstremalnych warunków (temperatury lub ciśnienia).

Innym parametrem może być wielkość próbki, w tego typu badaniach używa się próbek w kształcie cylindrycznym lub płaskim z przewężeniem w środku próbki. W tym przypadku jest również stosowany jednostronnie zamocowany układ wibracyjny [10]. Największym problemem jest takie dobranie kształtu i wymiarów próbki aby jej częstotliwość rezonansowa wynosiła ok. 20 kHz.

Prowadzi się również badania różnego rodzaju uszkodzeń próbek: mogą to być np. gigacyklowe badania zmęczenia lub zużycia frettingowego (ciemno-korozyjnego), badania pittingu, czy badania zmęczeniowego złamania próbki. Układy badawcze są dostosowane do rodzaju wymuszanego uszkodzenia. I tak np. w przypadku gigacyklowych badań zużycia frettingowego zastosowano piezoelektryczny zestaw składający się z trzech próbek [11]. Drgająca próbka była zamontowana pomiędzy dwiema nieruchomymi. Górna była zamocowana na ruchomym jarzmie, które się przesunęło po dwóch pionowych szynach. Obciążenie było realizowane poprzez zamontowanie obciążników w jarzmie. Druga próbka była nieruchoma.

Możliwe jest również badanie różnych rodzajów obciążeń, kierunków i rodzajów wymuszeń. Najczęściej prowadzi się badania ze zmienną niesymetryczną amplitudą i obciążeniem symetrycznym przy jednostronnym zamocowaniu układu wibracyjnego. Badanie drgań skrętnych wymusza zastosowanie innego typu urządzeń piezoelektrycznych. Elementy takie jak próbka i jej zamocowanie muszą być dużo mniejsze niż w przypadku poprzednio opisanych badań. Związane jest to z trudnością w uzyskaniu częstotliwości rezonansowej 20kHz dla standardowej wielkości próbek. [12].

Zazwyczaj na stanowisku umożliwiającym gigacyklowe badania zmęczeniowe realizowane jest trzypunktowe zginanie, próbka jest ustawiona na dwóch podporach na fundamencie.

Z punktu widzenia zmęczeniowego zniszczenia zęba, Autorzy proponują gigacyklowe badanie zmęczeniowe przy dwupunktowym zginaniu. Stanowisko pomiarowe składa się z przetwornika piezoelektrycznego, sterowanego za pomocą generatora, który jest kontrolowany za pomocą jednostki sterującej. Układ zginający próbkę jest zbudowany z trzpienia przenoszącego drgania generowane przez przetwornik piezoelektryczny, zamocowany w uchwycie. Próbka jest zamocowana

jednostronnie w podporze ustawionej na fundamencie.

Z tego punktu widzenia ważnym problemem jest opracowanie oceny faz rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie analizy uszkodzeniowo zorientowanej analizy parametrów sygnału wibroakustycznego. Rezultaty badań przeprowadzonych dotychczas w Pracowni Wibroakustyki IPBM PW potwierdzają możliwość opracowania na tej podstawie zarówno jakościowych jak i ilościowych miar rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego. Takim przykładem są rezultaty wibroakustycznych badań diagnostycznych nad skorelowaniem zmian mikrotwardości warstwy wierzchniej ze zmianami częstotliwościowej struktury sygnału wibroakustycznego, szczególnie rozwojem efektów modulacyjnych.

