

Pracownia Ultradźwiękowych Badań Materiałów
Zakład Teorii Ośrodków Ciągłych



(PRACA HABILITACYJNA)

Jacek Szulęzek

**POSTĘPY W ULTRADŹWIĘKOWYCH
BADANIACH NAPRĘŻEŃ**

4/2001

WARSZAWA 2001

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-56658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 15 maja 2001 r.

recenzent - Prof.dr hab. inż. Janusz Orkisz



57252



Praca habilitacyjna

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 11,25 Ark. druk. 14,25
Oddano do drukarni w sierpniu 2001 r.

ATOS - Poligrafia-Reklama, W-wa, ul. Jana Kazimierza 35/37

<http://rcin.org.pl>

STRESZCZENIE

Praca opisuje wkład autora w rozwój tensometrii ultradźwiękowej, a w szczególności jego badania nad nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi piezoelektrycznych głowic ultradźwiękowych i ich układów stosowanych w pomiarach. Prace koncentrowały się głównie na opracowaniu układów głowic umożliwiających precyzyjne pomiary czasu przejścia impulsów fal ultradźwiękowych w wyrobach hutniczych, częściach maszyn i konstrukcji, a więc w elementach o nieobrobionych, chropowatych czy skorodowanych powierzchniach. Prowadzenie pomiarów na takich właśnie elementach umożliwia wyjście z badaniami poza laboratorium i jest warunkiem niezbędnym do zastosowania tensometrii ultradźwiękowej w przemyśle.

We wstępie przedstawiono krótko potrzebę i cel wyznaczania wartości naprężeń w elementach różnych konstrukcji i stosowane dziś metody pomiarowe. W dalszej części opisany jest stan wiedzy w dziedzinie ultradźwiękowych metod wyznaczania wartości naprężeń. Opisane są typy fal stosowanych w badaniach z podaniem ich zalet i wad z punktu widzenia ich wykorzystania w badaniach naprężeń. Przedstawiona jest historia pomiarów podstawowej w tensometrii ultradźwiękowej zależności między prędkością propagacji różnego typu fal ultradźwiękowych i naprężeniem. Opisane są wyniki badań wpływu temperatury na prędkości fal oraz sposoby ograniczania wpływu anizotropii teksturalnej na wyniki badań naprężeń. W ostatniej części opisano krótko sposoby pomiarów czasu przejścia impulsów fal i uzyskiwane dokładności. Dokładności te autor ocenia biorąc pod uwagę możliwe do uzyskania w badaniach ultradźwiękowych powtarzalności pomiarów czasu przejścia fal zależne od warunków sprzężenia akustycznego i od dokładności pomiaru temperatury badanych elementów. W wyniku porównań autor ocenia dokładność pomiaru czasu potrzebną w tensometrii ultradźwiękowej. W ostatniej części opisana jest aparatura stosowana wspólnie w ultradźwiękowych badaniach naprężeń.

W drugim rozdziale autor przedstawia krótko techniki pomiarowe wykorzystywane we własnych badaniach. Opisuje rezultaty swoich prac nad ograniczeniami wynikającymi z geometrii badanych elementów. Są to wpływy skończonej grubości badanych elementów i bocznej ściany prowadzące do odbić i transformacji fal, a w rezultacie do zmian mierzonego czasu przejścia impulsów fal.

Rozdział trzeci opisuje przetworniki wykorzystywane do wzbudzania i odbioru fal oraz głowice ultradźwiękowe i ich zestawy stosowane w badaniach naprężeń. Główną część rozdziału zajmuje opis oryginalnych osiągnięć autora w opracowaniu nowych głowic i ich układów ze szczególnym uwzględnieniem eliminacji wpływu nierówności powierzchni badanych elementów na wyniki pomiarów. Przedstawiona jest historia rozwoju głowic budowanych w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT. Szczegółowo opisany jest rozwój konstrukcji głowic normalnych na fale poprzeczne, stosowanych w pomiarach dwójrotności akustycznej, oraz układów głowic na fale podpowierzchniowe. Autor przedstawia opracowane i wykonane przez siebie układy głowic na podpowierzchniowe fale podłużne, podpowierzchniowe fale poprzeczne typu SV i typu SH przeznaczone do badań laboratoryjnych oraz do określonych zastosowań przemysłowych. Pokazany jest postęp w eliminacji niekorzystnego wpływu chropowatości powierzchni badanego elementu i związanych z nim wahań grubości warstw sprzęgających na mierzone czasy przejścia impulsów w badanym materiale. Opisana jest budowa układów głowic wykorzystujących efekt "lustra" i ich działanie redukujące wpływ chropowatości powierzchni. Przedstawiony jest wpływ

temperatury na mierzone czasy przejścia impulsów fal i przytoczone są wyniki badania poprawek temperaturowych dla różnego typu układów głowic.

W rozdziale tym opisany jest również opracowany przez autora układ głowic wykorzystujący fale odbite od dna płyty oraz układy głowic na fale powierzchniowe i poprzeczne fale podpowierzchniowe pracujące bez konieczności stosowania cieczowego sprzężenia akustycznego. W końcowej części rozdziału przedstawione są wykonane przez autora pomiary czasów przejścia fal nadawanych i odbieranych głowicami z przetwornikami elektromagnetoakustycznymi (EMAT) i porównanie wyników z rezultatami uzyskiwanymi przy zastosowaniu przetworników piezoelektrycznych.

Rozdział czwarty przedstawia wyniki przeprowadzonych przez autora badań anizotropii i własności elastoakustycznych stali. Opisane są rezultaty pomiarów kierunkowych zależności prędkości propagacji fal w próbkach wykonanych ze stali o różnej teksturze.

W rozdziale piątym autor opisuje praktyczne zastosowania opracowanej aparatury i zbudowanych przez siebie układów głowic. Są to wyniki pomiarów prowadzonych na rzeczywistych elementach konstrukcji stalowych. We wstępie do rozdziału opisane są inne techniki wykorzystywane do badania naprężeń w tych elementach i wyniki obcych badań prowadzonych metodą ultradźwiękową. Na tle znanych wyników autor przedstawia rezultaty swoich badań naprężeń własnych w szynach kolejowych, naprężeń obwodowych w kolejowych kołach monoblokowych oraz naprężeń termicznych w szynach toru ciągle spawanego. Opisane wyniki uzyskane zostały w warunkach przemysłowych, w czasie badań prowadzonych w różnych hutach produkujących szyny kolejowe i u różnych użytkowników i producentów kół kolejowych. Badania naprężeń termicznych w szynach prowadzone były na torach kolejowych. Pomiary te wykonane mogły być jedynie dzięki wykorzystaniu w nich przenośnej aparatury zbudowanej w zespole autora i specjalnych zestawów głowic ultradźwiękowych. W rozdziale przedstawione są też, z odpowiednim zaznaczeniem, rezultaty pomiarów wykonanych przez innych badaczy aparaturą powstałą w IPPT PAN.

W dalszej części opisane są badania naprężeń w innych elementach. W pomiarach tych, prowadzonych przez współpracowników autora, wykorzystane zostały opracowane przez autora zestawy głowic ultradźwiękowych. Zastosowania te pokazują, że w pewnych warunkach technika ultradźwiękowa jest obecnie praktycznie jedynym sposobem mogącym dostarczyć informacji o wartościach naprężeń w elemencie konstrukcji. Na zakończenie rozdziału autor opisuje nieudane próby zastosowania tensometrii ultradźwiękowej z wyjaśnieniem przyczyn, dlaczego technika ta w danym przypadku nie mogła dostarczyć poprawnych wyników.

We wnioskach autor podsumowuje zebrane doświadczenia w zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej. Stwierdza, że technika ta jest metodą mogącą w wielu dziedzinach konkurować z innymi, znanymi metodami pomiarowymi. Dzięki wykorzystaniu w wykonanych przez autora pomiarach fal rozchodzących się jako fale objętościowe i jako fale podpowierzchniowe możliwe okazało się wyznaczenie wartości naprężenia uśrednionego na grubości elementu i naprężeń działających w powierzchniowych warstwach elementu. Na tej podstawie możliwa stała się ocena przybliżonego rozkładu naprężeń w przekroju elementu czyli uzyskanie pełniejszej informacji o stanie naprężeń niż przy wykorzystaniu powszechnie stosowanych tensometrów oporowych.

Opracowane przez autora układy głowic redukujące niekorzystny wpływ sprzężenia akustycznego na wyniki pomiarów czasu przejścia impulsu fal umożliwiły zastosowanie tensometrii ultradźwiękowej w warunkach przemysłowych, bez czasochłonnego przygotowywania powierzchni badanego elementu przed pomiarem. Poza nieniszczącym

charakterem właśnie szybkość badania techniką ultradźwiękową jest w wielu przypadkach cechą wyróżniającą tę metodą pomiarową.

Spis literatury obejmuje 222 pozycje. Są to głównie prace poświęcone badaniom nad zjawiskiem elastoakustycznym w metalach, prace opisujące budowę wykorzystywanych w pomiarach głowic ultradźwiękowych i różne zastosowania tensometrii ultradźwiękowej. W spisie znajduje się 16 prac, których piszący jest autorem lub współautorem. Budowę głowic ultradźwiękowych opisuje 5 z tych prac, a w 14 przedstawione są wyniki badań przeprowadzonych tymi głowicami. Dwa przytoczone patenty autora i jeden, którego piszący jest współautorem, to wynalazki związane z konstrukcją zestawów głowic ultradźwiękowych.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	8
1.1. Potrzeba pomiarów naprężeń	8
1.2. Sposoby wyznaczania wartości naprężeń i metody stosowane w warunkach przemysłowych	10
1.3. Stan wiedzy i techniki w dziedzinie ultradźwiękowych badań naprężeń	15
1.3.1. Typy fal stosowanych w tensometrii ultradźwiękowej	15
1.3.2. Współczynniki elastoakustyczne	18
1.3.3. Wpływ temperatury na prędkość propagacji fal ultradźwiękowych i wartości współczynników elastoakustycznych	26
1.3.4. Sposoby eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej na wyniki badania naprężenia	29
1.3.5. Sposoby precyzyjnych pomiarów czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych	36
1.3.6. Aparatura współcześnie wykorzystywana w tensometrii ultradźwiękowej	38
1.3.7. Podsumowanie	41
2. Zasady i ograniczenia w zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej	43
2.1. Zasady pomiarów	43
2.2. Ograniczenia wynikające z anizotropii teksturalnej	46
2.3. Ograniczenia wynikające z geometrii badanych elementów	47
2.3.1. Ograniczenia wynikające z odbić i transformacji fal	49
2.3.2. Wpływ bocznej ściany przy pomiarach prowadzonych głowicami normalnymi	51
3. Głowice ultradźwiękowe i ich układy	57
3.1. Przetworniki ultradźwiękowe stosowane w tensometrii	57
3.2. Konstrukcje nowych głowic, układów głowic i badanie ich własności	59
3.2.1. Głowice normalne	59
3.2.2. Głowice na fale podpowierzchniowe	65
3.2.2.1. Układy głowic na fale podpowierzchniowe	72
3.2.2.2. Propozycja, badania i wykorzystanie głowic typu "lustro"	77
3.2.2.3. Poprawki temperaturowe dla głowic na fale podpowierzchniowe	83
3.2.2.4. Głowice wykorzystujące fale odbite i transformowane	89
3.2.2.5. Głowice na podpowierzchniowe fale SH	90
3.2.3. Głowice na fale powierzchniowe	92
3.3. Badania głowic elektromagneto-akustycznych	94
3.3.1. Budowa głowic elektromagneto-akustycznych	94
3.3.2. Wyniki badań powtarzalności pomiarów czasów przejścia głowicami EMAT	96
3.3.3. Wnioski dotyczące zastosowań głowic typu EMAT do ultradźwiękowych badań naprężeń	103

4. Badania anizotropii i własności elastoakustycznych stali.....	105
4.1. Pomiary czasów przejścia fal w ośrodkach z anizotropią teksturalną i naprężeniową.....	105
4.1.1. Badania dwójłomności akustycznej.....	105
4.1.2. Pomiary czasów przejścia fal podpowierzchniowych.....	113
4.2. Wyznaczanie współczynników elastoakustycznych.....	118
5. Zastosowania opracowanej aparatury.....	125
5.1. Wyznaczanie wartości naprężeń własnych w szynach kolejowych.....	125
5.1.1. Wprowadzenie.....	125
5.1.2. Wyniki badania naprężeń własnych w szynach po prostowaniu.....	133
5.2. Badania naprężeń w szynach w torze ciągle spawanym.....	148
5.2.1. Wprowadzenie.....	148
5.2.2. Badania laboratoryjne.....	153
5.2.3. Badania sił podłużnych w szynach toru nowego.....	157
5.2.4. Badania dobowych i długookresowych zmian sił w szynach.....	159
5.2.5. Badania zmian sił podłużnych w czasie prac torowych.....	163
5.3. Wyznaczanie wartości naprężeń własnych w kołach kolejowych.....	166
5.3.1. Wprowadzenie.....	166
5.3.2. Badania stalowych kół kutych.....	170
5.3.3. Badania staliwnych kół odlewanych.....	182
5.3.3.1. Badania kół nagrzewanych indukcyjnie.....	184
5.3.3.2. Badania kół hamowanych w hamowni.....	194
5.4. Inne zastosowania.....	200
5.4.1. Badania zmian naprężeń w kolumnach prasy hydraulicznej.....	201
5.4.2. Badania rozkładów naprężeń własnych w wałach okrętowych.....	207
5.5. Nieudane próby zastosowań.....	207
5.6. Ocena dokładności wyznaczania naprężeń metodą ultradźwiękową.....	208
6. Wnioski.....	210
7. Literatura.....	216

1. WSTĘP

1.1. POTRZEBA POMIARÓW NAPRĘŻEŃ

Świadomość skutków jakie wywołują naprężenia w materiałach konstrukcyjnych istniała już od bardzo dawna. Wiadomo było, że obciążenie materiału ponad miarę spowodować może jego zniszczenie i w konsekwencji katastrofę. Przez setki lub tysiące lat jedyną pomocą dla budowniczych była intuicja. Dopiero opracowana w XVII wieku teoria Hooke'a pozwoliła na powiązanie naprężeń z odkształceniami. Te ostatnie mogły być mierzone i właśnie na pomiarach odkształceń wywołanych obciążeniami opartych jest wiele metod oceny naprężeń.

W XX wieku rozwój metalurgii doprowadził do coraz szerszego stosowania stali wysokowytrzymałych, o wysokich granicach sprężystości. W materiałach takich, podczas procesu technologicznego powstawać mogą silne naprężenia własne. Są to naprężenia występujące w elementach, na które nie działają siły zewnętrzne i w których nie występują gradienty temperatury. Naprężenia własne, w zależności od obszaru działania, dzieli się na naprężenia pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju. Obejmują one odpowiednio obszary wielu milimetrów czyli wielu ziaren metalu, obszary pojedynczych ziaren i obszary mierzone w Ångstrémach, odpowiadające komórkom elementarnym sieci krystalicznej metalu. Z punktu widzenia konstrukcji najważniejsze są naprężenia pierwszego rodzaju, zwane też makronaprężeniami, powstające w wyniku niejednorodnych przemian strukturalnych występujących w materiale lub będących rezultatem plastycznych odkształceń zachodzących w części objętości materiału. Obecnie coraz częściej uwzględnia się ich wpływ na własności eksploatacyjne konstrukcji. W jednych przypadkach naprężenia takie powodują wzrost zdolności przenoszenia obciążeń (np. podniesienie wytrzymałości zmęczeniowej przez wprowadzenie ściskających naprężeń w powierzchniowej warstwie materiału w wyniku obróbki cieplnej lub plastycznej), w innych - obniżają własności eksploatacyjne (np. spadek wytrzymałości konstrukcji spawanych wywołany wprowadzeniem do układu niekontrolowanych naprężeń montażowych).

W ciągu ostatnich lat nastąpił postęp w technikach wykrywania i oceny wielkości wad materiałowych powstających w procesie produkcyjnym lub w czasie eksploatacji. Jednoczesne osiągnięcia mechaniki pękania umożliwiły obliczanie jakim naprężeniem może być bezpiecznie poddany materiał, w którym występują wady (np. pęknięcia) o określonej wielkości. Tym bardziej potrzebne okazały się metody oceny wartości naprężeń własnych, które w czasie pracy konstrukcji sumują się z naprężeniami roboczymi jakim jest ona poddawana. Przykładem elementu, do oceny którego stosowane są jednocześnie mechanika pękania, defektoskopia i badania naprężeń własnych są koła kolejowe. Znajomość obciążeń jakim poddawane są koła, współczynników odporności na pękanie materiałów, z których są wykonane i minimalnej wielkości wykrywalnej w kołach wady pozwoliły na określenie maksymalnych wartości naprężeń własnych, przy których eksploatacja koła jest jeszcze bezpieczna. Powstanie nieniszczących metod wyznaczania wartości naprężeń własnych pozwoliło na eliminowanie z eksploatacji kół zagrażających bezpieczeństwu ruchu kolejowego.

Zastosowania technik badania naprężeń własnych mogą prowadzić do bardziej precyzyjnych obliczeń wytrzymałości i umożliwić obniżenie masy konstrukcji. Przykładem elementów, których ciężary mają niebagatelne znaczenie ekonomiczne są dysze trzech silników rakietowych wahadłowca kosmicznego. Dzwony dysz wykonane są z wysokowytrzymałej, żaroodpornej stali i każda z nich waży kilkaset kilogramów. Obliczenia wytrzymałościowe dysz przeprowadzone są z uwzględnieniem istniejących w nich, i znanych jedynie w przybliżeniu, naprężeń własnych. Obniżenie masy dyszy, możliwe przy dokładnej znajomości

wartości naprężeń własnych powstających w procesie technologicznym, jedynie o 1% mogły by doprowadzić do zmniejszenia ich wagi o wiele kilogramów i zwiększenia ładunku użytkowego, co oznacza oszczędności rzędu kilkudziesięciu tysięcy dolarów w każdym locie wahadłowca.

Innym przykładem potencjalnych oszczędności płynących ze znajomości naprężeń własnych są wspomniane już wcześniej monoblokowe koła kolejowe. Na świecie wymienia się rocznie miliony kół. Część z nich wycofywana jest z eksploatacji z powodu zużycia lub wykrytych w nich uszkodzeń, a część z powodu podejrzenia o niebezpieczne naprężenia własne. Obecnie wiadomo, dzięki pomiarom niszcącym i ultradźwiękowym, że znaczna część wycofanych kół została złomowana niepotrzebnie. Przy cenie jednego koła wynoszącej około 1000 dolarów, prawidłowa ocena naprężeń własnych w firmie kolejowej eksploatującej tysiące wagonów może być równoznaczna oszczędnościom rzędu setek tysięcy lub milionów dolarów rocznie.

Od czasu wprowadzenia spawania jako sposobu łączenia szyn w torze, kolejnictwo boryka się z nowym problemem - naprężeniami termicznymi w szynach w torze ciągle spawanym. W czasie upałów silne naprężenia ściskające doprowadzić mogą do wybożenia toru i katastrofy. Według statystyk Federalnej Administracji Kolei USA w samym tylko roku 1980 w USA wystąpiły 174 wykolejenia spowodowane wybożeniem, a wynikiem z nich straty oszacowano na ponad 14 mln dolarów [1]. Istnieje więc pilna potrzeba opracowania szybkiej, nieniszczącej kontroli wartości tych naprężeń pozwalającej na zapobieganie wykolejeniom.

Bardzo ważną okazuje się znajomość naprężeń własnych w częściach maszyn i ich wpływ na niezawodność bardzo złożonych i drogich konstrukcji, w których awaria jednej części pociąga za sobą unieruchomienie całego mechanizmu. Częścią taką jest na przykład wał śrubowy statku. Odształcenie wału prowadzi do konieczności dokowania statku, wycinania w jego burcie otworu i wymiany wału. Koszty takiej operacji w przypadku dużej, współczesnej jednostki liczone są w setkach tysięcy dolarów. Jedną z przyczyn takich właśnie awarii są nierównomierne rozkłady naprężeń własnych w wałach. Długotrwałe, wielomiesięczne wibracje jakim poddawany jest wał w czasie eksploatacji prowadzą do relaksacji naprężeń własnych co powoduje jego odształcenie. To pociąga za sobą niezrównoważenie wału, nasilenia się wibracji, awarie łożysk i w konsekwencji unieruchomienie statku.

Zmiany kształtu wynikające z odprężenia w czasie eksploatacji są równie groźne w przypadku rozjazdów kolejowych. Iglice rozjazdów kształtowane są przez zginanie na zimno i występują w nich bardzo wysokie naprężenia własne [2]. Relaksacja tych naprężeń prowadzi do wygięcia iglicy, co może być przyczyną katastrofy.

Przedstawione powyżej przykłady dotyczą części bardzo różnych maszyn. Dysza silnika raketowego to skomplikowana, cienkościenna konstrukcja przemysłu kosmicznego a liczba wykonanych dysz liczona jest jedynie w dziesiątkach. Koło i szyna kolejowa to elementy wytwarzane masowo w wielu hutach na świecie. Liczba kół w jednym tylko pociągu liczona może być w setkach lub nawet tysiącach, a szyny leżące w torach to setki milionów ton stali (masa szyn w jednym tylko kilometrze toru to więcej niż 100 ton). Wał okrętowy jest produkowanym jednostkowo elementem o ogromnych wymiarach i masie. Przytoczone, możliwe do osiągnięcia oszczędności obrazują jak ważne może być praktyczne zastosowanie nieniszczących pomiarów naprężeń w dziedzinach tak różnych jak budowa pojazdu kosmicznego i koleje żelazne oraz w elementach tak odmiennych jak cienkościenna dysza silnika raketowego czy masywny wał okrętowy.

W praktyce przemysłowych badań naprężeń często bardziej istotna jest szybkość uzyskania wyniku niż dokładność z jaką naprężenia są mierzone. Przykładem są szyny kolejowe, dla których ostatnią operacją w procesie technologicznym jest prostowanie w prostownicy

rolkowej. Ta właśnie operacja, polegające na plastycznym zginaniu szyny z coraz to mniejszą amplitudą, wprowadza silne naprężenia własne do materiału. Ustalono dopuszczalne wartości naprężeń, a ich przekroczenie powoduje konieczność złomowania szyny. Dlatego też producenci szyn potrzebują metody nie tyle dokładnej co szybkiej, umożliwiającej kontrolę naprężeń natychmiast po opuszczeniu prostownicy przez szynę. Szybka informacja o nieprawidłowym działaniu prostownicy pozwala na zatrzymanie produkcji i ograniczenie liczby braków. Takie badania naprężeń są też pomocne w czasie regulacji prostownicy. Możliwe do osiągnięcia oszczędności wynikające ze skrócenia czasu operacji i zmniejszenia liczby wadliwych szyn są zazwyczaj wyższe niż cena bardzo nawet drogiej aparatury do nieniszczących pomiarów naprężeń.

Nieprzypadkowo wszystkie opisane wyżej jako przykłady elementy wykonane są ze stali. Jest to obecnie materiał najpowszechniej stosowany w technice. Pojawiają się potrzeby oceny naprężeń własnych i w innych materiałach. Przykładem jest hartowane szkło wykorzystywane coraz częściej jako materiał budowlany przenoszący obciążenia. Innym przykładem są różnego rodzaju kompozyty. Już dziś prowadzone są próby oceny naprężeń własnych w tworzywach sztucznych.

Badania naprężeń, szczególnie w częściach maszyn wytwarzanych w małych ilościach, muszą być badaniami nieniszczącymi. Jednocześnie tylko niektóre z elementów wymienionych w przykładach, jak dysze silników, można badać w laboratoriach. Laboratoryjne sposoby wyznaczania wartości naprężeń na przykład w szynach kolejowych nie są możliwe ze względu na ich wymiary i ciężar. Aby więc metody oceny naprężeń w szynach, kołach czy innych wyrobach mogły znaleźć praktyczne zastosowanie muszą być nie tylko metodami nieniszczącymi. Pomiary muszą być również wykonywane przenośnymi aparatami ponieważ trudno sobie wyobrazić przewożenie 50-tonowego wału do laboratorium jedynie w celu wykonania pomiarów. Metody badania muszą też umożliwiać prowadzenie pomiarów w warunkach przemysłowych gdzie staranne przygotowanie powierzchni elementu do pomiarów jest często niewykonalne. Aparatura powstająca w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT PAN budowana była pod kątem spełnienia tych wymagań.

Zebrane w ciągu kilku lat doświadczenia i próby zastosowania tensometrii ultradźwiękowej pokazały, że dopiero udane wdrożenie techniki w warunkach przemysłowych i uzyskanie akceptacji tej techniki przez reprezentantów przemysłu, organizacji nadzoru technicznego czy towarzystw ubezpieczeniowych daje szansę na wyjście z nowymi metodami pomiarowymi i aparatami na rynki światowe. Innym niezbędnym do osiągnięcia powodzenia warunkiem jest budowa aparatury rozwiązującej konkretne problemy przemysłu.

1.2. SPOSOBY WYZNACZANIA WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ I METODY STOSOWANE W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

W dalszej części tekstu autor skrótowo nazywa sposoby wyznaczania wartości naprężeń na podstawie pomiarów wielkości fizycznych „pomiarami naprężeń”. Przykładowo pod określeniem ultradźwiękowy pomiar naprężenia należy rozumieć wyznaczenie wartości naprężenia na drodze pomiarów czasów przejścia fal ultradźwiękowych i temperatury a pomiar naprężenia metodą tensometryczną oznacza wyznaczenie wartości naprężenia na podstawie zmierzonej przy pomocy mostka tensometrycznego zmiany oporności tensometru wywołanej odkształceniem ośrodka.

W stosowanych obecnie metodach pomiarów naprężeń wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne. Metody pomiarowe różnią się osiąganymi dokładnościami, czasochłonnością i możliwościami zastosowań. Z punktu widzenia możliwości pomiarowych metody podzielić można na dwie grupy:

1. stosowane w pomiarach zmian naprężeń,
2. stosowane w pomiarach bezwzględnych wartości naprężeń (na przykład naprężeń własnych).

Wszystkie metody zdolne od określania bezwzględnych wartości naprężeń mogą być również stosowane do pomiarów ich zmian.

Z punktu widzenia wpływu na własności eksploatacyjne badanego obiektu techniki pomiarów naprężeń dzieli się na niszczące i nieniszczące. Pierwsze znajdują zastosowanie w badaniach elementów wytwarzanych masowo, gdy zniszczenie jednego z nich może być zaakceptowane z ekonomicznemu punktu widzenia. W przypadkach elementów drogich lub wytwarzanych jednostkowo stosowana metoda musi być metodą nieniszczącą.

Pierwszym, jak się uważa, akustycznym i nieniszczącym sposobem oceny naprężeń w konstrukcjach była ocena dźwięku jaki wydaje uderzona drewnianym młotem kamienna kolumna gotyckiej katedry [3]. Badania takie stosowano w celu sprawdzenia czy wszystkie z licznych kolumn przenoszą jednakowe obciążenia.

Od wielu lat odkształcenie spowodowane naprężeniami mierzone były ekstensometrami mechanicznymi, a z liniowej zależności odkształcenie-naprężenie obliczana była wartość naprężenia na powierzchni. Obecnie ekstensometry mechaniczne zastąpione zostały tensometrami oporowymi i technika ta jest najpowszechniej stosowaną metodą pomiarową. Uzyskiwany wynik to naprężenie obliczone na podstawie powierzchniowego, uśrednionego na powierzchni tensometru odkształcenia. Przy pomiarach zmian naprężeń jest to technika niszcząca natomiast w pomiarach naprężeń własnych konieczne jest zazwyczaj zniszczenie (pocięcie) elementu w celu uwolnienia naprężeń własnych i pomiaru wywołanych tym odkształceń. Zastosowanie tensometrów odpornych na wysokie temperatury pozwala obecnie na termiczne odprężenie badanego elementu.

W roku 1934 zaproponowana została metoda badania naprężeń własnych w wierzchniej warstwie materiału polegająca na pomiarze odkształceń wokół płytkiego otworka w czasie wiercenia tego otworka [4]. Ten sposób badania uważa się na quasi niszczący ponieważ śladem po pomiarze jest jedynie mały i płytki otworek na powierzchni, który w przypadku masywnych konstrukcji może w niczym nie zmieniać własności eksploatacyjnych elementu. Technika ta wymaga stosowania specjalnego sprzętu do wiercenia oraz optycznej aparatury do prawidłowego, centrycznego ustawienia narzędzia względem naklejonej na powierzchni rozetki tensometrycznej.

Zasady pomiarów tensometrycznych, metody mocowania tensometrów do powierzchni i sposoby obliczania wartości naprężeń w prostych i złożonych stanach naprężeń oraz budowa mostków tensometrycznych opisane są szczegółowo w pracy [5]. Metoda tensometryczna pozwala na bardzo dokładne pomiary odkształcenia i na ich podstawie obliczenia wartości i kierunków naprężeń głównych na powierzchni elementu. Dokładność wskazań, szczególnie długookresowa, związana jest głównie ze stabilnością połączenia czujnika z powierzchnią badanego elementu. Uznaje się, że współczesne tensometry i mostki tensometryczne, pod warunkiem dokładnej znajomości stałej Younga materiału, zapewniają dokładności pomiarowe do kilku megapaskali.

Tensometria oporowa umożliwia lokalne pomiary odkształceń powierzchni a uzyskany wynik mówi jedynie o zmianach zachodzących pod naklejonym na powierzchnię czujnikiem. Sposobem pozwalającym na badanie odkształceń na większym obszarze jest technika Moiré.

Klasyczna odmiana tej techniki polega na naniesieniu na badaną powierzchnię powłoki z precyzyjną siatką linii i na obserwowaniu odkształceń tej siatki spowodowanych przyłożeniem obciążenia lub uwolnieniem naprężeń własnych. Opracowanie siatek odpornych na wysokie temperatury pozwoliło na termiczne odprężanie badanych elementów. Najnowszą odmianą techniki Moiré jest wykorzystanie interferometrii do badania odkształceń a sposób badania tą techniką opisany jest w [6]. Metoda ta pozwala na badania odkształceń o wielkościach ułamka mikrometra. W odróżnieniu od tensometrii ultradźwiękowej może być stosowana jedynie na powierzchniach płaskich ale obszar badany obejmować może kilkadziesiąt milimetrów kwadratowych. Technika Moiré pozwala na wykrywanie obszarów odkształconych plastycznie.

Inna grupa metod opiera się na pomiarach odkształceń w mikroskali - mierzone są średnie odległości między płaszczyznami krystalograficznymi. Technika rentgenowska, oparta na dyfrakcji promieni X na płaszczyznach atomowych, pozwala na pomiary tych odległości na samej powierzchni materiału i, podobnie jak technika tensometrii oporowej, pozwala na obliczenie jedynie wartości naprężeń powierzchniowych [7]. Budowane są obecnie przenośne aparaty umożliwiające prowadzenie badań metodą dyfrakcji promieni X w warunkach polowych [8]. Mankamentami techniki rentgenowskiej są czasochłonność pomiaru, konieczność starannego przygotowania powierzchni materiału przed pomiarem oraz konieczność zabezpieczenia obsługi przez jonizującym promieniowaniem rentgenowskim. Na przykład w pomiarach opisanych w [9], gdzie powierzchnie badanych elementów mogły być odkształcone plastycznie, konieczne okazało się usunięcie wierzchniej, zdeformowanej warstwy metalu techniką, która sama nie wprowadzała naprężeń. Zastosowano wytrawiania stężonymi kwasami odpowiednich gniazd, na dnie których prowadzone były badania metodą dyfrakcji rentgenowskiej. Sam pomiar naprężenia w jednym punkcie, przy wykorzystaniu nowoczesnej, skomputeryzowanej aparatury zajmował około 15 minut.

Do pomiarów odległości między płaszczyznami krystalograficznymi w głębi materiału wykorzystywana jest dyfrakcja neutronów [10]. Za pomocą tej techniki możliwe jest wyznaczanie składowych tensora naprężenia nawet na głębokości kilku centymetrów pod powierzchnią materiału [11]. Pomiary techniką dyfrakcji neutronów mogą być prowadzone jedynie przy reaktorze jądrowym ponieważ odpowiednie, przenośne źródła neutronów termicznych nie są jeszcze dostępne. Powoduje to, że stosowanie tej metody ograniczone jest jedynie do badania próbek. Autorzy pracy [11] przyznają, że stosowana przez nich technika pomiarowa ze względu na jej ograniczenia znajduje zastosowania jedynie w pracach badawczych. Zarówno badania metodą dyfrakcji promieni X jak i neutronów umożliwiają pomiary bezwzględnych wartości naprężeń i są technikami nieniszczącymi.

Oddzielną grupą technik stosowanych w ocenie naprężeń są metody wykorzystujące zależności różnych własności magnetycznych metali od naprężenia. Opracowane są przyrządy wykorzystujące zależność szumów Barkhausena od naprężenia [12]. Badania nad zastosowaniem tej techniki pomiaru naprężeń własnych prowadzone są również w Polsce [13]. Niedogodnością technik wykorzystujących szumy Barkhausena jest ich wysoka czułość na mikrostrukturę materiału i na nieznaczne nawet zmiany własności magnetycznych. W przypadku pomiarów naprężeń termicznych w szynach kolejowych dodatkowym problemem są zmienne prądy płynące szynami i wytwarzające w nich zmienne pola magnetyczne. Najprawdopodobniej dlatego technika ta nie znalazła do dzisiaj szerszych zastosowań przemysłowych.

Potwierdzeniem tej opinii są wyniki opisane w pracy [14]. Porównuje ona rezultaty pomiarów naprężeń własnych w kołach kolejowych prowadzonych techniką szumów Barkhausena i

metodą niszczącą. Autorzy pracy stwierdzają brak korelacji pomiędzy wynikami uzyskanymi tymi dwoma sposobami. Przyczyny złych rezultatów uzyskanych metodą magnetyczną upatrują we wpływie odkształceń plastycznych powierzchni używanych kół oraz w zmianach struktury materiału kół (proporcji perlit - ferryt). We wnioskach podają, że technika oparta na pomiarze szumów Barkhausena jest nieprzydatna do pomiarów naprężeń w kołach pochodzących od różnych producentów i wykonywanych według różnych technologii.

Badane były zależności przewodności magnetycznej od naprężenia zarówno w ferromagnetykach (stale węglowe) jak i paramagnetykach (stopy niklu, stale nierdzewne). Uzyskano jednoznaczne zależności tego parametru od naprężenia jednocześnie jednak stwierdzono silną jego zależność od takich czynników jak zawartość węgla w stali czy obróbka termiczna jakiej poddano próbkę [15]. W pracy [16] opisane są próby wykorzystania instrumentu MAGNESCOPE opracowanego w Center for NDT, Iowa State University. Przyrząd ten składa się z elektromagnesu służącego do wytwarzania pola magnetycznego, cewki do pomiaru strumienia magnetycznego i sondy Halla do pomiaru natężenia pola magnetycznego. Analizie poddawana jest pętla histerezy magnetycznej zależna od naprężenia w badanym elemencie, a przedmiotem badania były próbki wycięte z szyn kolejowych. We wnioskach z prób zastosowania tej metody do pomiarów naprężeń własnych w szynach kolejowych autorzy podają, że ze względu na wysoką czułość techniki na stan powierzchni szyny, stopień jej pokrycia produktami korozji czy zendrą hutniczą, przydatność metody w warunkach przemysłowych jest wątpliwa.

Oddzielną grupę metod stanowią techniki wykorzystujące zjawiska akustyczne zachodzące w metalach poddanych naprężeniom. Badano wpływ naprężenia na zmiany emisji akustycznej powstającej w czasie magnesowania [17]. Prowadzone były pomiary zależności tłumienia fal ultradźwiękowych od naprężenia [18] oraz temperaturowej zależności prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia [19]. Żadna z tych metod akustycznych nie wyszła jednak poza laboratorium. Wynika to z trudności jakie stwarzają dokładne pomiary tłumienia fal w metalach czy badania temperaturowej zależności prędkości. Pomiar tłumienia fal ultradźwiękowych wymaga staranie obrabianej próbki i najczęściej wykonywany musi być metodą zanurzeniową. Do pomiaru temperaturowej zależności prędkości konieczne jest ściśle kontrolowane nagrzewanie lub chłodzenie badanego elementu. Z przyczyn technicznych sposoby te nie mogą być stosowane w warunkach przemysłowych.

Innym akustycznym sposobem badania naprężeń jest wykorzystanie efektu elastoakustycznego czyli zależności prędkości propagacji fali ultradźwiękowej od naprężenia. Spośród technik akustycznych jest to metoda najstarsza i jednocześnie najprostsza. Wartość naprężenia obliczana jest na podstawie stosunkowo łatwej do zmierzenia prędkości propagacji fal ultradźwiękowych lub czasu przejścia impulsu fali na określonej drodze.

Dokładności z jakimi wyznaczane są wartości naprężeń różnymi technikami są trudne do porównania. Mierzone są różne wielkości fizyczne i dopiero na podstawie wyników ich pomiarów, wykorzystując informacje o innych parametrach badanego materiału oraz różne modele obliczeniowe, obliczana jest wartość naprężenia. Przykładowo, w metodzie dyfrakcji promieni X wielkością mierzoną jest kąt, w metodzie tensometrycznej - opór elektryczny a w metodzie akustycznej opartej na wykorzystaniu efektu elastoakustycznego - czas i temperatura. Różne metody pomiarowe zbierają informacje z różnych obszarów materiału. Metoda dyfrakcji promieni X - z objętości o powierzchni ograniczonej do pojedynczych milimetrów kwadratowych i grubości równej kilku warstwom atomowym, niektóre metody magnetyczne i akustyczne - z objętości liczonej w dziesiątkach centymetrów sześciennych.

Przy zastosowaniu pojedynczego tensometru w badaniu próbki poddanej jednoosiowemu odkształceniu, do obliczenia wartości naprężenia poza zmianą oporności elektrycznej tensometru, konieczna jest znajomość modułu Younga. Przy ocenie wartości naprężeń własnych techniką tensometryczną w przypadku elementu w trójosiowym stanie naprężeń konieczne staje się uwzględnienie efektu Poissona. Dodatkowo, cięcie elementu wprowadza nowe naprężenia własne, których wartości są czasami oceniane a ich wpływ na wynik końcowy jest uwzględniany przez wprowadzenie dodatkowej poprawki.

Wiadomo, że w przypadku techniki tensometrycznej wskazania zależą od warunków w jakich czujnik został naklejony na powierzchnię czy staranności z jaką przygotowana została powierzchnia elementu. Pokazuje to, że dokładności pomiarowe nawet tej samej techniki zależą od sposobu jej zastosowania a ogólne porównanie dokładności wyznaczania wartości naprężenia różnymi technikami jest trudne lub niemożliwe.

