
XVII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 8-11 marca 2008

ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA ROZWOJU ZMĘCZENIA W
PRÓBKACH METALOWYCH

Jacek SZELAŻEK
Sławomir MACKIEWICZ
IPPT PAN Warszawa
jszela@ippt.gov.pl; smackiew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Metalowe próbki poddaje się badaniom zmęczeniowym w kontrolowanych warunkach w celu badania procesu zmęczenia lub wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej materiału. Z prób takich wyznacza się przy jakich obciążeniach i po ilu cyklach pojawiają się pierwsze pęknięcia zmęczeniowe, jak szybko się rozwijają i kiedy dochodzi do zniszczenia próbki. Dlatego celowe jest możliwie wczesne wykrywanie a potem monitorowanie metodami nieniszczącymi rozwoju pęknięć w czasie trwania próby zmęczeniowej. Pojawiło się szereg prac wykorzystujących do tego celu metodę ultradźwiękową. Jeśli próbki są wystarczająco duże głowice ultradźwiękowe mogą być na stałe sprzęgnięte z powierzchnią próbki w miejscach, które nie podlegają deformacji (części chwytowe). Generowane przez nie fale mogą penetrować obszary próbki, w których spodziewane jest, lub jest wymuszone przez koncentratorem naprężeń, powstanie i rozwój pęknięcia zmęczeniowego. Badania zmian amplitud, czasu przejścia czy widma impulsów mogą być prowadzone w czasie próby zmęczeniowej bez wpływu na sam proces zmęczenia.

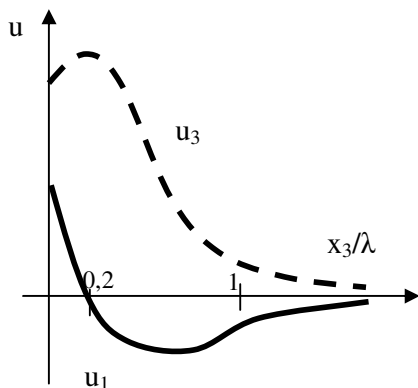
Referat przedstawia wybrane z literatury przykłady takich badań. Opisuje wykorzystanie fal powierzchniowych, fal poprzecznych i płytowych generowanych w materiale różnego typu głowicami ultradźwiękowymi. Powstające w czasie próby pęknięcia są wykrywane, lokalizowane a ich wielkość jest oceniana. Mierzony jest również wpływ degradacji materiału wskutek zmęczenia na prędkości czy osłabienie fal ultradźwiękowych. Charakterystyczną cechą badań pęknięć zmęczeniowych w czasie cyklicznego obciążania próbki jest „zamykanie” i „otwieranie” się szczeliny, co ma wpływ na współczynnik odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni pęknięcia.

Celem pracy jest przedstawienie różnych technik ultradźwiękowych wykorzystywanych w badaniach procesu zmęczenia metali. Opisywane pomiary prowadzone były na próbkach w czasie procesu zmęczenia, w warunkach laboratoryjnych. Nie są to techniki, które mogą być pomocne w wykrywaniu i ocenie wielkości pęknięć w warunkach przemysłowych. Pokazują one jednak potencjalne możliwości techniki ultradźwiękowej w badaniach samego procesu, w lokalizacji powstających wad, w śledzeniu ich rozwoju.

2. KLASYCZNE SPOSOBY WYKRYWANIA PĘKNIĘĆ

Najczęściej stosowaną w opisywanych pracach falą do wykrywania pęknięć zmęczeniowych jest fala powierzchniowa (fala Rayleigh). Fala ta charakteryzuje się największymi przemieszczeniami cząstek blisko powierzchni materiału i szybkim zanikiem amplitudy drgań

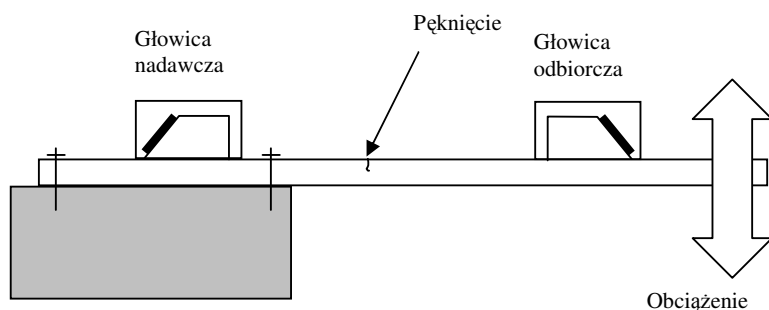
w głąb ośrodka. Dlatego wydaje się być predestynowana do wykrywania pęknięć rozpoczynających się od powierzchni materiału (w drobnoziarnistych metalach technicznych pęknięcia zmęczeniowe zazwyczaj rozpoczynają się od powierzchni). Rozkład przemieszczeń podłużnych (w kierunku równoległym do kierunku propagacji fal) i normalnych do powierzchni pokazano schematycznie na rysunku 1. Falą powierzchniową, metodą impulsową, można wykrywać pęknięcia o głębokościach znacznie mniejszych niż długość fali..



Rys. 1.
Składowe wektora przemieszczeń fali powierzchniowej. u_1 – składowa wzdłużna (równoległa do kierunku propagacji fali), u_3 – składowa normalna do powierzchni, λ – długość fali, x_3 – głębokość.

Należy też pamiętać, że osłabienie fal powierzchniowych zależne jest od chropowatości powierzchni wzdłuż której się rozchodzą. W opisanych niżej badaniach laboratoryjnych prowadzonych na próbkach o wysokiej gładkości możliwe było stosowanie głowic o częstotliwości rezonansowej 10 MHz. Wykrywanie wad w warunkach przemysłowych falą powierzchniową o tej częstotliwości byłoby zapewne skazane na niepowodzenia (lub wymagałoby starannego przygotowania powierzchni do badania).