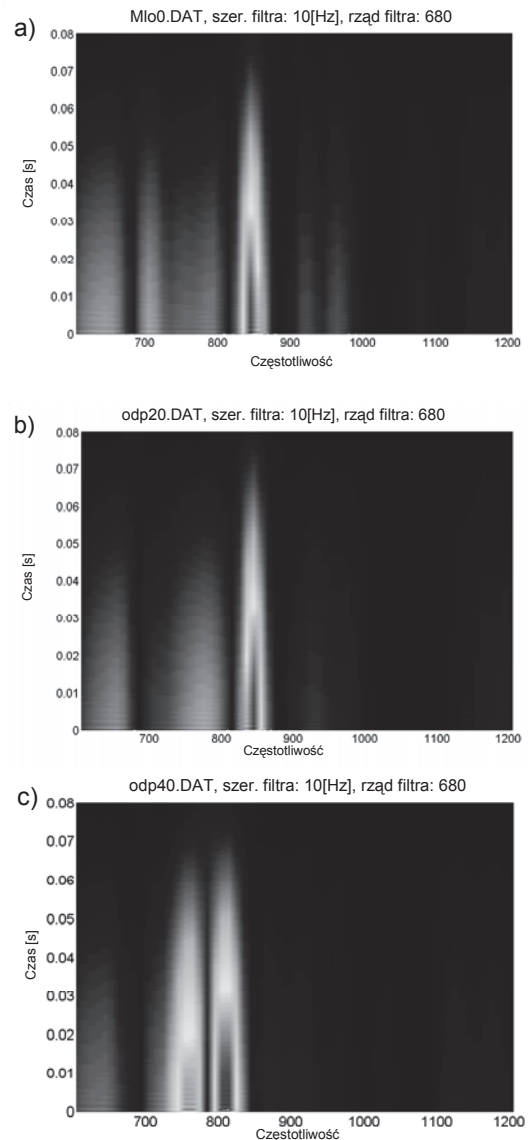
Oznacza to, że konstituując stan warstwy wierzchniej o dużej różnorodności rozkładu jej stref, grubości i związanym z tym rozkładem naprężeń, można wpływać na wielkość i parametry generowanego sygnału wibroakustycznego. Z punktu widzenia diagnostyki technicznej istotnym problemem jest znalezienie związków pomiędzy zmianami właściwości materiałów w tym właściwości warstwy wierzchniej i postępującymi procesami zużycia oraz degradacji a zmianami parametrów sygnałów wibroakustycznych generowanych przez diagnozowany węzeł kinematyczny.

Celem potwierdzenia wpływu własności warstwy wierzchniej elementów maszyn na generowany przez układ sygnał wibroakustyczny, przeprowadzono wstępne badanie wpływu zmiany wybranych parametrów warstwy wierzchniej fizycznie istniejącego obiektu (pary kinematycznej wałek – koło zębate zamontowanej w przekładni) na strukturę częstotliwościową sygnału wibroakustycznego (oraz jego poziom) generowanego w czasie pracy układu [5].

Z danych literaturowych [2] wynika dodatkowo, że w przypadku utwardzonej warstwy wierzchniej inicjacja pęknięcia zmęczeniowego wystąpi albo przy wyższych naprężeniach, albo po większej liczbie cykli niż w przypadku elementu, którego warstwa wierzchnia nie jest utwardzona. Równocześnie wskazuje się na fakt że, pęknięcie nie nastąpi na samej powierzchni ale bezpośrednio pod warstwą utwardzoną. Twardość warstwy wierzchniej jest określona przez trzy podstawowe parametry, głębokość, wskaźnik twardości i gradient twardości. Wymienione parametry mogą być określone za pomocą analizy rentgenowskiej lub przez pomiar mikrotwardości.

Ta ostatnia metoda została wykorzystania w badaniach porównujących wpływ zmiany twardości na strukturę generowanego sygnału wibroakustycznego. Porównując wykresy (rys. 8a i 8b) można zauważyć niewielkie różnice w wielkości modulacji częstotliwości nośnej wyrażające się zróżnicowaniem deformacji listków

bocznych. Efekt ten był zauważalny dla każdego podzbioru próbek. Stanowi to potwierdzenie tezy, że zmiana w warstwie wierzchniej, wyrażona w tym przypadku przez różną grubość warstwy hartowanej oraz wartości mikrotwardości jest mierzalna za pomocą sygnału wibroakustycznego. W szczególności należy zwrócić uwagę na jakościową zmianę struktury zmodulowanego pasma (rys. 8b i 8c) i tym samym możliwość budowy ilościowych modeli pomiędzy zmianami parametrów twardości a wskaźnikami modulacji wieloparametrowej.



Rys. 8. Zmodulowane pasmo częstotliwości dla wałka:
a) hartowanego, b) hartowanego i odpuszczanego w temp. 200°C,
c) hartowanego i odpuszczanego w temp. 400°C [5]

Podobnie duży wpływ na ostateczną wartość trwałości zmęczeniowej przypisuje się naprężeniom własnym.

Przyjmując, że procesy technologiczne wywołują zmianę właściwości warstwy wierzchniej i związane z tym zmiany właściwości wytrzymałościowych elementu również w tym przypadku dokonano próby oceny jakościowych i ilościowych zmian właściwości na podstawie analizy zmian parametru sygnału wibroakustycznego. Zestawienia wyników zawiera rys. 9.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu [14] pokazują, iż wybranie przestrzeni klasyfikacyjnej dla próbek o różnym stanie warstwy wierzchniej nie jest łatwe. Badany sygnał wibroakustyczny zawiera bowiem w sobie nie tylko informacje o stanie warstwy wierzchniej, ale także, i to zapewne w większym stopniu, zaburzenia od niejednorodności materiału próbek czy różnic, pozornie tych samych procesów obróbkowych.