Możliwe jest natomiast porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami w czasie badania takich samych obiektów. Porównania takie autor przedstawia w rozdziale 5.

Surowe wymagania stawiane są metodom pomiarowym w badaniach naprężeń prowadzonych w warunkach przemysłowych gdzie badanym obiektem jest konkretny wyrób a nie specjalnie przygotowana do badań próbka. Metoda stosowana tam powinna być przede wszystkim metodą nieniszczącą. Ze względu na ograniczone możliwości przemieszczania wyrobów stosowana aparatura powinna być łatwo przenośna i zasilana bateryjnie. Nie może też stwarzać zagrożenia dla ludzi i powinna być łatwa w obsłudze. Czas przeznaczony na badania w zakładzie przemysłowym jest zazwyczaj ograniczony. Pomiaru muszą więc być wykonywane stosunkowo szybko tak aby nie zakłócały cyklu produkcyjnego. Pomiaru prowadzone są w terenie bądź w hali. Oznacza to, że metoda musi pozwalać na prowadzenie pomiarów w szerokim zakresie temperatur lub w warunkach silnego zapylenia, wibracji, w pobliżu pracujących silników elektrycznych czy na przykład silnych elektromagnesów stosowanych w hutach do transportu. Wszystkie te wymagania eliminują wiele istniejących technik pomiarowych, które choć mogą dostarczyć pełnych informacji o trójosiowym stanie naprężeń to nie mogą być wykorzystane w specyficznych warunkach hali produkcyjnej. Dlatego praktyczne zastosowania przemysłowe znajdują tylko nieliczne, proste metody. Najbardziej popularną z nich jest tensometria oporowa stosowana w nieniszczących pomiarach przyrostów naprężeń i niszczących pomiarach bezwzględnych wartości naprężeń, stosowana powszechnie w badaniach konstrukcji poddawanych obciążeniami (próby mostów, zbiorników ciśnieniowych).

W mniejszym zakresie, i jedynie w przypadku badań elementów produkowanych seryjnie i charakteryzujących się powtarzalną strukturą i własnościami magnetycznymi, wykorzystywana jest metoda szumów Barkhausena. Cechą tej techniki jest jej szybkość oraz małe wymiary aparatury.

Brak jest natomiast metody, która spełniając specyficzne wymagania przemysłowe byłaby pozbawiona wad metod obecnie wykorzystywanych i byłaby w stanie dostarczać wiarygodnych informacji o stanie naprężeń. Nowe możliwości pomiarowe stwarza wspomniana wcześniej technika ultradźwiękowa wykorzystująca zjawisko elastoakustyczne stwarza. Właśnie w zastosowaniach przemysłowych wydaje się ona być pozbawiona niektórych wad przynależnych technikom magnetycznym i metodzie tensometrycznej. Rozwojem tej metody pomiarowej i jej zastosowaniami zajmował się autor. W dalszej części pracy określenie tensometria ultradźwiękowa czy ultradźwiękowe pomiary naprężeń oznaczają badania ultradźwiękowe, w których do wyznaczania wartości naprężenia pomiary wykorzystane jest zjawisko elastoakustyczne.

1.3. STAN WIEDZY I TECHNIKI W DZIEDZINIE ULTRADŹWIĘKOWYCH BADAŃ NAPRĘŻEŃ

W rozdziale tym przedstawiono ogólny stan wiedzy w dziedzinie ultradźwiękowych pomiarów naprężeń ze zwróceniem uwagi na dwa zagadnienia. Pierwsze to pomiary podstawowej w elastoakustyce zależności prędkości propagacji fal od naprężenia i wyznaczenie na podstawie tych pomiarów wartości współczynników elastoakustycznych. Drugie zagadnienie to główny problem utrudniający szerokie zastosowanie tensometrii ultradźwiękowej - silny wpływ anizotropii teksturalnej materiału na prędkość propagacji fal. Prace przedstawione w rozdziale 1.3.4 to próby znalezienia sposobu eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej na wyniki ultradźwiękowych badań naprężeń.

W pierwszej części krótko opisano typy fal ultradźwiękowych wykorzystywanych w pomiarach naprężeń z podaniem ich zalet i wad z punktu widzenia praktycznych zastosowań. Dalej przedstawiona jest historia pomiarów zależności prędkość - naprężenie i uzyskiwane przez innych badaczy wyniki. W następnej części opisany jest wpływ temperatury na prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w metalach i tworzywach sztucznych stosowanych na kliny załamujące głowic skośnych.

W odróżnieniu od badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach, w pomiarach przemysłowych możliwości wzbudzania i odbioru fal ultradźwiękowych są często ograniczone przez skomplikowany kształt badanego wyrobu czy utrudnienia w dostępie do jego powierzchni. Fale i konstrukcja zastawu głowic ultradźwiękowych stosowane w badaniach zależą też od wymiarów elementu i kierunku działania składowej naprężenia, której wartość ma być wyznaczona. Dlatego też szczegółowy stan wiedzy w dziedzinie konkretnych zastosowań tensometrii ultradźwiękowej przedstawiono na początku rozdziałów 5.1 - 5.3 opisujących wyniki uzyskane przez autora w czasie pomiarów naprężeń w szynach i kołach kolejowych.

1.3.1. Typy fal ultradźwiękowych stosowanych w tensometrii

Cechy jakie powinna posiadać „idealna” dla ultradźwiękowych pomiarów naprężeń fala to:

- duże zmiany prędkości spowodowane naprężeniem (wysoka wartość współczynnika elastoakustycznego opisanego dalej w rozdziale 1.3.2);
- łatwość wzbudzania i odbioru fali w różnych materiałach, różnego typu przetwornikami;
- możliwość pomiaru czasu przejścia impulsu fali na znacznych odległościach pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem czyli niskie osłabienie fali w badanym materiale;
- słaba zależność prędkości propagacji od temperatury;
- słaba kierunkowa zależność prędkości od tekstury w elementach stalowych;
- słaba zależność prędkości i amplitudy fali od stanu powierzchni badanego elementu.

Niestety żadna ze znanych fal ultradźwiękowych nie spełnia wszystkich tych wymagań. Zmiany prędkości propagacji spowodowane naprężeniem są dla wszystkich typów fal bardzo niskie, choć różne. Łatwo jest wzbudzić i obserwować na znacznych, liczonych w metrach, odległościach fale płaskie czy fale Lamba zwane w odróżnieniu od fal objętościowych falami prowadzonymi. Cecha ta łączy się jednak z silną geometryczną dyspersją prędkości, która skutecznie ogranicza ich zastosowania w tensometrii ultradźwiękowej. Również fale powierzchniowe, łatwe do wzbudzania i odbioru różnego typu przetwornikami, mogą się propagować na znacznych dystansach. Dodatkową ich zaletą jest zdolność do rozchodzenia się wzdłuż zakrzywionych powierzchni. Niestety zmiany prędkości spowodowane

naprężeniami dla fali powierzchniowej są minimalne, a dodatkowo prędkość propagacji tej fali zależy od stanu powierzchni materiału i jej zanieczyszczeń.

Fale podłużne.

Objętościowe fale podłużne są falami najczęściej stosowanymi w defektoskopii czy w ultradźwiękowych badaniach medycznych. Również w tensometrii ultradźwiękowej fale te znajdują zastosowanie dzięki najwyższym wartościom współczynników elastoakustycznych. Aby wyznaczyć prędkość propagacji fali, której znajomość jest niezbędna do obliczenia wartości naprężenia, potrzebna jest znajomość czasu przejścia impulsu oraz znajomość "drogi", którą w zmierzonym czasie pokonuje impuls. W pomiarach prowadzonych objętościowymi falami podłużnymi metodą echa, droga ta jest wielokrotnością grubości próbki. W warunkach laboratoryjnych grubość badanej próbki można wyznaczyć z wystarczającą dokładnością. Natomiast w warunkach przemysłowych, dokładne wartości grubości badanych elementów zazwyczaj nie są znane. W sytuacjach gdy element dostępny jest tylko z jednej strony, jak to ma miejsce na przykład w rurociągach, precyzyjny pomiar grubości a więc i "drogi" impulsu wcale nie jest możliwy. Fakt ten praktycznie eliminuje wykorzystanie fal podłużnych rozchodzących się w kierunku grubości w praktycznych zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej, których celem jest wyznaczenie bezwzględnej wartości naprężenia. Wyznaczenie wartości prędkości fali podłużnej jest jednak możliwy na podstawie pomiaru czasu przejścia fali rozchodzącej się równoległe do powierzchni, nazywanej dalej podłużną falą podpowierzchniową. W przypadku fali tego typu "droga" impulsu jest stała, wyznaczona jest przez odległości pomiędzy głowicami i może być określona z wymaganą precyzją. Ta właśnie fala znalazła zastosowania w ultradźwiękowych pomiarach naprężeń. Rozwój technik wzbudzania i odbioru podpowierzchniowych fal podłużnych opisany jest w rozdziale 3.2.2.

Fale poprzeczne.

Najczęściej stosowaną w pomiarach naprężeń głowicą normalną, a więc generującą wiązkę fal w kierunku prostopadłym do powierzchni materiału, jest głowica na fale poprzeczne spolaryzowane równoległe do powierzchni. Stosowana jest ona do pomiarów czasów przejścia fal poprzecznych o dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji (pomiar dwójłomności akustycznej). Dwójłomność obliczana jest jako stosunek różnicy czasów przejścia fal o prostopadłych kierunkach polaryzacji do czasu średniego. Oznacza to, że w odróżnieniu od pomiarów prowadzonych falami podłużnymi, przy pomiarze dwójłomności akustycznej niepotrzebna jest dokładna znajomość grubości mierzonego elementu. Jest to wielką zaletą tej techniki w zastosowaniach praktycznych. Drugą zaletą techniki jest to, że mierzona różnica czasów przejścia jest praktycznie niezależna od temperatury. Można założyć, że temperaturowe współczynniki prędkości dla fal poprzecznych różniących się jedynie kierunkiem polaryzacji są jednakowe i zmiany temperatury czy też gradienty temperatury na drodze fal, nie wpływają na wynik.

Fale poprzeczne wykorzystywane są również jako fale podpowierzchniowe typu SV (spolaryzowane w kierunku prostopadłym do powierzchni) i typu SH (o kierunku polaryzacji równoległym do powierzchni ośrodka). Fale podpowierzchniowe typu SV, podobnie jak podpowierzchniowe fale podłużne, wzbudzone są głowicami skośnymi wyposażonymi w przetworniki na drgania grubościowe. Kąt klina załamującego równy jest drugiemu kątowi krytycznemu dla granicy ośrodków polimetakrylan metylu (PMM), z którego wykonywane są klipy i stal. Razem z poprzeczną falą podpowierzchniową typu SV, wskutek rozbieżności wiązki fal wytwarzanych przez przetwornik głowicy, generowana jest zazwyczaj fala powierzchniowa. Prędkości tych fal różnią się nieznacznie co powoduje, że czasy przejścia fali

podpowierzchniowej typu SV mierzone mogą być w takich odległościach między głowicą nadawczą i odbiorczą, dla których nie występuje już interferencja impulsów fali SV i fali powierzchniowej.

Współczynniki elastoakustyczne fali podpowierzchniowej typu SV są niskie. Jej prędkość jest jednak zależna od tekstury materiału. Dlatego fala ta wykorzystywana jest w tensometrii ultradźwiękowej do obliczania poprawki strukturalnej (opisanej dalej w rozdziale 1.3.4).

Współczynniki elastoakustyczne podpowierzchniowej fali SH dla składowej naprężenia równoległej do kierunku polaryzacji fali są wysokie. Pozwala to na przykład na wykorzystanie takiej fali rozchodzącej się wzdłuż tworzącej rury do badania naprężeń obwodowych.

Fale powierzchniowe

Fala powierzchniowa posiada bardzo niski współczynnik elastoakustyczny, co jest jej wadą w zastosowaniu do tensometrii ultradźwiękowej. Innym mankamentem fali powierzchniowej jest zależność czasu przejścia impulsu tej fali od stanu powierzchni materiału i zanieczyszczeń na tej powierzchni. Wszelkie zabrudzenia, warstwy cieczy pokrywającej powierzchnię materiału, powodują lokalne zmiany prędkości propagacji i tym samym zmiany czasu przejścia fali pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Zaletami tej fali są natomiast łatwość jej wzbudzania i odbioru różnego typu przetwornikami, fakt, że może się ona rozchodzić wzdłuż zakrzywionych powierzchni oraz stosunkowo niska prędkość propagacji. Własności te wykorzystuje się w pomiarach zmian naprężeń. Obserwowane w takich pomiarach zmiany czasów przejścia fali spowodowane są jednak nie efektem elastoakustycznym a odkształceniem materiału i wynikającą z tego zmianą drogi fal pomiędzy przytwierdzonymi na stałe do powierzchni materiału nadajnikiem i odbiornikiem. Układy takich głowic działają jako „ultradźwiękowe ekstensometry”.

Fale Lamba

Fale Lamba, rozchodzące się w ośrodkach ograniczonych dwiema równoległymi płaszczyznami, mogą być generowane i odbierane głowicami skośnymi o odpowiednio dobranych kątach klinów załamujących. W zależności od stosunku długości fali do grubości blachy czy płyty, w której fale się rozchodzą, tworzą one różne mody cechujące się różnymi prędkościami. Cechą fal Lamba jest możliwość pomiaru ich czasu przejścia na długich odcinkach. Ich wadą jest natomiast silna zależność ich prędkości od nawet nieznacznych zmian grubości elementu. Badania nad wykorzystaniem modu zwanego prekursorem, którego prędkość nie zależy od grubości płyty, nie doprowadziły do rozwiązań praktycznych.

Fale prętowe

Podobnie jak dla fal Lamba cechą fal prętowych, rozchodzących się w ośrodkach w formie walca lub graniastopuła o nieskończonej wysokości, jest możliwość dokonania pomiarów ich prędkości na znacznych odległościach. Cecha ta może być wykorzystana w defektoskopii, gdzie średnia prędkość fali w przęcie jest funkcją liczby makroskopowych wad wewnętrznych. Autor wykorzystywał tę zależność do wykrywania rozwarstwień w stalowych prętach o długościach kilku metrów. Ta własność jest jednocześnie wadą w ultradźwiękowych badaniach naprężeń. Prędkość fal prętowych jest czuła nie tylko na wady wewnętrzne ale i na zmiany średnicy pręta wzdłuż którego się one rozchodzą. Dodatkową wadą fal rozchodzących się w prętach o ograniczonych długościach jest zależność czasu przejścia impulsu od długości pręta.

Z całego szeregu typów fal wykorzystywanych w ultradźwiękowych badaniach materiałów, w zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej wykorzystywane są jedynie fale podłużne rozchodzące się wzdłuż powierzchnią materiału jako fale podpowierzchniowe i fale

poprzeczne rozchodzące się zarówno jako podpowierzchniowe jak i jako fale objętościowe. Jedynie w specyficznych zastosowaniach, w pomiarach przyrostów naprężeń, wykorzystywane są fale powierzchniowe.

W laboratoryjnych badaniach naprężeń metodą ultradźwiękową stosowane są również fale podłużne i poprzeczne rozchodzące się pod różnymi kątami względem powierzchni materiału lub względem osi symetrii materiałów anizotropowych. Prowadzenie takich pomiarów możliwe jest jedynie na specjalnie przygotowanych i dokładnie obrabianych próbkach, a same pomiary prowadzone są często metodą zanurzeniową.

Dodatkowym ograniczeniem w praktycznych zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej jest geometria badanego elementu. Podpowierzchniowe fale podłużne można stosować jedynie na płaskich powierzchniach lub wtedy gdy rozchodzą się one wzdłuż prostoliniowych tworzących walca. Podobnie, do pomiaru dwójłomności akustycznej konieczne jest, aby element posiadał dwie płaskie i równoległe względem siebie powierzchnie.

W niektórych przypadkach opisanych w literaturze wybór typu fali podyktowany jest głowicami stosowanymi w danym ośrodku oraz ich możliwościami wzbudzenia i odbioru poszczególnych fal. Na przykład zarówno w Fraunhofer Institut w Saarbrücken i National Institute of Standards and Technology w Boulder, gdzie od lat prowadzone są prace nad ultradźwiękowymi pomiarami naprężeń, nie są stosowane fale podłużne [20,21]. Jest to spowodowane najprawdopodobniej tym, że stosowane w tych laboratoriach przetworniki elektromagneto-akustyczne (EMAT) jeszcze nie nadają się do tego. Wykorzystywane są tam jedynie fale poprzeczne rozchodzące się jako fale objętościowe i jako fale podpowierzchniowe ponieważ głowice EMAT efektywnie nadają i odbierają fale tego właśnie typu.

1.3.2. Współczynniki elastoakustyczne

Liniowa teoria sprężystości pozwala na obliczenie prędkości propagacji fal w nieograniczonym i izotropowym ośrodku na podstawie modułów sprężystości podłużnej i poprzecznej E i G , albo stałych Lamego λ i μ (stałych sprężystości drugiego rzędu), liczby Poissona ν i masy właściwej ośrodka ρ [22]. Prędkości te opisane są wzorami:

$$(1) \quad V_{11} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$(2) \quad V_{12} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

gdzie V_{ij} - prędkość fazowa, indeksy oznaczają kolejno kierunek propagacji fali i kierunek drgań cząsteczek,

ρ - gęstość masy,

E, G - moduły Younga i Kirchhoffa,

μ, λ - stałe Lamego (stałe sprężystości drugiego rzędu),

ν - liczba Poissona.

Wyrażenia te dają opis wystarczający w wielu zastosowaniach techniki ultradźwiękowej jak wykrywanie i lokalizacji wad materiałowych czy pomiary grubości. Nie opisują jednak

zależności prędkości od odkształceń spowodowanych działaniem obciążenia zewnętrznego czy naprężeń własnych.

W roku 1953 Hughes i Kelly wyprowadzili wzory na prędkość propagacji fal sprężystych o małych amplitudach rozchodzących się w ośrodku izotropowym poddanym działaniu naprężenia w zakresie odkształceń sprężystych [23]. Zależności uzyskane przez autorów tej pracy uznawane są za podstawowe dla ultradźwiękowych pomiarów naprężeń.

Wyrażenia na prędkości propagacji fal w ośrodku poddanym odkształceniu mają postać:

$$(3) \quad \rho_0 V_{111}^2 = \lambda + 2\mu - (\sigma / 3K_0) \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]$$

$$(4) \quad \rho_0 V_{112}^2 = \lambda + 2\mu - (\sigma / 3K_0) \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (\lambda + 2\mu + m) - 2l \right]$$

$$(5) \quad \rho_0 V_{131}^2 = \mu - (\sigma / 3K_0) \left(4\lambda + 4\mu + m + \frac{\lambda n}{4\nu} \right)$$

$$(6) \quad \rho_0 V_{133}^2 = \mu - (\sigma / 3K_0) \left(\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{4\nu} \right)$$

$$(7) \quad \rho_0 V_{132}^2 = \mu + (\sigma / 3K_0) \left(2\lambda - m + \frac{n}{2} + \frac{\lambda n}{\nu} \right)$$

gdzie: V_{pk} - prędkość fazowa; indeksy oznaczają kolejno kierunek propagacji fali, kierunek drgań cząsteczek i kierunek działania naprężenia,

$K_0 = \lambda + 2/3\mu$ - moduł sprężystości objętościowej,

ρ_0 - gęstość masy w stanie bez naprężeń,

l, m i n - stałe sprężystości trzeciego rzędu,

σ - naprężenie.

Wyprowadzenie tych zależności, opisujących prędkości fal podłużnych i poprzecznych rozchodzących się w różnych kierunkach względem kierunku naprężenia, jest przedstawione w pracy [24]. Zakładając, że zmiany prędkości wywołane naprężeniem są małe w porównaniu z bezwzględnymi wartościami prędkości w stanie pierwotnym i po przyłożeniu naprężenia można napisać $V + V_0 \cong 2 V_0$ i otrzymać związki między naprężeniem a dającymi się łatwo zmierzyć względnymi zmianami prędkości fali. Dla fal podłużnej i poprzecznej rozchodzących się w kierunku działania naprężenia mają one postać:

$$(8) \quad \left[\frac{V - V_0}{V_0} \right]_{111} = - \frac{\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l}{2(\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)} \sigma_1$$

$$(9) \quad \left[\frac{V - V_0}{V_0} \right]_{131} = - \frac{4\lambda + 4\mu + m + \frac{\lambda n}{4\mu}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \sigma_1$$

Współczynniki proporcjonalności między względnymi zmianami prędkości a naprężeniem jednostkowym nazywane są współczynnikami elastoakustycznymi.

Równania (3) - (7) umożliwiają obliczenie wartości współczynników elastoakustycznych pod warunkiem znajomości dokładnych wartości współczynników sprężystości materiału drugiego (λ , μ) i trzeciego rzędu (l , m , n). Niestety dla materiałów technicznych wartości tych współczynników nie zawsze są znane. Dlatego też konieczne stało się doświadczalne badanie zależności prędkość-naprężenie. Drugim argumentem przemawiającym za eksperymentalnym wyznaczeniem zależności jest to, że wartości współczynników elastoakustycznych nieznacznie zależą od technologii materiału i związanej z nią anizotropii teksturalnej i struktury materiału. Pierwszym eksperymentalnym potwierdzeniem efektu elastoakustycznego było doświadczenie wykonane przez Bensona i Realsona w 1959 roku [25]. Autorzy nie mierzili zmian prędkości propagacji fal, a jedynie zademonstrowali skrócenie płaszczyzny polaryzacji fali poprzecznej rozchodzącej się w ośrodku poddanym naprężeniu.

W miarę rozwoju aparatury umożliwiającej precyzyjne pomiary czasu przejścia pojawiały się prace przedstawiające wyniki pomiarów zależności prędkości propagacji od naprężania, z których obliczyć można współczynniki elastoakustyczne. W zakresie naprężeń sprężystych, w ośrodkach, w których kierunki anizotropii teksturalnej pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych oraz dla fal rozchodzących się i spolaryzowanych w kierunkach osi akustycznych wyznaczonych przez teksturę i naprężenia, obserwowane są liniowe zmiany prędkości propagacji od naprężenia. Te liniowe zmiany opisywane są przez współczynniki elastoakustyczne nazywane czasami stałymi elastoakustycznymi. Wzór na obliczenie wartości współczynnika na podstawie zmierzonych doświadczalnie zmian prędkości propagacji (lub czasu przejścia) impulsów ultradźwiękowych ma postać:

$$(10) \quad \beta_{jk} = \frac{(V - V_0)}{V_0 \sigma_1} = \frac{(t_0 - t)}{t \sigma_1}$$

gdzie: β_{jk} - współczynnik elastoakustyczny; indeksy j, k oznaczają odpowiednio kierunki propagacji fali, polaryzacji fali i działania naprężenia,

V i V_0 - prędkości fazowe odpowiednio w ośrodku naprężonym i bez naprężenia,

t i t_0 - czasy przejścia impulsu odpowiednio w ośrodku naprężonym i bez naprężenia,

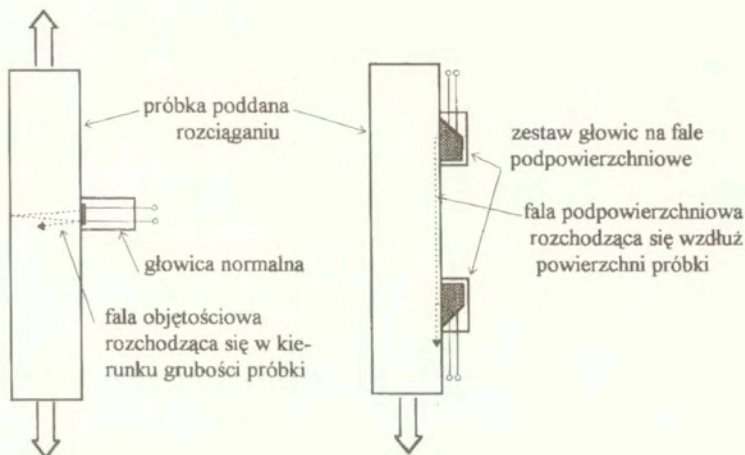
σ_1 - naprężenie.

Wartości współczynników elastoakustycznych zależą od rodzaju materiału i wzajemnych relacji pomiędzy kierunkami propagacji i polaryzacji fali a kierunkiem naprężenia. Z reguły najwyższe wartości współczynników obserwowane są dla fal, w których kierunki drgań cząstek są równoległe do kierunku naprężenia. Na rysunku 1 pokazano schematycznie sposoby pomiaru czasów przejścia fal objętościowych i podpowierzchniowych w próbkach poddanych jednoosiowemu stanowi naprężenia (rozciąganie lub ściskanie w maszynie wytrzymałościowej).

Na podstawie pomiarów prowadzonych falami objętościowymi, rozchodzącymi się w kierunku prostopadłym do kierunku działania naprężenia, obliczane mogą być współczynniki elastoakustyczne β_{ii} , β_{kj} i β_{ki} . Na podstawie wyników pomiarów prowadzonych falami podpowierzchniowymi obliczyć można wartości współczynników β_{iii} , β_{ij} , β_{ik} . Podobnie, z pomiarów czasu przejścia fali powierzchniowej rozchodzącej się w kierunku naprężenia obliczyć można współczynnik β_i . Na odpowiednio szerokich próbkach poddanych rozciąganiu lub ścisłaniu wyznaczone mogą być zależności prędkość-naprężenie dla fal

podpowierzchniowych i powierzchniowych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia. Na podstawie wyników takich pomiarów obliczane są współczynniki β_{ki} , β_{ji} , β_{3i} i β_{3j} .

Mierzone zmiany czasu przejścia fal objętościowych są wywołane efektem elastoakustycznym oraz zmianami drogi impulsu spowodowanymi zmianami grubości próbki w czasie rozciągania. Wiąże to wartość współczynnika elastoakustycznego obliczonego na podstawie takich pomiarów ze stałą Poissona materiału. W przypadku pomiarów falami podpowierzchniowymi, układem głowic zapewniającym stałą długość odcinka pomiarowego (stałe odległości między głowicami), wartość obliczonego współczynnika nie jest zależna od odkształcenia materiału próbki. Tak wyznaczone współczynniki zwykło nazywać się współczynnikami fizycznymi. Zaś współczynniki zależne od odkształcenia współczynnikami technicznymi.



Rys. 1. Schemat pomiaru czasu przejścia fali objętościowej i podpowierzchniowej w próbce poddanej rozciąganiu lub ścisnaniu.

Początkowo w publikacjach opisujących pomiary współczynników elastoakustycznych nadawano tym współczynnikom różne miana, zależne od techniki pomiarowej. Pierwsze opublikowane wyniki pomiarów wartości współczynników β_{221} , β_{211} i β_{231} (współczynniki mierzone dla fal podłużnej i poprzecznych rozchodzących się przez grubość próbki poddanej rozciąganiu) opisano w 1962 roku [26]. Pomiary czasu przejścia dokonano techniką krążącego impulsu ("sing-around"), a wyniki przedstawiono jako zmianę częstotliwości powtarzania układu w funkcji naprężenia [Hz/KSI]. Takie miano współczynników uzależniało ich wartości od zastosowanej techniki pomiarowej (pomiar częstotliwości powtarzania) oraz od grubości próbki i prędkości propagacji fal w badanym materiale. Prawdopodobnie wskutek niedoskonałości stosowanej aparatury autor pracy otrzymał zaskakująco wysoką wartość współczynnika β_{221} wynoszącą ponad 60% wartości β_{211} . Z punktu widzenia przyszłych

zastosowań, bardzo ważną obserwacją jakiej dokonał autor cytowanej pracy, było stwierdzenie nieczułości wartości współczynników elastoakustycznych na takie zmiany składu chemicznego czy tekstury materiału, które powodowały znaczne zmiany prędkości propagacji fal. Pięć lat później, w pracy [27] ten sam autor opisał wykorzystanie zmian prędkości fal poprzecznych opisywanych współczynnikami β_{211} i β_{231} do oceny odkształceń płyt metalowych wykorzystując technikę pomiaru dwójłomności akustycznej.

W 1969 roku ukazała się pierwsza praca opisująca pomiary, między innymi, współczynnika β_{111} (współczynnik fizyczny dla fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku naprężenia) dla stali szynowej [28]. Autorzy pracy uzyskali bardzo dobrą zgodność wartości współczynników obliczonych na podstawie znanych wartości współczynników sprężystości wyższych rzędów i wartości będących wynikiem pomiaru.

Przez następne lata publikowane były głównie wyniki pomiarów współczynników β_{211} i β_{231} wykorzystywanych w pomiarach naprężeń metodą pomiaru dwójłomności akustycznej. Obiektem, w którym technika ta mogła znaleźć zastosowanie były koła kolejowe stosowane na całym świecie. Towarzystwa kolejowe finansowały pomiary co zaowocowało szeregiem publikacji poświęconych tej tematyce. Od 1968 roku, w NASA Marshall Space Flight Center, prowadzono badania nad wykorzystaniem ultradźwiękowej techniki pomiaru naprężeń własnych w metalach [29], a w 1973 ukazała się pierwsza praca opisująca próby zastosowania pomiaru dwójłomności akustycznej we wieńcach kół kolejowych do oceny stanu naprężeń w kołach [30]. Współczynniki elastoakustyczne β_{211} i β_{231} materiału kół badano wykorzystując dwukanałowy oscyloskop i jednoczesną obserwacją sygnałów z próbki obciążonej i nieobciążonej. Stosunkowo krótkie próbki poddawane były ścisnaniu, a wyniki przedstawiono jako zmiany czasu przejścia fali na jednostce długości, wywołane jednostkowym naprężeniem. Mianem w ten sposób wyznaczanych współczynników elastoakustycznych było [ns/inch/KSI]. Tak przedstawiony współczynnik techniczny oddzielał wynik od techniki pomiarowej czy wymiaru próbki. Pomiary wartości współczynników przeprowadzono na próbkach pochodzących z kół odlewanych i kutych. Pomimo prostego układu pomiarowego stosowanego w badaniach, uzyskane przez autorów wyniki są bardzo bliskie wartościom uzyskiwanym współcześnie.

Autorzy pracy [30] również zauważyli, że wartości współczynników β_{211} i β_{231} są praktycznie niezależne od wahań struktury materiału, które zauważalnie wpływały na prędkości propagacji fal poprzecznych. Było to potwierdzenie wniosku wynikającego z pracy [28].

W 1976 opublikowana została pierwsza polska praca przedstawiająca możliwości wykorzystania efektu elastoakustycznego do badania naprężeń [31]. Podano w niej wyniki pomiarów współczynników β_{211} i β_{231} dla stali, zmierzonych metodą interferencyjną.

W 1979 [32] i 1980 [33] ukazały się wyniki pomiarów współczynników elastoakustycznych dla fal powierzchniowych rozchodzących się w żeliwie. Wysokie rozrzuty zmierzonych wartości oraz nieliniowe zależności prędkości propagacji od naprężenia najprawdopodobniej spowodowane były wysoką niejednorodnością materiału jakim jest żeliwo szare i niedoskonałością stosowanej aparatury. W pracy [33], niezgodnie z przewidywaniami teoretycznymi i wynikami innych badaczy, przedstawiono różne wartości współczynnika elastoakustycznego β_{11} dla ścisnania i dla rozciągania.

W 1981 w publikacji [34] potwierdzono ważne z praktycznego punktu widzenia obserwacje z pracy [28] mówiące o stałości wartości współczynników elastoakustycznych niezależnie od wahań składu chemicznego stali. Granice zmian składu wyznaczone były normami technicznymi dla stali jednego gatunku. W pracy tej doniesiono też o braku częstotliwościowej zależności współczynników elastoakustycznych.

Do podobnych wniosków dotyczących braku zależności wartości współczynników elastoakustycznych β_{122} i β_{123} od tekstury doszli w 1983 roku badacze amerykańscy eksperymentujący z blachami stalowymi o różnej grubości, poddanymi różnym odkształceniom plastycznym w czasie produkcji [35].

W rok później obserwacje amerykańskie zostały potwierdzone przez zespół niemiecki prowadzący badania zjawiska elastoakustycznego w stali [20]. Autorzy stwierdzili pomijalną zależność wartości współczynników β_{122} i β_{123} od stopnia odkształcenia plastycznego stali.

W 1984 autorzy japońscy, zajmujący się pomiarami naprężeń w kołach kolejowych, po raz pierwszy przedstawili współczynniki elastoakustyczne β_{211} i β_{231} jako względną zmianę prędkości propagacji fali spowodowaną jednostkowym naprężeniem [MPa^{-1}] i nadali im nazwę "elastoacoustic constant" [36]. Dokładne pomiary czasów przejścia wykonywali przetwornikami piezoelektrycznymi na drgania ścinania naklejanymi na stałe na powierzchnie badanych próbek. Porównali oni również wartości współczynnika obliczonego zgodnie z [23] i zmierzonego, uzyskując różnicę jedynie 10%. Od czasu tej publikacji praktycznie wszyscy badacze zajmujący się ultradźwiękowymi pomiarami naprężeń w kołach kolejowych stosują ten sam sposób przedstawiania wartości współczynników w elastoakustycznych.

W 1987 roku, w pracy [24] przedstawiono po raz pierwszy kompletne wyniki pomiarów wszystkich współczynników elastoakustycznych dla stali. W pracy tej pokazano również jak bardzo różnią się wartości współczynników zmierzonych przez różnych autorów, w różnych laboratoriach i różnymi technikami pomiarowymi. Wyniki badań przeprowadzonych na licznych próbkach o tym samym składzie chemicznym (pochodzących z tego samego wytopu), a różniących się jedynie anizotropią teksturalną (stopniem odkształcenia plastycznego w czasie walcowania) pokazały zakres zmian wartości współczynników elastoakustycznych związanych z wahaniami tekstury stalowych wyrobów walcowanych.

W 1993 autorzy japońscy przedstawili wyniki pomiarów współczynników elastoakustycznych mierzonych metodą rezonansową w cienkich blachach [37]. W pomiarach wykorzystali działające bezkontaktowo przetworniki elektromagneto-akustyczne (EMAT), a wzbudzonymi w blachach falami były fale płytowe. Wartości współczynników elastoakustycznych obliczyli jako względne przyrosty częstotliwości rezonansowych podzielone przez przyrost naprężenia. Uzyskane nową, jak na owe czasy, techniką wartości współczynników elastoakustycznych dla blach aluminiowych nie były jednak potwierdzone przez innych autorów.

Ten sam zespół autorów w rok później w 1994 opublikował wyniki prób zastosowania techniki rezonansowej do pomiarów sił osiowych w szynach kolejowych [38] i podał wartości współczynników β_{211} i β_{231} dla stali szynowej. Uzyskane wyniki wykazywały duży rozrzut spowodowany najprawdopodobniej nie zbadanymi jeszcze wówczas wpływami zmiennych własności magnetycznych stali z jakiej wykonane były próbki szyn, na wyniki pomiarów uzyskiwanych głowicami typu EMAT. Identyczną technikę pomiarową (przetworniki EMAT, technika rezonansowa) i sposób obliczania wartości współczynników elastoakustycznych zastosowali w dwa lata później Amerykanie i opisali swe pomiary w pracy [39].

Na wartości współczynników elastoakustycznych podanych w pracy [21] powołują się autorzy innych, znacznie późniejszych publikacji jak [40] czy [41] rezygnując z kosztownego przygotowywania własnych próbek i pomiarów.

W 1995 roku ukazała się praca [42], w której techniczne współczynniki elastoakustyczne przedstawiono jako bezwymiarowy stosunek względnej zmiany prędkości propagacji fali do wydłużenia. Przedstawiono wyniki pomiarów dla podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych oraz dla fal powierzchniowych. Tak obliczana wartość współczynnika elastoakustycznego zależna jest od modułu Young'a materiału.

Autorzy niemieccy [43], stosujący w pomiarach fale poprzeczne i badający współczynniki β_{122} i β_{21} , stosują odwrotną od powszechnie przyjętej konwencję i mianem obliczanych przez nich współczynników elastoakustycznych jest [MPa].

W 1996 roku opublikowano wyniki badań fizycznych współczynników elastoakustycznych dla fal poprzecznych rozchodzących się w stalach węglowych i niskostopowych stosowanych na szyny kolejowe [44]. Autorzy wykorzystali w pomiarach polski aparat DEBRO-30, a w wyniku badań stwierdzili, że współczynniki elastoakustyczne przybierają tym niższe wartości im wyższy jest udział składników stopowych (chrom, molibden) w stali.

W pracy [45] opisane są wyniki badania współczynników elastoakustycznych β_{11} w stali S355 oraz w spoinie wykonanej z tej stali. Dla materiału rodzimego autorzy uzyskali wynik $\beta_{11} = -1,25 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$, dla strefy wpływu cieplnego $\beta_{11} = -1,125 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$ a dla materiału spoiny wynik $\beta_{11} = -1,00 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$. Oznacza to, że wartości stałej elastoakustycznej w materiale rodzimym (walcowana blacha) i w spoinie (struktura powstała w wyniku krzepnięcia płynnego metalu) różnią się o około 20%.

W 1977 ukazała się praca [46], opisująca zastosowanie fali powierzchniowej do pomiarów spawalniczych naprężeń własnych. Autorzy mierzyli czas przejścia impulsu na odcinku równym 300 mm wykorzystując do pomiaru falę powierzchniową propagującą się w kierunku obwodowym, równoległe do wykonanej na rurze spoiny obwodowej. Naprężenia własne obliczali wykorzystując fizyczny współczynnik β_{12} (obliczana była wartość składowej naprężenia prostopadłej do osi spoiny). Według wiedzy autora współczynnik elastoakustyczny dla takiej fali jest bliski zeru. Analizując uzyskane wyniki autorzy pracy sami zwrócili uwagę na fakt, że obserwowane zmiany czasu przejścia spowodowane mogły być nie tyle naprężeniami spawalniczymi co zmianą długości odcinka pomiarowego wywołanego zmianą średnicy rury w pobliżu spoiny.