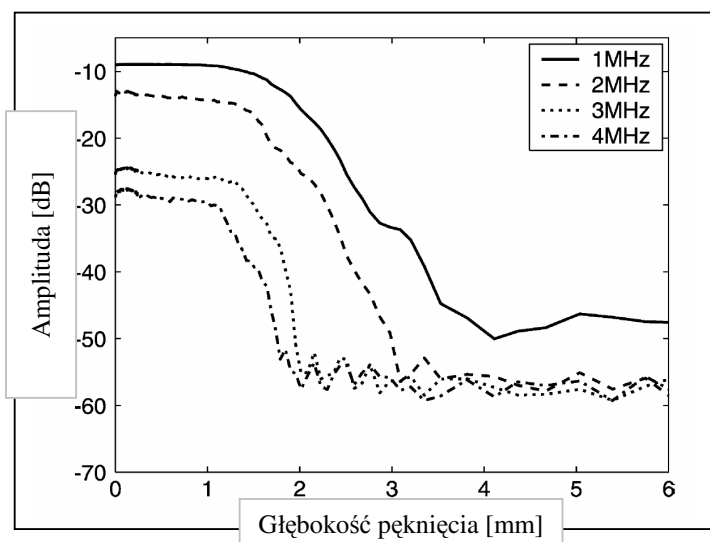
Dzięki zależności głębokości wnikania od częstotliwości fala ta może być wykorzystana do oceny głębokości pęknięcia. Jeśli na drodze impulsu fali o częstotliwości rezonansowej 2 MHz, której odpowiada w stali fala o długości i głębokości wnikania około 1,5 mm, znajdzie się pęknięcie o głębokości 0,3 mm to fala częściowo ulegnie odbiciu od pęknięcia, częściowo przejdzie „pod” pęknięciem. Odbiciu ulegną składowe fali o wyższych częstotliwościach a dalej będą się propagowały składowe o niższych częstotliwościach. Badając widmo echa od reflektora lub widmo fali przechodzącej można oceniać głębokość pęknięcia znajdującego się na drodze fali. Takie badania, wykonywane metodą przepuszczania, opisano w pracy [1]. Rysunek 2 pokazuje schemat badania. Stalowa próbka jest z lewej strony sztywno umocowana a drugi jej koniec jest obciążony zmienną siłą wywołującą zginanie próbki. Po obu stronach pęknięcia rozwijającego się na górnej powierzchni próbki umocowane są szerokopasmowe głowice nadawcza i odbiorcza fal powierzchniowych o częstotliwości 10 MHz.



Rys. 2.
Schemat badania zginanej próbki z pęknięciem metodą przepuszczania falą powierzchniową. Według pracy [1].

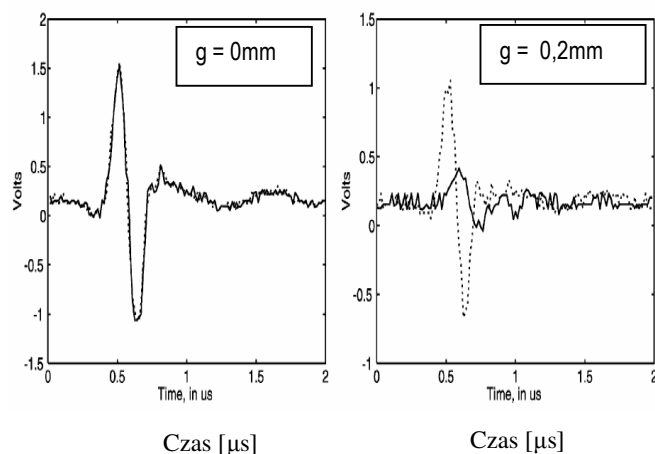
Rysunek 3 pokazuje zależności amplitudy różnych składowych częstotliwościowych przechodzącego impulsu od głębokości pęknięcia. Pomiary wykonana w próbce odciążonej.

Pokazane wyniki pochodzą z pomiarów na próbce nieobciążonej. Widoczny jest szybki spadek amplitudy składowych o częstotliwościach 3 i 4 MHz, wolniejszy dla 2 MHz i najwolniejszy dla najdłuższej fali o częstotliwości 1 MHz.



Rys. 3.
Zmiany amplitudy odbieranego sygnału w funkcji głębokości pęknięcia, dla składowych o różnych częstotliwościach. Z pracy [1].

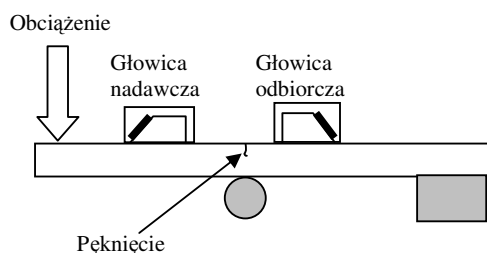
Fale o tej częstotliwości osiągają najniższą amplitudę dla pęknięcia o głębokości blisko 4 mm, czyli w przybliżeniu równego długości fali. Autorzy zauważyli, że dla wyższych częstotliwości spadki amplitud nie odpowiadają przewidywaniom teoretycznym. Na przykład dla częstotliwości 3 MHz można by się spodziewać, że amplituda osiągnie minimum dla pęknięcia o głębokości równej około 1 mm, czyli równego długości fali. Za odstępstwa od przewidywań odpowiadało to, że badane pęknięcie zamykało się w dolnej strefie po usunięciu obciążenia. Powodowało to, że fala częściowo przenikała przez stykające się ścianki pęknięcia. Zależność amplitudy fali przechodzącej od obciążenia próbki pokazano na rysunku 4. Przedstawia on amplitudy odbieranej fali dla dwóch obciążeń próbki - „zamykającego” pęknięcie (linia kropkowana) i „otwierającego” (linia ciągła).



Rys. 4.
Amplitudy fali przechodzącej. Linia kropkowana dla obciążenia „zamykającego”, linia ciągła- dla obciążenia „otwierającego” pęknięcie, g – głębokość pęknięcia. Z pracy [1].