Jednak stosując analizę pasmową, uzyskano dostateczną rozróżnialność wybranych procesów technologicznych. Zaobserwowane zmiany modulacyjne, składowych wokół częstości drgań własnych umożliwiające określenie i klasyfikację najbardziej kontrastowych, ze względu na naprężenia w warstwie wierzchniej, obróbek tj. szlifowania i dogniatania.

Zatem, stosując metody diagnostyki wibroakustycznej możliwa jest detekcja informacji nie tylko o wystąpieniu uszkodzeń powierzchniowych, ale również wykrycie uszkodzeń występujących w rdzeniu próbki.

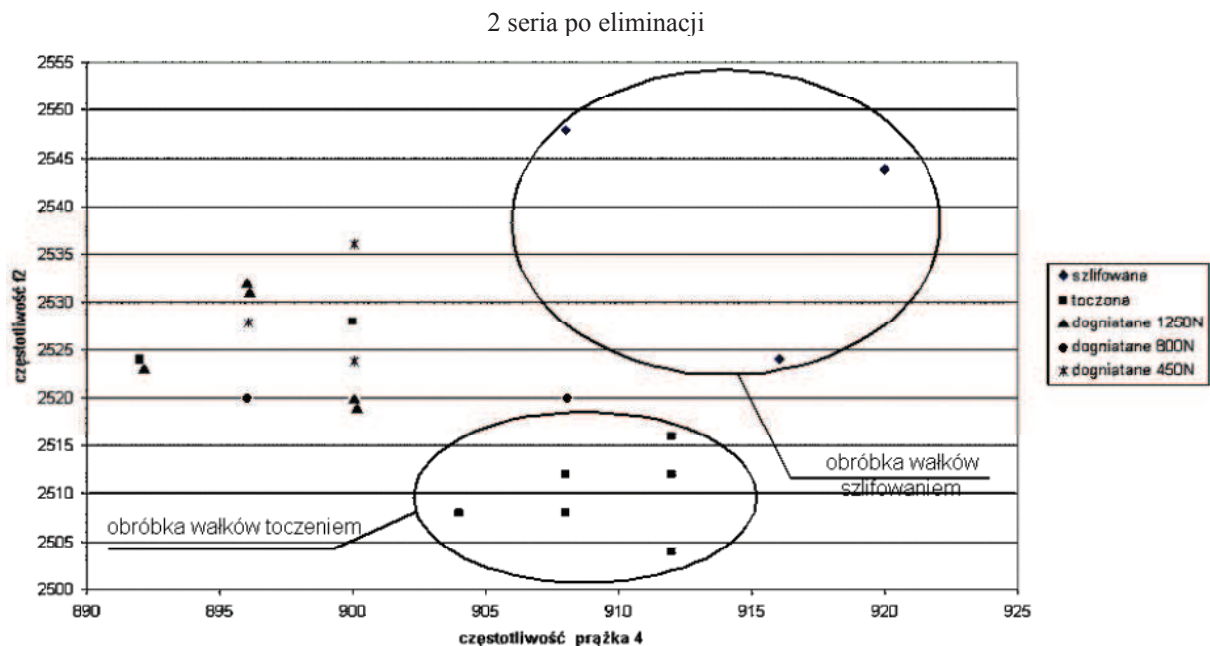
Możliwym staje się podjęcie próby poznania natury przedłużonej trwałości zmęczeniowej, szczególnie określenie wpływu czynników, które na obecnym etapie badań należy zaliczyć do najbardziej istotnych.

4. PODSUMOWANIE

Prowadzenie przyspieszonych testów zmęczeniowych na ultrasonycznym stanowisku badawczym z częstotliwością wymuszeń z przedziału 10÷30 kHz, pozwala sprowadzić okres badań do ekonomicznie akceptowalnego czasu (odpowiednio 10^9 cykli można uzyskać w czasie 30 godzin).

Możliwym staje się podjęcie próby poznania natury przedłużonej trwałości zmęczeniowej, szczególnie określenie wpływu następujących czynników: zjawiska przedłużonego okresu nukleacji; możliwości wystąpienia wydłużonego okresu propagacji pęknięcia; obecności reszkowych naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej i ich wpływu na spowolnione zjawisko propagacji niedużych pęknięć; zjawiska spowolnionego rozwoju pęknięcia w obecności wodoru w otoczeniu wtrąceń niemetalicznych; zjawiska umocnienia próbki wywołanego nieregularnym obciążeniem podczas przyspieszonych badań stanowiskowych; wpływu wysokoczęstotliwościowego wymuszenia i towarzyszącego temu wzrostu temperatury na wiarygodność ultrasonicznych zmęczeniowych badań przyspieszonych.