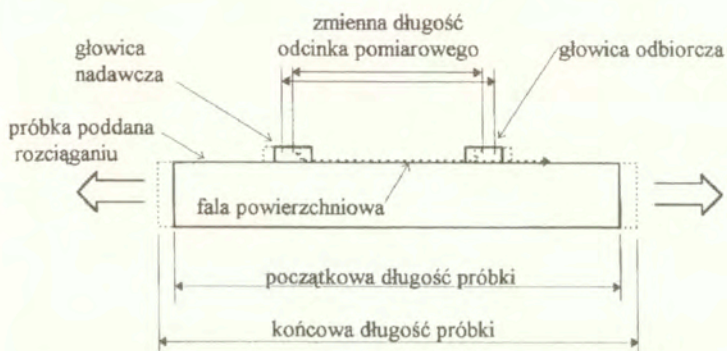
W 1982 roku opublikowano wyniki pomiarów technicznych współczynników elastoakustycznych dla fali powierzchniowej w aluminium oraz w stali wysokostopowej [47]. Autorzy uzyskali wartości $\beta_{11} = -29,4 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$ dla aluminium i $\beta_{12} = -9,03 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$ dla stali. Ci sami autorzy, w roku 1984, przedstawili wyniki pomiarów fizycznych współczynników elastoakustycznych dla stali nierdzewnej typu 304 [48]. W pomiarach zastosowano układ dwóch głowic typu EMAT, a obiektem pomiaru była rura. Zmiany naprężenia uzyskiwano rozpierając rurę ustawionym w jej środku siłownikiem hydraulicznym. Uzyskane wartości fizycznych współczynników elastoakustycznych wyniosły $\beta_{11} = -8,72 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$ i $\beta_{12} = -2,7 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}]$. Są to wartości tego samego rzędu co wartości współczynników mierzone przez innych badaczy dla fali podłużnej (czyli fali o najwyższej „czułości” na naprężenie). Przedstawione przez autorów pracy [48] wyniki nie uwzględniają najprawdopodobniej zmian krzywizny rury poddanej rozpieraniu po średnicy i wywołanych tym zmian długości odcinków pomiarowych.

Ta sama stal nierdzewna (typu 304) była w następnym roku obiektem badań innej grupy badaczy [49]. Pomiary prowadzono specjalnym zestawem głowic, w którym dwie głowice odbiorcze pracowały bez potrzeby stosowania cieczy sprzęgającej, stykając się liniowo z powierzchnią próbki. Dla badanej stali autorzy uzyskali następujące wyniki:

$$\beta_{11} = -0,7 \cdot 10^{-7} [\text{MPa}^{-1}], \quad \beta_{12} = -0,5 \cdot 10^{-6} [\text{MPa}^{-1}].$$

Porównanie wyników pomiarów stałych elastoakustycznych dla fal powierzchniowych w stali nierdzewnej typu 304, opisanych w pracach [46, 47 i 49] pokazuje na jakie trudności pomiarowe musieli napotykać badacze uzyskując w niektórych wypadkach wyniki różniące się wielokrotnie. Dowodzi to, że pomiary falami powierzchniowymi, dla których zjawisko

elastoakustyczne rozumiane jako zmiana prędkości propagacji wywołana naprężeniem jest słabe, są bardzo trudne. Dodatkową przyczyną rozbieżności wyników może być trudna do określenia długość odcinka pomiarowego, na którym mierzony jest czas przejścia fali, w szczególności w pomiarach na powierzchniach o zmieniającej się w trakcie badania krzywiznie. Przykładem trudności pomiarowych jest jedna z ostatnich prac dotyczących fal powierzchniowych [50]. Autorzy tej publikacji, badając żeliwo szare, a więc materiał charakteryzujący się współczynnikami elastoakustycznymi kilkakrotnie wyższymi niż stale, stwierdzili niemożność określenia zależności elastoakustycznej dla fal powierzchniowych. Pomimo niskiej wartości współczynnika elastoakustycznego fale powierzchniowe mogą być wykorzystane w tensometrii ultradźwiękowej do badania odkształcenia. Schemat takiego badania pokazano na rysunku 2. W czasie pomiaru głowice fal powierzchniowych związane są na stałe z powierzchnią materiału, a odległość między nimi, i tym samym długość odcinka pomiarowego, zmienia się wraz z odkształceniem badanego elementu. O skuteczności tego typu pomiaru świadczą wyniki pracy [51], w której rezultaty pomiarów zmiennych naprężeń elementów mostu uzyskane zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2, pokrywają się z wynikami dostarczonymi przez naklejone na stałe tensometry oporowe.



Rys. 2. Schemat pomiaru czasu przejścia fal powierzchniowych głowicami związanymi trwale z powierzchnią elementu.

Przedstawione wyżej prace opisywały pomiary zmian czasu przejścia fal rozchodzących się równoległe lub prostopadłe do kierunku naprężenia. Jednocześnie kierunek ten pokrywał się z kierunkiem jednej z osi akustycznych anizotropowego ośrodka, jakim z reguły są metale techniczne. W sytuacjach gdy kierunki naprężeń głównych nie pokrywają się z kierunkami tekstury, w czasie narastania naprężenia następuje obrót układu osi akustycznych i ogólnie obserwowane są nieliniowe zależności prędkości propagacji fali od naprężenia. Wyniki pomiarów zmian czasu przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych pod różnymi kątami względem kierunków anizotropii akustycznej przedstawiono w [52].

W zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej wykorzystuje się jedynie zależność prędkość - naprężenie dla fal rozchodzących się zgodnie z kierunkami osi akustycznych. Możliwe jest to dzięki temu, że w wielu elementach konstrukcji kierunki tekstury i kierunki naprężeń głównych pokrywają się. Jest tak na przykład w stalowych, walcowanych belkach poddanych rozciąganiu lub zginaniu czy też w rurach poddanych ciśnieniu wewnętrznemu lub zginaniu. Często też

jedna ze składowych naprężenia ma dominującą wartość i wówczas inne składowe naprężenia można pominąć. Tak jest w przypadku pomiarów naprężeń własnych w szynach kolejowych, w których kierunek dominującej składowej naprężeń własnych podłużnego pokrywa się z kierunkiem tekstury będącej wynikiem walcowania.

1.3.3. Wpływ temperatury na prędkość propagacji fal ultradźwiękowych i wartości współczynników elastoakustycznych

Na wartości mierzonego czasu przejścia w istotny sposób wpływa temperatura. Wskutek temperaturowych zależności współczynników sprężystości, zmienia się prędkość propagacji fal ultradźwiękowych. W pomiarach prowadzonych metodą echa, poprzez rozszerzalność termiczną badanego materiału zmienia się długość drogi, na jakiej mierzony jest czas przejścia. W pomiarach prowadzonych zestawami głowic na fale podpowierzchniowe, wskutek rozszerzalności cieplnej elementów zestawu zmienia się długość odcinka pomiarowego. Sposoby doświadczalnego wyznaczania sumarycznych wpływów temperatury na wyniki pomiaru czasu przejścia opisane są w rozdziale 3.2.2.3 poświęconym pomiarom poprawek temperaturowych.

Główny wpływ na mierzony czas przejścia mają zmiany prędkości propagacji fal spowodowane zmianami temperatury. Są one na tyle małe, że w zastosowaniach takich jak defektoskopia ultradźwiękowa czy pomiary grubości były i są nadal często zaniedbywane. Przykładowo w monografii [53], wydanej w roku 1961, której tematem jest zastosowanie różnych technik ultradźwiękowych w nieniszczących badaniach materiałów, wspomina się jedynie o temperaturowej zależności prędkości fal nie podając danych liczbowych. Podobnie, w wydanej w Polsce w roku 1983 monografii [54] nie ma danych o wpływie temperatury na prędkości fal w ciałach stałych.

Dopiero wykorzystanie precyzyjnych pomiarów prędkości fal do wyznaczania stałych sprężystości ośrodków spowodowało dokładniejsze badania zjawiska temperaturowych zależności prędkości. W latach 70-tych, w ultradźwiękowych pomiarach grubości cienkich elementów zastosowanie znalazły głowice podwójne z liniami opóźniającymi wykonanymi z tworzyw sztucznych. W tworzywach takich temperaturowe zmiany prędkości są wielokrotnie większe niż w metalach. Doprowadziło to do konieczności uwzględniania zmian prędkości w liniach opóźniających i do badań zależności prędkość-temperatura. W monografii [55] wydanej w 1980 roku podano wyrażenia na liniową zależność prędkości fali podłużnej w polimetakrylanie metylu (PMM, Plexiglas), z którego wykonywane są linie opóźniające:

$$(11) \quad V_L = 2670 - 3(T - 20)$$

gdzie 2670 [m/s] jest prędkością propagacji fali podłużnej w PMM w temperaturze 20°C, T [°C] jest aktualną temperaturą, a współczynnik 3 [m/s*°C] opisuje zmianę prędkości wywołaną zmianą temperatury o 1°C. Zależność ta obowiązuje w zakresie temperatur -50 ÷ +50 °C

W wydanej w 1989 roku monografii [56], dla tego samego materiału, zależność prędkości od temperatury opisana jest jako:

$$(12) \quad V_L = 2690 - 2.3(T - 25)$$

Różnice w prędkościach propagacji fal i współczynnikach temperaturowych zmian prędkości nominalnie takiego samego tworzywa sztucznego związane są najprawdopodobniej z różnicami własności tworzyw produkowanych przez różnych wytwórców.

W metalach zmiany prędkości fal wywołane zmianami temperatury są wielokrotnie mniejsze niż w tworzywach sztucznych. W monografii [57] wydanej w 1972 roku podano jedynie, że zmiany prędkości fal podłużnych od temperatury w stalach są mniejsze niż $1 \text{ m/s} \cdot ^\circ\text{C}$, a dla fal poprzecznych zmiany te są zaniedbywalne. W pracy [56] wydanej w 1989 roku podane są liczbowe zależności prędkości od temperatury dla stali, dla fal podłużnych i poprzecznych, w zakresie temperatur $2,8 + 47,2 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$(13) \quad V_L = 5900 - 0.55 (T - 25)$$

$$(14) \quad V_T = 3280 - 0.38 (T - 25)$$

gdzie 5900 m/s i 3280 m/s są odpowiednio prędkościami propagacji fali podłużnej i poprzecznej w stali, w temperaturze 20°C . Natomiast w wydanej w tym samym roku monografii [58] wpływ temperatury na prędkości fal jest pomijany choć jeden z rozdziałów pracy traktuje o precyzyjnych pomiarach prędkości propagacji fal w zastosowaniu do badania zmian naprężeń.

W roku 1987 [59] wyznaczona została zależność prędkości fali podłużnej w stali stosowanej do produkcji szyn kolejowych. W wyniku pomiarów autorzy uzyskali wynik $0,56 \text{ m/s} \cdot ^\circ\text{C}$. Zastosowania tensometrii ultradźwiękowej, w których pomiary wykonywane muszą być w różnych temperaturach, wymusiły nie tylko dokładniejsze badania zależności prędkości fal od temperatury ale i jej wpływu na zależność prędkości od naprężenia.

W roku 1983 [60] wykazano, że zależności prędkości propagacji fal od temperatury są liniowo zależne od naprężenia. Autorzy podali, że dla stali, wpływ temperatury na prędkość propagacji fali podłużnej zmienia się o 15% przy zmianach naprężenia w granicach od 0 do 240 MPa . Wyznaczone przez nich współczynniki zmian prędkości dla stali wynoszą:

$$(15) \quad -(dV/dT) [\text{m/s} \cdot \text{K}] = 0,589 \text{ dla naprężenia } 0 \text{ MPa}$$

$$(16) \quad -(dV/dT) [\text{m/s} \cdot \text{K}] = 0,680 \text{ dla naprężenia } 240 \text{ MPa.}$$

Autorzy podali też, że uzyskane przez nich wyniki zmian prędkości nie są zależne od kierunku propagacji względem tekstury i zaproponowali wykorzystanie zależności prędkości od temperatury do wyznaczania wartości naprężeń. Liniowa zależność współczynników opisujących zależność prędkość-naprężenie od temperatury, a szczególnie ich niezależność od kierunku propagacji fali względem kierunków tekstury, wydawała się być zjawiskiem umożliwiającym proste pomiary naprężeń techniką ultradźwiękową. Niestety trudności w realizacji pomiarów spowodowały, że nie znalazła ona zastosowania.

Podobne obserwacje poczynili autorzy pracy [61]. Badali oni zmiany prędkości spowodowane rozchodzeniem się frontu cieplnego w próbce zawierającej obszar z naprężeniami własnymi. Zauważyli również, że temperaturowe zmiany prędkości są funkcją naprężenia i zaproponowali tę technikę do wykrywania obszarów, w których występują naprężenia własne. Nie podali jednak sposobu w jaki można pomiary naprężeń tą techniką wykonywać kontrolując dokładnie rozkłady temperatury oraz uwzględniając wpływ termicznej rozszerzalności badanego ośrodka

na wyniki pomiaru. Autorzy nie podali też wartości liczbowych zmierzonych przez siebie temperaturowych współczynników stałych elastoakustycznych.

W pracy [62] opisano badania temperaturowych zależności prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych w stalach węglowych i stali nierdzewnej typu 304. Autorzy badali również wpływ temperatury na materiały stosowane do wyrobu klinów załamujących głowic skośnych i uzyskali następujące wyniki:

materiał:	temperaturowy współczynnik prędkości [$1/^\circ\text{C}$]
stal węglowa	$-7.75 \div -9.9 \cdot 10^{-5}$
stal 304	$-9.24 \cdot 10^{-5}$
Polystyren	$-3.1 \cdot 10^{-3}$
Black Vespel (mat. podobny do PMM)	$-1.4 \cdot 10^{-3}$

Temperaturowe współczynniki zmian prędkości obliczane były jako przyrosty prędkości wywołane przyrostem temperatury o 1°C .

W pracy [63], opisującej badania temperaturowych zależności współczynników elastoakustycznych, podano wyniki pomiarów wykonanych na próbkach ze stali. Autorzy zaproponowali zapis współczynnika elastoakustycznego jako:

$$(17) \quad \beta = \beta^{T_0} + \Delta T \cdot W$$

gdzie: β - wartość współczynnika elastoakustycznego w temperaturze T [MPa^{-1}],
 β^{T_0} - wartość współczynnika elastoakustycznego wyznaczonego dla temperatury T_0 [MPa^{-1}],
 W - współczynnik określający zmiany współczynnika elastoakustycznego z temperaturą [$\text{MPa}^{-1}/^\circ\text{C}$],
 $\Delta T = T - T_0$ gdzie T - temperatura aktualną [$^\circ\text{C}$].

Autorzy przeprowadzili pomiary współczynników W dla fal podłużnych i poprzecznych, w zakresie temperatur od 0 do 25°C , i uzyskali następujące wyniki:

dla fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku prostopadłym do naprężenia:

$$W_{L,L} = -0.87 \div -1.04$$

dla fali poprzecznej spolaryzowanej w kierunku naprężenia: $W_{T,T} = 1.49 \div 1.43$

dla fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadle do naprężenia: $W_{T,L} = -0.71 \div -0.81$

(wartości podane w [$\text{MPa}^{-1}/^\circ\text{C}$])

Przedmiotem badań opisanych w pracy [64] były pomiary zależności współczynnika elastoakustycznego β_{111} dla żeliwa ciągliwego od temperatury. Autorzy stwierdzili, że wartość współczynnika β_{111} może być zależna nie tylko od temperatury ale również od naprężeń w próbce. Zauważyli też, że wartość tego współczynnika, mierzonego w stałej temperaturze, jest zależna od technologii wykonania próbki (próbka odprężona, normalizowana). Wiarygodność uzyskanych wyników podważa jednak wykorzystanie w pomiarach najprostszego układu głowic, który nie zapewniał wymaganej powtarzalności pomiarowej. Autorzy pracy nie wspomnieli też o tym czy eliminowali wpływ zmian temperatury na czasy przejścia w klinach głowic skośnych.

Wyniki badań przedstawionych w cytowanych pracach dowodzą, że w precyzyjnych pomiarach czasu przejścia w metalach niezbędne jest uwzględnianie wpływu temperatury na prędkości impulsów fal ultradźwiękowych. Niektórzy autorzy donoszą o mierzalnej zależności wartości współczynników elastoakustycznych od temperatury. Zmiany te są niewielkie i przykładowo, zgodnie z wynikami pracy [63], dla współczynnika elastoakustycznego β_{122} (fala poprzeczna spolaryzowana w kierunku działania naprężenia, wykorzystywana w pomiarach dwójłomności akustycznej) mieszczą się w granicach 6%.

W pracy [65], wykonanej w pracowni autora, przedstawiono wyniki doświadczalnych badań zależności współczynników elastoakustycznych od temperatury. Polegały one na pomiarach czasów przejścia fal w próbce rozciąganej w różnych temperaturach, w komorze termicznej. Dla próbki wykonanej z powszechnie stosowanej w konstrukcjach stalowych stali St3S, w zakresie temperatur 13° - 60° , zmiany wartości współczynnika β_{111} były niemierzalne. Oznacza to, że zmierzone zmiany są znacznie niższe niż podane w [63]. Podobne wyniki przyniosły pomiary wykonane przez dr M. Adamskiego na próbce szyny posiadającej wysokie naprężenia własne. Podłużna składowa tych naprężeń w szyjce szyny wynosiła około -200 MPa (ściskanie), a w główce szyny - około 230 MPa (rozciąganie). Na podstawie wyników pomiarów czasów przejścia fal wykonanych w szerokim zakresie temperatur (20° - 65°) obliczone zostały wartości naprężeń w szyjce i stopce. W pomiarach wykorzystano zestaw głowic zbudowany przez autora, a w obliczeniach uwzględniono wpływ temperatury na prędkości propagacji fal w materiale szyny i czasy przejścia fal w elementach zestawu głowic. Pomimo szerokiego zakresu temperatur i wysokich wartości naprężeń w próbce (różnica naprężeń równa około 430 MPa) obliczone wartości naprężeń okazały się niezależne od temperatury. Oznacza to, że w wielu zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej, w pomiarach prowadzonych na elementach wykonanych ze stali węglowych czy niskostopowych, przyjmując można, że zależność wartości współczynników elastoakustycznych od temperatury jest pomijalna.

1.3.4. Sposoby eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej na wyniki badania naprężenia

W materiałach konstrukcyjnych prędkości propagacji fal ultradźwiękowych zależne są od wielu czynników takich jak skład chemiczny, mikrostruktura, temperatura (poprzez temperaturowe zależności stałych sprężystości), tekstura (ukierunkowane ułożenie ziaren metalu) czy działające w ośrodku naprężenia. Z analizy wartości opisanych wcześniej współczynników elastoakustycznych wynika, że wpływ naprężenia na prędkości propagacji fakt jest nikły. Silniejszy od niego wpływ temperatury w badaniach naprężeń techniką ultradźwiękową może być uwzględniony dzięki znajomości zależności prędkości propagacji fal od temperatury i stosowaniu wyznaczonych doświadczalnie poprawek temperaturowych zależnych od budowy używanego w pomiarach zestawu głowic. Znacznie większe różnice prędkości propagacji niż spowodowane naprężeniem czy temperaturą w materiale o nominalnie jednakowym składzie chemicznym spowodowane mogą być zmianami tekstury materiału. Właśnie dlatego wyeliminowanie wpływu nieznaną zazwyczaj tekstury na prędkości propagacji fal w tensometrii ultradźwiękowej jest tak ważnym zagadnieniem, a poszukiwania sposobów pomiarów naprężeń techniką ultradźwiękową w ośrodkach anizotropowych stanowią do dzisiaj temat wielu prac teoretycznych.

W roku 1963 Thurston i Brugger [66] przedstawili wyrażenia opisujące prędkości propagacji fal w ośrodku o dowolnej symetrii krystalicznej, i w dowolnym stanie naprężeń, przez stałą sprężystości drugiego i trzeciego rzędu oraz naprężenie.

W pracy [67] opublikowanej w 1966 roku opisano częstotliwościowe zależności dwójłomności akustycznej (znormalizowanej różnicy prędkości propagacji fal poprzecznych o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji) w blachach wykonanych ze stali nierdzewnej, miedzi i aluminium. Autor stwierdził, że wartość dwójłomności akustycznej wywołana teksturą materiału zależna jest od częstotliwości fal natomiast wartość dwójłomności będącej wynikiem naprężenia jest od częstotliwości niezależna. Podobnie w pracy [68] opisującej wyniki pomiarów prędkości fal poprzecznej i podłużnej rozchodzących się w kierunku grubości blachy ze stali niklowej opisano częstotliwościową zależność wartości dwójłomności akustycznej. Autorzy tej pracy, opierając się na badaniach opublikowanych wcześniej w pracy [67], stwierdzili, że dla niskich częstotliwości wartość dwójłomności zależna jest od naprężenia i anizotropii teksturalnej, dla wysokich zaś - głównie od anizotropii teksturalnej. Zjawisko to zaobserwowane zostało w metalach poddanych odkształceniu plastycznemu i tłumaczone było ruchem dyslokacji wywołanych odkształceniem.

Doniesienia o częstotliwościowej zależności dwójłomności wywołanej teksturą obudziły nadzieje na stosunkowo łatwe oddzielenie wpływu naprężeń od tekstury i możliwość obliczania wartości naprężeń w metalach o nieznannej teksturze. Niestety wymagania co do zakresu częstotliwości fal potrzebnych do oddzielenia wpływu tekstury i naprężeń ograniczyły zastosowanie tej techniki jedynie do badań laboratoryjnych. Przedstawione w pracach [68] i [67] wyniki nie zostały też potwierdzone przez innych badaczy prowadzących doświadczenia na materiałach technicznych.

Badania nad anizotropią akustyczną walcowanych wyrobów stalowych, szczególnie blach stosowanych do głębokich tłoczeń, doprowadziły do powstania metod ilościowej oceny tekstury na podstawie pomiarów prędkości propagacji fal. Opublikowana w roku 1982 praca Sayers'a [69] opisuje propagację fal ultradźwiękowych w ośrodku anizotropowym, zbudowanym z monokrystalicznych ziaren.

W silnie anizotropowym, gruboziarnistym materiale spoiny austenicznej obserwowane były znaczące kierunkowe rozkłady prędkości propagacji fal. Celem pracy była ocena wpływu anizotropii materiału takiej spoiny na błędy w lokalizacji wad wykrywanych w niej metodą ultradźwiękową. Wynikiem pracy jest możliwość obliczania prędkości propagacji fal podłużnej i poprzecznej na podstawie rozkładu orientacji monokrystalicznych, idealnych ziaren o symetrii ortorombowej.

Fakt, że własności walcowanych wyrobów stalowych spełniają warunek symetrii ortorombowej doprowadził do znalezienia wyrażeń opisujących związki między prędkościami propagacji fal niezależne od stopnia tekstury (stopnia ukierunkowania ziaren). W 1984 roku w pracy [70] stwierdzono, że w walcowanych blachach stalowych suma kwadratów prędkości fal podłużnej i dwóch poprzecznych rozchodzących się wzdłuż dowolnego kierunku głównego, jest stała. Suma kwadratów prędkości opisana jest wyrażeniem, którego wartość jest niezależna od stopnia anizotropii ośrodka:

$$(18) \quad \rho (V_{31}^2 + V_{32}^2 + V_{33}^2) = K + \frac{10\mu}{3}$$

gdzie: ρ - gęstość ośrodka,

μ - stała Lamego,

K - współczynnik sprężystości objętościowej,

V_{ij} - prędkość propagacji fal, indeks i - kierunek propagacji, indeks j - kierunek polaryzacji fali.

Był to pierwszy „niezmiennik” pozwalający na uniezależnienie kombinacji prędkości fal od tekstury i na operowanie unormowanymi prędkościami propagacji fal poprzecznych V_B i podłużnej V_L :

$$(19) \quad V_B = (V_{31}^2 - V_{32}^2) / (V_{31}^2 + V_{32}^2 + V_{33}^2)$$

$$(20) \quad V_L = V_{33}^2 / (V_{31}^2 + V_{32}^2 + V_{33}^2)$$

Obliczenia tych prędkości możliwe było bez znajomości dokładnej grubości badanego elementu. Stałość sumy kwadratów prędkości została potwierdzona eksperymentalnie przez autorów przy badaniu naprężeń wokół szczytu pęknięcia w płaskiej próbce [70].

Inne badania doświadczalne przeprowadzone na próbkach wykonanych z różnych gatunków stali nie potwierdziły jednak tych wyników. W pracy [71] opisano pomiary prędkości trzech fal w stalowych wyrobach walcowanych na gorąco czyli w ośrodkach o niskiej anizotropii teksturalnej. Uzyskane wyniki pokazały, że zmiany wartości sumy kwadratów prędkości fal w badanych próbkach są tego samego rzędu co zmiany prędkości poszczególnych fal. Oznaczało to, że wykorzystanie tego „niezmiennika” do obliczania naprężeń w materiałach technicznych prowadzi do błędów. Odstępstwa od teoretycznych przewidywań autorzy wyjaśnili tym, że w badanych próbkach o strukturze perlitycznej występowały również kryształy fazy Fe_3C .

W inny sposób stałość sumy kwadratów prędkości fal trzech rozchodzących się w kierunku grubości walcowanej blachy wykorzystano w pracy [72]. Autorzy wprowadzili współczynnik R obliczany jako:

$$(21) \quad R = 2V_{33} / (V_{31} + V_{32})$$

Wartość współczynnika R jest słabo zależna od parametrów anizotropii teksturalnej (zależna jest jedynie od wartości parametru W_{400}) i jej obliczenie jest możliwe bez znajomości grubości badanej próbki. Doświadczenia przeprowadzone przez autorów na stalowej płycie ze spoiną potwierdziły te oczekiwania.

Inne podejście do zagadnienia zaprezentowano w pracy [73]. Jej autorzy zaproponowali wykorzystanie w pomiarach fal poprzecznych spolaryzowanych równoległe do powierzchni próbki ale rozchodzących się pod kątami względem powierzchni. Rozpatrywali oni przypadek gdy kierunki anizotropii teksturalnej ośrodka o symetrii ortorombowej pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych. Dla tej konfiguracji uzyskali oni możliwość eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej i obliczenia różnicy naprężeń głównych korzystając z pomiarów prędkości propagacji fal w czterech kierunkach.

Technika ta została zweryfikowana doświadczalnie przez autorów na próbce aluminiowej, w której wytworzono płaski, kołowo-symetryczny stan naprężeń wciskając w wykonany w niej otwór stalowy „korek”. Trudności pomiarowe (pomiar prędkości fali rozchodzącej się pod kątem, konieczność dostępu do obu powierzchni próbki) spowodowały, że metoda ta nie znalazła zastosowania poza badaniami laboratoryjnymi.

Jeszcze inny sposób eliminacji wpływu tekstury na prędkości propagacji fal to pomiary kątowych rozkładów prędkości. Podejście takie przedstawione jest w pracy [74] z roku 1986. Autorzy obliczają rozkłady kątowe prędkości fal poprzecznych w ośrodku o symetrii ortorombowej poddanej płaskiemu stanowi naprężenia. Wpływ tekstury na te rozkłady eliminują stosując analizę Fouriera kątowych zależności prędkości. Zaproponowana przez nich metoda umożliwia wyznaczenie kierunków naprężeń głównych i różnicy ich wartości w ośrodku o nieznanym kierunku anizotropii teksturalnej. Wyniki obliczeń autorzy potwierdzili eksperymentem przeprowadzonym na próbkach wykonanych ze stali nierdzewnej. Zaobserwowany błąd pomiarowy tłumaczyli głównie błędami w pomiarze kierunku polaryzacji fal choć kąt jaki tworzy kierunek polaryzacji z układem odniesienia mierzony był z dokładnością $\pm 0,5^\circ$. Według autorów był to jedynie pomiar zgrubny.

Autorzy zauważyli też, że takiemu samemu opisowi jak dla fal poprzecznych podlegają kątowe rozkłady prędkości modu S_0 fal Lamba i zaproponowali ich wykorzystanie w tensometrii ultradźwiękowej.

W pracy [75] opisany jest podobny sposób wyznaczania kierunków i wartości różnicy naprężeń głównych w płaskim stanie naprężenia. Kierunki polaryzacji fal poprzecznych odpowiadające kierunkom osi akustycznych wynikających z kierunków anizotropii i pola naprężeń autorzy wyznacali z dokładnością do 1° , czyli dwukrotnie gorszą niż w pracy [74]. Potwierdzeniem przewidywań teoretycznych były wyniki pomiarów prędkości fal w próbkach poddanych jednoosiowemu rozciąganiu w różnych kierunkach względem kierunków anizotropii teksturalnej i w krążkach ściskanych osiowo, w środkach których wywołany jest płaski stan naprężenia.

Rozwiązanie teoretycznie pozwalające na określenie stanu naprężeń w ośrodku o nieznanym stopniu tekstury opisane jest w pracy [76]. Opisuje ona sposób wyznaczania naprężeń w ośrodkach o symetrii ortorombowej, bez potrzeby wykonywania jakichkolwiek pomiarów skalujących na próbkach pozbawionych naprężeń. Autorzy podają, że w przypadku zgodności kierunków anizotropii teksturalnej i kierunków naprężeń głównych wyznaczone mogą być wartości tych naprężeń. W przypadkach, gdy kierunki naprężeń głównych i anizotropii teksturalnej różnią się, wyznaczona może być różnica naprężeń głównych i naprężenia styczne. Informacje te można uzyskać z kierunkowych rozkładów prędkości propagacji fal objętościowych. Doświadczenia wykonane przez autorów prowadzone były metodą zanurzeniową na starannie obrabianych próbkach. Opisane w pracy pomiary wykonano w goniometrze o rozdzielczości i powtarzalności kątowej lepszej niż $0,01$ stopnia.

Trudności pomiarowe, na które napotykali badacze stosujący pomiary czasów przejścia fal podłużnych i poprzecznych rozchodzących się w kierunku grubości próbki, fal poprzecznych rozchodzących się pod kątem względem powierzchni czy kątowych rozkładów prędkości dowiodły, że praktycznie żadna z proponowanych metod eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej nie może być zastosowana w badaniach przemysłowych. Wynika stąd wniosek, że jedynym skutecznym sposobem eliminacji wpływu tekstury jest dzisiaj pomiar anizotropii teksturalnej w ośrodku pozbawionym naprężeń i uwzględnienie jej wartości przy obliczaniu wartości naprężeń. Do wniosku tego doszli na przykład autorzy pracy [77] opisującej pomiary naprężeń w aluminiowej próbce wykonanej z walcowanej blachy i podanej płaskiemu stanowi naprężenia. Naprężenia obliczali oni na podstawie mierzonych prędkości fal poprzecznych. Po próbach pomiarów czasu przejścia fal rozchodzących się pod różnymi katami względem powierzchni, zgodnie z [73], jako najdokładniejszy sposób oceny stanu naprężeń wybrali pomiary dwójmnośności akustycznej, a jako sposób eliminacji wpływu tekstury ośrodka na

wyniki, pomiar dwójłomności akustycznej wywołanej teksturą na oddzielnej próbce, wykonanej z tego samego materiału i pozbawionej naprężeń. Podejście to jest skuteczne w warunkach gdy anizotropia teksturalna i jej rozkład jest jednakowy w pozbawionej naprężeń próbce i w badanym obiekcie.

Przytoczone wyżej prace opisywały badania prowadzone falami rozchodzącymi się przez grubość próbki, a obliczane na podstawie takich pomiarów wartości naprężenia były wartościami uśrednionymi na grubości. Naprężenia powierzchniowe oceniane są na podstawie prędkości propagacji fal powierzchniowych lub powierzchniowych. Fale powierzchniowe typu SH (fale poprzeczne, o kierunku polaryzacji równoległym do powierzchni) posiadają cechę umożliwiającą oddzielenie wpływu tekstury ośrodka ortorombowego na prędkości propagacji fal rozchodzących się we wzajemnie prostopadłych kierunkach [78]. Różnicę prędkości powierzchniowych fal SH rozchodzących się w kierunkach tworzących kąty Θ i $\Theta+90^\circ$ z osiami symetrii ośrodka opisuje wyrażenie:

$$(22) \quad \frac{V_{SH}(\Theta) - V_{SH}(\Theta + 90^\circ)}{V_A} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2\mu} \cos 2\Omega$$

gdzie: Θ - kąt utworzony przez kierunki osi akustycznych będących wynikiem tekstury a układem odniesienia,

$V_{SH}(\Theta)$, $V_{SH}(\Theta+90^\circ)$ - prędkości fal rozchodzących się odpowiednio pod kątem Θ i $\Theta+90^\circ$ względem układu odniesienia,

$V_A = (V_{SH}(\Theta) + V_{SH}(\Theta+90^\circ)) / 2$ - średnia prędkości fal SH

Ω - kąt między kierunkami naprężeń głównych i kierunkami anizotropii.

Zgodnie ze wzorem (22) różnicę naprężeń głównych obliczyć można bez znajomości wartości współczynnika elastoakustycznego. Stałość prędkości propagacji powierzchniowych fal poprzecznych typu SH w ośrodku o symetrii ortorombowej, propagujących się w kierunkach osi akustycznych była drugim „niezmiennikiem” zaproponowanym do wykorzystania w tensometrii ultradźwiękowej i pozwalającym na wyznaczenie wartości różnicy naprężeń głównych w ośrodku poddanym płaskiemu stanowi naprężenia.

W pracy [79] opisane są badania nad wyznaczeniem współczynników opisujących teksturę blach stalowych i aluminiowych przez pomiary prędkości fal SH rozchodzących się w dwóch prostopadłych kierunkach. Autorzy sygnalizują odstępstwa od teorii zaobserwowane w próbkach aluminiowych i tłumaczą je zanieczyszczeniami materiału badanych próbek. Dopiero pomiary przeprowadzone na próbkach wykonanych z aluminium o wysokiej czystości (99,99%) okazały się zgodne z przewidywaniami teoretycznymi.

Inne podejście do problemu eliminacji wpływu lokalnych zmian tekstury na wyniki pomiarów czasów przejścia fal ultradźwiękowych w materiałach walcowanych na gorąco, o niskiej anizotropii, zaproponowali w roku 1985 Deputat i Brokowski [80]. W metodzie tej do obliczenia wartości naprężenia wykorzystuje się czasy przejścia powierzchniowych fal podłużnej i poprzecznej typu SV, propagujących się w kierunku naprężenia pokrywającym się z kierunkiem walcowania. Dzięki niskiemu współczynnikowi elastoakustycznemu fali poprzecznej (β_{121}) można było przyjąć, że wpływ naprężenia na czas przejścia tej fali jest pomijalny. Fala podłużna jest zaś na składową naprężenia równoległą do kierunku propagacji falą „najczulszą” (wartość współczynnika β_{111} jest najwyższa, o rząd wyższa niż wartość współczynnika β_{121}). Czasy przejścia obu fal są zależne od anizotropii teksturalnej. W metodzie

zapropionowanej przez autorów założono stałość wartości modułu sprężystości objętościowej co pozwoliło na powiązanie prędkości fal podłużnej i poprzecznej w ośrodku bez naprężenia:

$$(23) \quad \frac{K}{\rho} = V_L^2 - \frac{4}{3}V_T^2 = const$$

gdzie V_L , V_T - prędkości fazowa fali podłużnej i poprzecznej,
 K - moduł sprężystości objętościowej,
 ρ - gęstość masy.

Czas przejścia fali poprzecznej wykorzystany jest do obliczenia poprawki strukturalnej opisującej różnicę anizotropii teksturalnej między próbką wzorcową, pozbawioną naprężeń, i elementem, w którym mierzone mają być naprężenia. Próbka wzorcowa wykorzystywana jest do skalowania aparatury czyli do pomiarów czasów przejścia fal w materiale bez naprężeń. Różnica czasów przejścia fali poprzecznej zmierzonych we wzorcu i w badanym elemencie jest miernikiem różnicy tekstury między wzorcem a elementem. Odpowiednia różnica czasów przejścia fali podłużnej jest zależna dodatkowo od naprężenia panującego w elemencie. Poprawka strukturalna pozwala na obliczenie jaki powinien być czas przejścia fali podłużnej t_L^0 w badanym elemencie gdyby nie działało w nim naprężenie. Ten czas przejścia obliczany jest z zależności:

$$(24) \quad t_L^0 = t_L^K + \left(\frac{t_L}{t_T}\right)^3 X (t_T - t_T^0)$$

gdzie: t_L^K - czas przejścia fali podłużnej zmierzony na odprężonym wzorcu,
 t_T^0 - czas przejścia fali poprzecznej zmierzony na odprężonym wzorcu,
 t_L , t_T - czasy przejścia odpowiednio fali podłużnej i poprzecznej w ośrodku z naprężeniem,
 $X = 0,75 (t_L / t_T)^2$ - współczynnik zależny od stosunku dróg fali podłużnej t_L i poprzecznej t_T w ośrodku,

a wartość naprężenia σ_1 obliczana jest ze wzoru:

$$(25) \quad \sigma_1 = \frac{t_L^0 - t_L}{t_L \beta_{111}}$$

gdzie: β_{111} - współczynnik elastoakustyczny dla fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku naprężenia.

Dokładny opis sposobu obliczania poprawki strukturalnej opisany jest w [24]. W odróżnieniu od metod opisanych wcześniej, próbujących generalnie wyeliminować wpływ tekstury na prędkości fal, w pomiarze z wykorzystaniem poprawki strukturalnej konieczne jest skalowanie aparatu to znaczy pomiar czasów przejścia t_T^0 i t_L^K na wzorcu o anizotropii zbliżonej do anizotropii elementu badanego i pozbawionym naprężeń. Poprawka strukturalna pozwala na wyeliminowanie wpływu nieuniknionych w produkcji przemysłowej wahań anizotropii teksturalnej badanych elementów na wyniki obliczeń wartości naprężenia. Umożliwiło to prowadzenie pomiarów w szynach kolejowych przy wykorzystaniu jednego odprężonego wzorca, którego tekstura mogła nieznacznie odbiegać od tekstury badanej szyny. Badania

doświadczalne związku prędkości fal podłużnej i poprzecznej rozchodzących się w ośrodkach o ortorombowej symetrii opisane są w rozdziale 4.

Modyfikacja poprawki strukturalnej została zaproponowana w pracy [65]. W odróżnieniu od poprawki opisanej wzorem (24) do wyznaczenia nowej poprawki konieczne są pomiary czasów przejścia fal podłużnej i poprzecznej w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, odpowiadających kierunkom tekstury blachy. Przy obliczaniu wartości poprawki autor wyszedł z założenia, że w stalowych blachach, zgodnie z wynikami pracy [69], spełniony jest warunek:

$$(26) \quad V_{11}^2 - V_{22}^2 = V_{23}^2 - V_{13}^2$$

gdzie: V_{11} , V_{22} - prędkości podpowierzchniowych fal podłużnych rozchodzących się odpowiednio w kierunku walcowania i prostopadłym do niego,

V_{13} , V_{23} - prędkości podpowierzchniowych fal poprzecznych typu SV rozchodzących się odpowiednio w kierunku walcowania i prostopadłym do niego.

Autor założył pomijalnie małe oddziaływania naprężeń na czas przejścia fali poprzecznej i uzyskał wyrażenie pozwalające na wyznaczenie czasów przejścia jakie miały by fale w materiale bez naprężeń na podstawie wyników pomiarów wykonanych w obszarze zawierającym naprężenia. Wyrażenie to wiąże czasy przejścia fal z długościami odcinków pomiarowych i ma postać:

$$(27) \quad \frac{t_{11}^0 - t_L^{WZ}}{t_{13}^0 - t_T^{WZ}} = - \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^2 \left(\frac{t_L^{WZ}}{t_T^{WZ}} \right)^3$$

gdzie: $t_L^{WZ} = \frac{t_{11}^0 + t_{22}^0}{2}$, $t_T^{WZ} = \frac{t_{13}^0 + t_{23}^0}{2}$

S_L , S_T - długości odcinków pomiarowych fal podłużnej i poprzecznej,

t_{ij}^0 - czasy przejścia fal o kierunku propagacji i i kierunku polaryzacji j ,

t_{ij}^0 - czas przejścia w materiale bez naprężeń.