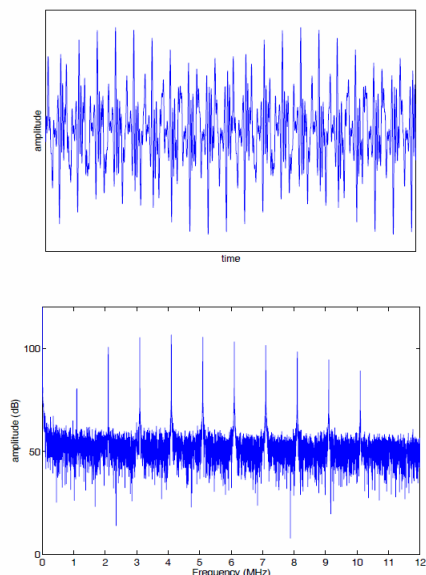
Lewy rysunek przedstawia wyniki dla próbki bez pęknięcia a prawy dla próbki, w której powstało już pęknięcie o głębokości 0,2 mm. Widoczny jest silny spadek amplitudy nawet dla pęknięcia o tak nieznacznej głębokości.

W pracy [2] opisany jest nowy sposób oceny głębokości pęknięcia z wykorzystaniem fali powierzchniowej. Autorzy badali rozwój pęknięcia w stalowej próbce o grubości 12 mm poddanej cyklicznemu zginaniu. Schemat badania prowadzonego metoda przepuszczania falą powierzchniową pokazano na rysunku 5. Na próbce, po obu stronach pęknięcia, ustawiono dwie głowice na fale powierzchniowe o częstotliwości rezonansowej 10 MHz. Próbka umocowana była sztywno z prawej strony, podparta w środku długości a jej lewy koniec był cyklicznie obciążany siłownikiem hydraulicznym. Pęknięcie powstawało ponad podporą, w miejscu maksymalnego momentu zginającego.



Rys. 5.
Sposób badania próbki jednostronnie zginanej.
Z pracy [2].

W celu wyeksponowania zmian w amplitudzie fal o różnych częstotliwościach przechodzących przez obszar z pęknięciem głowica nadawcza pobudzana była niskonapięciowym ciągłym sygnałem zawierającym składowe o różnych częstotliwościach (*multisine excitation signal*). Na rysunku 6 pokazano odbierany przez głowicę odbiorczą sygnał w dziedzinie czasu i częstotliwości. Widmo sygnału zawiera wyróżnione składowe o częstotliwościach od 1 do 10 MHz.

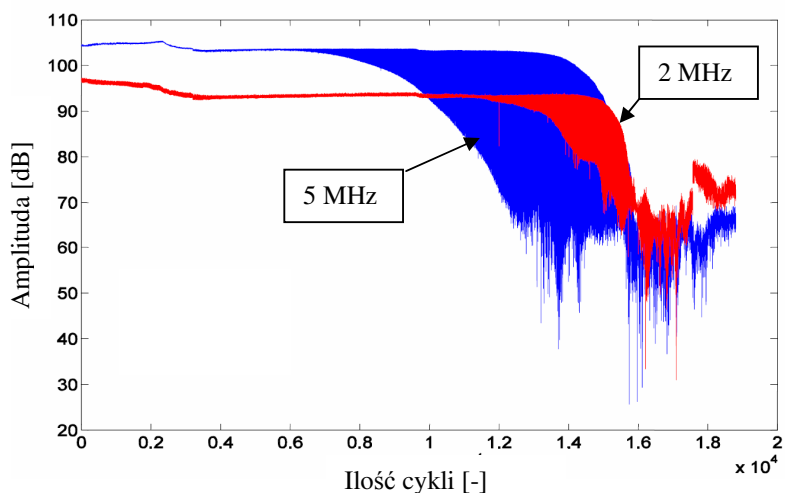


Rys. 6.
Wieloczęstotliwościowy sygnał w dziedzinie czasu
(górny wykres) i częstotliwości (dolny wykres).
Z pracy [2].

Badania widma odbieranego sygnału prowadzone były w czasie próby zmęczeniowej i korelowane z głębokością pęknięcia mierzoną specjalnym czujnikiem przyklejonym do bocznej powierzchni próbki w miejscu pęknięcia. Następny rysunek (rys. 7) przedstawia zależność amplitudy składowej o częstotliwości 2 MHz (pole szare) i 5 MHz (pole czarne). Po około 6500 cyklach pole dla $f=5\text{MHz}$ rozszerza się. Spowodowane jest to wpływem „zamykania” i „otwierania” się powstałej szczeliny na transmisję fali i cyklicznymi wahaniami amplitudy. Amplituda fali dla tej częstotliwości zmienia się o blisko 40 dB w zależności od tego, czy powierzchnie pęknięcia są do siebie dociskane czy też szczelina jest rozwartą. Zmiany dla składowej o niższej częstotliwości (pole szare) uwidaczniają się dopiero po około 1200 cyklach, kiedy pęknięcie osiągnęło głębokość około 1,2 mm.

Dla ilości cykli powyżej 16000 widoczne są wyraźne spadki amplitud fal przechodzących również przez „zamkniętą” szczelinę. Oznaczają one, że w trakcie próby powierzchnie pęknięcia zdeformowały się i nawet w stanie zamkniętym fale nie przedostają się przez nią. Co ciekawe, badania wykazały, że zdolność szczeliny do dokładnego zamykania się zależy do orientacji powierzchni pęknięcia względem kierunku walcowania. Najsilniejszy wpływ

zamykania się szczeliny na transmisje fal zaobserwowano dla pęknięć w płaszczyźnie wyznaczonej przez kierunek walcowania i grubości blachy.

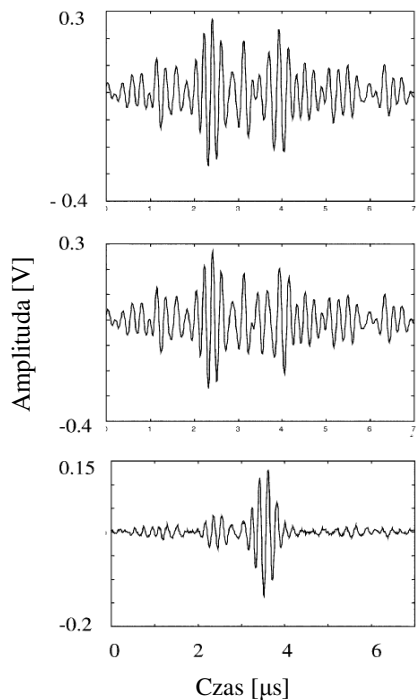


Rys. 7.
Zależność amplitudy fali przechodzącej przez obszar z pęknięciem o składowych częstotliwości 2 i 5 MHz od ilości cykli obciążenia. Z pracy [2].