Zatem, głównym rezultatem jest opracowanie i budowa odpowiedniego stanowiska do badań gigacyklowych procesów zmęczeniowych oraz procedur badawczych uwzględniających, niepodjęmowane do tej pory na świecie próby wykorzystania w prognozowaniu gigacyklowej trwałości zmęczeniowej cech sygnałów wibroakustycznych.



Rys. 9. Płaszczyzna klasyfikacji serii pomiarów [14]

Przedstawione w pracy rozważania skłoniły Autorów do przedstawienia propozycji stanowiska laboratoryjnego do badań gigacyklowych procesów zmęzeniowych. Obliczono wstępne wymiary próbki (HxBxL): 8mm x 5mm x 41mm (może być również płyta o grubości 8 mm i szerokości 41 mm). Dla zadanego maksymalnego odkształcenia z zakresu 5÷40 μm oraz generowanej częstotliwości 10-20kHz dobrano układ, który może być zasilany napięciem 360V. Jest to generator piezoelektryczny PPA40L współpracujący z zasilaczem LA75C.

LITERATURA

- [1]. Bathias C., Paris P.C.: Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Marcel Dekker, New York, 2005.
- [2]. Kujawski D.: ΔK_{eff} parameter under re-examination. International Journal of Fatigue, Vol. 25, 2003, str. 793÷800.
- [3]. Marines I., Bin X., Bathias C.: An understanding of very high cycle fatigue of metals. International Journal of fatigue, Vol. 25, 2003, str. 1101÷1107.
- [4]. Forrester B.D.: Advanced Vibration Analysis Techniques for Fault Detection and Diagnosis in Geared Transmission Systems. PhD Thesis, Swinburne University of Technology, 1996.
- [5]. Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom, 2002.
- [6]. Zawisza M. Wykorzystanie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, 2004.
- [7]. Stanz-Tschegg S.E.: Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultrasonic frequencies. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 22, 1999, str. 567÷579.
- [8]. Buchinger L., Stanzl S., Laird C.: Dislocation structures in copper single crystals fatigued at low temperature. Philosophical Magazine, Vol. 50 (2), 1984, str. 275÷298.
- [9]. Ebara R.: Corrosion fatigue in practical problems, w Nisitani H. (edytor): Comp. And Exp. Fract. Mech. UK, Comp. Mech. Publ., 1994, str. 347÷376.
- [10]. Wang Q., Bathias C.: Réalisation d'un système de fatigue vibratoire sur tôles minces. Partie I: Conception et mise au

point. Contrat Renault-Rapport 96-2, ITMA/CNAM, 1996.

- [11]. Mason W.P.: Use of high amplitude strains in studying wear and ultrasonic fatigue in metals, w WELL J.M. at all. (edytorzy): Ultrasonic Fatigue, Proc. Of the First International Conference on Fatigue and Corrosion Fatigue up to Ultrasonic Frequencies. The Metallurgical Society of AIME, 1982, str. 87÷102.
- [12]. Mayer H.R., Tschegg E.K., Stanzl-Tschegg S.E.: High-cycle fatigue measurements on ceramic materials in combined loading (cyclic torsion and static compression) w Pineau A. (edytor): Proc. Of Fourth International Conference on Biaxial and Multiaxial Fatigue, ESIS, Vol. 2, 1994, str. 357÷368.
- [13]. Bathias C.: A survey of the progress of piezoelectric fatigue machines concept. Fatigue, 2002, str. 2963÷2971.
- [14]. Radkowski S., Szczurowski K., Zduniak A.: Zależność struktury częstotliwościowej SWA od rodzaju obróbki technologicznej elementu. Materiały IX Francusko-Polskiego Seminarium Naukowego Mechaniki, IPBM, Warszawa 2001.



dr inż. Marcin JASIŃSKI
adiunkt w Pracowni
Wibroakustyki Instytutu
Podstaw Budowy Maszyn
Politechniki Warszawskiej.
W pracy naukowej zajmuje
się diagnostyką
wibroakustyczną i modelami
empirycznymi.



Stanisław RADKOWSKI
profesor w Instytucie
Podstaw Budowy Maszyn
Politechniki Warszawskiej
kierownik zespołu nauko-
wego Diagnostyki Techni-
cznej i Analizy Ryzyka.
Prezes Polskiego Towar-
zystwa Diagnostyki
Technicznej.
W pracy naukowej zajmuje
się diagnostyką wibroa-
kustyczną i analizą ryzyka
technicznego.