Działanie powyższej wersji poprawki strukturalnej nie zostało jednak potwierdzone doświadczalnie na blachach poddanych jednoosiowemu lub płaskiemu stanowi naprężenia. Konieczność pomiaru czasów przejścia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach ogranicza ewentualne zastosowanie tej poprawki do płaskich blach o anizotropii strukturalnej równomiernej na ich powierzchni.

Z porównania wyników przewidywań teoretycznych propagacji fal w ośrodkach anizotropowych o symetrii ortorombowej i rezultatów badań doświadczalnych wynika, że jedynie niektóre ze sposobów eliminacji wpływu tekstury na pomiary prędkości propagacji fal mogą znaleźć zastosowania w pomiarach prowadzonych na rzeczywistych wyrobach czy elementach konstrukcji. Pierwszym kryterium jest uzyskanie wystarczającej dokładności pomiaru prędkości. Wymaganie to eliminuje procedury, w których pomiary prowadzone są falami rozchodzącymi się w kierunkach innych niż prostopadły lub równoległy do powierzchni elementu. Podobnie, zastosowanie procedur korzystających z kątowych rozkładów prędkości fal, czyli z pomiarów czasu przejścia fal rozchodzących się w kierunkach innych niż kierunki osi akustycznych ośrodka, jest w praktyce bardzo trudne lub niemożliwe.

Sposoby badania, które znalazły zastosowania wymienione są w pracy [81]. Według autorów te sposoby to: pomiar dwójłomności akustycznej, pomiar różnicy prędkości dwóch fal poprzecznych SH rozchodzących się w kierunkach naprężeń głównych i pomiar falą podłużną rozchodzącą się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny naprężeń. Do oceny wartości naprężeń na podstawie dwóch pierwszych sposoby wystarczające są pomiary różnic czasów przejścia fal. Natomiast trzeci wymieniony przez autorów sposób wymaga obliczenia prędkości propagacji fali do czego konieczna jest dokładna znajomość grubości próbki. Niestety w warunkach przemysłowych ten warunek zazwyczaj nie jest spełniony.

Doświadczenia przeprowadzone przez różne zespoły badaczy wykazały, że z „niezmienników” proponowanych na podstawie prac teoretycznych potwierdzenie znalazła jedynie równość prędkości podpowierzchniowych fal poprzecznych typu SH o wzajemnie prostopadłych kierunkach propagacji. Badania potwierdziły też poprawność działania poprawki strukturalnej obliczanej na podstawie czasu przejścia podpowierzchniowej fali poprzecznej typu SV. Głównym powodem niezgodności przewidywań teoretycznych z wynikami pomiarów jest najprawdopodobniej zbyt uproszczony model ośrodka nie uwzględniający istnienia w nim zanieczyszczeń czy obcych faz. Na wagę wpływu tej „anizotropii zanieczyszczeniowej” uwagę zwrócono w pracy [24] sumującej wieloletnie doświadczenia w ultradźwiękowych pomiarach naprężeń. Teoretyczne potwierdzenie wpływu obcych faz w ośrodku na prędkości propagacji fal i ich tłumienie jest przedstawione w pracy [82], w której analizowana jest propagacja fal w ośrodku dwufazowym z inkluzjami. Wnioskiem z pracy jest stwierdzenie, że kształt inkluzji określany stosunkiem ich długości do szerokości ma istotny wpływ na parametry akustyczne ośrodka. W 1998 zaproponowany został sposób obliczania efektywnych modułów sprężystości ośrodka o symetrii ortorombowej, zbudowanego z monokrystalicznych ziaren żelaza ale uwzględniający wpływ innych (niż czyste żelazo) faz lub zanieczyszczeń [83]. Model ten miał przybliżyć teorię do rzeczywistych własności walcowanych, stalowych wyrobów hutniczych.

1.3.5. Sposoby precyzyjnych pomiarów czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych

W pierwszych badaniach zjawiska elastoakustycznego dla fal poprzecznych, prowadzonych także w IPPT, wpływ naprężenia na prędkość propagacji fal wyznaczano przez rejestrację zmian obwiedni ciągu ech fal odbitych od dna próbki. Nieznaczące różnice prędkości fal o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji prowadziły do interferencji widocznych na ekranie oscyloskopu jako maksima i minima w obwiedni ciągu ech. Z rozkładu ekstremów obwiedni, znanej częstotliwości fal i znanej grubości próbki obliczana była różnica prędkości fal o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji.

W pracy [84] z 1948 roku opisana została metoda pętli elektroakustycznej do precyzyjnych pomiarów czasu przejścia impulsu fal ultradźwiękowej w płaskich próbkach. Metoda ta, zwana też metodą krążącego impulsu, pozwoliła powiązać częstotliwość powtarzania nadajnika z czasem przejścia impulsu przez podwojoną grubość próbki. W ten sposób, dzięki pomiarowi stosunkowo łatwej do zmierzenia w owych czasach częstotliwości możliwe stało się dokładne obliczenie czasu przejścia fali. Podobny sposób wiążący prędkość propagacji z częstotliwością, tym razem częstotliwością impulsu ultradźwiękowego, stosowany jest w pomiarach rezonansowych [85].

Innym sposobem oceny czasu był pomiar czasu od momentu nadania impulsu do wybranego przejścia przez zero impulsu odebranego (zero crossing technique). Technika ta w zastosowaniu do pomiarów naprężeń opisana jest w pracy [78].

W wymienionych wyżej sposobach pomiarów czasu stosowano aparaturę analogową. Pojawienie się przetworników analogowo-cyfrowych pozwoliło na pomiary czasów przejścia nowymi technikami i z niespotykaną wcześniej dokładnością. Przykładowo w pracy [86] opisano układ pomiarowy wyposażony w szybki przetwornik analogowo-cyfrowym umożliwiającą obliczanie czasu przejścia z dokładnością do kilku pikosekund. We wnioskach autorzy stwierdzają, że ich układ pomiarowy zestawiony został z dostępnej na rynku aparatury. Jeszcze wyższą dokładność osiągają autorzy pracy [87]. Osiąganą precyzję pomiaru czasu przejścia fal podłużnych oceniają na 4 ps (jest to czas potrzebny światłu na przebycie w próżni odcinka o długości zaledwie 1,2 mm !!!). Należy jednak pamiętać, że aby obliczyć prędkość propagacji fali na podstawie czasu mierzonego z tak wysoką dokładnością, grubość próbki (droga jaką pokonuje impuls fal) powinna być znana z dokładnością do 0,00002 mm. Wykonanie próbki z tak wysoką precyzją, lub jedynie tak dokładny pomiar jej grubości, wydają się dzisiaj znacznie trudniejsze niż osiągnięcie pikosekundowej dokładności pomiaru czasu.

Autorzy pracy informują również, że w czasie pomiarów temperatura próbki stabilizowana była z dokładnością do $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że prędkość fali podłużnej, wskutek możliwych wahań temperatury mogła zmieniać się o około $\pm 0,055$ m/s. Przykładowo, dla drogi fali podłużnej równej jedynie 20 mm w stali odpowiada to zmianom czasu przejścia o blisko 30 ps. Pokazuje to, że tak nieznaczne nawet wahania temperatury mogły wprowadzać niekontrolowane zmiany czasów przejścia wielokrotnie przewyższające osiąganą dokładność pomiarów. Autorzy pracy zauważają również, że zjawiska dyfrakcyjne, pomimo stosowania poprawek dyfrakcyjnych powodują, iż obliczana wartość prędkości propagacji zależna jest od grubości próbki. Błędy w pomiarach prędkości fal w rozbieżnych wiązkach wytwarzanych przez przetworniki o skończonych wymiarach spowodowane niepłaskością czoła fali czy przesunięciem fazy w warstwie sprzęgającej opisane są w pracy [88].

Cyfrowy zapis przebiegu impulsu umożliwił pomiary czasu przejścia przy wykorzystaniu nie tylko wybranego fragmentu impulsu, jak maksimum czy przejście przez zero, ale całego jego przebiegu. W pracy [89] opisana jest technika pomiaru czasu między dwoma impulsami oparta na znajdowaniu maksimum funkcji korelacji. Ta sama technika pomiaru, pozwalająca na obliczanie czasu przejścia z dokładnością 0,3 ns stosowana jest w opisaney w rozdziale 1.3.6 komputerowej karcie ultradźwiękowej produkowanej w Polsce.

Innym sposobem obliczania czasu przejścia na podstawie analizy całego przebiegu odbieranego impulsu jest technika wykorzystująca analizę Fourier'a i zależność fazy impulsu od częstotliwości [90].

Metody oparte na analizie całego przebiegu impulsu stosowane mogą być w przypadkach, gdy przebiegi napięcia w dwóch impulsach, między którymi mierzone jest opóźnienie, są podobne. Zjawisko to zachodzi w badaniach prowadzonych głowicami normalnymi, metodą echa. W pomiarach takich mierzone jest opóźnienie między dwoma „echami dna” próbki (kolejnymi rejestrowanymi impulsami fali odbijającej się wielokrotnie między równoległymi powierzchniami ograniczającymi). W niskotłumiących stalowych elementach takie echa dna różnią się między sobą jedynie nieznacznie amplitudą (wskutek rozbieżności wiązki, tłumienia fal i strat na odbicia od powierzchni ograniczających) oraz kształtem (wskutek zmian widma wynikających z częstotliwościowej zależności tłumienia).

W przypadku, gdy pomiary prowadzone są blisko powierzchni bocznej próbki, odbicia fal od tej powierzchni powodują zmiany kształtu odbieranych „ech dna” (zjawisko opisane w rozdziale 2.2.2). Zmiany te powodują, że w takich przypadkach zastosowanie metod pomiaru czasu wykorzystujących cały przebieg impulsu, prowadzi do błędów pomiarowych. Podobnie, w pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi na elementach o ograniczonej

grubości, odbicia fal od dolnej powierzchni próbki prowadzą do podobnych efektów. Dlatego w aparatach DEBRO opracowanych w IPPT wykorzystuje się pomiary czasu przejścia na wybranym maksimum impulsu. Do pomiarów wybierane jest pierwsze lub drugie maksimum tak, aby wyeliminować zmiany kształtu impulsu spowodowane ewentualną interferencją impulsu pomiarowego z opóźnionymi impulsami fal odbitych. W aparatach DEBRO-30 pomiar czasu odbywa się przez ręczne ustawianie znacznika na wybranym maksimum impulsu obserwowanego na ekranie lampy oscyloskopowej. Kształt znacznika, dobrany do częstotliwości impulsu, pozwala na prosty, ręczny pomiar czasu przejścia z dokładnością ± 1 ns. Zasada działania miernika czasu opisana jest w [91].

1.3.6. Aparatura wspólnie wykorzystywana w tensometrii ultradźwiękowej

Konieczność pomiaru czasu przejścia z dokładnością rzędu 0,01% stawia specyficzne wymagania aparaturze stosowanej w tensometrii ultradźwiękowej. Aparatom - konieczność pomiaru czasu z nanosekundową lub lepszą dokładnością, zestawom głowic - umożliwienie obserwacji impulsów na odpowiednio długich dystansach i eliminację wpływu sprzężenia akustycznego na mierzony czas przejścia. Rozdział ten opisuje urządzenia stosowane obecnie w ultradźwiękowych badaniach naprężeń, w skład których wchodzi zespoły nadawczo-odbiorcze i mierniki czasu.

Aparaturę wykorzystywaną w tensometrii ultradźwiękowej podzielić można na trzy grupy. Do pierwszej zaliczają się wyspecjalizowane urządzenia nadawcze i odbiorcze wraz z miernikami czasu przejścia, zbudowane z myślą o pomiarach prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych. Z przyrządów tych można zestawiać dowolne układy pomiarowe. Przykładem takiej aparatury są moduły amerykańskiej firmy RITEC [92]. Aparatura ta pozwala na szeroką kontrolę impulsów pobudzających przetworniki (napięcie, kształt impulsu pobudzającego, czas trwania impulsu), posiada wysokoczułe odbiorniki a oprogramowanie pozwala na pomiary czasów przejścia różnymi technikami. Układy nadawcze tej firmy pozwalają na prowadzenie pomiarów zarówno głowicami wyposażonymi w przetworniki piezoelektryczne jak i elektromagneto-akustyczne. Badania prowadzone taką aparaturą, zasilaną z sieci, mogą być wykonywane praktycznie jedynie w warunkach laboratoryjnych choć czynione były próby wykorzystania ich w warunkach przemysłowych [93]. Waga zestawu pomiarowego składającego się z nadajnika, odbiornika, wzmacniaczy i komputera z monitorem sięga 100 kg.

Drugą grupę aparatów stosowanych w tensometrii stanowią karty ultradźwiękowe do komputerów klasy PC. Na jednej standardowej karcie typu ISA, dzięki zastosowaniu układów scalonych wielkiej skali integracji i wielowarstwowych obwodów drukowanych, mieszczą się układy nadawczo-odbiorcze i przetworniki analogowo-cyfrowe. Oprogramowanie połączone z kartą umożliwia wizualizację odbieranych impulsów fal, ich obróbkę (np. uśrednianie), analizę widmową i pomiary czasu przejścia. Karty takie stosowane są głównie w przemyśle w automatycznych, stacjonarnych i wielokanałowych stanowiskach defektoskopowych. Pod warunkiem spełnienia wymagań co do precyzji pomiaru czasu, karty te mogą być wykorzystywane w ultradźwiękowych pomiarach naprężeń.

Karty ultradźwiękowe produkowane są obecnie również w Polsce. Firma ULTRAMET z Radomia oferuje jednokanałowy defektoskop ultradźwiękowy posiadający między innymi możliwości pomiarów czasów przejścia impulsów fal metodą korelacji [94]. Pozwala ona na pracę z głowicą normalną i pomiary czasu przejścia między kolejnymi echem dna próbki z podawaną przez producenta dokładnością równą 1 nanosekundzie.

Trzecią grupę przyrządów stanowią aparaty wyspecjalizowane, zaprojektowane i zbudowane z przeznaczeniem do ultradźwiękowych pomiarów naprężeń w konkretnych elementach. Określone przeznaczenie oznacza zazwyczaj wyposażenie aparatu w głowicę ultradźwiękową przystosowaną do badania jednego, wybranego wyrobu. Poniżej przedstawione są opisane w literaturze przyrządy zbudowane z myślą o ultradźwiękowych pomiarach naprężeń, których producenci podają w jakich elementach maszyn naprężenia mogą być nimi badane.

W USA badania nad opracowaniem techniki pomiaru naprężeń w monoblokowych kołach kolejowych prowadzone były od połowy lat osiemdziesiątych w Materials Reliability Division, NIST, Boulder, Kolorado [95]. Prace prowadzone we współpracy z badaczami japońskimi zaowocowały powstaniem w 1990 roku stacjonarnego, laboratoryjnego zestawu pomiarowego opartego na ultradźwiękowej aparaturze firmy RITEC. Aparatura ta wyposażona była w nadawczo-odbiorczą głowicę ultradźwiękową typu EMAT. W latach 1992-1996 prowadzone były dalsze prace, w których uczestniczył autor a do badań włączono aparat DEBRO-30. Uzyskane wyniki doprowadziły badaczy amerykańskich do opracowania mniejszego, przenośnego aparatu wyposażonego w udoskonaloną głowicę typu EMAT. Ostatnia wersja tego przyrządu opisana jest w [96] a wykonana została w powstałej w 1997 roku firmie INTELLTECH, INC. Jest to zestaw przenośnego komputera z kartą zawierającą układy nadawczo-odbiorcze i specjalnie wykonana głowica EMAT z uchwytem pozwalającym na powtarzalne ustawianie jej na wiencu koła kolejowego. Aparat znajduje się obecnie (lipiec 2000) w Transportation Test Center w Pueblo, Kolorado, gdzie przechodzi próby. Jednocześnie prowadzona jest przez Federalną Administrację Kolejową analiza ekonomiczna stosowania techniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń w kołach kolejowych. Dotychczas nie ma danych o wynikach uzyskiwanych tym aparatem.

Na podstawie wyników prac prowadzonych w NIST dwie inne amerykańskie firmy w latach 1997-1999 zaanonsowały wprowadzenie na rynek nowych aparatów do ultradźwiękowych pomiarów naprężeń. Firma SONICFORCE [97] z Kalifornii przedstawiła aparaturę do pomiarów naprężeń w kołach monoblokowych i naprężeń termicznych w szynach ciągle spawanych. Wcześniej ta sama firma propagowała zastosowania tensometrii ultradźwiękowej z wykorzystaniem fal powierzchniowych, a zbudowany w tym celu przyrząd został nazwany ASG (Acoustic Strain Gauge). W swoich aparatach firma stosuje wyłącznie głowice typu EMAT.

Drugą nową firmą budującą aparaty do badania naprężeń we wieńcach kół kolejowych jest INTERNATIONAL ELECTRONIC MACHINES CORPORATION z Albany, NY, USA. W tych urządzeniach również stosowane są głowice typu EMAT, wyposażone w magnesy stałe. Aparaty obydwu wymienionych wyżej firm to, podobnie jak aparat INTELLTECH, przenośne komputery klasy PC z kartami ultradźwiękowymi współpracujące ze specjalnymi głowicami typu EMAT. Zasilane są z akumulatorów, a czas ich pracy jest ograniczony dużym poborem prądu niezbędnym do zasilania przetworników elektromagneto-akustycznych.

W Europie prace nad aparatami do ultradźwiękowych pomiarów naprężeń prowadzone były w Niemczech, Francji, Włoszech, na Ukrainie i Polsce. W Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IzFP) w Saarbrücken, na zlecenie kolei niemieckich został opracowany i zbudowany zmechanizowany przyrząd UER do pomiarów naprężeń w kołach. Aparat ten, wyposażony w głowicę typu EMAT jest urządzeniem stacjonarnym, zasilanym z sieci. Według informacji zawartych w [98] 20 zestawów typu UER pracuje obecnie w zakładach naprawczych taboru kolejowego w Niemczech, Austrii i Szwajcarii. Na etapie badań znajduje się nowa, pomniejszona i przenośna wersja tego aparatu, która (zgodnie z informacjami jego twórców) będzie mogła być stosowana do badania kół w czasie postoju pociągu, na torze.

Obydwa typy aparatu wyposażone są w komputery typu PC i głowice typu EMAT. Wyniki uzyskiwane aparatami typu UER w warunkach przemysłowych nie są niestety publikowane.

We Włoszech, w firmie CISE SpA w Mediolanie i przy współpracy z hutą Lucchini w Brescia, zbudowano podobny aparat przeznaczony również do pomiarów naprężeń w kołach kolejowych [99]. Podobnie jak w przypadku aparatów amerykańskich jest to komputer z kartą ultradźwiękową wyposażony w dostępną na rynku głowicę typu EMAT. Przyrzędem tym jego autorzy przeprowadzili badania partii kół dla kolei włoskich. Nie ma natomiast informacji o jego zastosowaniach przemysłowych. Aparat jest bardzo podobny do przyrządu zbudowanego przez INTELLTECH.INC. Co interesujące, autorzy włoskiego urządzenia dopiero w 1994 roku dowiedzieli się o tym, że pomiary naprężeń w kołach są od blisko ćwierćwiecza tematem prac badawczych w wielu innych ośrodkach.

Jeszcze jeden przyrząd do badania naprężeń w kołach kolejowych zbudowany został we Francji. Aparat ten znajduje się obecnie w Valdunes, u producenta kół [100]. Konstruktorzy tego przyrządu nie kryją, że został on zbudowany na podstawie doświadczeń zdobytych w czasie badań prowadzonych opracowanym w IPPT PAN aparatem DEBRO-20, który wykorzystywany był przez koleje francuskie w roku 1988. Aparat francuski jest urządzeniem stacjonarnym, wyposażonym w głowicę z przetwornikiem piezoelektrycznym i skomplikowany mechanizm docisku głowicy do powierzchni koła. Według publikowanych danych jest on stosowany w pomiarach naprężeń w kołach opuszczających fabrykę. Co jednak ciekawe, wyniki pomiarów naprężeń w kołach sprzedawanych przez hutę w Valdunes, pomimo ich istotnego znaczenia dla eksploatacji kół, nie są udostępnianie nabywcom kół [101].

Wszystkie wymienione wyżej aparaty to albo przenośne komputery klasy PC ze specjalnymi kartami ultradźwiękowymi albo zestawy, których częścią składową jest komputer z monitorem. Wykorzystanie komputera ze standardową klawiaturą i ekranem ogranicza zakres zastosowań tych aparatów i ich odporność na warunki atmosferyczne oraz uszkodzenia mechaniczne. Wszystkie przyrządy, prócz aparatu francuskiego, wyposażone są w głowice typu EMAT. Oznacza to, z powodu wysokiego poboru prądu przez głowice tego typu, że są to aparaty zasilane z sieci lub z ciężkich, trudnych do przeniesienia akumulatorów o wysokiej pojemności.

W latach 80-tych na Ukrainie zbudowano na bazie defektoskopu ultradźwiękowego aparat do pomiarów naprężeń w rurociągach. Wykorzystywał on głowice z przetwornikami piezoelektrycznymi, a naprężenia wyznaczane były w oparciu o zmierzoną wartość dwójtłoność akustycznej materiału rury. Aparat, podobnie jak defektoskop, był przenośny i zasilany bateryjnie. Brak jest jednak jakichkolwiek danych o zastosowaniach tego aparatu i o uzyskiwanych przy jego pomocy wynikach [102].

W Republice Czeskiej w latach 90-tych opracowany został przenośny aparat do pomiaru czasu przejścia fal poprzecznych wzbudzanych głowicą normalną [103]. Na podstawie zmierzonego czasu wyznaczyć można grubość elementu lub, mierząc czasy przejścia dla dwóch kierunków polaryzacji, wartość dwójtłoności akustycznej i wyznaczania wartości naprężenia. Aparat wyposażony jest w standardową, jednoprzetwornikową głowicę z przetwornikiem piezoelektrycznym. Dotychczas nie ma informacji o zastosowaniach tego przyrządu.

Coraz większe możliwości w pomiarach czasów przejścia stwarzają współczesne ultradźwiękowe defektoskopy cyfrowe. Na przykład, jak podano w [104], aparat EPOCH III pozwala na pomiar czasu przejścia impulsu z rozdzielczością 7 ns.

W Polsce, w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT PAN kierowanej przez prof. Juliana Deputata zbudowano szereg różnego typu aparatów wyposażonych w różne głowice i zestawy głowic. Pierwszym był opracowany w 1982 roku dla Huty Katowice

Ultradźwiękowy Miernik Naprężeń. W przyrządzie tym wykorzystano niektóre elementy defektoskopu Unipan 511 [105]. Aparat ten współpracował z jednym, wieloprzetwornikowym zestawem głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne. Następne przyrządy to opracowane od podstaw aparaty DEBRO-20 i DEBRO-30. DEBRO-30 może współpracować z różnego typu zestawami głowic piezoelektrycznych. Twórcami układów elektronicznych tych aparatów są mgr inż. Adam Bartosiewicz, inż. Krzysztof Mizerski i mgr inż. Wiktor Stańczyk, a produkcję aparatów uruchomił mgr inż. Andrzej Brokowski. Ostatnio opracowanym przez inż. Krzysztofa Mizerskiego (lipiec 2001) aparatem jest DEBRO-35 charakteryzujący się wysoką stabilnością układów pomiaru czasu przejścia.

Cechą odróżniającą aparaturę powstającą w IPPT od innych przyrządów jest wyposażanie ich w głowice ultradźwiękowe lub ich zestawy budowane specjalnie do badań naprężeń. Odpowiednie dla każdego z zestawów oprogramowanie aparatu pozwala na automatyczne obliczanie wyników z uwzględnieniem wpływu temperatury czy zmian tekstury (stosowanie poprawki strukturalnej w pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi). Współpracując z aparatami zestawy głowic umożliwiły pomiary czasów przejścia impulsów fal różnego typu.

1.3.7. Podsumowanie

Wynikający z przedstawionego przeglądu literatury stan wiedzy w dziedzinie ultradźwiękowych badań naprężeń, w tym i zastosowań tej techniki, jest fragmentaryczny i niepełny. Podawane są różne dane liczbowe opisujące zjawisko elastoakustyczne nawet dla tego samego materiału a publikowane dane wydają się być czasem nierealne. Przykładem są wartości współczynników elastoakustycznych dla fal powierzchniowych podane w [48].

W niektórych pracach czasy przejścia impulsów fal mierzone są z bardzo wysokimi dokładnościami liczonymi w ułamkach nanosekund czy nawet pikosekundach. Jednocześnie autorzy tych prac nie podają czy uwzględniony jest wpływ innych czynników niż naprężenie na mierzone czasy przejścia. Czynnikiem takimi są zjawiska termiczne zachodzące w głowicach stosowanych w pomiarach, zmiany temperatury próbki oraz niekontrolowane wahania cieczowego sprzężenia akustycznego. Dokładność oceny prędkości propagacji fali jest też zależna od precyzji z jaką zmierzona może być długość drogi pokonywanej przez impuls (w czasie 1ns, w stali impuls fali podłużnej pokonuje jedynie 0,006 mm). Ograniczeniem dokładności z jaką wyznaczane może być metodą ultradźwiękową naprężenie nie jest więc dokładność z jaką może być zmierzony czas przejścia a zjawiska związane z wprowadzaniem i odbiorem fal, niejednorodnością materiałów technicznych czy zmianami temperatury. Według autora nanosekundowa dokładność pomiaru czasu, w zastosowaniu do tensometrii ultradźwiękowej, jest wystarczająca.

Przykładem doświadczenia, w którym pomiary czasu wykonywane były z wysoką dokładnością szacowaną przez autorów na 0,5 ns, a jednocześnie zastosowany został najprostszy układ głowic składający się jedynie z głowicy nadawczej i odbiorczej, są pomiary wartości współczynnika elastoakustycznego β_{111} w żeliwie ciągliwym [65]. Według doświadczeń autora błędy wynikające z niekontrolowanego wpływu temperatury czy zmian sprzężenia cieczowego mogły w opisanym eksperymencie powodować wahania mierzonych czasów przejścia liczone w setkach nanosekund.

W większości prac opisujących badania laboratoryjne przemilczany jest wpływ temperatury na uzyskiwane wyniki. Przykładem jest monografia [58], której autorzy podają, że stosując dwie standardowe głowice skośne i mierząc zmiany czasu przejścia możliwe jest badanie zmian naprężenia z dokładnością do 0,1 MPa. Jednocześnie nie mówią nic o uwzględnieniu wpływu

temperatury na mierzony czas choć proponowane przez nich głowice wyposażone są w kliny załamujące z tworzywa sztucznego, ustawione są w znacznej odległości od siebie i po przeciwnych stronach próbki. W przedstawionym układzie pomiarowym wpływ zmiany temperatury o ułamek stopnia może być większy niż wpływ zmiany naprężenia o kilka megapaskali.

W opisywanych w literaturze eksperymentach wykorzystywane były ogólnie dostępne piezoelektryczne głowice ultradźwiękowe stosowane w defektoskopii ultradźwiękowej. Brak jest krytycznej oceny przydatności takich głowic w badaniach naprężeń oraz prób budowy głowic lub ich układów specjalnie przystosowanych do badania naprężeń. W opublikowanej w 2000 roku pracy [104] proponowany jest do pomiaru czasu przejścia fal powierzchniowych najprostszы układ składający się z dwóch głowic, nadawczej i odbiorczej, połączonych prostym metalowym łącznikiem. Autor pracy informuje o niekorzystnym wpływie zmian sprężenia akustycznego na wyniki ale jako jedyne rozwiązanie tego problemu proponuje silny docisk głowic do powierzchni próbki. Brak jest w literaturze informacji (lub też nie są one publikowane) o wykorzystaniu głowic specjalnie zbudowanych do precyzyjnych pomiarów czasów przejścia. Wynika to najprawdopodobniej z wysokich kosztów opracowania i badania nowej głowicy w firmach produkującą aparaturę ultradźwiękową. Jedyne w pracy [106] opisana jest głowica stosowana w badaniach naprężeń w śrubach, która wyposażona została w magnesy zapewniające stałą siłę docisku do czoła badanej śruby.

W większości opisane w literaturze ultradźwiękowe sposoby badania naprężeń nie biorą pod uwagę wymagań jakie spełniać musi metoda stosowana w przemyśle. Na przykład techniki akustyczne proponowane w pracach [17, 18, 19] oraz technika ultradźwiękowa przedstawiona w [60] są trudne do zastosowania nawet w laboratorium a praktycznie niemożliwe do zrealizowania w warunkach przemysłowych.

Brak jest w literaturze opisów eksperymentów potwierdzających praktyczną możliwość eliminacji wpływu tekstury wyrobów stalowych na wartości ocenianych naprężeń. W większości doświadczenia prowadzone były na specjalnie przygotowanych próbkach oraz wymagały wykonania wielu pomiarów czasu przejścia fal rozchodzących się w różnych kierunkach [73, 74, 79]. Badania takie, możliwe do przeprowadzenia na płaskich próbkach, ograniczają zakres zastosowań proponowanych technik pomiarowych.

Pomimo bogatej literatury opisującej wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do badania naprężeń w metalach technicznych trudno jest na podstawie zawartych w publikacjach danych skorzystać z nich w badaniach przemysłowych. Prowadzący badania dla przemysłu, podpisując się pod protokołem badania, musi wziąć na siebie odpowiedzialność za ewentualne skutki popełnionej omyłki.

2. ZASADY I OGRANICZENIA W ZASTOSOWANIACH TENSOMETRII ULTRADŹWIĘKOWEJ

Spośród wielu typów fal i możliwych kombinacji wzajemnych kierunków ich propagacji, polaryzacji, kierunków tekstury i działających naprężeń głównych w zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej wykorzystuje się jedynie układy najprostsze. Są to:

- objętościowe fale poprzeczne rozchodzące się w kierunku prostopadłym do powierzchni elementu, o dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji, wykorzystywane do pomiaru dwójłomności akustycznej ośrodka;
- fale podpowierzchniowe rozchodzące się wzdłuż powierzchni w elementach płaskich lub wzdłuż tworzącej w elementach walcowych.

Kierunki propagacji i polaryzacji fal pokrywają się z kierunkami osi akustycznych ośrodka i z kierunkami naprężeń głównych.

Ograniczenie do stosowania jedynie fal rozchodzących się w kierunkach normalnym lub równoległym do powierzchni spowodowane jest trudnościami w uzyskaniu wymaganej dokładności i powtarzalności pomiarów czasu przejścia fal rozchodzących się pod kątem do powierzchni elementu. W praktyce pomiary falami rozchodzącymi się skośnie wykorzystywane mogą być jedynie w pomiarach zmian naprężeń i to przy założeniu, że zapewniona jest możliwość powtarzalnego sprzęgania zestawu głowic w dokładnie tym samym miejscu powierzchni badanego elementu.

Ograniczenie do stosowania jedynie fal poprzecznych i podłużnych wynika z niskich wartości współczynników elastoakustycznych dla fal powierzchniowych i z dyspersji prędkości fal prowadzonych jak fale prętowe czy Lamba.

Ograniczenie do pomiarów fal propagujących się jedynie w kierunkach zgodnych z osiami akustycznymi ośrodka są spowodowane praktycznymi trudnościami w wyznaczaniu kątowych rozkładów czasu przejścia i kierunków osi akustycznych na rzeczywistych obiektach innych niż płaskie, starannie obrobione próbki.

2.1. ZASADY POMIARÓW

Poniżej opisane są zasady pomiarów prowadzonych objętościowymi falami poprzecznymi i falami podpowierzchniowymi.

Pomiary dwójłomności akustycznej:

Pomiary dwójłomności akustycznej możliwe są do wykonania w elementach posiadających dwie płaskie i równoległe względem siebie powierzchnie (blachy, płyty), w których fale poprzeczne o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji rozchodzą się w kierunku grubości. Do nadawania i odbioru fal stosuje się głowice generujące wiązki fal poprzecznych w kierunku prostopadłym do powierzchni, zwane głowicami normalnymi. Fala generowana taką głowicą ulega wielokrotnym odbiciom od dolnej i górnej powierzchni próbki. Po każdym z odbić od dolnej powierzchni głowica rejestruje dochodzące do niej impulsy fali jako kolejne "echa dna" próbki. Pomiaru dwójłomności akustycznej dokonuje się zazwyczaj metodą echa to znaczy z wykorzystaniem impulsów odbitych od dolnej powierzchni. Czas przejścia mierzony może być między impulsem pobudzającym przetwornik a jednym z "ech" lub pomiędzy dwoma wybranymi "echami dna" (metoda różnicowa). Droga fali, na której mierzony jest czas przejścia, jest wielokrotnością grubości próbki w miejscu pomiaru. Schemat pomiaru pokazano na rysunku 3.

Możliwy jest też pomiar metodą „przejścia”, przy wykorzystaniu dwóch głowic. W metodzie tej głowica nadawcza umieszczona jest po jednej stronie elementu, a głowica odbiorcza po drugiej. Technika ta wymaga jednak dostępu do obu powierzchni i przy korzystaniu z klasycznych głowic, możliwości precyzyjnego, współosiowego ustawienia obu głowic.

Jak wynika z praw optyki wartość dwójłomności akustycznej ośrodka anizotropowego oblicza się ze wzoru:

$$(28) \quad B = 2 * (V_2 - V_1) / (V_1 + V_2) = 2 * (t_1 - t_2) / (t_1 + t_2)$$

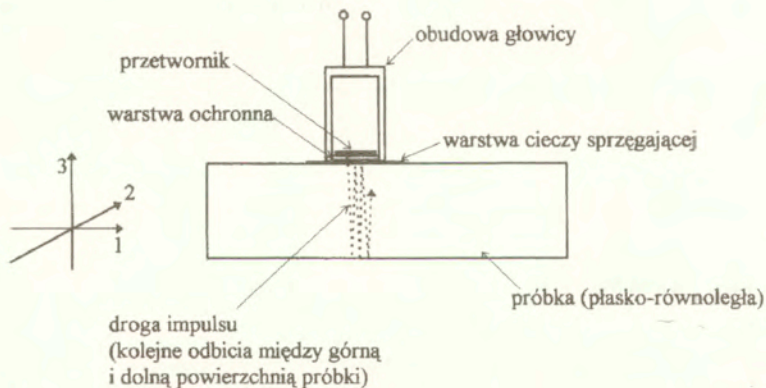
gdzie: B - dwójłomność akustyczna,

V_1 i V_2 - prędkości fal spolaryzowanych w kierunkach odpowiednio 1 i 2.

t_1 i t_2 - czasy przejścia fal spolaryzowanych w kierunkach odpowiednio 1 i 2.

Wartość dwójłomności nie jest zależna od grubości badanej próbki. Oznacza to, że pomiary mogą być wykonywane na elementach o grubościach znanych jedynie w przybliżeniu co jest z punktu widzenia zastosowań ważną zaletą tej techniki. Jej drugą istotną zaletą jest to, że wynik pomiaru nie zależy od temperatury ośrodka i praktycznie nie jest zależny od gradientów temperatury na drodze fal. Wynika to z zaniedbywanej różnicy temperaturowych zmian prędkości fal poprzecznych rozchodzących się w stali i różniących się jedynie kierunkiem polaryzacji.

Wartość dwójłomności mierzonej jak to pokazano na rysunku 3 jest wartością uśrednioną na grubości badanego elementu.



Rys. 3. Schemat badania dwójłomności akustycznej głowicą normalną na fale poprzeczne.

W ośrodku izotropowym, poddanym płaskiemu stanowi naprężenia, wartość dwójłomności akustycznej mierzonej falami o kierunkach polaryzacji zgodnych z kierunkami naprężeń głównych, jest proporcjonalna do różnicy naprężeń głównych:

$$(29) \quad B = (\sigma_1 - \sigma_2) * \beta_B$$

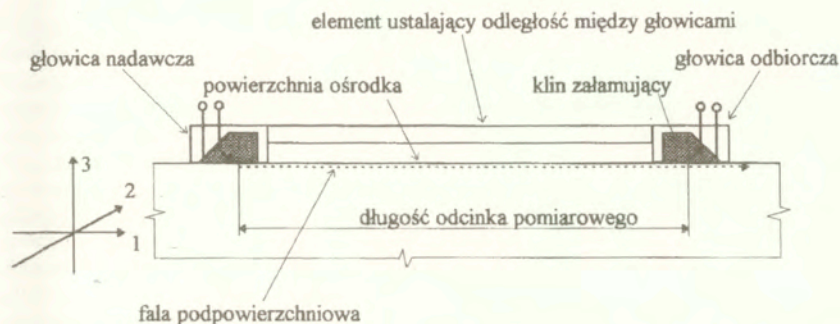
gdzie: σ_1 , σ_2 - naprężenia główne,

$\beta_B = \beta_{123} + \beta_{122}$ - współczynnik elastoakustyczny.

W metalach technicznych dwójłomność akustyczna jest sumą dwójłomności spowodowanej naprężeniem (anizotropia naprężeniowa) i teksturą (anizotropia teksturalna).

Pomiary falami podpowierzchniowymi.

W elementach płaskich lub walcowych możliwe są pomiary czasu przejścia impulsów rozchodzących się jako fale podpowierzchniowe różnych typów. Schemat pomiaru czasu przejścia fali podpowierzchniowej na ustalonym odcinku drogi pokazany jest na rysunku 4. Pokazuje on elementarny układ głowic składający się z jednej głowicy nadawczej i jednej odbiorczej (układy wielogłowicowe opracowane przez autora i stosowane w pomiarach opisane są w rozdziale 3.2.2).



Rys. 4. Schemat pomiaru czasu przejścia fali podpowierzchniowej na ustalonym odcinku drogi wzdłuż płaskiej powierzchni.

W odróżnieniu od pomiaru dwójłomności akustycznej, w pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi konieczne jest uwzględnienie wpływu temperatury na mierzony czas przejścia impulsu. Od temperatury zależne są prędkości propagacji fal w klinach załamujących głowic i w badanym osrodku, a sposób eliminacji wpływu temperatury na czas przejścia opisany jest w rozdziale 3.2.2.3.

Zmiana czasu przejścia fali podpowierzchniowej spowodowana działaniem naprężeń powiązana jest z wartościami składowych naprężenia zgodnie z równaniem:

$$(30) \quad (t_{ij} - t_{ij}^0) / t_{ij} = (\sigma_i * \beta_{ji} + \sigma_j * \beta_{ij} + \sigma_k * \beta_{jk})$$

gdzie: t_{ij} , t_{ij}^0 - czasy przejścia fali odpowiednio w osrodku z naprężeniami i bez naprężeń, pierwszy indeks oznacza kierunek propagacji fali drugi - kierunek polaryzacji fali,

σ_i , σ_j , σ_k - naprężenia główne,

β_{jk} - współczynniki elastoakustyczne.