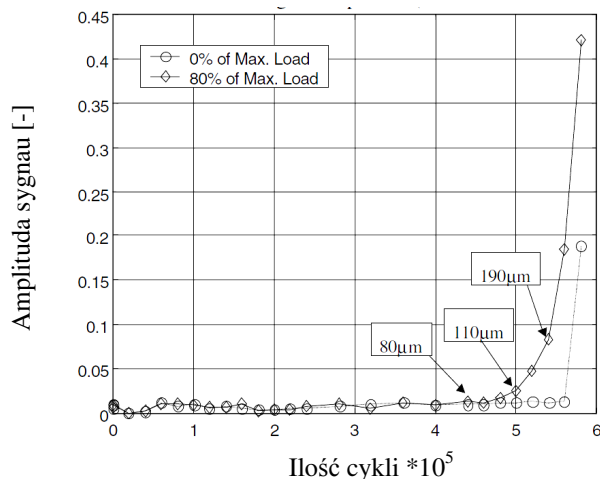
Dwie następne prace opisują sposób, w jaki możliwe jest wczesne wykrycie powstającego pęknięcia. W początkowych stadiach zniszczenia sygnał od powstającego dopiero pęknięcia jest porównywalny z szumami strukturalnymi. W celu uwidocznienia go stosowane są techniki różnicowe. Jedna z nich polega na odejmowaniu od rejestrowanych sygnałów przebiegu uzyskanego w materiale przed powstaniem uszkodzenia. Druga – na odejmowaniu sygnałów uzyskiwanych w stanie obciążonym (przy otwartym pęknięciu) od sygnałów w stanie nieobciążonym (pęknięcie zamknięte).

W pracy [3] opisane jest badania stalowej próbki podawanej cyklicznemu rozciąganiu falami powierzchniowymi o częstotliwości 5 MHz, metodą echa. Jako koncentrator naprężeń w próbce o grubości 3 mm i szerokości 30 mm wykonano gładkie, półelipsoidalne zagłębienie. Koncentrator miał długość 5 mm, szerokość 8 mm i głębokość 1 mm. Zagłębienie to było reflektorem fali powierzchniowej utrudniającym rejestrację powstającego na jego dnie pęknięcia. Aby odseparować sygnały od zagłębienia i powstającego pęknięcia zastosowano technikę różnicową polegającą na odejmowaniu wskazań „referencyjnych” (uzyskanych na próbce przed wywołaniem w niej pęknięcia) od wskazań na próbce z rozwijającym się już pęknięciem. Wskazania referencyjne zarejestrowano nie na próbce nowej a na próbce, która poddana była pewnej ilości cykli obciążenia (próbka „trenowana”). Osiągnięcie stabilnych, powtarzalnych sygnałów w czasie cyklu rozciągania okazało się koniecznym warunkiem skutecznego eliminowania sygnałów od zagłębienia. Rysunek 8 przedstawia od góry sygnał od zagłębienia w dziedzinie czasu (sygnał referencyjny), poniżej sygnał od zagłębienia z pęknięciem a na dole sygnał różnicowy (od pęknięcia). Ponieważ prędkości fal i w związku z tym i czasy przejścia w próbce nowej i po pewnej ilości cykli różniły się, w celu poprawnego odejmowania sygnałów konieczne okazało się ich synchronizowanie. Do tego celu wykorzystano technikę wzajemnej korelacji sygnałów. Pozwoliła ona na odpowiednie przesuwanie w fazie sygnału referencyjnego względem sygnału z wadą. Przesunięcie to mieściło się w granicach 10-40 ns. Metoda odejmowania sygnałów pozwoliła autorom na wczesne wykrycie powstającego w próbce pęknięcia i śledzenie rozwoju pęknięcia poczynając od głębokości poniżej 0,1 mm.

Podobnie jak i w innych pracach zaobserwowano wpływ naprężenia panującego w próbce na amplitud echa wady. Rysunek 9 pokazuje zależności amplitud echa przy próbce rozciąganej siłą równą 80% siły maksymalnej (pęknięcie otwarte) i dla siły równej zero (pęknięcie naturalnie zamknięte).



Rys. 8.
 Sygnały uzyskane podczas wykrywania pęknięcia rozpoczynającego się od wgłębienia; Od góry: sygnał referencyjny (od zagłębienia bez pęknięcia, po 20.000 cyklach), od zagłębienia z pęknięciem (po 500.000 cykli), sygnał różnicowy. Z pracy [3].

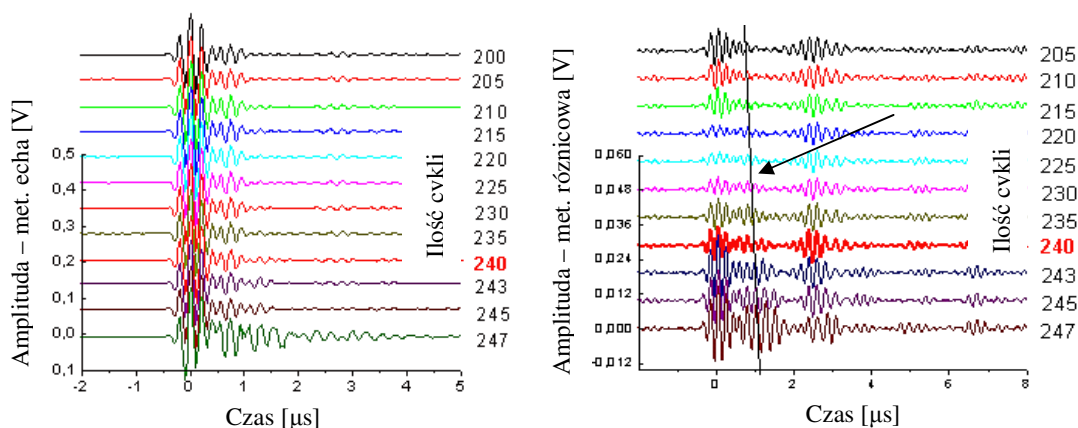


Rys. 9.
 Zależność amplitudy echa od ilości cykli obciążenia próbki. Romby – pęknięcie otwarte, kółka – pęknięcie zamknięte (siła równa zero).

Widoczne jest, że amplituda sygnału odbitego od pęknięcia zamkniętego (kółka na wykresie) rośnie dopiero w końcowym stadium zmęczenia.

Inny przykład różnicowego pomiaru opisany jest w pracy [4], w której stalowa próbka poddana była cyklicznemu rozciąganiu. Jako koncentrator naprężeń wykonano w niej otwór przelotowy. Pęknięcia zmęczeniowe rozpoczynające się od powierzchni otworu wykrywane były metodą echa głowicą kątową sprzęgniętą na stałe z powierzchnią próbki. Wykrycie powstającego pęknięcia zmęczeniowego utrudniały echa uzyskiwane od otworu. Dlatego do możliwie wczesnego wykrycia pęknięcia autorzy wykorzystali występujące synchronicznie z cyklami obciążenia próbki różnice w amplitudzie echa od zamykanego i otwieranego pęknięcia. Impulsy uzyskiwane dla maksymalnej siły rozciągającej próbkę odejmowano od impulsów dla siły zerowej. Założono, że dla tych dwóch stanów różnica w impulsach odbitych od wady będzie maksymalna. Taki sposób badania pozwolił na wczesne wykrycie pęknięcia bez konieczności stosowania sygnału referencyjnego (dla próbki bez pęknięcia) i konieczności eliminowania zmian prędkości i osłabienia fal w degradującym się podczas

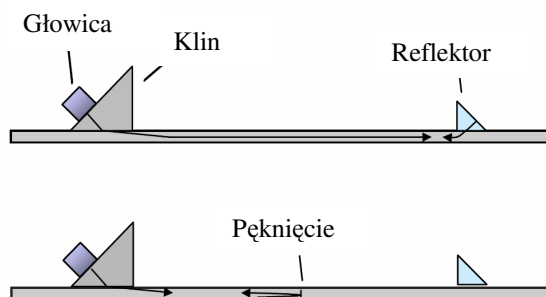
próby materiale. Uzyskane wyniki pokazuje rysunek 10. Lewy wykres to przebiegi czasowe bez odejmowania sygnałów, prawy – uzyskane metodą różnicową dla etapu badania, w którym powstało już pęknięcie. Po prawej stronie wykresów podana jest ilość cykli obciążenia (o 200 do 247 tysięcy cykli).



Rys. 10. Impulsy od otworu przelotowego z rozwijającym się pęknięciem zmęczeniowym. Lewy wykres – klasyczne obrazy uzyskane metoda echa. Prawy wykres – wyniki uzyskane metodą różnicową. Z pracy [4].

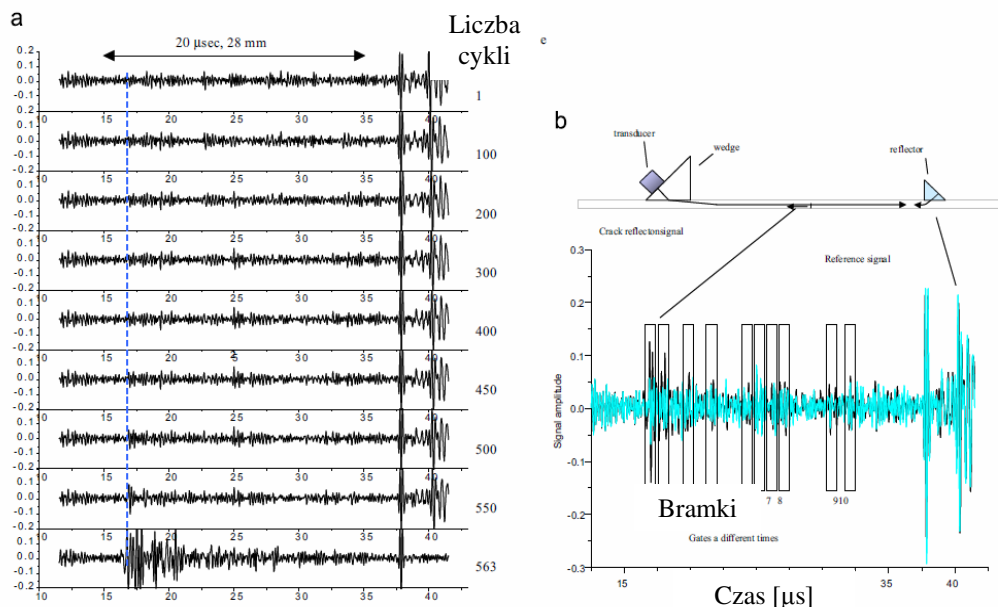
Strzałką na prawym wykresie pokazano linię przeciągniętą wzdłuż rosnącego echa wady. Według autorów zastosowanie metody odejmowania sygnałów pozwoliło odseparować echa małego pęknięcia od stałego echa pochodzącego od krawędzi utworzonej przez powierzchnie próbki i otwór przelotowy.

W większości przypadków w badaniach zmęczeniowych metalowych próbek bez koncentratorów naprężeń, pęknięcia zmęczeniowe rozwijają się od powierzchni próbki. W materiałach gruboziarnistych mogą one rozpoczynać się również wewnątrz materiału. W pracy [5] opisano badania ultradźwiękowe próbek wykonanych z gruboziarnistego stopu tytanu Ti-6242. Do wykrycia powstających pęknięć wykorzystano fale płytowe penetrujące całą objętość płaskiej próbki o grubości 2 mm. Sprzęgniętą na stałe z próbką szerokopasmową głowicą kątową o częstotliwości 5 MHz wzbudzano jednocześnie impulsy fal płytowych S0 i A0. Badanie przeprowadzono metodą echa. Do uzyskania impulsu referencyjnego na drugim końcu próbki przyklejono reflektor fal płytowych (goły klin załamujący). Amplituda echa tego reflektora pozwoliła na śledzenie zmian osłabienia fal w materiale podczas procesu zmęczenia. Schemat badania pokazano na rysunku 11.