2.2. OGRANICZENIA WYNIKAJĄCE Z ANIZOTROPII TEKSTURALNEJ

Dwójłomność akustyczna B jest wynikiem istnienia w ośrodku anizotropii teksturalnej B_T (wywołanej ukierunkowaniem ułożeniem ziaren z jakich zbudowany jest metal) i anizotropii naprężeniowej B_σ . Do obliczenia wartości naprężenia konieczne jest wyeliminowanie wpływu anizotropii teksturalnej, zazwyczaj nieznaney, na wyniki pomiaru. Rezultaty teoretycznych przewidywań wpływu anizotropii teksturalnej na czasy przejścia fal nie pokrywają się z wynikami doświadczeń prowadzonych na rzeczywistych obiektach. Trudności te powodują, że jedynym dziś praktycznym sposobem umożliwiającym ocenę wartości naprężenia na podstawie pomiaru dwójłomności akustycznej jest pomiar prowadzony przy następujących założeniach:

- kierunki anizotropii teksturalnej pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych,
- kierunki polaryzacji fal pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych.

Spełnienie tych warunków oznacza, że fale, których czasy przejścia są mierzone są czystymi falami poprzecznymi o kierunkach polaryzacji zgodnych z kierunkami osi akustycznych ośrodka. Dzieje się tak w wielu przypadkach badania konstrukcji stalowych czy elementów maszyn. Jest tak na przykład w stalowych walcowanych kształtownikach poddanych ścisnaniu czy zginaniu, w rurach ze szwem podłużnym wykonanych z walcowanych blach i poddanych ciśnieniu wewnętrznemu lub zginaniu. Warunek zgodności kierunków tekstury i naprężeń głównych spełniony jest również w walcowanych kształtownikach gdzie dominującą składową naprężeń własnych jest składowa podłużna, równoległa do kierunku walcowania i wytworzonej w materiale tekstury (na przykład szyny kolejowe). Podobnie jest w elementach kołosymetrycznych wykonywanych techniką walcowania jak tarcze wirników czy koła kolejowe. W elementach takich kierunki tekstury i główne kierunki naprężeń własnych często pokrywają się z kierunkami obwodowym i promieniowym.

W przypadku jednoosiowego stanu naprężenia działającego w kierunku 1 (rysunek 3) wartość naprężenia obliczana jest ze wzoru:

$$(31) \quad \sigma_1 = \frac{B_\sigma + B_T}{\beta_{311} - \beta_{321}} = \frac{B}{\beta_B}$$

gdzie: $B = B_\sigma + B_T$ - odpowiednio dwójłomność akustyczna, dwójłomność wywołana naprężeniem i istnieniem tekstury,

σ_1 - naprężenie,

β_{311} - współczynnik elastoakustyczny fali spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem 1 i oddziaływania na nią składowej naprężenia σ_1 ,

β_{321} - współczynnik elastoakustyczny fali spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem 2 i oddziaływania na nią składowej naprężenia σ_1 .

Do obliczenia naprężenia konieczna jest znajomość wartości anizotropii teksturalnej B_T . Wyznacza się ją doświadczalnie przez pomiar dwójłomności akustycznej na pozbawionym naprężeń wzorcu wykonanym z tego samego materiału i według tej samej technologii co element badany. Do usunięcia naprężeń z materiału wzorca stosuje się odpowiednią dla danego gatunku materiału ciepłą obróbkę odprężającą. Innym sposobem pomiaru anizotropii teksturalnej jest wykonanie pomiaru na tym fragmencie badanego elementu, co do którego można założyć, że panujące w nim naprężenia są równe lub bliskie zeru.

Wartość współczynnika elastoakustycznego $\beta_B = \beta_{321} - \beta_{311}$ wyznaczana jest na próbce poddanej rozciąganiu lub ścisnaniu w maszynie wytrzymałościowej. Eksperymenty takie są opisane w rozdziale 4.

W ośrodku poddanym płaskiemu stanowi naprężenia, w którym fale poprzeczne rozchodzą się w kierunku prostokątnym do płaszczyzny naprężeń, czas przejścia fal spolaryzowanych zgodnie z kierunkami osi akustycznych ośrodka jest opisany wzorem:

$$(32) \quad B = B_{\sigma} + B_T = \sigma_1 * (\beta_{311} - \beta_{321}) + \sigma_2 * (\beta_{311} - \beta_{321}) + B_T$$

gdzie: σ_1, σ_2 - naprężenia główne.

Wartość różnicy naprężeń głównych obliczana jest ze wzoru:

$$(33) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{B}{\beta_B}$$

W badaniach prowadzonych falami podpowierzchniowymi wykorzystywana jest głównie fala podłużna. Dla tej właśnie fali, rozchodzącej się wzdłuż kierunku działania naprężenia, obserwowana jest najwyższa wartość współczynnika elastoakustycznego (współczynnik β_{111}). Wartość współczynnika elastoakustycznego β_{21} (fala rozchodząca się w kierunku prostokątnym do kierunku naprężenia) jest dla stali o rząd niższa niż współczynnika β_{111} . Pozwala to w wielu zastosowaniach na zaniedbanie wpływu składowej naprężenia prostokątnej do kierunku propagacji fali podłużnej na czas przejścia fali.

Drugą falą o wysokim współczynniku elastoakustycznym jest podpowierzchniowa fala poprzeczna typu SH (kierunek polaryzacji równoległy do powierzchni). Współczynnik elastoakustyczny β_{122} dla tej fali w stali jest równy około $0,6 * \beta_{111}$. Pozostałe fale charakteryzują się niższymi współczynnikami elastoakustycznymi i z tego powodu nie są wykorzystywane w tensometrii jako fale dostarczające informacji o wartości naprężenia.

2.3. OGRANICZENIA WYNIKAJĄCE Z GEOMETRII BADANYCH ELEMENTÓW

Oprócz anizotropii teksturalnej i temperatury na mierzone czasy przejścia wpływ mogą mieć również skończone wymiary badanych elementów. Wpływ ten zależy jest od sposobu pomiaru czasu przejścia i głowic ultradźwiękowych wykorzystywanych w pomiarach. Skończone wymiary badanych elementów mogą powodować, że rozchodzą się w nich fale dyspersyjne, których prędkości silnie zależą od wymiarów próbki. Tak jest w przypadku cienkich płyt, wzdłuż których rozchodzą się fale Lamba. W przypadku prętów czy prostopadłościanów, powierzchnie boczne stanowią reflektory dla rozbieżnych wiązek fal, a fale odbite od nich mogą interferować z impulsami, których czasy przejścia są mierzone. Poniżej opisano wykonane przez autora badania mające na celu określenie warunków, w jakich mierzone czasy przejścia impulsów nie są zależne od geometrii badanego elementu czy też od miejsca przyłożenia głowicy na powierzchni elementu.

Geometryczna dyspersja prędkości - pomiary czasów przejścia fal Lamba.

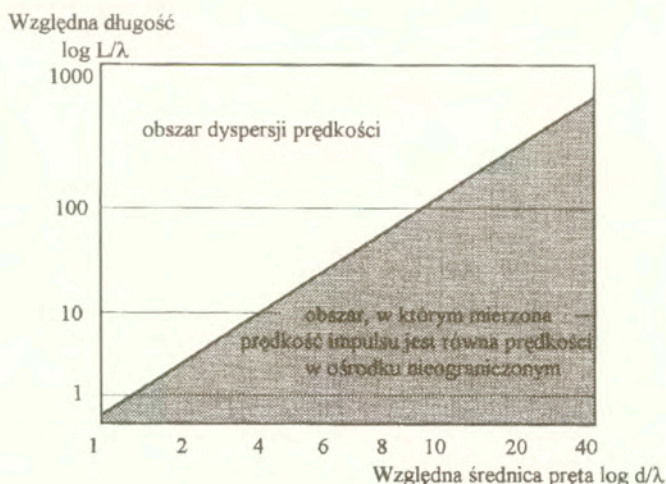
Jednym z czynników silnie wpływających na prędkości fal jest geometryczna dyspersja prędkości fal występująca w ośrodkach, których co najmniej jeden z wymiarów jest zbliżony do długości fali (na przykładzie w blachach czy prętach). W przypadku gdy grubość blachy jest zbliżona do długości stosowanej w pomiarach fali, wzdłuż blachy rozchodzi się fala Lamba. Prędkości grupowe tych fal są silnie zależne nie tylko od własności sprężystych materiału ale i od jego wymiarów. Uzyskane wyniki doświadczeń przeprowadzonych przez autora falami płytowymi, opisanych szerzej w rozdziale 4, wykazały, że możliwości ich zastosowania ograniczają się do pomiarów zmian naprężeń, w układach pomiarowych, w których głowice są

sprężnięte na stałe z powierzchnią blachy. Dodatkowym utrudnieniem przy korzystaniu z fal płytowych jest konieczność znajomości modu fali rozchodzącej się w ośrodku, od którego zależna jest wartość współczynnika elastoakustycznego.

Wpływ średnicy i długości pręta na wyniki pomiaru prędkości fal podłużnych rozchodzących się wzdłuż pręta.

Jednym z pierwszych zastosowań tensometrii ultradźwiękowej były pomiary naprężeń w śrubach [107]. Wartość naprężenia jest obliczana na podstawie czasów przejścia fal podłużnych i poprzecznych rozchodzących się wzdłuż śruby. Głowice nadawczo-odbiorcze ustawiane są w czasie pomiaru na płaskich łbach śrub. Zmierzone w ten sposób prędkości fal odpowiadają prędkościom w ośrodku nieograniczonym dla śrub o wystarczająco dużych średnicach i ograniczonych długościach. Dla smukłych prętów jakimi są długie śruby czy szpilki o małych średnicach, mierzone czasy przejścia zależne są od ich wymiarów, nawet gdy są one wielokrotnie większe niż długość fali ultradźwiękowej. Wyniki doświadczeń przeprowadzonych przez autora na próbkach stalowych prętów o kołowym przekroju i różnych długościach wykazały, że dla próbek o takich kształtach prędkość propagacji fali obliczana na podstawie mierzonego czasu przejścia impulsu jest funkcją nie tylko średnicy pręta ale i jego długości. W pracach [108] i [109] opisano doświadczalnie wyznaczone krzywe określające długości i średnice prętów, w których wyznaczona prędkość fal odpowiada prędkości fazowej w ośrodku nieograniczonym. Zakresy odniesionych do długości fali wymiarów prętów, dla których spełniony jest warunek równości prędkości pokazano na rysunku 5.

Z zależności pokazanej na wykresie widać, że wpływ skończonych wymiarów pręta na mierzone czasy przejścia widoczny jest również w przypadku prętów o średnicach większych od długości rozchodzących się w nim fal. Jest on też tym wyraźniejszy im większa jest długość badanego pręta. Należy dodać, że przedstawione ograniczenia zależą nie tylko od wymiarów pręta i długości fali ale i od sposobu pomiaru czasu przejścia impulsu. Opisane wyniki

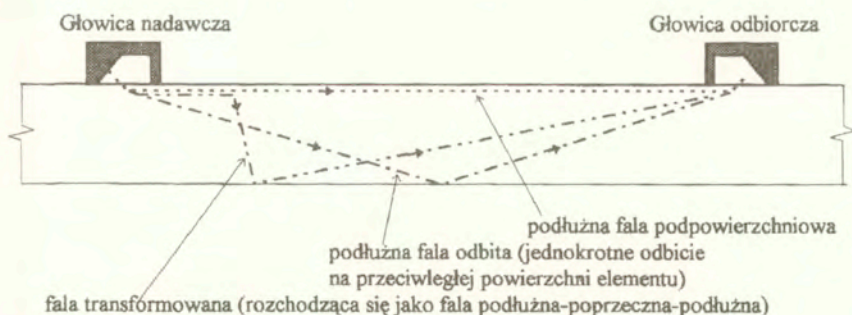


Rys. 5. Zakresy długości i średnic prętów, w których wyznaczana doświadczalnie prędkość fali odpowiada prędkości w ośrodku nieograniczonym.

uzyskano stosując metodę echa (jedna głowicę nadawczo-odbiorczą przyłożona do płaskiego czoła pręta), a więc sposób stosowany w pomiarach naprężeń w śrubach. W takim pomiarze impuls przebywa dwukrotnie drogę równą długości próbki, a czas przejścia jest mierzony od momentu nadania impulsu do wybranego punktu impulsu odebranego („echa dna” pręta). Czasy przejścia mierzono nanosekundowym miernikiem czasu, wybierając punkt pomiaru czasu w początkowej części impulsu (na drugim dodatnim maksimum impulsu). Można się spodziewać, że stosując pomiar czasu na maksimum odsuniętym od początku impulsu lub na przykład pomiar czasu techniką korelacji i wykorzystując w pomiarach dwa kolejne echa (droga impulsu w próbce równa czterokrotnej długości próbki), zakres średnic i długości próbek, dla których czas nie jest zależny od geometrii, byłby jeszcze mniejszy.

2.3.1. Ograniczenia wynikające z odbić i transformacji fal

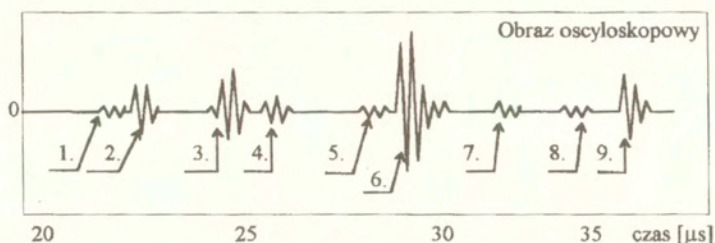
W czasie pomiarów prowadzonych falami podpowierzchniowymi w elementach o znacznych grubościach jedynym odbieranym przez głowicę odbiorczą impulsem jest impuls fali podpowierzchniowej, rozchodzącej się wzdłuż powierzchni. Fale rozchodzące się w głąb materiału ulegają wytłumieniu. W elementach płasko-równoległych (blachy, płyty), o ograniczonych, ale wielokrotnie większych od długości fali grubościach, głowica odbiorcza rejestruje jako pierwszy impuls fali podpowierzchniowej, a następnie szereg impulsów docierających do niej różnymi drogami. Podczas propagacji podpowierzchniowej fali podłużnej w stali powstaje odpromieniowana fala poprzeczna, będąca wynikiem transformacji fali podłużnej, rozchodząca się pod kątem około 33° względem powierzchni próbki. Kąt pod jakim rozchodzi się fala poprzeczna w ośrodku wynika z prawa Snelliusa i jest równy kątowi odbicia fali poprzecznej powstającej przy padaniu fali podłużnej na swobodną powierzchnią ośrodka pod kątem równym 90° . Fala poprzeczna po dotarciu do dolnej powierzchni próbki odbija się od niej pod kątem równym kątowi padania lub transformuje się na falę podłużną rozchodzącą się wzdłuż dolnej powierzchni próbki. Wskutek rozbieżności wiązki fala ta może być odebrana przez głowicę odbiorczą docierając do niej bezpośrednio lub po kolejnych odbiciach od górnej i dolnej powierzchni próbki. Rysunek 6 pokazuje schematycznie drogi jakimi rozchodzą się fale odbite i transformowane w płycie o grubości wielokrotnie większej od długości fali.



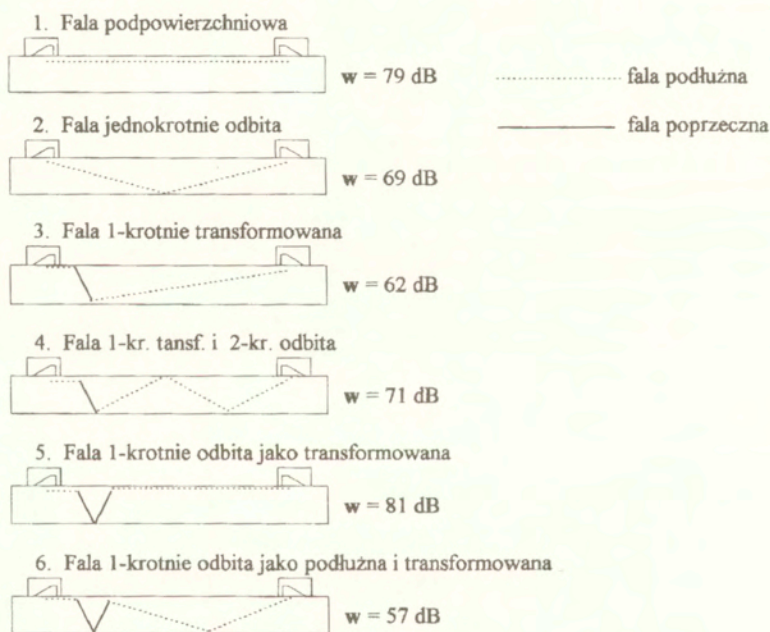
Rys. 6. Schemat powstawania i rozchodzenia się fal odbitych i transformowanych.

Przykładowy obraz oscyloskopowy i różne drogi jakimi impulsy odbierane przez odbiornik docierają do niego w stalowej próbce o grubości 15 mm pokazano na rysunku 7. Widoczne są

Amplituda impulsu



w - wzmacnienie, przy którym amplituda impulsu osiąga ustalony poziom



Rys. 7. Obraz oscyloskopowy i schemat rozchodzenia się fal wzbudzanych głowicą na podłużne fale podpowierzchniowe w stalowej próbce o grubości 15 mm. Odległość między głowicami nadawczą i odbiorczą równa 109 mm.

wyraźne różnice amplitud odbieranych impulsów. Obraz oscyloskopowy, stosunki amplitud poszczególnych impulsów i relacje czasowe pomiędzy nimi zależą od grubości próbki, Amplituda impulsu

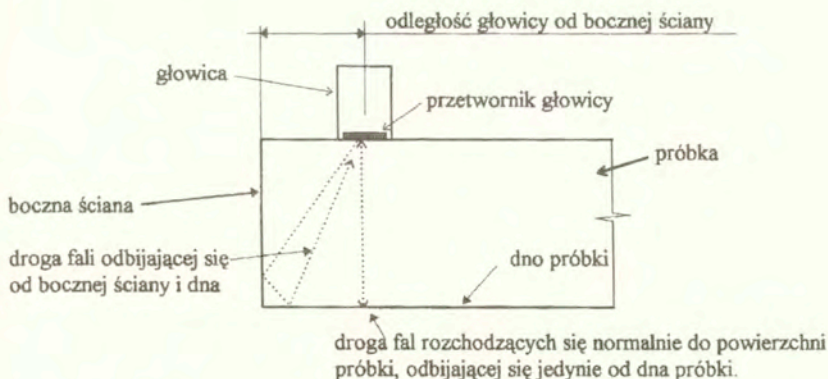
odległości pomiędzy głowicami nadawczą i odbiorczą oraz od charakterystyk kierunkowości głowic. Niezależnie jednak od tych warunków amplituda fali podpowierzchniowej, a więc fali, której czas jest mierzony, jest znacznie niższa niż fali odbitej i transformowanej.

Dla cienkich próbek i dużych odległości pomiędzy głowicami nadawczą i odbiorczą, impuls fali podpowierzchniowej dociera do głowicy odbiorczej niemal równocześnie z impulsem fali jednokrotnie odbitej. Czas przejścia fali odbitej zależy jest od znanej zazwyczaj jedynie w przybliżeniu (lub zmiennej) grubości próbki i dlatego nie może być wykorzystane do oceny bezwzględnych wartości naprężeń. Konieczność odseparowania impulsów fali podpowierzchniowej i odbitej stwarza więc ograniczenie na maksymalną odległość między głowicami nadawczą i odbiorczą. Odległość ta musi być dobrana tak, aby przebieg impulsu fali podpowierzchniowej w tym jego fragmencie, w którym dokonywany jest pomiar czasu (maksimum, przejście przez zero) nie był zakłócony docierającą do przetwornika odbiorczego falą odbitą. Warunek ten oznacza, że im bliższy początkowi impulsu jest fragment, na którym mierzony jest czas, tym mniejsze może być opóźnienie fali odbitej, która jeszcze nie zakłóca pomiaru. Tym samym tym większa może być odległość między głowicami dla danej grubości próbki.

Fale odbite i transformowane mogą być wykorzystane w pomiarach zmian naprężeń. Ich cechą w stosunku do fali podpowierzchniowej jest to, że biegną przez całą grubość próbki i obliczany na podstawie zmian czasów przejścia takich fal przyrost naprężenia jest uśredniony na grubości elementu. Pomiar współczynników elastoakustycznych wykonane przez autora dla takich fal opisano w rozdziale 4.

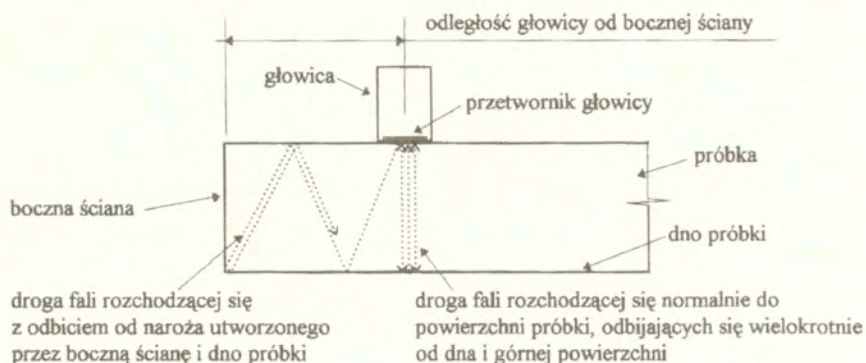
2.3.2. Wpływ bocznej ściany przy pomiarach prowadzonych głowicami normalnymi

Przy pomiarach prowadzonych głowicami normalnymi boczna ściana badanego elementu działać może jak rozległy, płaski reflektor dla fal ultradźwiękowych i odbite od niej impulsy mogą interferować z impulsami pomiarowymi. Schemat powstawania takich odbić, będących wynikiem rozbieżności generowanej w materiale wiązki, pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat powstawania impulsów odbitych od bocznej ściany.

Fale odbite powstające w próbkach o mniejszych grubościach, w badaniach których wykorzystuje się impulsy wielokrotnie odbite od dna, pokazano schematycznie na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat powstawania odbić od bocznej ściany przy badaniach prowadzonych głowicami normalnymi.

Wpływ odbić od bocznej ściany na czasy przejścia fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku normalnym do powierzchni opisano w [110], a sposób numerycznego modelowania wpływu bocznej ściany na mierzone czasy przejścia opisano szczegółowo w [111].

Wpływ bocznej ściany jest funkcją grubości próbki, odległości głowicy od tej ściany i zależy od ilości przejść fali przez grubość próbki wykorzystanej w pomiarze oraz od rozkładu ciśnienia akustycznego w generowanej przez głowicę wiązkę fal. W pracy opisującej model numeryczny i badania doświadczalne pokazano również jak mierzony czas przejścia zależy od kształtu impulsu ultradźwiękowego oraz od położenia wybranego fragmentu impulsu, na którym dokonywany jest pomiar czasu. Miejszem tym w technice stosowanej w aparatach DEBRO jest zazwyczaj drugie maksimum impulsu. Na rysunkach 10 i 11 pokazano przykładowo obliczone numerycznie i zmierzone zależności czasów przejścia od odległości głowicy od bocznej ściany. Pomiar prowadzone były na jednorodnej, stalowej próbce o grubości 20 mm. Maksymalne różnice między wynikami pomiarów i obliczeń, odpowiednio dla wykresów na rysunkach 10 i 11, wynoszą 7,7 i 4 ns a błędy średnie 2,5 i 1,8 ns.

Widoczny jest wyraźny wpływ bocznej ściany dla położenia głowicy bliższych niż 8 mm od krawędzi próbki. Zmiany czasu wywołane odbiciami sięgają -30 ns czyli aż 0,15% mierzonego czasu przejścia. Oznacza to, że w tensometrii ultradźwiękowej odbicia od bocznej ściany mogą być powodem znacznych błędów w ocenie wartości naprężeń.

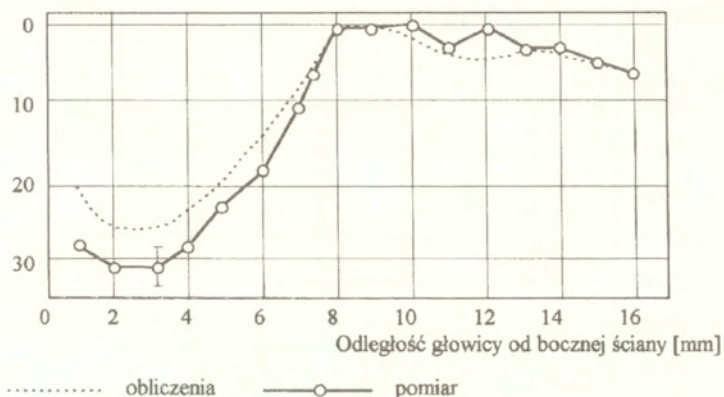
Następny wykres pokazuje obliczone i zmierzone zmiany czasów przejścia dla tej samej próbki i głowicy, ale dla czasu mierzonego pomiędzy 2-gim i 3-cim echem dna. Widoczny jest wpływ bocznej ściany na czas dla odległości głowicy od krawędzi sięgających 12 mm, a wahania mierzonego czasu przejścia sięgają od +5 ns do -15 ns.

Przedstawione zależności oraz uzyskana zgodność wyników obliczeń i doświadczeń pozwoliły na wyznaczenie minimalnych odległości głowicy od krawędzi badanego elementu, dla której mierzony czas przejścia fal nie jest zakłócany odbiciami fal od tej krawędzi. Ma to praktyczne znaczenie w doborze wymiarów wzorców (wzorce czasów przejścia lub wzorce anizotropii

akustycznej), których wymiary i związana z nimi masa, z praktycznego punktu widzenia powinny być jak najmniejsze.

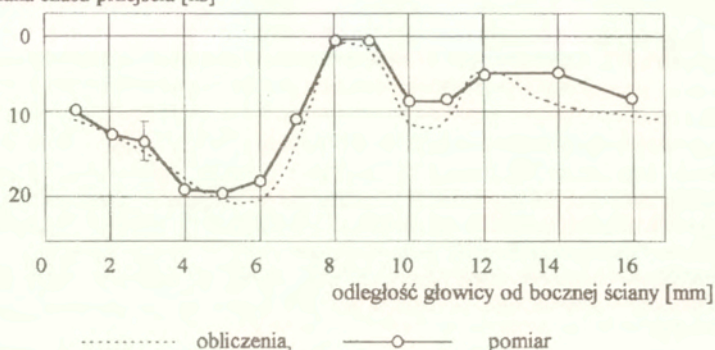
Dla fal poprzecznych stosowanych w wyznaczaniu naprężeń na podstawie pomiaru dwójnośności akustycznej, wpływ ściany bocznej jest zależny nie tylko od grubości próbki, wybranych do pomiaru ech, kształtu generowanego przez głowicę impulsu ale również od kierunku polaryzacji fali względem powierzchni odbijającej. Wynika to z zależności współczynnika odbicia fali poprzecznej od kierunku polaryzacji fali względem powierzchni odbijającej.

Zmiana czasu przejścia [ns]



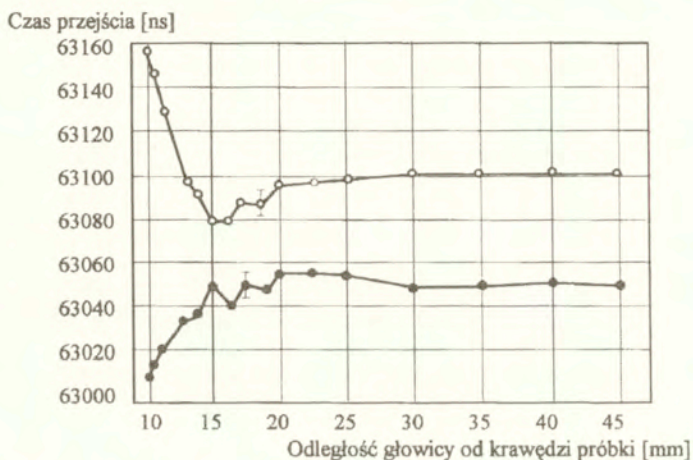
Rys. 10. Zmiany czasu 6-cio krotnego przejścia mierzonego jako przejścia przez grubość próbki (czas przejścia do "3-go echa dna").

Zmiana czasu przejścia [ns]



Rys. 11. Zmiany czasu przejścia mierzonego pomiędzy dwoma kolejnymi odbiciami fali od dna próbki (czas przejścia mierzony między 2-gim i 3-cim „echem dna”).

Przykładowe zależności zmierzonych czasów przejścia dla różnych odległości głowicy od ściany bocznej pokazano na rysunku 12. Czas przejścia był mierzony metodą echa, między 1-szym i 2-gim echem dna próbki, głowicą z kwadratowym przetwornikiem na fale poprzeczne o boku 12 mm i częstotliwości 2,2 MHz. Pomiary przeprowadzono na jednorodnej, szlifowanej próbce stalowej o grubości 100 mm, pozbawionej naprężeń. Widoczny jest wyraźny wpływ odbić od bocznej ściany na czasy przejścia dla położenia głowicy w odległościach mniejszej niż 30mm od krawędzi płyty. Wpływ ten jest też zależny od kierunku polaryzacji fali. Odbicia powodują wzrost mierzonego czasu przejścia dla fali spolaryzowanej równoległe do niej i spadek czasu dla fali o polaryzacji prostopadłej. Dla położenia głowicy w odległości większej niż 30 mm od krawędzi płyty, stała różnica czasów przejścia dla fal o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji wynosi około 45 ns i jest wynikiem jedynie anizotropii teksturalnej materiału płyty.



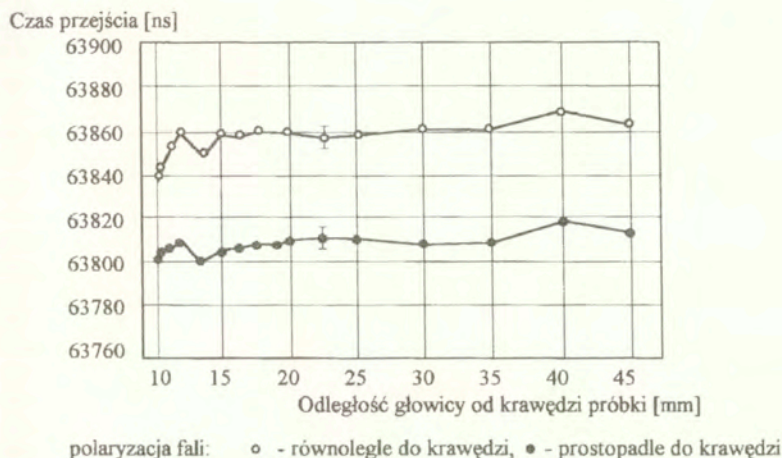
kierunek polaryzacji fali: ○ - równoległy do krawędzi, ● - prostopadły do krawędzi

Rys. 12. Wpływ krawędzi na czasy przejścia fal poprzecznych mierzone pomiędzy 1-szym i 2-gim echem dna płyty stalowej o grubości 100 mm.

Dla głowicy stojącej blisko krawędzi różnica czasów przejścia osiąga wartość blisko 150 ns. Wartość naprężenia obliczonego na podstawie pomiaru dwójłomności akustycznej jest proporcjonalna do różnicy czasów przejścia fal o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji. Dlatego odmienne zależności czasów przejścia fal o różnym kierunku polaryzacji względem krawędzi powodują niedopuszczalne błędy w ocenie naprężenia. Zakładając jednorodność mierzonej płyty, wpływ bocznej ściany na zmierzone czasy przejścia jest równoważny wpływowi uśrednionego na grubości naprężenia jednoosiowego równego blisko 190 MPa.

Na następnym rysunku, numer 13, pokazano wpływ krawędzi tej samej płyty na czas przejścia fal mierzony do 1-go echa dna. Badania przeprowadzono tą samą głowicą, a pomiaru czasu dokonano na tym samym fragmencie impulsu co w eksperymencie pokazanym na rysunku 12. W porównaniu z wynikami pomiaru dokonanego między 1-szym i 2-gim echem

dna, dla czasu mierzonego między momentem nadania impulsu i 1-szym echem dna wpływ odbić od bocznej ściany jest wielokrotnie mniejszy. Dlatego też, w opisanych w rozdziale 5.3 pomiarach naprężeń we wieńcach kół kolejowych, w przypadku kół zużytych (o małej grubości wieńca) gdzie zachodzi niebezpieczeństwo odbić impulsów od ścianek wąskiego wieńca koła, stosuje się obecnie pomiary czasu przejścia jedynie do 1-go echa dna. Zwiększa to niekorzystny wpływ wahań grubości warstwy sprzęgającej na wyniki ale jednocześnie umożliwia wykonywanie pomiarów dla mniejszych niż 20 mm odległości środka głowicy od krawędzi wieńca koła.



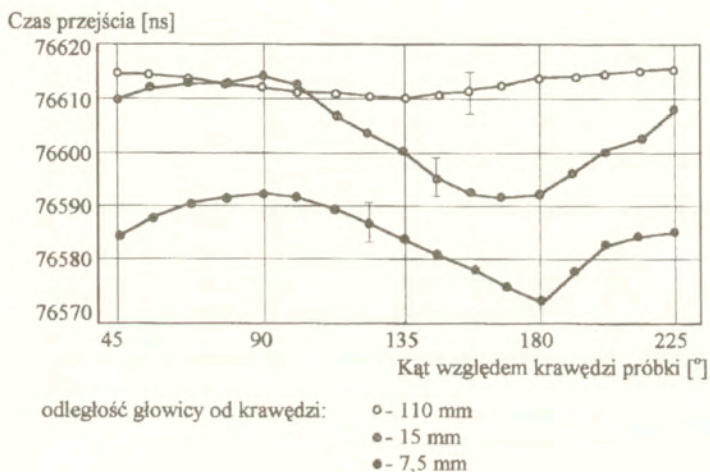
Rys. 13. Wpływ krawędzi na wartości czasu przejścia fal poprzecznych mierzone do 1-go echa dna płyty stalowej o grubości 100 mm.

W materiałach z teksturą, której kierunki nie pokrywają się z kierunkami krawędzi elementu, wpływ bocznej ściany prowadzi do błędnego wyznaczenia kierunków osi akustycznych materiału. Na rysunku 14 pokazano kątowe rozkłady czasu przejścia fali poprzecznej zmierzone na próbce wykonanej ze staliwa charakteryzującego się gruboziarnistą strukturą. Kierunki osi akustycznych wyznaczonych przez strukturę odlewu tworzyły z ścianą boczną próbki kąty 45° i 135°. Badania rozkładów przeprowadzono dla różnych odległości głowicy od płaskiej, obrobionej krawędzi próbki. Dla położenia głowicy w odległości 110 mm od bocznej ściany, jej wpływ na wyniki pomiarów nie jest widoczny i ekstrema czasów przejścia obserwowane są dla kierunków polaryzacji fal tworzących z krawędzią próbki kąty 45° i 135°. Dla głowicy ustawionej w odległości 15 mm od krawędzi, minimum czasu przejścia obserwowane jest dla kierunku polaryzacji około 170°. Natomiast dla położenia głowicy w odległości tylko 7,5 mm od krawędzi, ekstrema czasów przejścia, wskutek silnego wpływu płaskiej, bocznej ściany próbki, odpowiadają kierunkom polaryzacji równoległemu i prostopadłemu do krawędzi.

Wyniki badań przeprowadzonych przez autora pokazują, że odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni ograniczających badanego elementu mogą być przyczyną błędów pomiaru czasu

przejścia tego samego rzędu co wpływ na ten czas naprężenia sięgającego granicy plastyczności stali konstrukcyjnych.

W pomiarach ultradźwiękowych prowadzonych na elementach o ograniczonych wymiarach i wykonanych z drobnoziarnistej, niskłutującej stali pojawić się może dodatkowa trudność. Generowane w ośrodku impulsy, po minięciu głowic odbiorczych docierają do krańców elementu, odbijają się od nich i po pewnym czasie, po wielu obiciach, fale rozchodzące się w różnych kierunkach „wypełniają” całą objętość elementu. Te odbijające się fale nakładają się na impulsy wytworzone w ośrodku podczas następnego cyklu powtarzania aparatu. Zjawisko to, widoczne na obrazie oscyloskopowym jako szum, występuje podczas badania falami podpowierzchniowymi rozchodzącymi się wzdłuż elementów o ograniczonej długości. Jest tak na przykład w czasie pomiarów na wzorcach, których wymiary z konieczności są



Rys. 14. Wpływ bocznej ściany na katowe rozkłady czasów przejścia mierzone na próbce wykonanej ze staliwa dla różnych odległości głowicy od tej ściany. Kierunki osi akustycznych próbki tworzyły z jej ścianą boczną kąty 45° i 135°.

ograniczone (ograniczenie masy wzorca, ograniczenie wynikające z możliwości przeprowadzenia wyżarzenia odprężającego). Jedynym skutecznym sposobem wyeliminowania wpływu tych fal na wyniki pomiaru jest obniżenie częstotliwości powtarzania nadawania impulsu na tyle aby w okresie między kolejnymi pobudzeniami przetwornika nadawczego wszystkie fale „wypełniają” element uległy wytłumieniu. Inną metodą ograniczenia amplitud fal odbijających się od ścianek wzorca jest kształtowanie jego końców w formie pałapki akustycznej, tak jak było to czynione w klinach załamujących pierwszych głowic skośnych.

3. GŁOWICE ULTRADŹWIĘKOWE I UKŁADY GŁOWIC STOSOWANE W POMIARACH NAPRĘŻEŃ

3.1. PRZETWORNIKI ULTRADŹWIĘKOWE STOSOWANE W TENSOMETRII

W ultradźwiękowych badaniach metali powszechne zastosowania znalazły dwa rodzaje przetworników: od dawna znane i używane przetworniki piezoelektryczne i nowe, wchodzące w użycie przetworniki elektromagneto-akustyczne (EMAT) [112], [113].

Zaletą przetworników piezoelektrycznych jest wysoka amplituda wytwarzanych przez nie impulsów oraz możliwość generowania za ich pomocą praktycznie wszystkich typów fal. Wadą zaś tych przetworników jest konieczność stosowania ośrodków sprzęgających wypełniających przestrzeń pomiędzy głowicą a powierzchnią badanego elementu. W przypadku fal podłużnych są nimi ciecze (olej, woda) lub specjalne żele, a w przypadku fal poprzecznych - ciecze o wysokiej lepkości (na przykład żywice epoksydowe bez utwardzacza czy miód). Prędkości propagacji fal w ośrodkach sprzęgających są kilkakrotnie mniejsze niż w metalach. Dlatego też wahania grubości tych warstw, wynikające z nierówności powierzchni elementu w miejscu przyłożenia głowicy, są głównym źródłem rozrzutów wyników w precyzyjnych pomiarach czasów przejścia impulsów fal ultradźwiękowych prowadzonych metodą kontaktową.