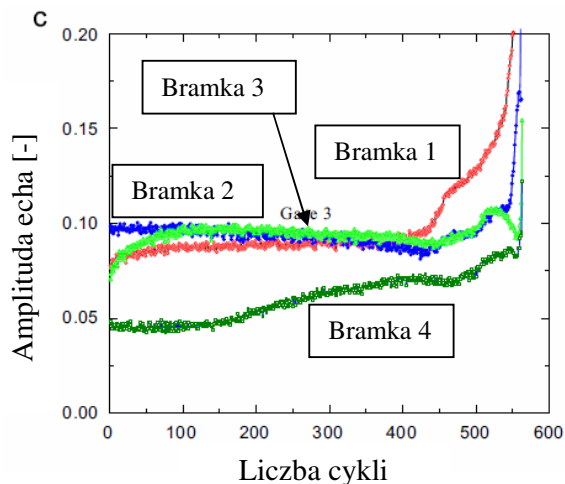
Rys. 11. Schemat pomiaru płaskiej próbki falami Lamba z wykorzystaniem reflektora w postaci klina załamującego przyklejonego do próbki. Z pracy [5].

Rysunek 12 przedstawia wyniki pomiarów. Obrazy oscyloskopowe otrzymane w czasie trwania próby, pokazane w lewej części rysunku, były zapamiętywane. Ze względu na szумы akustyczne pochodzące od gruboziarnistej struktury materiału próbki, wczesne wykrycie uszkodzeń klasyczną metodą echa okazało się trudne. Tym bardziej, że w badanej próbce jednocześnie rozwijało się kilka uszkodzeń. Echa powstających w próbce pęknięć ujawniły się wyraźnie dopiero w końcowym stadium próby (dolne linie na lewym wykresie). Aby prześledzić rozwój tych pęknięć wykorzystano 10 bramek czasowych ustawionych w miejscach wskazań uszkodzeń. Miejsca bramek pokazano na prawym wykresie rysunku 12. Mając określone w ten sposób pozycje bramek, z zapamiętanych przebiegów odtworzono „wstecz” zmiany amplitud ech w bramkach.



Rys. 12. Wyniki badania próbki ze stopu tytanu falami Lamba. Lewa strona – obrazy oscyloskopowe uzyskane po różnej ilości cykli obciążenia. Prawa strona – pozycje 10 bramek czasowych na obrazie oscyloskopowym. Z pracy [5].

Wyniki odtworzenia „wstecz” dla kilku bramek pokazano na rysunku 13. Bramkę Nr 1 ustawiono została w miejscu wiodącego pęknięcia, które doprowadziło do uszkodzenia próbki.



Rys. 13. Wyniki odtworzenia wstecz zmian amplitud w bramkach. Z pracy [5].

Z wykresu na rysunku 13 możliwe jest odtworzenie historii próbki. Zmiany amplitudy w bramkach podczas pierwszych 50 cykli wynikają ze stabilizacji próbki w szczękach maszyny. Pęknięcie, które doprowadziło do zerwania próbki (bramka Nr 1) powstało

dopiero po 400 cyklach obciążenia. W bramce Nr 4 pęknięcie powstało już po 170 cyklach. Aż do cyklu 500 pęknięcie to rozwijało się bardzo wolno po czym jego rozwój przyspieszył. Autorzy wnioskuje, że pęknięcie w bramce Nr 4 rozwijało się do granicy ziarna, na której jego rozwój został zahamowany. Zwracają też uwagę, że w zastosowanej przez nich metodzie „odtworzenia wstecz” historii rozwoju licznych pęknięć, pęknięcia znajdujące się bliżej głowicy zasłaniały pęknięcia leżące dalej i amplitudy ich ech mogły być zafałszowane.

3. BADANIA ZJAWISK NIELINIOWYCH

Innym podejściem do śledzenia metodą ultradźwiękową zmian wywołanych w materiale wskutek zmęczenia jest badanie własności nieliniowych lub ich zmian. Badania takie prowadzone są we wczesnych stadiach degradacji materiału, przed powstaniem w nim wiodących pęknięć zmęczeniowych.

W próbkach poddanych zmęczeniu zjawiska nieliniowe, czyli generacja wyższych harmonicznych, są wywołane dwoma efektami. Pierwszy z nich to nieliniowość samego materiału (w przydatku metali w stanie dostawy bardzo niska) a drugi to drgania zakotwiczonej dyslokacji. Ponieważ zmęczenie metalu prowadzi do kumulacji dyslokacji, pomiar parametru β będącego miarą nieliniowości powinien być sposobem oceny stanu materiału. Bezwymiarowy parametr β jest wyznaczany z zależności:

$$(1) \quad \beta = \frac{8 A_2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \times A_1^2}$$

gdzie: x - współrzędna w kierunku propagacji fali, λ – długość fali, A_1 – amplituda częstotliwości podstawowej, A_2 – amplituda drugiej harmonicznej

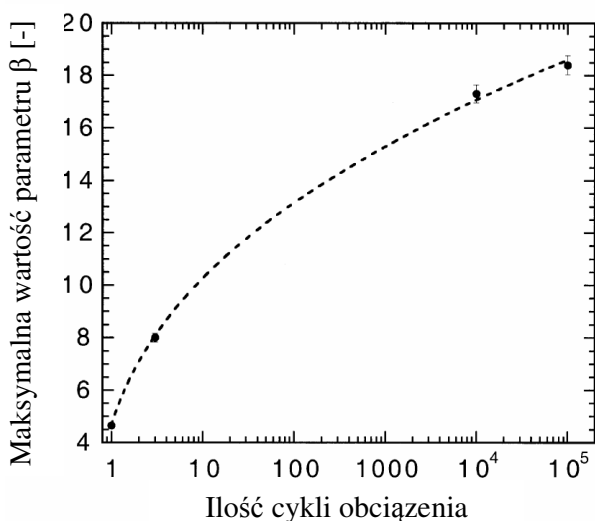
Innym od wyżej opisanego dyslokacyjnego mechanizmu nieliniowości (który opisuje jedynie zachowanie ośrodka ciągłego) jest mechanizm nieliniowego zachowanie się ośrodka z pęknięciami. W materiale z pęknięciami naprężenia rozciągające i ściskające są przenoszone w różny sposób. Jeśli naprężenie ściskające w fali podłużnej rozchodzącej się w materiale z otwartymi pęknięciami jest wystarczające do „zamknięcia” pęknięcia to częściowo zostanie ono przekazane na drugą stronę szczeliny. Podczas padania fali podłużnej na taką szczelinę będzie ona „kłała”. Takie zachowywanie pobudzanej padającą na nią falą szczeliny prowadzi do zniekształcenia przebiegu ciśnienia w fali i do generacji wyższych harmonicznych. Mechanizm ten może być tym łatwiej zaobserwowany im wyższa jest amplituda fali padającej na szczelinę.