Śród przetworników piezoelektrycznych wykorzystywane są obecnie przetworniki z litej ceramiki, przetworniki kompozytowe i przetworniki z piezoelektrycznych folii polimerowych. Przetworniki z litej ceramiki charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną, łatwością obróbki i wysoką akustyczną opornością falową wynoszącą dla powszechnie stosowanej w badaniach metali ceramiki z tytaniano-cyrkonianu ołowiu około $33,8 \cdot 10^6$ [kg/(m²s)]. Mają też wysoką temperaturę Curie równą 320°C.

Przetworniki kompozytowe charakteryzują się niższą akustyczną opornością falową co predysponuje je do pracy w mediach takich jak ciecze czy tkanki biologiczne. Przetworniki foliowe mają również niską oporność akustyczną wynoszącą jedynie $4,1 \cdot 10^6$ [kg/(m²s)] a ich dodatkową cechą jest elastyczność i możliwość dowolnego kształtowania.

W ultradźwiękowych badaniach naprężeń medium, w którym najczęściej wzbudzone są fale, jest stal o oporności akustycznej wynoszącej $45 \cdot 10^6$ [kg/(m²s)], a więc zbliżonej do oporności przetworników z litej ceramiki. W głowicach skośnych, stosowanych do wzbudzania fal rozchodzących się skośnie do powierzchni, przetworniki osadzone są na klinach załamujących wykonanych z tworzyw sztucznych o bardzo niskich opornościach akustycznych wynoszących około $3 \cdot 10^6$ [kg/(m²s)]. Aby więc efektywnie wzbudzać fale w klinach celowe byłoby stosowanie przetworników o niższych akustycznych opornościach, na przykład kompozytowych. Jednak w przypadkach badania stali największa różnica oporności akustycznych występuje na granicy cieczy sprzęgającej i metalu. Oporność akustyczna cieczy jest około 30-to krotnie niższa niż oporności stali i na granicy tych ośrodków, przez którą musi przejść nadawana fala, występuje największe niedopasowanie akustyczne. Po raz drugi taką samą granicę fala musi pokonać docierając do przetwornika głowicy odbiorczej. Dlatego też wykorzystanie w głowicach skośnych przetworników kompozytowych jedynie nieznacznie poprawiło by amplitudy odbieranych impulsów.

Przetworniki z litej ceramiki stosowane w głowicach normalnych i skośnych mają dodatkowe zalety - do ich powierzchni można lutować przewody i mają większą wytrzymałość mechaniczną niż kompozytowe. Przetworniki kompozytowe, w których stosowana musi być specjalna, drobnoziarnista ceramika są ponadto wielokrotnie droższe niż wykonane z litej

ceramiki. Zapewne dlatego przetworniki kompozytowe nie znajdują szerszego zastosowania w głowicach do nieniszczących badań metali z wyjątkiem przypadków, w których wykorzystuje się inne ich własności, takie jak mała amplituda "listków bocznych" w wiązce fal czy możliwość generowania sygnałów o szerokim widmie częstotliwościowym.

Poprawę dopasowania akustycznego przetwornika do klina załamującego uzyskać można stosując pomiędzy nimi warstwę ćwierćfalową wykonaną z mieszaniny żywicy epoksydowej i proszku wolframowego. Głowice takie były z sukcesem wykonywane w IPPT [114]. Jednak dla najczęściej stosowanych w badaniach naprężeń częstotliwości równej 4 MHz, grubość warstwy ćwierćfalowej wynosi zaledwie około 0,1 mm. Biorąc pod uwagę małe wymiary stosowanych przetworników i klinów załamujących oraz złożone kształty klinów, wykonanie tak cienkich warstw przy jednoczesnym zachowaniu stałej na całej powierzchni grubości jest w warunkach laboratorium bardzo kłopotliwe.

W odróżnieniu od przetworników piezoelektrycznych przetworniki typu EMAT pracują bezkontaktowo i nie wymagają stosowania żadnego ośrodka sprzęgającego. Do generacji fal wykorzystane są siły Lorentza i zjawisko magnetostrykcji, a fala ultradźwiękowa generowana jest bezpośrednio w wierzchniej warstwie badanego materiału. Bezkontaktowy sposób działania przetworników EMAT jest ich główną zaletą. Wadą tych przetworników jest natomiast niska amplituda wytwarzanych sygnałów akustycznych oraz wysoki pobór mocy. Konieczność zasilania z sieci lub dużych i ciężkich akumulatorów praktycznie uniemożliwia budowę przenośnych aparatów wyposażonych w takie głowice.

Zazwyczaj autorzy publikujący wyniki pomiarów uzyskanych głowicami EMAT przedstawiają ich zalety i przewagi nad przetwornikami piezoelektrycznymi nie wspominając o ich wadach [115]. Podobnie, badacze stosujący przetworniki piezoelektryczne nie wspominają o istnieniu przetworników EMAT. Brak jest w literaturze porównania dokładności pomiarów prędkości fal uzyskiwanych głowicami obu typów, w podobnych warunkach. Dlatego też w rozdziale 3.3 przedstawiono krótko opis głowic wyposażonych w przetworniki typu EMAT, wyniki pomiarów czasu przejścia przeprowadzonych przez autora na różnych stalowych próbkach takimi głowicami i porównanie ich z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu głowic piezoelektrycznych.

Głowice ultradźwiękowe stosowane w przemyśle muszą pracować w znacznie cięższych warunkach niż głowice stosowane w badaniach laboratoryjnych czy w medycynie. Powinny one przetrwać wielokrotny kontakt z chropowatymi, zanieczyszczonymi i twardymi powierzchniami elementów stalowych, muszą pracować w szerokim zakresie temperatur. Dlatego też z punktu widzenia zastosowań przemysłowych wspólną wadą zarówno przetworników piezoelektrycznych jak i typu EMAT jest ich stosunkowo niska odporność na uszkodzenia mechaniczne. Ceramika piezoelektryczna jest łamiwa, a wykonane z cienkich przewodów miedzianych cewki przetworników EMAT są łatwo podatne na przerwanie.

Ważną cechą stosowanych w badaniach przemysłowych głowic jest możliwość prowadzenia pomiaru w czasie ruchu głowicy, czy zastawu głowic, po powierzchni materiału. Jednym ze sposobów bezkontaktowego wzbudzenia i odbioru fal ultradźwiękowych umożliwiających takie badania jest technika laserowego wzbudzenia i interferometrycznego odbioru fal [116, 117].

Rozwiązania techniczne umożliwiające bezkontaktowe badania ultradźwiękowe różnymi technikami opisane są w pracy [118]. Autorzy tej publikacji dokonują też porównania różnych sposobów wzbudzenia i odbioru fal z punktu widzenia możliwości ich zastosowań w przemyśle. Sposób wzbudzenia fal laserem uznają za możliwy do wykorzystania jedynie w laboratorium. Czułości działających bezkontaktowo przetworników EMAT i przetworników

pojemnościowych uznają za zbyt niskie do zastosowań praktycznych. Wspominają o sposobie sprzęgania głowic bez udziału cieczy, polegającym na wytworzeniu wysokiego ciśnienia pomiędzy falowodem głowicy a powierzchnią materiału. Szczegółowo opisują stosowane w defektoskopii koła Sperry, nad rozwojem których sami pracują. Właśnie koło Sperry uznają jako jedyny skuteczny i przydatny sposób wprowadzania fal podczas ruchu głowicy po powierzchni. Niestety koła te, wykonane z miękkiej i niskotłumiącej gumy nie zapewniają stałości czasu przejścia fali pomiędzy przetwornikiem a powierzchnią materiału i nie nadają się do precyzyjnych pomiarów prędkości fal.

Od kilku lat trwają prace nad wykorzystaniem różnego typu przetworników działających ze sprzężeniem powietrznym. Głowicami skupiającymi wyposażonymi w przetworniki piezoelektryczne i pojemnościowe prowadzone są badania nad wykrywaniem wad w laminatach czy strukturach typu plastra miodu, a więc w ośrodkach o stosunkowo niskich opornościach falowych [119].

Trwają też prace nad wykorzystaniem układów z głowicami typu EMAT jako nadajnikami i techniki laserowej do odbioru fal [120]. Te bezkontaktowe sposoby wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych nie wyszły jednak poza laboratoria, a jedynym zastosowaniem przetworników ultradźwiękowych działających bezkontaktowo, ze sprzężeniem powietrznym, są pewne zastosowania mikroskopii ultradźwiękowej.

3.2. KONSTRUKCJE NOWYCH GŁOWIC, UKŁADÓW GŁOWIC I BADANIE ICH WŁASNOŚCI

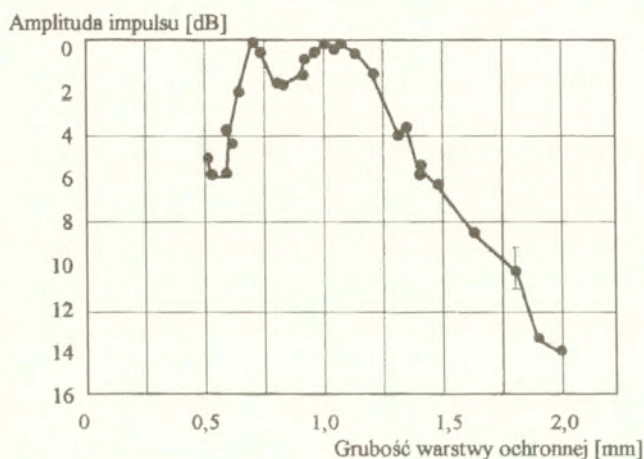
3.2.1. Głowice normalne

Głowicami normalnymi w badaniach ultradźwiękowych nazywa się głowice generujące wiązki fal w kierunku prostopadłym do powierzchni materiału. Najczęściej stosowaną w pomiarach naprężeń głowicą normalną jest głowica na fale poprzeczne. Wykorzystuje się ją do pomiarów czasu przejścia fal poprzecznych o dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji czyli do badania dwójmnożności akustycznej.

Początkowo, gdy jedynym materiałem piezoelektrycznym były przetworniki kwarcowe, generacja fal poprzecznych o polaryzacji równoległej do powierzchni materiału stanowiła problem. Niska skuteczność tych przetworników i ich podatność na pękanie wymagała przyklejania przetwornika do próbki. Stosowano też metodę przyciskania specjalnie oprawionych przetworników do powierzchni materiału za pomocą prasy hydraulicznej. Problemy związane z wytwarzaniem fal poprzecznych jeszcze w latach 60-tych opisane są w pracy [27]. Dostępne obecnie przetworniki ceramiczne spolaryzowane w kierunku prostopadłym do ich grubości i wykonujące drgania ścinania pozwalają na łatwe wzbudzenia i odbiór tych fal głowicami normalnymi.

W stosowanych współcześnie głowicach przetworniki są osłonięte warstwą ochronną wykonaną z mieszaniny żywicy epoksydowej i wypełniacza. Zadaniem tej warstwy jest zabezpieczenie kruchości przetwornika przed mechanicznymi uszkodzeniami i jednocześnie dopasowanie akustyczne przetwornika do badanego metalu. Z punktu widzenia dopasowania akustycznego grubość warstwy powinna być nieparzystą wielokrotnością $1/4$ długości fali w warstwie. Z punktu widzenia ochrony mechanicznej, warstwa powinna być możliwie gruba i wytrzymała. Jednocześnie grubość warstwy jest ograniczona spadkiem amplitudy impulsu wynikającym z tłumienia fal w warstwie, którą w czasie pomiaru impuls musi przebyć dwukrotnie, przy nadawaniu i odbiorze fali.

Aby uzyskać możliwie wysoką odporność warstwy ochronnej na uszkodzenia mechaniczne, w głowicach budowanych przez autora, warstwa ochronna wykonana jest z mieszaniny żywicy epoksydowej i korundu. Korundowy wypełniacz podnosi odporność warstwy na ścieranie i jednocześnie, dzięki wysokiej prędkości propagacji fali w korundzie, akustyczną oporność falową warstwy. Dla częstotliwości fali równej 2 MHz, 1/4 długości fali w materiale warstwy wynosi jedynie około 0,15 mm. Jest to grubość zbyt mała aby warstwa skutecznie spełniała funkcję ochronną. Na rysunku 15 pokazane są wyniki poszukiwania warstwy o grubościach większych od 0,5 mm, zapewniających z jednej strony ochronę przetwornika, a z drugiej wystarczającą w pomiarach amplitudę impulsu. Wykres pokazuje uzyskaną doświadczalnie przez autora zależność amplitudy impulsu od grubości żywiczno-korundowej warstwy ochronnej przetwornika o częstotliwości 2 MHz. Zależność tę uzyskano pobudzając impulsem o czasie narastania około 15 ns obciążony od tyłu masą tłumiącą przetwornik osadzony w metalowej tulei. Pomiar przeprowadzono na stalowej próbce o gładkiej powierzchni, a grubość warstwy ochronnej zmniejszano szlifując czoło głowicy pomiędzy kolejnymi pomiarami.



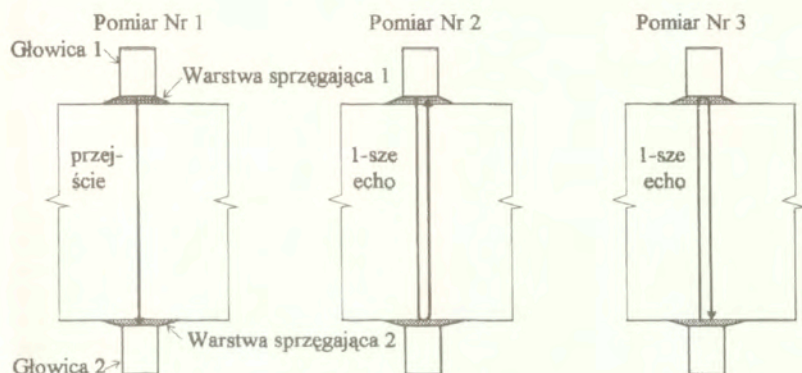
Rys. 15. Zależność amplitudy impulsu wprowadzanego do stali od grubości warstwy ochronnej. Częstotliwość 2 MHz, fala poprzeczna, warstwa ochronna żywiczno-korundowa.

Widoczne są dwa maksima amplitudy dla grubości warstwy 0,7 i 1,1 mm. Odpowiadają one w przybliżeniu pięcio- i siedmiokrotnej grubości warstwy ćwierćfalowej. Widoczne jest też minimum amplitudy dla grubości nieco większej od 0,5 mm i ciągły spadek amplitudy dla grubości większych od 1,1 mm. Przeprowadzone doświadczenie pozwoliło na zastosowanie w budowanych głowicach o częstotliwości 2 MHz, bez uszczerbku dla amplitudy sygnału, stosunkowo grubej i odpornej na uszkodzenia warstwy o grubości 1,1 mm.

Aby wyeliminować wpływ grubej warstwy ochronnej oraz warstwy cieczy sprzęgającej na czas przejścia impulsu stosuje się metodę różnicową. Mierzona jest różnica czasów przejścia od impulsu nadawczego do pierwszego i np. trzeciego "echa dna" próbki. W każdej pojedynczej wartości czasu zawarty jest podwojony czas przejścia przez warstwy ochronną i sprzęgającą. Pomiar różnicowy z wykorzystaniem dwóch ech częściowo eliminuje wpływ tych warstw na wynik. Wadą takiego pomiaru jest jednak konieczność mierzenia czasów przejścia dwóch

impulsów różniących się amplitudą i kształtem. Zmiany amplitudy są wynikiem spadku ciśnienia akustycznego fali w wyniku rozbieżności wiązki i jej tłumienia w ośrodku, a zmiany kształtu - zmianami widma impulsu w wyniku częstotliwościowej zależności tłumienia fal. Powoduje to, że czasy przejścia impulsu mierzone pomiędzy różnymi "echami", choć echa te leżą w polu dalekim przetwornika, nie są równe i zależą od wybranych do pomiaru "ech" i tłumienia fal w ośrodku. Zjawisko to nie ma jednak wpływu na wyniki pomiaru dwójłomności akustycznej, w których czasy przejścia dwóch fal poprzecznych różniących się jedynie kierunkiem polaryzacji, mierzone są na tych samych parach „ech”.

W przypadku badań elementów o dużej grubości i wykonanych z materiałów silnie tłumiących fale poprzeczne, amplituda drugiego i dalszych „ech” jest mała. Autor zaproponował sposób pomiaru eliminującego wpływ warstwy sprzęgającej na mierzony czas przejścia z wykorzystaniem jedynie pierwszego „echa”. Sposób, pokazany schematycznie na rysunku 16, polega na wykorzystaniu dwóch głowic ustawionych na obu powierzchniach elementu i na pomiarach czasu przejścia pomiędzy głowicami i czasu do pierwszych „ech” dla każdej z głowic.



Rys. 16. Schemat pomiaru czasu przejścia fal poprzecznych eliminujący wpływ grubości warstw sprzęgających na wynik pomiaru.

Jeśli wartości czasu przejścia przez warstwy sprzęgające 1 i 2 oraz przez grubość elementu oznaczyć odpowiednio jako t_{S1} , t_{S2} i t_G to mierzone w kolejnych pomiarach czasy przejścia wynoszą:

$$\text{Pomiar 1: } t_1 = t_{S1} + t_{S2} + t_G$$

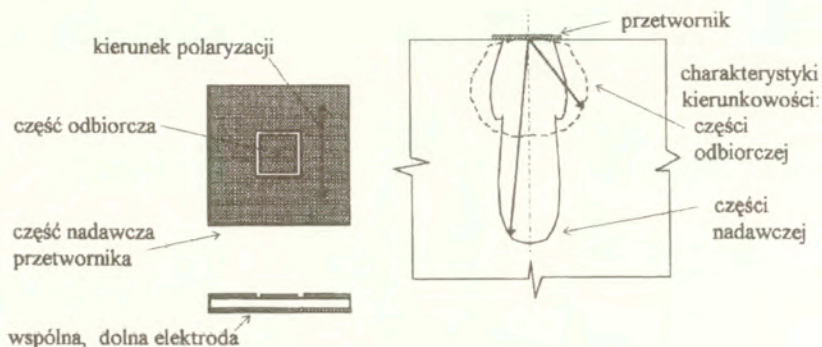
$$\text{Pomiar 2: } t_2 = 2t_{S1} + 2t_G$$

$$\text{Pomiar 3: } t_3 = 2t_{S2} + 2t_G$$

Obliczając czas przejścia jako $t = t_2 + t_3 - 2t_1$ uzyskuje się wartość czasu niezależną od grubości warstw sprzęgających pod głowicami, podobnie jak przy pomiarze różnicowym, między dwoma „echami”.

Stosowane w pierwszych opracowanych w IPPT PAN aparatach oddzielne układy nadajnika i odbiornika nie pozwalały na pracę metodą echa, w której rolę nadajnika i odbiornika pełni kolejno ten sam przetwornik. W roku 1985 autor opracował i wykonał głowicę wyposażoną w jeden przetwornik, którego jedna z elektrod została podzielona. To elektryczne rozdzielenie części nadawczej od odbiorczej umożliwiło współpracę głowicy z aparatem. Schemat tej

głowicy pokazano na rysunku 17. Zewnętrzna część przetwornika, z elektrodą w kształcie pierścienia, działa jako nadajnik generujący wąską wiązkę fal, a mała część środkowa - jako odbiornik. W wyniku eksperymentów stwierdzono, że szeroka charakterystyka kierunkowa części odbiorczej, wynikająca z niskiego stosunku wymiaru odbiorczej części przetwornika do długości fali, nie wpływa na uzyskiwane wyniki pomiarów. Wykorzystanie tej samej płytki ceramicznej do nadawania i odbioru zapewniało utrzymanie nadajnika i odbiornika w tej samej płaszczyźnie.

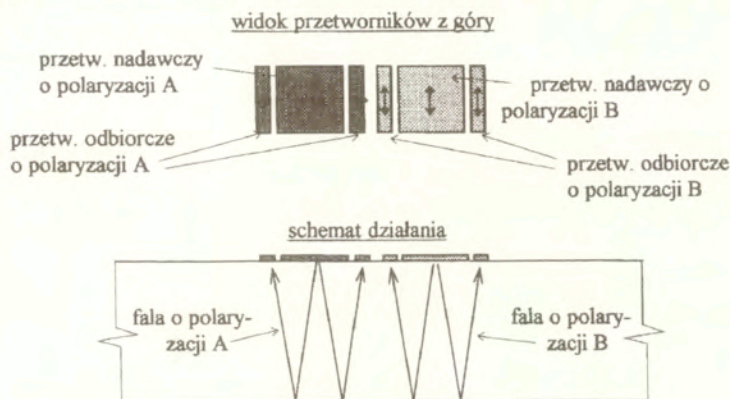


Rys. 17. Schemat przetwornika z dzieloną elektrodą stosowanego w głowicach „obracanych”.

W czasie badania głowicą wyposażoną w jeden przetwornik nadawczo-odbiorczy, jak pokazano na rysunku 17, zmianę kierunku polaryzacji fali uzyskuje się przez obrót głowicy. Zaletą takich „obracanych” głowic jest możliwość pomiarów przy dowolnym kierunku polaryzacji fali. Natomiast niedogodnością głowic obracanych jest możliwość zmiany grubości warstwy sprzęgającej zachodząca podczas obrotu głowicy i będący wynikiem tej zmiany błąd pomiarowy.

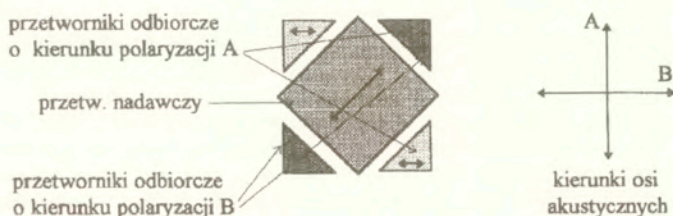
W roku 1987 autor opracował wieloprzetwornikową głowicę piezoelektryczną umożliwiającą wykonanie pomiaru bez konieczności obracania głowicy. Schemat jej budowy pokazuje rysunek 18. Głowica ta składa się z dwóch kwadratowych przetworników nadawczych o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji i z czterech wąskich przetworników odbiorczych. Usytuowanie przetworników odbiorczych po bokach przetworników nadawczych, a więc w pewnej odległości od siebie, miało spowodować uśrednianie wpływu lokalnych zmian grubości warstwy sprzęgającej na mierzone czasy przejścia. Wydłużony kształt zespołu przetworników dobrze wpisywał się w obrys wąskiej powierzchni wieńca koła kolejowego, do pomiarów których głowica została zbudowana. Głowica ta współpracowała z aparatem DEBRO-20 i wykorzystana została w pomiarach naprężeń własnych we wieńcach kotł. monoblokowych wykonanych w Vitry dla Europejskiej Unii Kolejowej [9], a uzyskane przy wykorzystaniu tej głowicy wyniki opisane są w rozdziale 5.3.2. Badane koła były starannie obrobione mechanicznie i wykonane ze stali pochodzącej z ciągłego odlewania charakteryzującej się wysoką czystością i jednorodnością. Te cechy oznaczały też wysoką jednorodność akustyczną materiału. Nieistotny więc był fakt, że obszary materiału obejmowane przez wiązki fal poprzecznych o różnych kierunkach polaryzacji nie pokrywały się. Natomiast rozdzielenie obszarów penetracji fal o różnych kierunkach polaryzacji okazało się wadą tej głowicy w czasie pomiarów na elementach wykazujących niejednorodną

anizotropię strukturalną, takich jak walcowane kształtowniki i odlewane koła kolejowe. Inną wadą takiej głowicy, widoczną szczególnie w czasie pomiarów prowadzonych na elementach o chropowatych powierzchniach, okazały się błędy wynikające z różnic grubości warstw sprzęgających pod rozsuniętymi przetwornikami odbiorczymi.



Rys. 18. Układ przetworników i schemat działania wieloprotwornikowej, nieobracanej głowicy do pomiaru dwójłomności akustycznej.

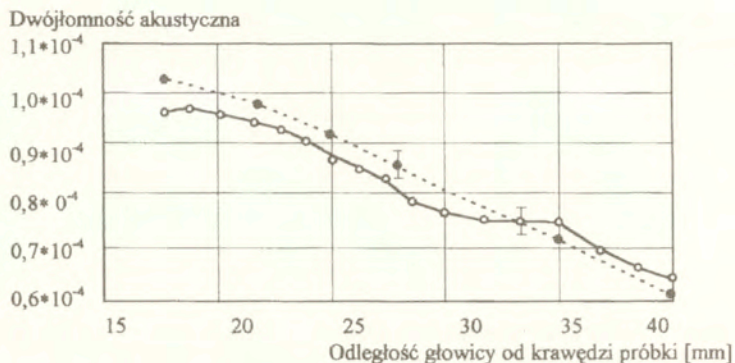
Aby wyeliminować te wady w 1994 autor opracował głowicę składającą się z jednego przetwornika nadawczego i kilku małych przetworników odbiorczych [121]. Cechą charakterystyczną głowicy jest to, że przetwornik nadawczy generuje falę poprzeczną spolaryzowaną pod kątem 45° względem kierunków osi akustycznych materiału. Anizotropia materiału, wywołana naprężeniem lub teksturą, powoduje rozłożenie wytworzonej fali na dwie czyste fale poprzeczne rozchodzące się z różnymi prędkościami, spolaryzowane zgodnie z kierunkami osi akustycznych materiału. Małe przetworniki odbiorcze, ustawione wokół przetwornika nadawczego, posiadają parami polaryzację zgodne z kierunkami osi akustycznych. Dzięki temu każdy z nich reaguje jedynie na dochodzącą do niego falę o zgodnym kierunku polaryzacji. Zaletą rozwiązania jest możliwość pomiaru dwójłomności bez konieczności obracania głowicy w czasie pomiaru oraz penetracja dokładnie tego samego obszaru materiału falami o różnych kierunkach polaryzacji. Układ przetworników w głowicy pokazano na rysunek 19.



Rys. 19. Układ przetworników w nieobracanej, wieloprotwornikowej głowicy do pomiaru dwójłomności akustycznej.

Strzałkami na rysunku zaznaczono kierunki polaryzacji przetwornika nadawczego i trójkątnych przetworników odbiorczych.

Badania przeprowadzone na stalowych próbkach wykazały, że wyniki uzyskane tą głowicą są porównywalne z wynikami otrzymywanymi głowicą obracaną z pojedynczym przetwornikiem nadawczo-odbiorczym. Rezultaty pomiarów porównawczych przeprowadzonych na próbce stalowej o grubości 125 mm z gradientem anizotropii akustycznej pokazuje rysunek 20. Jest to zależność zmierzonej dwójłomności akustycznej materiału próbki od położenia głowicy na powierzchni próbki.



---•--- głowica jednoprzetwornikowa, —○— głowica wieloprzetwornikowa, nieobraca.

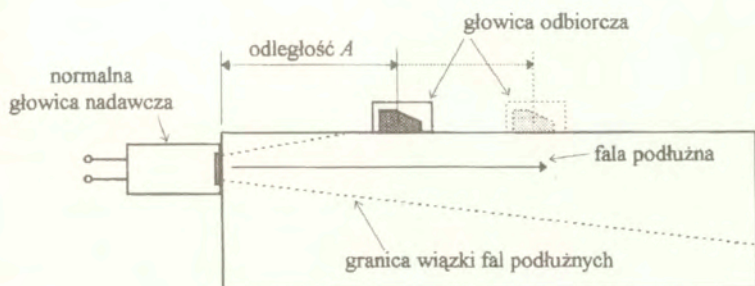
Rys. 20. Rozkłady dwójłomności akustycznej w stalowej próbce zmierzone głowicą "obrącą", wyposażoną w jeden przetwornik nadawczo-odbiorczy i głowicą wieloprzetwornikową.

Widoczne są różnice dwójłomności sięgające $0,4 \cdot 10^{-4}$. Różnica ta jest jednak niewielka i równoważna różnicy naprężenia jednoosiowego wynoszącej około 15 MPa. Głowica wieloprzetwornikowa "wypłaszcza" zmiany czasów przejścia, a spowodowane jest to najprawdopodobniej tym, że w głowicy tej obszar w jakim uśredniane są prędkości fal jest większy niż w jednoprzetwornikowej głowicy obracanej. Wynika to z ustawienia przetworników odbiorczych wokół przetwornika nadawczego. Opisana głowica „nieobrąca” była z powodzeniem stosowana w pomiarach naprężeń w kołach łańch wykazujących niejednorodności tekstury [122].

W czasie pomiarów opisanymi wyżej głowicami fale o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji propagują się w tym samym, lub prawie tym samym, obszarze materiału. Wiadomo również, że temperaturowe zależności prędkości propagacji dla obydwu fal różniących się jedynie kierunkiem polaryzacji są praktycznie jednakowe, a zależność współczynnika elastoakustycznego dla fal poprzecznych od temperatury jest niska i może być pominięta. Założyć więc można, że temperatura ośrodka, w którym rozchodzą się obydwie fale wpływa na nie jednakowo, niezależnie od kierunku polaryzacji i nie wpływa na wartość obliczonej dwójłomności. Zmiany wartości dwójłomności próbek stalowych wywołane zmianami temperatury w zakresie 15 - 35°C były niemierzalne. Dlatego też głowice do pomiarów dwójłomności akustycznej nie były wyposażane w czujniki temperatury i niepotrzebne było wyznaczanie dla nich poprawek temperaturowych.

3.2.2. Głowice na fale podpowierzchniowe

Początkowo jedynym sposobem pomiaru prędkości fal podłużnych rozchodzących się w powierzchniowej warstwie materiału (fali podpowierzchniowej) było nadawanie fali podłużnej głowicą przyłożoną do bocznej ściany element, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 21.



Rys. 21. Schemat pomiaru prędkości fali podłużnej w powierzchniowej warstwie materiału z wykorzystaniem głowicy normalnej jako nadajnika.

Pomiary czasu przejścia pomiędzy momentem nadania fali i jej odbioru dla dwóch odległości A głowicy odbiorczej od krawędzi próbki pozwalały na obliczenie przybliżonej prędkości propagacji fali w powierzchniowej warstwie materiału. Niedogodnością tej techniki była konieczność dostępu do bocznej ściany badanego elementu, z której fala była nadawana.

W latach 70-tych, wraz z rozpowszechnieniem się sprawnych ultradźwiękowych przetworników ceramicznych, możliwe stało się wykorzystanie głowic skośnych nie tylko do odbioru ale i do generacji fal podpowierzchniowych. Pozwoliło to na ich wzbudzenie i odbiór przy dostępie do tylko jednej płaskiej powierzchni elementu. Podłużna fala podpowierzchniowa jest obecnie wzbudzana głowicami skośnymi wyposażonymi w kliny załamujących o kącie równym pierwszemu kątowi krytycznemu i nazywana w literaturze jako surface-skimming wave, subsurface wave, gołownaja volna lub Krichwelle. Początkowo podłużną falę podpowierzchniową wykorzystywano do wykrywania wad leżących blisko powierzchni materiału [123].

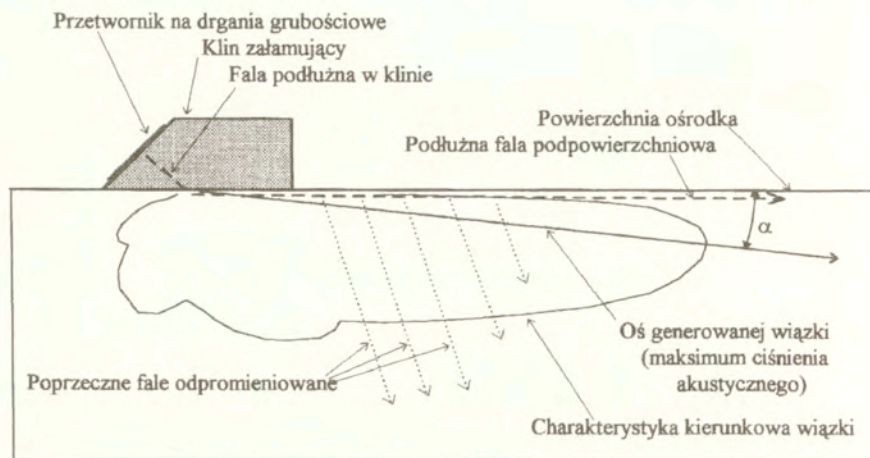
Głowice skośne na fale podpowierzchniowe wyposażone są w kliny załamujące wykonane z tworzywa sztucznego o małej prędkości propagacji fali (zazwyczaj z polimetakrylanu-metylu), a kąt klina obliczany jest z prawa Snelliusa. Znaczącą zależność prędkości fal w tworzywach sztucznych i rozbieżności wyników jej pomiarów wykonanych dla polimetakrylanów-metylu pochodzących od różnych producentów (opisane w rozdziale 1.3.3) autor przeprowadził własne pomiary temperaturowej zależności prędkości propagacji fali podłużnej w polimetakrylanie-metylu (Plexi) produkcji polskiej. Uzyskane zmiany prędkości opisuje wzór:

$$(34) \quad V_L = 2715 - 3.1(T - 22)$$

Pomiary przeprowadzono na płycie o grubości 32 mm, w zakresie temperatur od 0 do 42°C. Klina wykonane z takich właśnie płyt stosował autor w budowanych przez siebie głowicach skośnych. W porównaniu z wynikami przedstawionymi w pracy [56] tworzywo produkowane

w Polsce charakteryzuje się o blisko 35% silniejszą zależnością prędkości fali podłużnej od temperatury.

Sposób wzbudzania fali podpowierzchniowej głowicą wyposażoną w klin załamujący i pionową charakterystykę kierunkową generowanej przez taką głowicę wiązki w stali pokazano schematycznie na rysunku 22.



Rys. 22. Schemat działania głowicy skośnej na fale podpowierzchniowe.

Oś wiązki fal w ośrodku jest nachylna w stosunku do powierzchni ośrodka pod kątem α i jedynie niewielka część energii fali rozchodzi się równoległe do powierzchni próbki jako fala podpowierzchniowa. Powoduje to, że amplituda odbieranej na powierzchni fali jest niewielka. Dodatkową przyczyną szybkiego spadku amplitudy podpowierzchniowej fali podłużnej jest ciągłe odpromieniowywanie fali poprzecznej w głąb materiału. Te dwa czynniki powodują, że amplitudy impulsów odbieranych w znacznych odległościach od nadajnika są niskie. W pracy [124] z 1978 roku opisującej charakterystyki kierunkowości wiązek fal podłużnych wytwarzanych z użyciem klinów o kącie równym pierwszemu kątowi krytycznemu, autorzy stwierdzili nawet, że amplituda fali na samej powierzchni swobodnej materiału jest bliska zero. W tej samej pracy przedstawiono też wyniki mówiące, że kąt α pod jakim rozchodzi się promień o maksymalnej amplitudzie (oś wiązki) wynosi około 12° i że jest on praktycznie niezależny od stosunku wymiaru boku przetwornika do długości fali w materiale.

W tym samym roku zespół innych badaczy przeprowadził doświadczenia stosując do wzbudzania fali technikę zanurzeniową. Generowane tą techniką w aluminium podłużne fale podpowierzchniowe nazwane zostały "fast surface wave" choć ich prędkość odpowiadała prędkości objętościowej fali podłużnej w aluminium [125]. W pracy tej autorzy opisali jeszcze jedną, ważną z praktycznego punktu widzenia cechę fali podpowierzchniowych - brak zależności jej prędkości od chropowatości powierzchni materiału.

W pracy [126] opublikowanej w następnym roku przedstawione są wyniki pomiarów osłabienia fali podpowierzchniowej rozchodzącej się w stali. Prowadząc pomiary metodą kontaktową autorzy uzyskali spadek amplitudy fali zgodny z:

(35)

$$A = A_0 * r^{(-1.7)}$$

gdzie: A - amplituda fali,
 r - odległość od nadajnika.

Jednym z praktycznych wniosków z pracy jest stwierdzenie, że maksymalna odległość na jakiej podłużna fala podpowierzchniowa o częstotliwości 1 - 2 MHz może być odebrana wynosi dla stali około 300 mm.

Schemat pomiaru czasu przejścia podpowierzchniowej fali podłużnej, mierzonego układem różnicowym, składającym się z jednej głowicy nadawczej i dwóch głowic odbiorczych ustawionych w jednej linii pokazano na rysunku 28. Mierzony czas jest odwrotnie proporcjonalny do średniej prędkości fali na drodze pomiędzy środkami głowic odbiorczych. Przyjmuje się, że objętość materiału w jakim prędkość fali jest uśredniania odpowiada prostopadłościanowi o długości odpowiadającej odległości między głowicami odbiorczymi, szerokości równej szerokości przetworników odbiorczych i małej, liczonej w ułamkach milimetra, grubości.

Niektóre doniesienia literaturowe informują o częstotliwościowej zależności grubości warstwy materiału, w której uśredniana jest prędkość podpowierzchniowej fali podłużnej. Występowanie takiej zależności byłoby bardzo korzystne. Stosując fale o różnych częstotliwościach możliwe byłoby pomiary rozkładów naprężeń w kierunku normalnym do powierzchni materiału. W pracy [127] opisane są pomiary zmian czasów przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej w próbkach wykonanych z żeliwa ciągliwego. Zastosowany układ pomiarowy składał się jedynie z jednej głowicy nadawczej i jednej odbiorczej, przymocowanych do stalowego pręta. Autorzy założyli, że fala podpowierzchniowa to "...fala objętościowa i dlatego czuła na pole naprężeń w warstwie o skończonej grubości, a nie tylko na powierzchni. Dodatkowo, głębokość penetracji może być regulowana zmianami częstotliwości fali co umożliwiła pomiary gradientów naprężeń". W eksperymencie opisanym w pracy autorzy zmierzli jedynie zmiany czasów przejścia fali w próbkach poddanych jednoosiowemu ścisnaniu i rozciąganiu, a więc obciążeniom nie wywołującym gradientów naprężeń. Tym samym nie dowiedli tezy o zależności głębokości penetracji od częstotliwości fali.

W wydanej 5 lat później pracy [128] stwierdzono, że "...metoda z zastosowaniem podpowierzchniowej fali podłużnej jest szczególnie odpowiednia do wykrywania gradientów naprężeń pod powierzchnią ponieważ fala rozchodzi się wzdłuż powierzchni, a głębokość penetracji może być regulowana częstotliwością głowicy" (str. 159). Autorzy założyli, że podobnie jak w fali powierzchniowej, energia fali podpowierzchniowej skoncentrowana jest w powierzchniowej warstwie materiału o grubości równej długości fali. Wykonali pomiary zmian czasu przejścia falami o częstotliwościach 1, 2,25 i 5 MHz stosując różnicowy układ głowic o odległości pomiędzy odbiornikami wynoszącej zaledwie 25 mm. Głowice przyłożone były do powierzchni próbki poddanej czteropunktowemu zginaniu. Nie jest jasne jednak czy do powierzchni, na której pojawiają się naprężenia ścisające czy rozciągające. Na odcinku próbki poddanemu czystemu zginaniu naprężenia te zmieniają się liniowo na grubości próbki. Autorzy uzyskali zaskakujący wynik: czas przejścia fali nie odpowiada odległości pomiędzy głowicami odbiorczymi, a obliczone współczynniki elastoakustyczne mają wartości $-3,16 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] dla częstotliwości 2,25 MHz i $-6,16 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] dla częstotliwości 5 MHz. Wykazują więc zależność od częstotliwości ale jednocześnie ich wartości drastycznie odbiegają od wartości uznanych za prawidłowe.

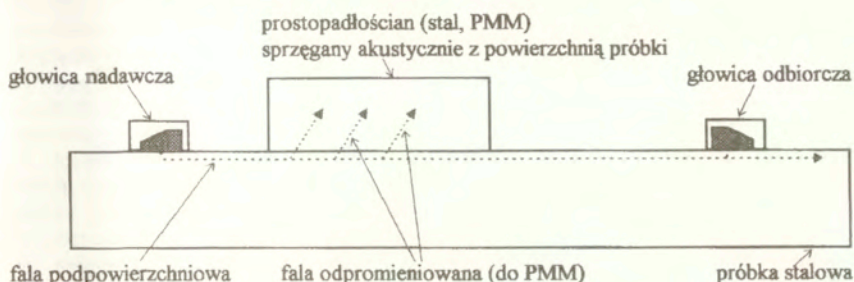
Jedną z prawdopodobnych przyczyn faktu, że ani mierzone czasy przejścia nie odpowiadają podanej odległości pomiędzy odbiornikami, ani wartości współczynników elastoakustycznych

nie są prawidłowe może być to, że falą odbieraną przez dalszy odbiornik była nie fala podpowierzchniowa a wielokrotnie od niej silniejsza fala odbita od dna próbki. W czasie pomiarów na nieznanych próbkach błędy takie wielokrotnie przydarzały się autorowi. W latach 1987-1989 autor wykonał próby oceny grubości warstwy materiału w jakiej uśredniana jest prędkość fali podpowierzchniowej. Badania zainspirowane zostały przez jednego z użytkowników aparatu DEBRO-20 (koncern Thyssen Stahl AG) produkującego szyny kolejowe. W wyniku badań tensometrycznych (nawiercanie otworka otoczonego rozetką tensometryczną) wykonanych w laboratorium Thyssen Forschung w Duisburgu stwierdzono silne gradienty podłużnych naprężeń własnych w wierzchniej warstwie materiału główek tych szyn. W celu przeprowadzenia badań ultradźwiękowych autor wykonał dwa identyczne 6-cio przetwornikowe zestawy głowic o częstotliwościach 4 i 1,8 MHz. Odpowiadające tym częstotliwościom długości fal w stali to odpowiednio 1,49 i 3,3 mm. Głowicami tymi przeprowadzono pomiary naprężeń w kilku szynach poddanych uprzednio badaniom tensometrycznym. Wyniki eksperymentu przeprowadzonego na płaskich, starannie przygotowanych próbkach pokazały, że uzyskiwane metodą ultradźwiękową wyniki praktycznie nie zależą od częstotliwości fali. Dowodzi to, że mierzony czas przejścia fali zależy jest od średniej prędkości w warstwie materiału o grubości znacznie mniejszej niż długość zastosowanej fali. Potwierdzeniem tego wniosku są wyniki badań naprężeń własnych w szynach produkowanych dla szybkiej kolei francuskiej. W opisanych w rozdziale 5.1. badaniach uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników ultradźwiękowych, przeprowadzonych podpowierzchniowymi falami podłużnymi o częstotliwości 4 MHz, i tensometrami oporowymi mierzącymi odkształcenia na samej powierzchni materiału. Podobnie, wysoką zgodność pomiarów ultradźwiękowych i wykonanych metodą dyfrakcji promieni X, a więc metodą zbierającą informacje w warstwy materiału o grubości pojedynczych atomów, uzyskano w badaniach kół kolejowych opisanych w rozdziale 5.3.

Zaletą fali podpowierzchniowej, w odróżnieniu od fali powierzchniowej, jest jej nieczułość na stan powierzchni materiału, w którym się rozchodzi. Ciecz sprzęgająca rozlana pomiędzy głowicami i zanieczyszczenia powierzchni mają pomijalnie mały wpływ na mierzone czasy przejścia. Autor potwierdził te obserwacje na próbkach o różnym stanie powierzchni. Badania prowadzone z wykorzystaniem nanosekundowego miernika czasów przejścia wykazały, że wpływ stanu powierzchni i jej zanieczyszczeń jest na czas przejścia tych fal niemierzalny. Autor zbadał też czy stalowe i wykonane z tworzyw sztucznych elementy leżące na powierzchni, na drodze fal, mogą powodować zmiany czasu przejścia. Celem badania było sprawdzenie czy w zestawach wielogłowicowych, kliny załamujące innych głowic oraz magnesy utrzymujące głowicę w kontakcie z badanym przedmiotem i znajdujące się pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem fal podpowierzchniowych, mają wpływ na wynik pomiaru czasu przejścia. Schemat badania pokazano na rysunku 23. Rezultaty prób pokazały, że obserwowany był jedynie nieznaczny wpływ obciążenia powierzchni na amplitudę odbieranych impulsów wynikający z odpromieniowania fali podłużnej do znajdujących się na jej drodze, na powierzchni materiału, elementów wykonanych z PMM. Dla elementów stalowych zmiany czasu przejścia oraz zmiany amplitudy impulsu były niemierzalne.

Opisywane w obcych pracach [59], [64] głowice na podpowierzchniowe fale podłużne wyposażone były w duże przetworniki piezoelektryczne, o boku kilkunastu milimetrów, lub nawet jednego cala. Duże przetworniki umieszczane muszą być na odpowiednio dużych i wysokich klinach załamujących. Prowadzi to do wzrostu wymiarów głowicy i wzrostu powierzchni kontaktu klina z badanym materiałem. W głowicach wyposażonych w kliny

załamujące o dużych wymiarach znaczna różnica współczynników rozszerzalności termicznej pomiędzy tworzywem sztucznym i ceramiką przetwornika, przy badaniach w szerokim

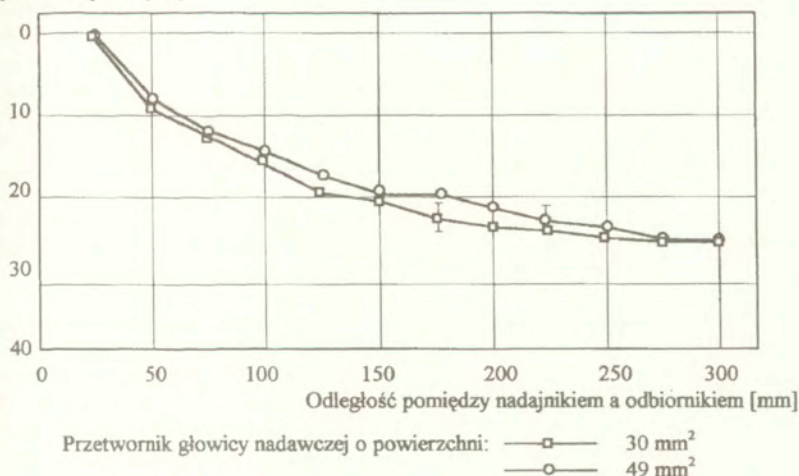


Rys. 23. Schemat badania wpływu elementów głowicy stykających się z powierzchnią materiału na mierzone czasy przejścia fal podpowierzchniowych.

zakresie temperatur, prowadzi do utraty spójności między przetwornikiem a klinem. Poważną niedogodnością głowic z dużymi przetwornikami, nieistotną w pomiarach laboratoryjnych prowadzonych w stałej temperaturze, jest duża objętość klina i wynikający stąd długi czas stabilizacji temperatury w klinie.

W odróżnieniu od fal objętościowych rozchodzących się w ośrodkach nieograniczonych i wytwarzanych przetwornikami o skończonych wymiarach, spadek ciśnienia akustycznego fali podpowierzchniowej ze wzrostem odległości od źródła jest słabo zależny od wielkości przetwornika i długości fali w ośrodku. Na rysunku 24 pokazano zmierzone zależności

Amplituda impulsu [dB]



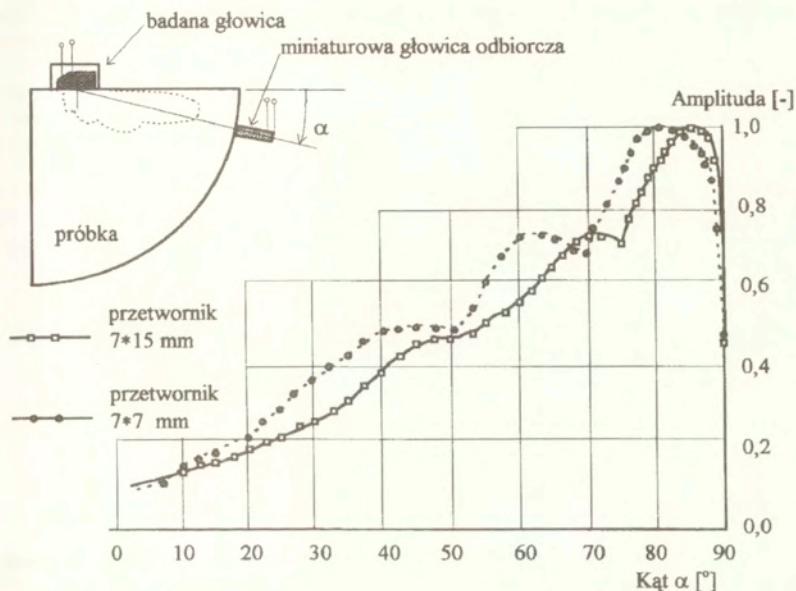
Rys. 24. Zależność amplitudy impulsu podłużnej fali podpowierzchniowej od odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem dla dwóch różnych głowic nadawczych.

amplitudy impulsu od odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, dla nadajników o różnych wielkościach. Pomiar przeprowadzono dla częstotliwości fali równej 4 MHz stosując do odbioru fal głowicę wyposażoną w przetwornik o wymiarach 2*5 mm. Jako poziom odniesienia przyjęto amplitudy odbieranych dla odległości między głowicą nadawczą i odbiorczą równej 50 mm. Spadki amplitud impulsów dla przetworników nadawczych różniących się znacznie powierzchnią, obserwowane przy wzroście odległości między głowicą nadawczą i odbiorczą, są podobne. Oznacza to, że w pomiarach prowadzonych podłużnymi falami podpowierzchniowymi do nadawania tych fal wykorzystywane mogą być przetworniki znacznie mniejsze niż stosowane powszechnie w głowicach skośnych używanych w defektoskopii ultradźwiękowej. Obserwacja ta pozwoliła autorowi na budowę zwartych głowic i ich zestawów, wyposażonych w małe przetworniki piezoelektryczne oraz niskie i krótkie kliny załamujące. Takie zestawy umożliwiają prowadzenie pomiarów na elementach, w których wymiary płaskich powierzchni, do których głowice mogą być sprzęgnięte, są ograniczone.

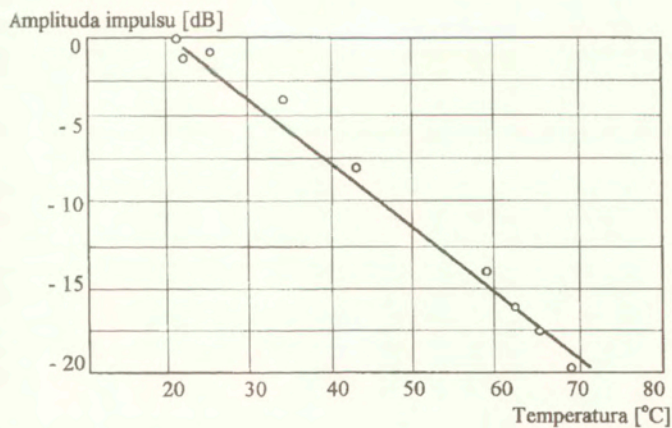
W celu zbadania rozkładu ciśnienia akustycznego w wiązkach generowanych przez głowice wyposażone w małe przetworniki autor wykonał pomiary pionowych charakterystyk kierunkowych takich głowic. Na rysunku 25 pokazane są przykładowe wyniki pomiarów dla dwóch głowic na podłużne fale podpowierzchniowe o częstotliwości 2 MHz. Głowice wyposażone były w identyczne kliny załamujące o kącie równym $27,2^\circ$ (pierwszy kąt krytyczny dla fali podłużnej padającej na granicę PMM - stal dla temperatury pokojowej) i przetworniki o szerokości 7 mm i wysokościach 7 i 15 mm. Głowice ustawione były na stalowym wzorcu W1 i działały jako nadajniki. Wytwarzane przez nie impulsy odbierane były z walcowej powierzchni wzorca za pomocą specjalnie wykonanej miniaturowej głowicy odbiorczej na fale podłużne, sprzężanej z powierzchnią wzorca za pomocą cieczy. Głowica ta wyposażona była w przetwornik o wymiarach 2*1mm i umożliwiała quasi-punktowy pomiar amplitudy fal. Na zależnościach amplituda-kąt pokazanych na wykresie widoczne są różnice w kącie przy jakim obserwowane jest maksimum amplitudy fali. Dla przetwornika o wymiarach 7*7 mm kąt ten wynosi około 82° , a dla przetwornika 7*15 odpowiednio 85° . Oś wiązki fal generowanych w materiale wzorca jest mniej odchylona od powierzchni materiału dla przetwornika większego. Jednak amplituda fali mierzona tuż pod powierzchnią, a więc w tej części wiązki, która wykorzystywana jest w pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi, praktycznie nie zależy od wielkości przetwornika. Jest ona dla obu przetworników w przybliżeniu dwukrotnie niższa niż amplituda w osi wiązki. Oznacza to, że w pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi, bez szkody dla amplitudy odbieranych impulsów i tym samym bez ograniczenia odległości na jakich pomiary czasu przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych mogą być dokonywane, stosowane mogą być głowice nadawcze wyposażone w małe przetworniki.

W zestawach głowic na podpowierzchniowe fale podłużne przeznaczonych do badań w szerokim zakresie temperatury, silna temperaturowa zależność prędkości propagacji fali w materiale klina załamującego wpływa w widoczny sposób na amplitudy odbieranych impulsów. Zależność amplitudy impulsu od temperatury pokazano na rysunku 26. Pomiary przeprowadzono w komorze termicznej wykorzystując jedną głowicę nadawczą i jedną odbiorczą sprzęgnięte na stałe do stalowej próbki. Kąty klinów obu głowic były równe $27,2^\circ$. Odległość między głowicami wynosiła 400 mm, a częstotliwość fal 2 MHz. Widoczny jest silny, sięgający 20 dB, spadek amplitudy dla wyższych temperatur. Te zmiany amplitudy spowodowane są różnymi temperaturowymi zależnościami prędkości fali podłużnej w stali i

PMM oraz będącą tego wynikiem temperaturową zależnością kąta krytycznego, zgodnie z którym wykonane powinny być kliny głowic na fale podpowierzchniowe. Z wykresu

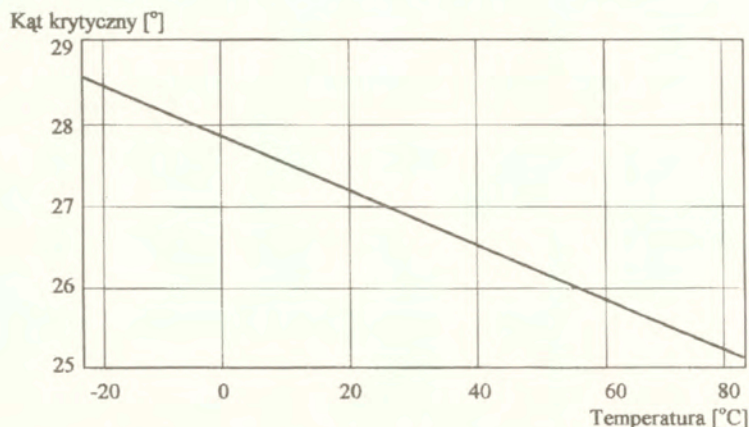


Rys. 25. Schemat badania i charakterystyki kierunkowości głowic na podłużne fale podpowierzchniowe o różnych wielkościach przetworników.



Rys. 26. Zależność amplitudy odbieranego impulsu podpowierzchniowych fal podłużnych od temperatury.

na rysunku 27 pokazującego tę zależność widać, że dla zakresu temperatur od -10°C do $+80^{\circ}\text{C}$ wartość tego kąta zmienia się od $28,2^{\circ}$ do $25,2^{\circ}$. W praktyce oznacza to, że prowadząc pomiary w szerokim zakresie temperatur głowicą o kącie klina dopasowanym do temperatury pokojowej, w temperaturach niższych i wyższych od niej obserwowany będzie spadek amplitudy fali podpowierzchniowej. Oznacza to również, że kąt pod jakim odpromieniowuje do klina głowicy odbiorczej fala podłużna zależy od temperatury.



Rys. 27. Zależność wartości 1-go kąta krytycznego (PMM / stal) od temperatury.

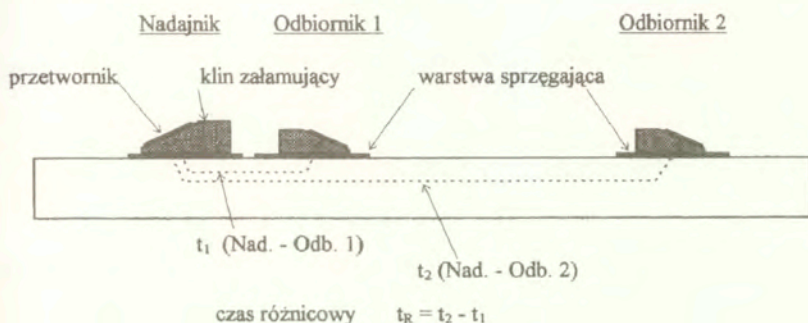
Badania doświadczalne przeprowadzone przez autora z wykorzystaniem głowic wyposażonych w kliny o różnych kątach wykazały, że dla głowic pracujących w szerokim zakresie temperatur optymalnym kątem klina jest kąt $26,8^{\circ}$. Jest to kąt o $0,4^{\circ}$ mniejszy niż kąt wyznaczony dla temperatury pokojowej. Dla tego kąta klina, w zakresie temperatur od -10°C do $+70^{\circ}\text{C}$, amplituda odbieranego impulsu zmienia się w granicach około 12 dB. Zmiany o tej wielkości są porównywalne ze zmianami amplitud wywołanymi wahaniami chropowatości i jakości sprzężenia akustycznego.

3.2.2.1. Układy głowic na fale podpowierzchniowe

Najprostszym układem do pomiaru czasu przejścia fali podpowierzchniowej jest zestaw składający się z dwóch głowic - nadajnika i umieszczonego w jednej linii z nim odbiornika. Układ taki wykorzystywany był na przykład w pracy [64]. Mierzony w ten sposób czas przejścia fal podpowierzchniowych jest sumą czasów przejścia fali przez obydwa kliny załamujące, warstwy sprzęgające pod klinami i czasu propagacji impulsu w materiale próbki. Czasy przejścia w klinach załamujących wykonanych z tworzywa sztucznego silnie zależą od temperatury, a chropowatości powierzchni materiału powodują zmiany grubości warstw sprzęgających i czasu przejścia impulsu przez te warstwy. Przy stałej temperaturze własne wahania czasu przejścia potrzebnego fali na pokonanie warstwy cieczy sprzęgającej decydują o rozrzutach mierzonych czasów przejścia. W pomiarach na próbkach o nieprzygotowanej, chropowatej powierzchni, zmiany czasu spowodowane wahaniami grubości warstwy sprzęgającej praktycznie uniemożliwiają prowadzenie pomiarów naprężeń takim układem dwóch głowic. Dlatego też aby zredukować te niepożądane wpływy sprzężenia i temperatury

na wynik pomiaru stosuje się różnicowe zestawy głowic, składające się z jednej głowicy nadawczej i dwóch odbiorczych. Układ taki pokazano na rysunku 28.

Zakładając, że obydwie głowice odbiorcze są identyczne przyjąć można, że czasy przejścia w ich klinach załamujących są takie same. Identyczne są też zmiany czasu przejścia w obydwu klinach wywołana zmianami temperatury. Jeśli przyjąć dodatkowo, że chropowatość powierzchni badanego elementu jest stała na jego powierzchni to grubości warstw sprzęgających pod głowicami odbiorczymi są jednakowe lub podobne. W ten sposób w znacznym stopniu wpływ klinów odbiorczych i chropowatości powierzchni na wynik pomiaru zostaje wyeliminowany.

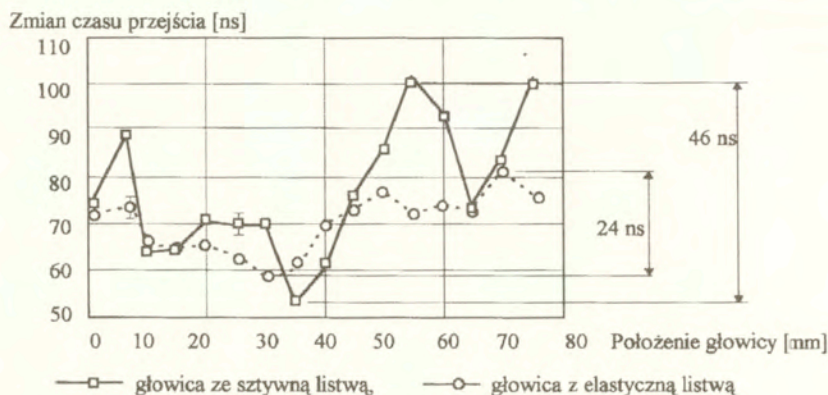


Rys. 28. Różnicowy układ głowic na podpowierzchniowe fale podłużne.

Jednakże rozrzuty czasów przejścia mierzonych układem różnicowym na nieobrobionych elementach, i spowodowane wpływem zmiennej na powierzchni chropowatości, sięgają kilkudziesięciu, a na elementach skorodowanych, o dużych nierównościach powierzchni nawet kilkuset nanosekund. Pociąga to za sobą odpowiednio wysokie rozrzuty wartości obliczanych na podstawie wyników pomiarów czasu naprężeń, konieczność wykonania wielu pomiarów i obliczenia średniego czasu przejścia. Przykładowo, dla odległości pomiędzy odbiornikami równej 180 mm, zmianie czasu przejścia fali podłużnej w stali o 50 ns odpowiada zmiana naprężenia o około 100 MPa. Wysokie rozrzuty czasów przejścia mierzonych układem różnicowym powodują, że jego zastosowania ograniczają się do pomiarów naprężeń w elementach o obrobionych, gładkich powierzchniach. Aby umożliwić praktyczne zastosowanie tensometrii ultradźwiękowej konieczny był znaczny postęp w eliminacji wpływu lokalnych zmian sprzężenia akustycznego na mierzone czasy przejścia fal podpowierzchniowych.

Na grubość warstwy sprzęgającej wpływa nie tylko chropowatość powierzchni elementu ale również sposób w jaki głowice zestawu są ze sobą połączone i dociskane do tej powierzchni. Pierwsze budowane przez autora układy głowic na fale podpowierzchniowe to układy różnicowe. Początkowo poszczególne głowice układu umieszczane były w sztywnych obudowach, a cała głowica dociskana była do powierzchni próbki zewnętrznymi magnesami. W 1988 roku autor przeprowadził badania wpływu nierówności powierzchni badanego elementu na czasy przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych mierzonych układami głowic różniącymi się sztywnością listwy łączącej poszczególne głowice. Na rysunku 29 pokazano rozrzuty czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej wywołane wahaniami grubości warstwy sprzęgającej. Pomiaru wykonano przykładając głowicę do powierzchni stalowej, zgrubnie obrobionej próbki. Widoczne są blisko dwukrotnie niższe zmiany czasów przejścia zmierzonych układem elastycznym, umożliwiającym dopasowywanie się

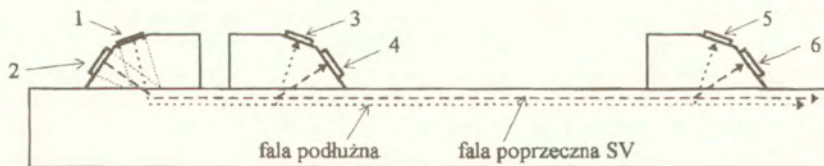
poszczególnych głowic układu do lokalnych nierówności powierzchni próbki. Wraz z zastosowaniem elastycznych połączeń między poszczególnymi głowicami autor wprowadził do obudów poszczególnych głowic magnesy, z których każdy dociskał do powierzchni mierzonego elementu jedną z głowic. W rezultacie wprowadzonych zmian rozrzuty czasu przejścia spowodowane zmianami sprężenia zostały zredukowane. Jednocześnie wymiary i



Rys. 29. Rozrzuty wartości czasu przejścia zmierzone układami różnicowymi wyposażonymi w sztywną i elastyczną listwę łączącą poszczególne głowice.

ciężar nowych zestawów głowic zostały obniżone co umożliwiło ich sprzęganie do powierzchni pionowych (np. do boku głowki szyny bez potrzeby obracania szyny).

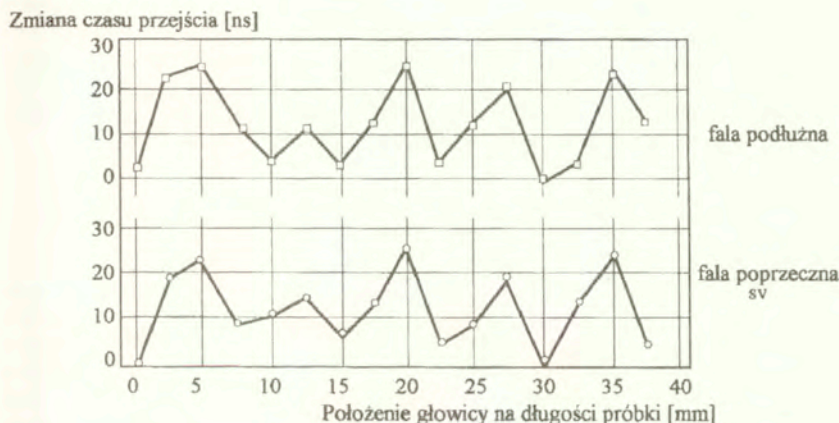
Dowodem na to, że głównym powodem obserwowanych rozrzutów wyników pomiaru czasu przejścia fal podpowierzchniowych jest zmienna, wywołana chropowatością, grubość warstwy cieczy sprzęgającej, a nie na przykład lokalne zmiany prędkości propagacji fal w materiale próbki, są wyniki innego eksperymentu przeprowadzonego przez autora. Na rysunku 30 pokazano schemat zestawu głowic wykorzystanego w pomiarach. Był to różnicowy zestaw składający się z trzech identycznych klinów załamujących, na każdym z których osadzono dwa przetworniki na drgania grubościowe. Jeden z przetworników służył do nadawania lub odbioru fali podłużnej, drugi - fali poprzecznej. Geometria klinów została



- 1 - przetwornik nadawczy fali podłużnej, 4 i 6 - przetworniki odbiorcze fali poprzecznej
 2 - przetwornik nadawczy fali poprzecznej, 3 i 5 - przetworniki odbiorcze fali podłużnej,

Rys. 30. Schemat budowy różnicowego zestawu głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne typu SV.

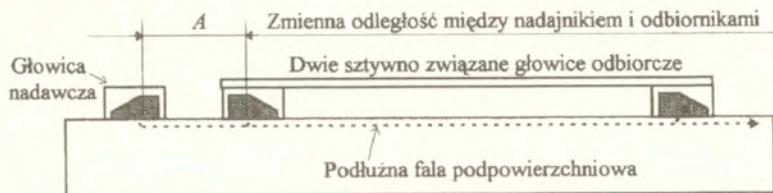
dobrana tak, że obszar przechodzenia fali przez warstwę cieczy sprzegającej był jednakowy dla fal podłużnych i poprzecznych. Zestawem takich głowic wykonano szereg pomiarów czasów przejścia sprzegając go co 2,5 mm do powierzchni nieobrobionej stalowej próbki. Wyniki pomiarów pokazuje rysunek 31. Widoczne są podobne zmiany czasów przejścia fal podłużnych i fal poprzecznych wynoszące odpowiednio 27 i 28 ns. Fale podłużne i poprzeczne charakteryzują się różnymi częstotliwościami na zmiany struktury materiału i naprężenia. Podobne zmiany czasów przejścia dowodzą, że głównym czynnikiem powodującym rozrzuty mierzonych czasów są wahania grubości warstwy sprzegającej. Ta z kolei zależy od lokalnej chropowatości powierzchni materiału w obszarze styku klina załamującego z powierzchnią materiału.



Rys. 31. Zmiany czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych spowodowane zmianami grubości warstwy cieczy sprzegającej.

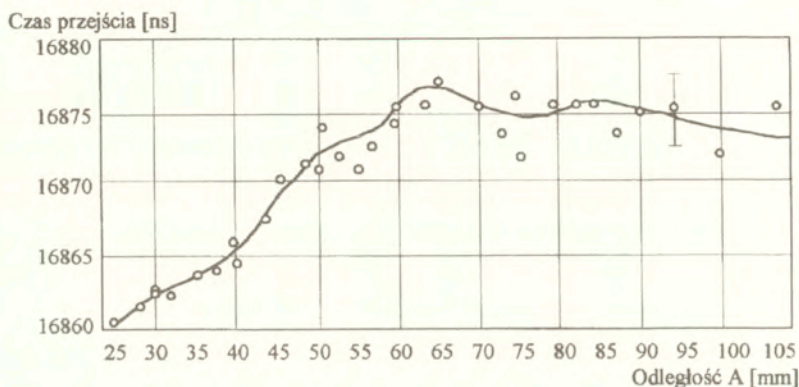
Czasy mierzone różnicowym układem głowic, pomijając wpływy zmian sprzężenia akustycznego czy temperatury, zależne są głównie od odległości między głowicami odbiorczymi, a więc od długości drogi fali w badanym materiale. Znaczący wpływ na mierzony czas ma też odległość między głowicą nadawczą, a parą głowic odbiorczych. Wynika to z faktu, że fala rozchodząca się w materiale nie jest falą płaską. Głowica nadawcza generuje rozbieżną wiązkę fal, posiadającą pole bliskie, w obszarze którego amplituda i faza impulsu ulegają zmianom wraz z odległością od przetwornika nadawczego.

Autor przeprowadził badania zależności wyników pomiaru czasu metodą różnicową od odległości między głowicą nadawczą a zestawem dwóch głowic odbiorczych. Schemat badania i wyniki pomiarów pokazane są na rysunkach 32 i 33. Pomiary wykonano głowicami na podłużne fale podpowierzchniowe o częstotliwości 4 MHz, na stalowej próbce. W celu zminimalizowania wpływu zmian sprzężenia akustycznego na wyniki powierzchnia próbki była płaska i gładka (szlifowana), a głowice odbiorcze sprzęgnięte z powierzchnią próbki na stałe. Głowica nadawcza wyposażona była w przetwornik o wymiarach 12*8 mm. Dwie identyczne głowice odbiorcze posiadały przetworniki w wymiarach 8*8 mm. Głowica nadawcza ustawiana była przed każdym pomiarem wzdłuż linii wyznaczonej przez środki głowic odbiorczych. Widoczna jest wyraźna zależność różnicowego czasu przejścia od odległości A . Dla odległości między głowicą nadawczą a odbiorczymi w zakresie od 25 do 65 mm widoczny jest



Rys. 32. Schemat pomiaru zależności czasu przejścia podpowierzchniowej fali podłużnej od odległości między głowicą nadawczą a głowicami odbiorczymi.

wzrost czasu przejścia wynoszący około 18 ns. Dla większych odległości A zmiany czasu są niższe i wynikają głównie z wahań grubości warstwy cieczy sprzęgającej pod głowicą badawczą. Podobne wyniki autor uzyskał prowadząc pomiary zestawami głowic wyposażonymi w przetworniki o innych wielkościach.



Rys. 33. Zależności różnicowego czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej od odległości między głowicą nadawczą a głowicami odbiorczymi.

W pomiarach prowadzonych różnicowymi zestawami głowic odległość A jest stała i zmiany czasów pokazane na rysunku 33 nie mają wpływu na wyniki, jednak pod warunkiem, że powtarzalne jest sprzężenie akustyczne głowicy nadawczej i stała jest geometria wiązki fal generowanych w materiale. Jeśli jednak, wskutek zanieczyszczenia lub nierówności powierzchni materiału, nie cała powierzchnia klina załamującego głowicy nadawczej jest sprzęgnięta akustycznie z powierzchnią materiału, odnosi to taki sam skutek jakby do pomiaru użyto głowicy wyposażonej w mniejszy przetwornik nadawczy. Mniejszy przetwornik generuje w materiale wiązkę o krótszym polu bliskim i innym rozkładzie ciśnienia akustycznego niż przetwornik większy. Sprzężenie akustyczne może więc zmienić relacje między odległością od głowicy nadawczej do głowic odbiorczych, a długością pola bliskiego wiązki fal wytwarzanych w materiale. Tym samym zmianie uleg mogą fazy impulsów odbieranych przez głowice odbiorcze, a w rezultacie czas przejścia mierzony układem różnicowym. Celowe byłoby więc

budowanie zestawów, w których głowica nadawcza oddalona jest od głowic odbiorczych tak, że opisany wyżej wpływ zmian sprzężenia akustycznego jest słaby. Na przykład w odległości większej niż 65 mm zgodnie z wykresem na rysunku 33. Dla takich odległości zmiany sprzężenia powinny powodować stosunkowo małe zmiany mierzonych różnicowych czasów przejścia. Niestety zachowanie odległości między głowicą nadawczą i głowicami odbiorczymi, poprawnej z tego punktu widzenia, zwiększa również odległość między głowicą nadawczą i dalszą głowicą odbiorczą. Ta zaś odległość jest ograniczona spadkiem amplitudy fali podpowierzchniowej z odległością. Dlatego też w budowanych przez autora zestawach głowic na fale podpowierzchniowe odległości między głowicą nadawczą i bliższą głowicą odbiorczą są małe.

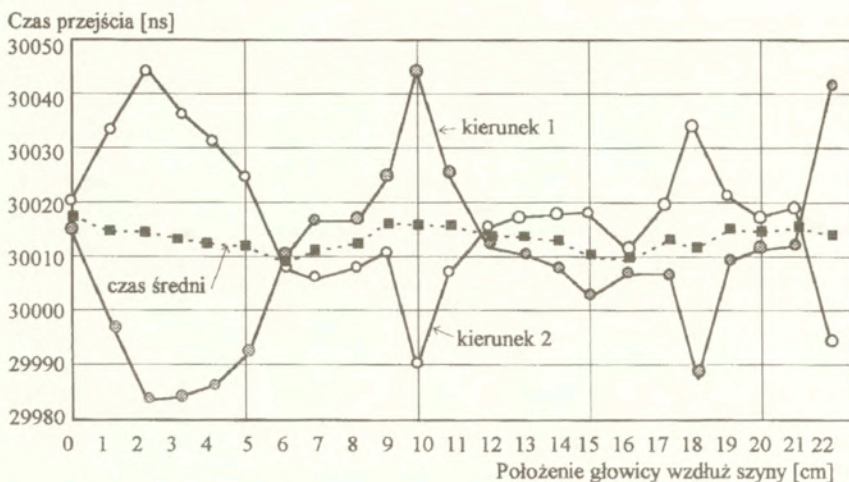
W celu sprawdzenia wpływu jakości sprzężenia akustycznego głowicy nadawczej na mierzone układem różnicowym czasy przejścia autor wykonał pomiary stosując układy głowic wyposażone w różnej wielkości przetworniki nadawcze. W pomiarach tych odległość między głowicą nadawczą, a bliższą głowicą odbiorczą wynosiła od 15 do 25 mm. W badaniach wykorzystane zostały głowice nadawcze z przetwornikami o wymiarach od 7*7 do 25*25 mm, a polegały one na pomiarach różnicowych czasów przejścia dla stałej odległości między głowicą nadawczą i głowicami odbiorczymi, dla różnych sposobów sprzęgania akustycznego głowicy nadawczej do powierzchni próbki. W wyniku serii pomiarów powtarzalności czasów przejścia mierzonych na próbkach o różnej chropowatości stwierdzono, że wpływ jakości sprzężenia głowicy nadawczej przejawia się najsilniej dla przetworników "szerokich", to znaczy przetworników o dużych wymiarach w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali podpowierzchniowej. "Wysokość" przetwornika okazała się mieć nieznaczny wpływ na mierzone rozrzuty.

Przeprowadzone przez autora doświadczalne badania rozkładów ciśnienia akustycznego, spadków amplitudy z odległością i wpływu jakości sprzężenia głowicy nadawczej na mierzone czasy przejścia potwierdziły możliwość stosowania w tensometrii ultradźwiękowej przetworników małych, a co za tym idzie osadzanie ich na małych klinach załamujących. Takie rozwiązanie pozwoliło też na budowę zwartych i krótkich układów głowic.

3.2.2.2. Propozycja, badania i wykorzystanie układów głowic typu „lustro”

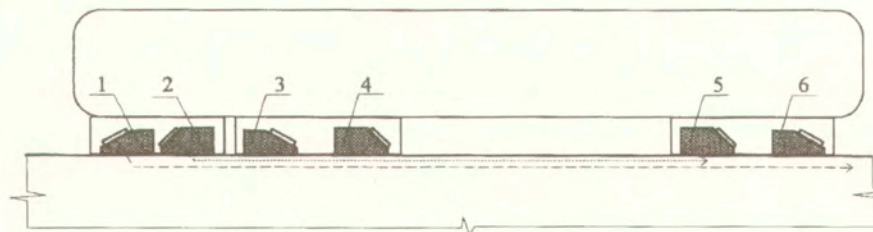
Następnym krokiem w eliminacji wpływu zmian sprzężenia akustycznego na wynik pomiaru czasu przejścia było wprowadzenie dwukierunkowego, różnicowego układu głowic. W czasie pomiarów prowadzonych na szynach kolejowych różnicowym układem głowic zaobserwowano zjawisko "lustra" to znaczy podobieństwa przebiegów zmian czasów przejścia zmierzonych układem głowic zorientowanych raz w jedną, a drugi raz, w tym samym miejscu, w drugą stronę. Wartości czasów przejścia zmierzonych dla dwóch kierunków orientacji układu głowic na szynie o surowej powierzchni pokazuje rysunek 34. Widoczna jest wyraźna symetria przebiegów czasów przejścia. Wzrostowi czasu dla jednego kierunku propagacji fali odpowiada spadek czasu dla drugiego kierunku propagacji. Rozrzut czasu przejścia dla jednego kierunku propagacji fali sięga 60 ns. Średnia wartość czasów, pokazana na rysunku linią przerywaną, jest wielokrotnie mniej zależna od położenia zastawu niż wartości czasu mierzone dla jednego tylko kierunku propagacji fal. Jej wahania nie przekraczają 8 ns. Wykorzystanie efektu „lustra” oznaczało więc kilkukrotne zmniejszenie wpływu chropowatości powierzchni elementu na mierzony czas przejścia fal podpowierzchniowych.