W pracy [6] opisano wyznaczanie parametru β w próbkach ze stopu lekkiego poddanych zmęczeniu. Ponieważ pomiar amplitudy wyższych harmonicznych jest trudny badania prowadzono na specjalnie przygotowanych próbkach. Z różnych miejsc dużych próbek poddanych zmęczeniu wycinano cylindryczne próbki o długości 19 mm. Z każdej z poddanych zmęczeniu próbek wycinano kilka takich cylinderków w celu zbadania jak zmiany parametru nieliniowego rozkładają się na długości i w przekroju zmęczonej próbki. Badania mikroskopowe starannie obrobionych czoł małych próbek wykazały, że rozwinęły się w nich mikropęknięcia nie większe niż 35-40 μm (uszkodzenia niewykrywalne klasycznymi technikami).

Do jednego czoła małej cylindrycznej próbki sprężnięto przetwornik piezoelektryczny generujący czystą falę sinusoidalną o częstotliwości 5 MHz. Do drugiego czoła próbki przyłożono bezkontaktowy odbiornik pojemnościowy rejestrujący amplitudy fali po przejściu przez długość próbki. Z analizy Fouriera wyznaczano amplitudy fal o częstotliwościach 5

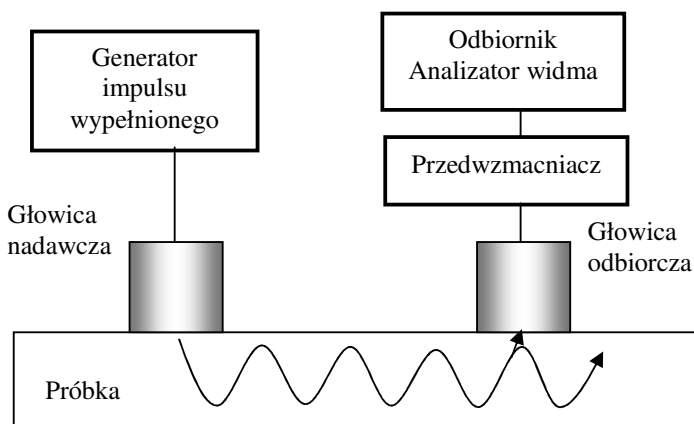
(podstawowa) i 10 MHz (2-ga harmoniczna) a z zależności (1) obliczano parametr β . Opisane wyżej pomiary wykonano dla próbek po różnej ilości cykli obciążenia. Wykres na rysunku 14 pokazuje uzyskane rezultaty. Widoczny jest kilkukrotny wzrost wartości parametru β w funkcji uszkodzenia zmęczeniowego materiału.

Wykres na rysunku 14 pokazuje maksymalne wartości parametru β dla danej próbki. Wyniki pokazały bowiem, że na długości próbki wartości tego parametru zmieniają się różnie i mogą się dwukrotnie różnić. Zauważono też, że największe wartości parametru β obserwowane są dla materiału przy powierzchni próbki.



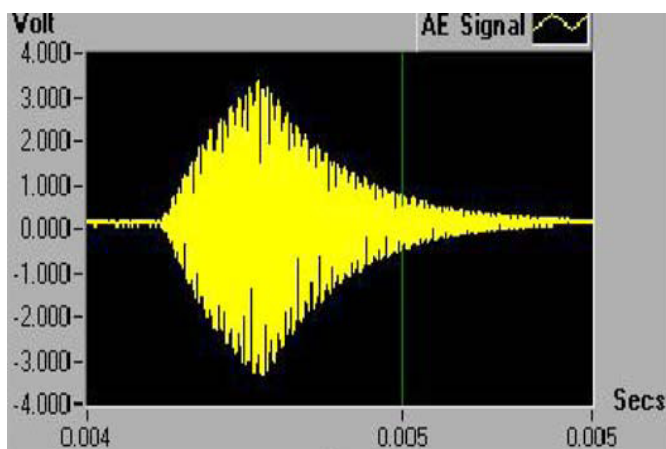
Rys. 14. Zmiany maksymalnej wartości parametru nieliniowości β w próbkach ze stopu lekkiego poddanych zmęczeniu. Z pracy [6].

Inne podejście do wykrycia nieliniowości materiału wywołanej zmęczeniem opisane jest w pracy [7]. Z jednego płaskownika wykonano szereg stalowych próbek i poddano je wysokocyklicznemu zmęczeniu (współczynnik amplitudy $R = -1$). Po osiągnięciu określonej liczby cykli do powierzchni próbek przykładano głowicę nadawczą o częstotliwości rezonansowej 150 kHz oraz szerokopasmową głowicę odbiorczą o paśmie sięgającym 1 MHz. Głowica nadawcza pobudzana była impulsem wypełnionym a sygnał odebrany był poddany analizie widmowej. Schemat pomiaru pokazano na rysunku 15 a rysunek 16 przedstawia odbierany sygnał w dziedzinie czasu.



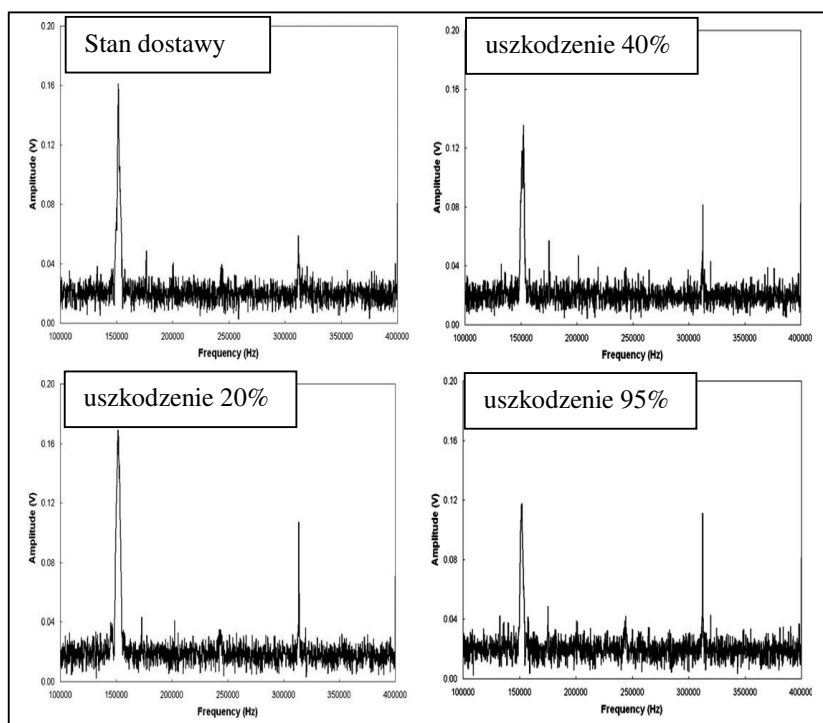
Rys. 15. Schemat badania próbki stalowej falą prowadzoną o częstotliwości 150kHz. Z pracy [7].

Rysunek 17 pokazuje widma odbieranych sygnałów dla próbki w stanie dostawy i po różnej ilości cykli podanej jako procent ilości cykli do zniszczenia. Widać, że nawet dla próbki przed zmęczeniem, poza składową częstotliwości podstawowej 150 kHz.



Rys. 16.
Odbierany sygnał w dziedzinie czasu.
Z pracy [7].

Widoczna jest wybijająca się z szumów składowa 2-giej harmonicznej o częstotliwości 300 kHz. Amplituda tej składowej monotonicznie rośnie wraz z postępem zmęczenia materiału.



Rys. 17.
Widma impulsów
odbieranych na próbce
w stanie dostawy i
uszkodzonych wskutek
zmęczenia w różnym
stopniu.
Z pracy [7].

Autorzy zauważyli, że stosunek amplitudy 2-giej harmonicznej do podstawowej rośnie szybko do uszkodzenia równego 40%, stabilizuje się aż do uszkodzenia wynoszącego 90% po czym gwałtownie rośnie aż do zniszczenia próbki. Początkowy wzrost amplitudy 2-giej harmonicznej jest wywołany wzrostem gęstości dyslokacji, potwierdzonej obserwacjami mikroskopowymi. Gęstość ta zmienia się niewiele podczas następnego okresu próby a w końcowym etapie badania za szybki wzrost amplitudy 2-giej harmonicznej odpowiedzialne są formujące się trwałe pasma poślizgu (regiony szczególnej koncentracji dyslokacji). Co ciekawe, w końcowym etapie zmęczenia autorzy uzyskali stosowaną techniką amplitudę 2-giej harmonicznej porównywalną z amplitudą częstotliwości podstawowej.

4. Podsumowanie

Przytoczone prace dają pogląd jak obecnie pomiary ultradźwiękowe wykorzystywane są w badaniach zmęczenia metali. Klasyczne badania metodą echa lub przepuszczania pozwalają

na wczesne wykrycie pęknięć oraz ocenę ich wielkości. Badania własności nieliniowych pozwalają na śledzenie będących wynikiem wczesnych stadiów zmęczenia zmian mikrostruktury materiału. Można zauważyć, że do badań wykorzystywane są zazwyczaj stosunkowo duże próbki płaskie, pozwalające na przyłożenie do ich powierzchni głowic ultradźwiękowych. Nie ma w dostępnej literaturze opisu badania ultradźwiękowego typowych w badaniach zmęczeniowych próbek klepsydrycznych, o przekroju okrągłym. Wynika to zapewne z trudności z wprowadzeniem i odbiorem fal z krzywoliniowych powierzchni takich próbek.

W cytowanych pracach wyniki badań ultradźwiękowych potwierdzone były badaniami mikroskopowymi pozwalającymi potwierdzić jakie mechanizmy były odpowiedzialne za obserwowane w czasie próby zmiany paramentów akustycznych.

LITERATURA

- [1]. S. Vanlanduita, P. Guillaumea, G. Van Der Linden, On-line monitoring of fatigue cracks using ultrasonic surface waves, *NDT&E International* 36 (2003) 601–607
- [2]. K. Harri, P. Guillaumes, S. Vanlanduit, On-line Monitoring of Cracks using Ultrasonic “Multisine” Surface Waves, *Proc. ECNDT 2006 - Th.1.5.3* (<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.1.5.3.pdf>)
- [3]. D.A. Cook, Y.H. Berthelet, Detection of small surface-breaking fatigue cracks in steel using scattering of Rayleigh waves, *NDT&E International*, 34 (2001) 4830492
- [4]. B. Köhler F. Bergner Monitoring of ultrasound crack indications in experiments with cyclic loads, *NDT.net* – March 2002, Vol.7, No.03 (<http://www.ndt.net/article/v07n03/koehler/koehler.htm>)
- [5]. S.I. Rokhlin_, J.-Y. Kim, B. Xie, B. Zoofan Nondestructive sizing and localization of internal microcracks in fatigue samples, *NDT&E International* 40 (2007) 462–470
- [6]. J.H. Cantrell, W.T. Yost, Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures, *International Journal of Fatigue* 23 (2001) S487–S490
- [7]. S. Palit Sagar, S. Das, N. Parada, D.K. Bhattacharya, Non-linear ultrasonic technique to assess fatigue damage in structural steel, *Scripta Materialia* 55 (2006) 199–202