Pierwszym zestawem głowic, w którym wykorzystano efekt "lustra" był zbudowany przez autora sześcioprotwornikowy zestaw na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne. Rozmieszczenie głowic w tym zestawie pokazano na rysunku 35. Zestaw składał się z dwóch układów różnicowych (jeden dla fal podłużnych, drugi dla poprzecznych) ustawionych tak, że



Rys. 34. Czasy przejścia zmierzone głowicą ustawianą dwukrotnie w tym samym miejscu, dla dwóch różnych kierunków propagacji fali (dwóch orientacji głowicy).

fale poprzeczne i podłużne propagowały się wzdłuż tej samej linii w badanym materiale. Wartość naprężenia obliczana była na podstawie mierzonych zestawem czasów przejścia dwóch typów fal z wykorzystaniem opisanej w rozdziale 1.3.3 poprawki strukturalnej. Zestaw głowic był wyposażony w szablon przykładany do powierzchni materiału w miejscu pomiaru. Szablon ten pozwalał na dwukrotne sprzężenie zestawu głowic dokładnie w tym samym miejscu na powierzchni elementu. Po wykonaniu pierwszego pomiaru zestaw głowic obracano, ustawiano ponownie w otworze szablonu i wykonywano pomiar czasu dla fal biegnących w przeciwnym kierunku. Sześcioprzetwornikowy zestaw głowic wykorzystujących efekt „lustra”,



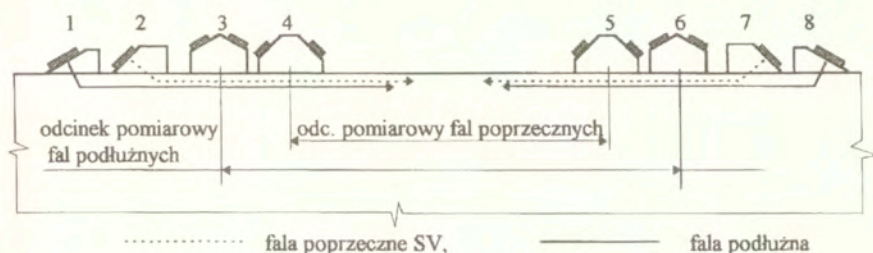
- 1 - głowica nadawcza fali podłużnej, 2 - głowica nadawcza fali poprzecznej,
 3 i 5 - głowice odbiorcze fali podłużnej, 4 i 6 - głowice odbiorcze fali poprzecznej.

Rys. 35. Schemat budowy sześcioprzetwornikowego zestawu głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne.

wyposażony w szablon, znalazł zastosowanie w pomiarach naprężeń własnych w hucie UNIMETAL we Francji, a uzyskane nim wyniki opisane są w rozdziale 5.

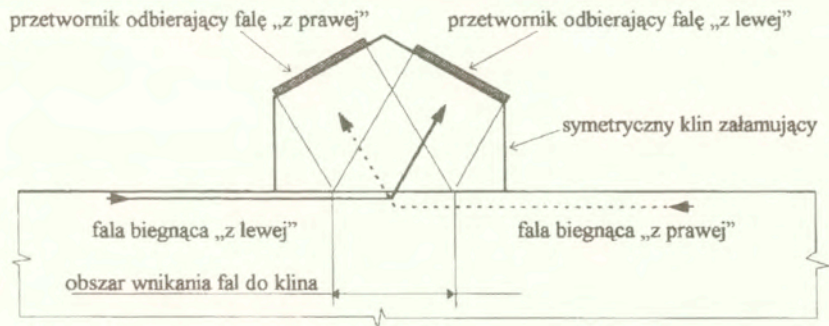
Ostatnią wersją zbudowanego przez autora zestawu na podpowierzchniowe fale jest podwójny zestaw różnicowy. Jest to zestaw ośmiogłowicowy (12-przetwornikowy) na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne, w którym wykorzystano efekt „lustra”, ale pomiar czasów przejścia dokonywany jest bez konieczności odrywania zestawu od powierzchni, obrotu i ponownego sprzęgania. Schemat budowy zestawu pokazano na rysunku 36. Zestaw wyposażony jest w cztery głowice nadawcze. Dwie z nich generują fale rozchodzące się „w prawo”, dwie pozostałe - rozchodzące się „w lewo”. Między nimi usytuowane są cztery dwuprzetwornikowe głowice odbiorcze.

- 1,8 - głowice nadawcze podpowierzchniowych fal podłużnych,
- 2,7 - głowice nadawcze podpowierzchniowych fal poprzecznych,
- 3,5 - dwuprzetwornikowe głowice odbiorcze podpowierzchniowych fal podłużnych,
- 4,5 - dwuprzetwornikowe głowice odbiorcze podpowierzchniowych fal poprzecznych.



Rys. 36. Schemat budowy zestawu 12-głowicowego na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne.

Głowice odbiorcze mogą odbierać fale rozchodzące się „w prawo” i „w lewo” dzięki odpowiedniemu kształtowi klina załamującego i osadzeniu na każdym z nich dwóch przetworników piezoelektrycznych. Schemat budowy takiej głowicy odbiorczej pokazany jest na rysunek 37. Klin załamujący ukształtowany jest w ten sposób, że odległości między



Rys. 37. Schemat budowy dwuprzetwornikowej, symetrycznej głowicy odbiorczej na fale podpowierzchniowe.

środkami przetworników, a dolną powierzchnią klina są jednakowe. Przetworniki osadzone są na klinie symetrycznie i dzięki temu obszar na dolnej powierzchni klina, w którym fale podpowierzchniowe biegnące „z prawej” i „z lewej” odpromieniowują do niego i jako fale podłużne docierają do przetworników, jest identyczny. Oznacza to, że i średnia grubość warstwy cieczy sprzęgającej jaką musi pokonać fala biegnąca „z prawej” i „z lewej” zanim dotrą do przetworników jest identyczna. W celu obliczenia średniego czasu przejścia, dla każdego typu fali konieczne jest wykonanie czterech pomiarów czasu przejścia. Przykładowo dla fali podłużnej, zgodnie ze schematem na rysunku 36 są to:

- t_1 - czas między głowicą nadawczą 1 a odbiornikiem w głowicy 3,
- t_2 - czas między głowicą nadawczą 1 a odbiornikiem w głowicy 6,
- t_3 - czas między głowicą nadawczą 8 a odbiornikiem w głowicy 6,
- t_4 - czas między głowicą nadawczą 8 a odbiornikiem w głowicy 3.

Czasy te można zapisać jako sumy czasów przejścia przez kliny załamujące, przez warstwy cieczy sprzęgającej i czasów przejścia w badanym materiale:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_{KN1} + t_{SN1} + t_{1-3} + t_{SO3} + t_{KO3} \\ t_2 &= t_{KN1} + t_{SN1} + t_{1-6} + t_{SO6} + t_{KO6} \\ t_3 &= t_{KN8} + t_{SN8} + t_{1-6} + t_{SO6} + t_{KO6} \\ t_4 &= t_{KN8} + t_{SN8} + t_{1-3} + t_{SO3} + t_{KO3} \end{aligned}$$

gdzie: t_{KNi} - czas przejścia fali w klinie głowicy nadawczej Nr i ,
 t_{SNI} - czas przejścia fali przez warstwę sprzęgającą pod klinem głowicy nadawczej Nr i ,
 t_{i-j} - czas przejścia fali w materiale między głowicami i i j ,
 t_{SOi} - czas przejścia fali przez warstwę cieczy sprzęgającej pod klinem głowicy odbiorczej Nr i ,
 t_{KOi} - czas przejścia fali w klinie głowicy odbiorczej Nr i .

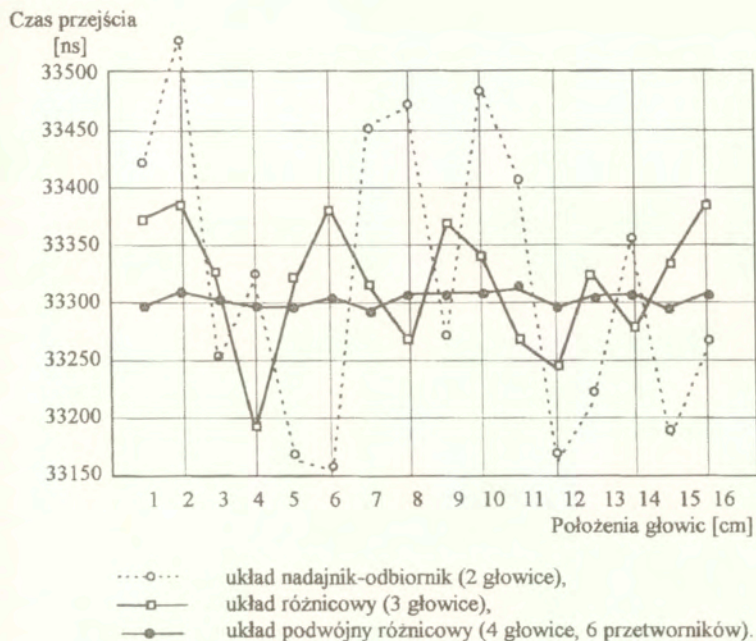
Czasy t_{KOi} są równe sobie, co wynika z symetrycznej budowy klina. Obliczony czas średni jest więc równy:

$$(36) \quad t_w = (t_2 - t_1 + t_4 - t_3) / 2$$

Czas ten jest niezależny od czasów przejścia fal przez warstwy cieczy sprzęgającej pod głowicami odbiorczymi i nadawczymi, a jedynie od długości odcinka pomiarowego wyznaczonego przez środki głowic odbiorczych. Podwójny zestaw różnicowy został opatentowany [129], a głowice wykonane przez autora zgodnie z pomysłem znalazły zastosowania w pomiarach naprężeń własnych w szynach kolejowych i zmianach naprężeń termicznych.

Rysunek 38 pokazuje porównanie rozrzutów czasu przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych mierzonych różnymi zestawami głowic, na jednej chropowatej próbce. Długości odcinków pomiarowych (odległości między odbiornikami) dla wszystkich zestawów były zbliżone i wynosiły około 108 mm a czasy przejścia mierzono nanosekundowym miernikiem czasu. W pomiarach wykorzystano zestaw składający się z jednej głowicy nadawczej i jednej odbiorczej, zestaw różnicowy i zestaw podwójny różnicowy („lustrzany”). Pomiaru wykonywane były w tych samych miejscach na próbce, wzdłuż jednej linii, co 10 mm. Linie na wykresie pokazują zmiany czasu przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych zmierzonego dla poszczególnych położań głowic na próbce. Widoczne są wyraźne różnice w

rozrzutach zmierzonych czasów spowodowanych wpływem chropowatości powierzchni próbki.



Rys. 38. Pomiary czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych, na chropowatej próbce stalowej, wykonane zestawami głowic różnego typu.

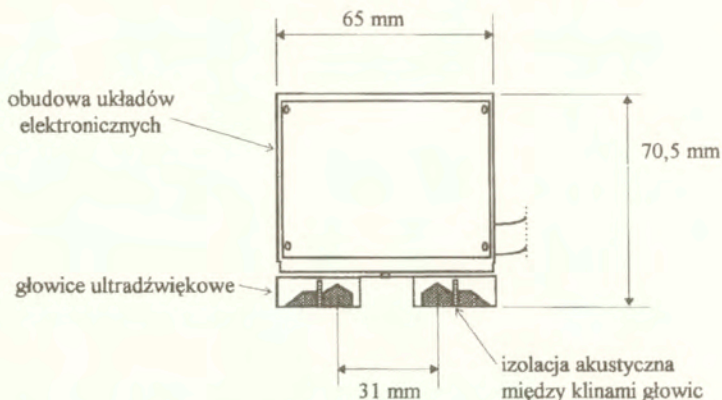
Najwyższe, wynoszące kilkaset nanosekund - dla najprostszego układu nadajnik-odbiornik, niższe - dla układu różnicowego i najbardziej stabilne odczyty dla układu podwójnego różnicowego, wykorzystującego zjawisko "lustra". Dla tego ostatniego wahania mierzonych wartości czasu przejścia wynoszą jedynie kilkanaście nanosekund. Pokazane wahania zmierzonych czasów przejścia odpowiadają następującym zmianom obliczonych prędkości propagacji fali podłużnej:

- dla układu nadajnik-odbiornik - 72 m/s co stanowi 1,2% prędkości fali,
- dla układu różnicowego - 36 m/s co stanowi 0,6% prędkości fali,
- dla podwójnego układu różnicowego - 3 m/s co stanowi jedynie 0,05% prędkości fali.

Oznacza to, że opracowanie podwójnego układu różnicowego zmniejszyło niekorzystny wpływ chropowatości powierzchni badanej próbki na mierzone czasy 24-krotnie w stosunku do układu nadajnik-odbiornik i 12-krotnie w stosunku do układu różnicowego.

Precyzja pomiarów czasów przejścia fal podpowierzchniowych, wymagana w tensometrii ultradźwiękowej, została osiągnięta w pomiarach prowadzonych w warunkach przemysłowych praktycznie dopiero po opracowaniu podwójnego układu różnicowego wykorzystującego

efekt „lustra”. Na podstawie tego właśnie układu autor zbudował szereg zestawów głowic na podpowierzchniowe fale podłużne, poprzeczne typu SV i poprzeczne typu SH. Zestawy te przeznaczone były do różnych celów, a część z nich zamówiona została w IPPT przez Laboratorium Westinghous’a w Bettis, USA. Były to zestawy opracowane do badania zmian naprężeń w próbkach wykonanych ze stali żaroodpornych typu Inconel, stosowanych w budowie reaktorów jądrowych. Ograniczone wymiary niektórych próbek zmusiły do opracowania miniaturowych zestawów głowic. Szkic takiego małego, 6-przetwornikowego, podwójnego zestawu różnicowego, wykonanego przez autora, przedstawia rysunek 39. Przetworniki zastosowane w głowicach miały wymiary 6*6 mm i częstotliwość 4 MHz.



Rys. 39. Budowa i wymiary 6-głowicowego zestawu na podłużne fale podpowierzchniowe.

Organicznie długości całego zestawu do 65 mm spowodowało konieczność usytuowania głowic nadawczych i odbiorczych blisko siebie. Przy odległościach między klinami wynoszących jedynie 2 - 3 milimetry pojawiła się konieczność zastosowania izolacji akustycznej między nimi. Bez tej izolacji głowice odbiorcze rejestrowały fale biegnące krótszą drogą, przez kliny i masę wypełniającą przestrzeń między nimi.

Drugim przykładem podwójnego różnicowego zestawu głowic na podpowierzchniowe fale podłużne jest zestaw opracowany i wykonany przez autora do pomiarów zmian naprężeń termicznych w szynach kolejowych. W przypadku takich pomiarów długość zestawu ograniczona jest jedynie przez spadek amplitudy fali podpowierzchniowej. W głowicach nadawczych zastosowano przetworniki o częstotliwości 1,8 MHz i wymiarach 12*15 mm, a w głowicach odbiorczych - o wymiarach 10*10 mm. Odległość między głowicami odbiorczymi tego zestawu wynosiła 450 mm (czyli blisko 15 razy więcej niż w zestawie pokazanym na rysunku 39). Czas przejścia fali podłużnej w stali na tym odcinku wynosi około 75 μ s, a zmianie czasu przejścia o 1 ns odpowiada zmiana naprężenia termicznego jedynie o około 1 MPa. Wyniki pomiarów wykonanych przez autora na torach taką głowicą opisane a w rozdziale 5.2.

3.2.2.3. Poprawki temperaturowe dla głowic na fale podpowierzchniowe

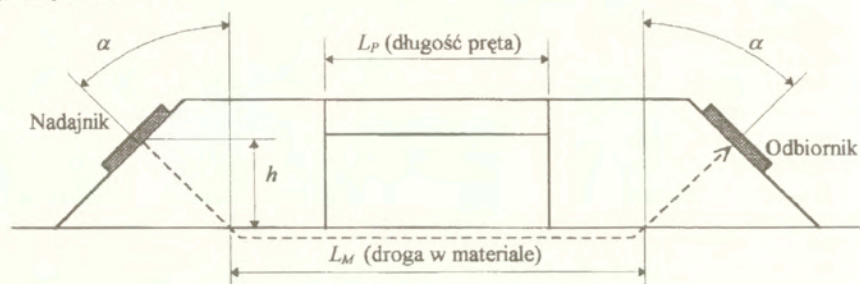
W tensometrii ultradźwiękowej, w której korzysta się z wzajemnych relacji czasów przejścia impulsów ultradźwiękowych, a pomiary tych czasów wykonywane są w różnych temperaturach, konieczne jest uwzględnianie nie tylko zależności prędkości fal od temperatury badanego elementu ale również zmian prędkości w klinach załamujących głowic oraz rozszerzalności cieplnej elementów głowicy. Zależność prędkości fal od temperatury w metalach i tworzywach sztucznych stosowanych na kliny załamujące głowic opisano w rozdziale 1.3.3. Niżej opisany jest wpływ temperatury na wartości czasów przejścia mierzonych wielogłowicowymi zestawami na fale podpowierzchniowe. Wpływ ten pokazany zostanie na przykładzie elementarnego zestawu głowic pokazanego na rysunku 40. Zestaw składa się z jednej głowicy nadawczej i jednej odbiorczej. Odległość między nimi ustalona jest przez długość pręta łączącego obie głowice. W temperaturze T_1 , fala rozchodzi się jak na rysunku 40a. Przy wzroście temperatury do temperatury T_2 , zmianie ulegają prędkości propagacji fal w materiale i klinach oraz rozkład ciśnienia akustycznego w wiązce wytwarzanej w materiale. Zmiany prędkości powodują, że inny jest też kąt pod jakim fala odbierana odpromieniowuje do klina głowicy odbiorczej skutkiem czego czoło fali odpromieniowanej nie jest równoległe do powierzchni przetwornika odbiorczego. Zmienia się też odległość pomiędzy głowicami wskutek rozszerzalności cieplnej pręta łączącego. Droga impulsu w temperaturze T_2 pokazana jest na rysunku 40b. W rezultacie zmiany temperatury zmienia się kształt odbieranego impulsu, jego amplituda i czas przejścia między przetwornikami głowicy nadawczej i odbiorczej, a także zmianie ulega amplituda odbieranego impulsu. Łącznie efekty temperaturowe prowadzą do wydłużenia czasu przejścia wraz ze wzrostem temperatury.

Zmiany czasu przejścia w zależności od temperatury są tym większe im większy jest kąt załamania klina. Kąty załamania dla podpowierzchniowych fal podłużnych wynoszą około 27° , dla podpowierzchniowych fal poprzecznych typu SV - 57° . Najmniejszy kąt posiadają kliny załamujące głowic na podpowierzchniowe fale poprzeczne typu SH (fale o kierunku polaryzacji równoległym do powierzchni materiału). Kąt ten wynosi około $24,5^\circ$.

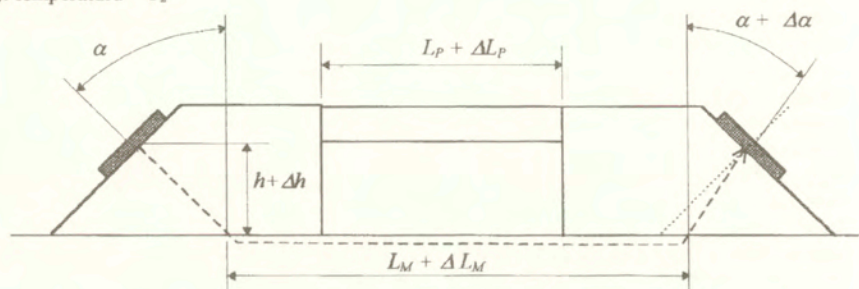
Dodatkowym czynnikiem wpływającym na zmiany amplitudy i kształtu impulsu są zależne od temperatury zmiany pojemności przetworników piezoelektrycznych i zmiany częstotliwości układu przetwornik (pojemność) - cewka stojące (indukcyjność). O tym jak silnie na mierzony czas przejścia wpływają zmiany temperatury świadczy wpływ samej tylko zmiany czasu przejścia impulsu w klinie załamującym głowicy odbiorczej. Dla typowych klinów załamujących głowic odbiorczych przetworniki umieszczone są na wysokości h równej 7 mm nad powierzchnią próbki. Dla takiego klina zmiana temperatury o 10°C powoduje zmianę czasu przejścia fali w klinie o około 50 ns. Zmiana ta jest skutkiem rozszerzalności cieplnej klina, zmiany prędkości propagacji fali w klinie i zmiany kąta odpromieniowania fali do klina.

Tę wysoką czułość głowic odbiorczych na zmiany temperatury eliminuje w znacznej mierze stosowanie różnicowych układów głowic, w których dwie głowice odbiorcze reagują na zmiany temperatury w zbliżony sposób. Niestety, ze względów technicznych, głowice odbiorcze nie są identyczne i zmiany temperatury wpływają na każdą z nich nieco różnie. Dlatego też zmiany czasów przejścia wywołane zmianami temperatury, mierzone w tych samych warunkach, dla różnych egzemplarzy nominalnie takich samych układów głowic, różnią się nieznacznie między sobą. Jednak głównym czynnikiem wpływającym na zmiany czasu przejścia od temperatury mierzone układami różnicowymi, czy podwójnymi układami różnicowymi, jest wywołana zmianą temperatury zmiana prędkości fali w badanym materiale. Jedynym zaś sposobem uwzględnienia wpływu temperatury na mierzone czasy przejścia jest doświadczalny pomiar „poprawki temperaturowej” dla danego

a). temperatura = T_1



b). temperatura = T_2



Rys. 40. Drogi impulsów podpowierzchniowych fal podłużnych w klinach załamujących i w próbce dla dwóch różnych temperatur T_1 i T_2 .

zestawu głowic oraz badanego materiału i obliczanie czasu przejścia t_K skorygowanego temperaturowo (odniesionego do stałej temperatury odniesienia). Czas ten jest obliczany z zależności:

$$(37) \quad t_K = t_M + Pt * (T_M - T_O)$$

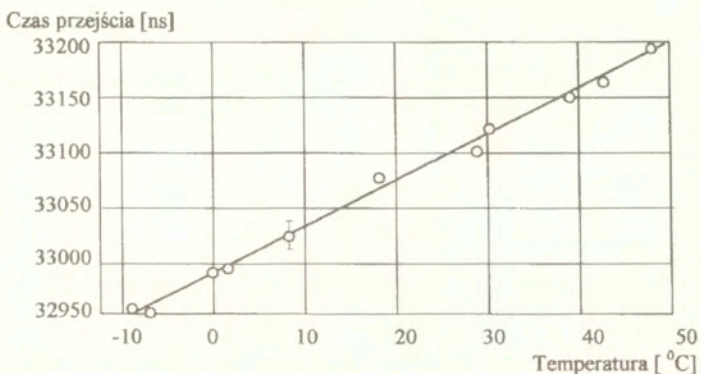
gdzie: t_M - czas zmierzony w temperaturze T_M ,

Pt - poprawka temperaturowa [ns/°C],

T_O - temperatura odniesienia,

T_M - temperatura, w jakiej dokonany został pomiar czasu.

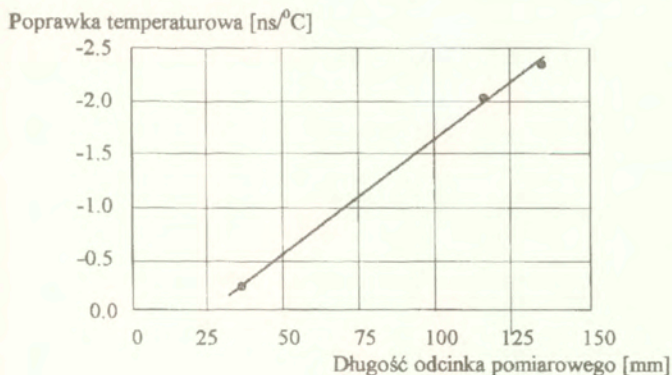
Wartość poprawki temperaturowej Pt zależy od badanego materiału i od konstrukcji układu głowic. Jest ona wyznaczana doświadczalnie dla każdego zestawu głowic na podstawie pomiarów zmian czasu przejścia wywołanych zmianami temperatury. Pomiary takie są przeprowadzane w komorze termicznej. Zestaw głowic w czasie grzania i chłodzenia sprzęgnięty jest na stałe z próbką w celu ograniczenia wpływu zmian warunków sprzężenia akustycznego na wyniki. Rysunek 41 pokazuje przykładowe wyniki uzyskane podczas takich badań zestawu głowic na podłużne fale podpowierzchniowe rozchodzące się w stali. Widoczny jest w przybliżeniu liniowy wzrost czasu przejścia ze wzrostem temperatury.



Rys. 41. Zależność czasu przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych w stali od temperatury. Pomiaru wykonano zestawem różnicowy (czterogłowicowym), głowice połączone listwą z brązu fosforowego.

Dla zestawów głowic pracujących w ograniczonym zakresie temperatur, na przykład od 5 do 35°C, autor przyjmował stałą, niezależną od temperatury wartość poprawki wyznaczanej jako stosunek przyrostu czasu przejścia impulsu do przyrostu temperatury.

Następny rysunek, 42, pokazuje porównanie wartości poprawek temperaturowych wyznaczonych przez autora dla trzech zestawów głowic na podłużne fale podpowierzchniowe. Były to podwójne różnicowe zestawy o częstotliwości fal 4 MHz wyposażone w identyczne głowice odbiorcze. Różniły się natomiast długościami odcinków pomiarowych (odcinków wyznaczonych przez środki głowic odbiorczych). Poprawki temperaturowe zmierzone były na stalowej próbce w zakresie temperatur od -5 do +50°C. Prawie liniowa zależność wartości poprawki od długości odcinka pomiarowego świadczy o powtarzalności wykonania głowic odbiorczych. Potwierdza to również, że dla różnicowych układów głowic zmiany czasu przejścia od temperatury zależą głównie od temperaturowej zależności prędkości fali w



Rys. 42. Zależność wartości poprawki temperaturowej od długości odcinka pomiarowego podpowierzchniowych fal podłużnych w stali.

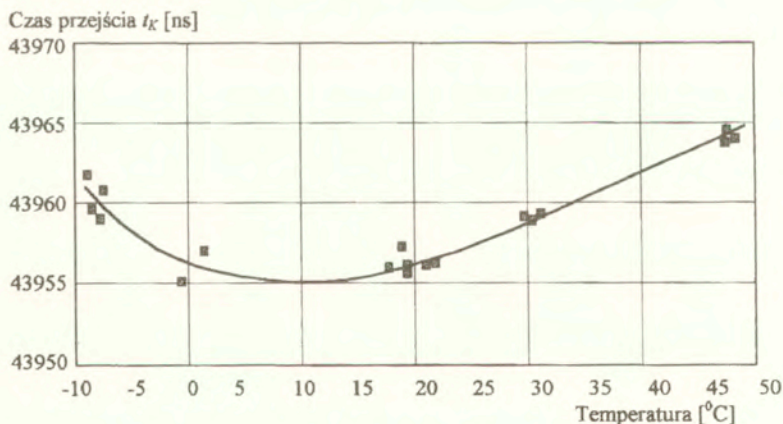
badanym materiale. Widoczny jest też stały składnik poprawki, zależny od konstrukcji zestawu.

Wartość poprawki dla „najdłuższego” zestawu wynosi $-2,38 \text{ ns}^\circ\text{C}$ a dla „najkrótszego” - jedynie $-0,30 \text{ ns}^\circ\text{C}$. Dla porównania, poprawka temperaturowa zmierzona przez autora na stalowej próbce dla wspomnianego wcześniej zestawu głowic o długości odcinka pomiarowego równej 450 mm , wyniosła $-5,5 \text{ ns}^\circ\text{C}$.

Wartość poprawki temperaturowej zależna jest nie tylko od badanego materiału, konstrukcji zestawu głowic ale i typu fali poprzez zależność prędkości od temperatury. Przykładowo, dla zestawów głowic na podpowierzchniowe fale poprzeczne typu SV i dla długości odcinka pomiarowego równej $71,7 \text{ mm}$ wartość poprawki zmierzonej w zakresie temperatur od 0 do 45°C wynosi $-1,0 \text{ ns}^\circ\text{C}$. Jest więc niższa niż poprawka termiczna dla fali podłużnej.

Dokładne pomiary poprawek temperaturowych wykonał autor dla zestawów głowic na podłużne fale podpowierzchniowe przeznaczonych do badań zmian naprężeń termicznych. Były to głowice budowane do pomiarów prowadzonych w szerokim zakresie temperatur, od -20 do $+80^\circ\text{C}$, i dlatego dokładność wyznaczenia wartości poprawki dla tych głowic była istotna. Badania poprawki przeprowadzono dwuetapowo. Po pierwsze wyznaczono przybliżoną zależność czasu przejścia fal od temperatury. Następnie, po wprowadzeniu liniowej korekcji czasu przejścia równej $Pt = -4,46 \text{ ns}^\circ\text{C}$, eksperyment powtórzono. Rysunek 43 pokazuje wyniki drugiego eksperymentu czyli zależność skorygowanego już zgrubnie czasu przejścia od temperatury. W czasie pomiarów po każdej zmianie ustawienia temperatury komory termicznej czas stabilizacji temperatur zestawu głowic, próbki i powietrza w komorze, wynosił minimum 4 godziny.

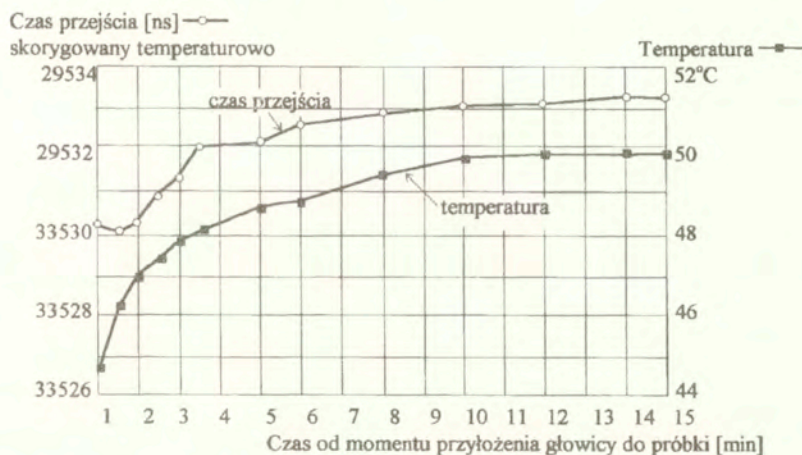
Wykres przedstawia nieliniową zależność skorygowanego (przy założeniu liniowej zależności czas przejścia-temperatura) czasu przejścia od temperatury. Wynika z niego, że dla badanej głowicy i przyjętego zakresu temperatur, przyjmowanie liniowej poprawki temperaturowej jest przybliżeniem prowadzącym do błędu mierzonego czasu sięgającego 10 ns . Taki błąd pociąga za sobą błąd w ocenie naprężenia o około 16 MPa .



Rys. 43. Nieliniowa zależność mierzonego czasu przejścia impulsu fal podpowierzchniowych od temperatury.

Wyniki opisanego eksperymentu pokazują, że dla zestawów głowic przeznaczonych do pomiarów w szerokim zakresie temperatur konieczne jest stosowanie do temperaturowej korekcji czasów przejścia poprawki, której wartość jest zależna nie tylko od konstrukcji głowicy i własności badanego materiału, ale jest również funkcją temperatury.

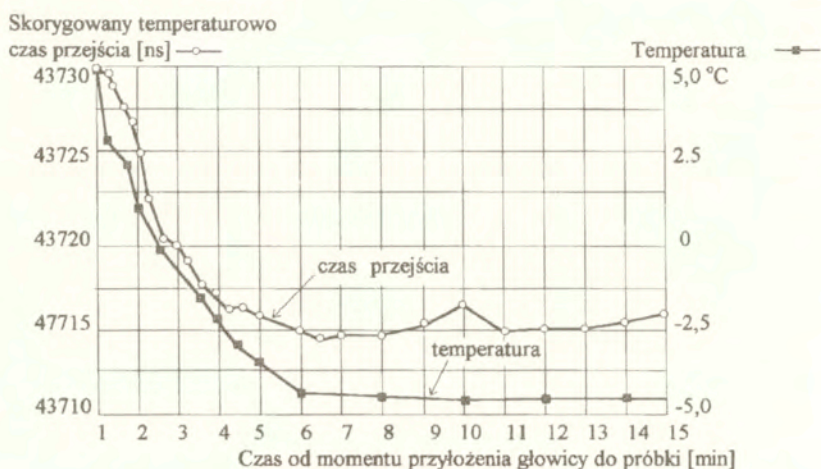
Przedstawione powyżej wartości poprawek temperaturowych wyznaczane były na podstawie pomiarów, z których każdy wykonany został w warunkach ustalonych, przy stałej i jednakowej temperaturze próbki i zestawu głowic. W przypadkach gdy temperatury głowicy i mierzonego elementu różnią się, wartość mierzonego czasu przejścia zmienia się z upływem czasu, w miarę wyrównywania się temperatur materiału i głowic. Wskutek zmian temperatury zmienia się też czas przejścia skorygowany z uwagi na zmiany temperatury zgodnie ze wzorem (37). Temperatura T_{M_2} , którą aparat wykorzystuje do korekcji czasu, mierzona jest półprzewodnikowym czujnikiem temperatury osadzonym w jednej z głowic zestawu i stykającym się z powierzchnią badanego elementu. Początkowe wskazania czujnika odpowiadają więc temperaturze głowicy. Wskazania temperatury ustalają się dopiero po wyrównaniu temperatur głowic i badanego elementu. Okres po jakim mierzony czas przejścia ustala się zależy od różnicy temperatur i szybkości z jaką wyrównują się temperatury zestawu i badanego elementu. Zależności pokazujące takie zmiany dla jednego z wczesnych zestawów głowic na podłużne fale podpowierzchniowe, o długości odcinka pomiarowego równej 199 mm, pokazano na rysunku 44. Przed pomiarem temperatura zestawu głowic wynosiła 22°C, a temperatura próbki 51 °C (różnica równa 29°C). Widoczna jest stabilizacja skorygowanego temperaturowo czasu przejścia po upływie około 10 minut. Po tym samym czasie stabilizuje się również temperatura mierzona na powierzchni próbki.



Rys. 44. Zmiany czasu przejścia w czasie ustalania się temperatury próbki i głowicy. Głowica o temperaturze pokojowej postawiona na ciepłej szynie.

Okres 10 minut jest jednak na tyle długi, aby praktycznie wykluczyć możliwość zastosowania takiego zestawu w pomiarach na przykład zmian naprężeń termicznych w warunkach toru kolejowego. Dlatego też, aby możliwie skrócić okres wyrównywania się temperatur, w 1998

roku autor opracował nowy zestaw głowic, dla którego czas stabilizacji temperatury jest możliwie krótki. Rysunek 45 pokazuje zmiany skorygowanego z uwagi na temperaturę czasu przejścia zmierzone takim zestawem. Są to zmiany czasu obserwowane po przyłożeniu zestawu o temperaturze 23°C do szyny o temperaturze -4°C (różnica temperatur równa 27°C). Mierzony czas przejścia stabilizuje się po około 6 minutach. W stosunku do wykresu pokazanego na rysunku 44, przy zbliżonej początkowej różnicy temperatur, oznacza to skrócenie czasu stabilizacji wskazań o 40%. Skrócenie czasu stabilizacji temperatury i mierzonego czasu przejścia uzyskano stosując Invar (stop niklu i żelaza o zerowej rozszerzalności termicznej) jako materiał, z którego wykonana została listwa łącząca głowice. Spowodowało to praktyczne uniezależnienie czasu przejścia od temperatury tej listwy. W celu skrócenia czasu ustalania się temperatur głowic i badanego materiału, pojemność cieplna elementów zestawu stykających się z powierzchnią materiału została możliwie ograniczona. Zastosowane zostały niskie kliny załamujące i silne, jednocześnie małe i lekkie, magnesy stałe z ziem rzadkich (neodymowo - kobaltowe) co pozwoliło na zmniejszenie wymiarów i masy



Rys. 45. Zmiany czasu przejścia w czasie ustalania się temperatur próbki i głowicy. Głowica o temperaturze pokojowej postawiona na oziębionej szynie.

obudowy każdej z głowic. W celu szybszego nagrzania (lub oziębienia) klinów wykonanych z tworzywa sztucznego o niskiej przewodności cieplnej, otoczone one zostały metalowymi obudowami stykającymi się z powierzchnią materiału.

Listwa łącząca poszczególne głowice została odizolowana termicznie od metalowej obudowy układów elektronicznych zestawu co ograniczyło przepływ ciepła przez kliny do tej obudowy i skróciło czas stabilizacji temperatury. Elementy zestawów przeznaczonych do pomiarów na szynach w torze kolejowym zostały pomalowane farbą o barwie odpowiadającej barwie skorodowanej szyny. W czasie pomiarów w słońcu zapewnić to miało osiągnięcie przez zestaw temperatury zbliżonej do temperatury szyna, która pod wpływem operacji słonecznej może nagrząć się do 80°C. Przetworniki piezoelektryczne poszczególnych głowic takich zestawów dobierane były też według pojemności elektrycznej i strojone jednakowymi cewkami.

3.2.2.4. Głowice wykorzystujące fale odbite i transformowane

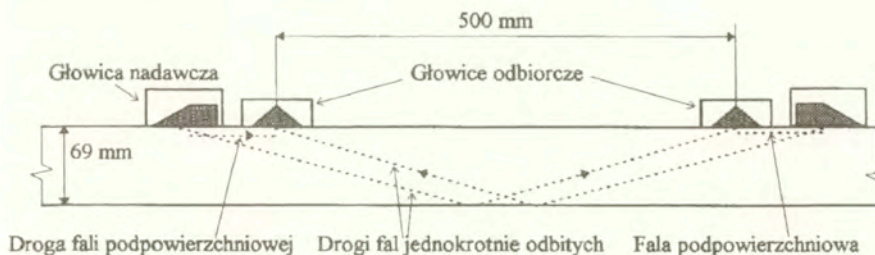
W elementach o ograniczonej grubości, przy znacznych odległościach pomiędzy głowicą nadawczą a odbiorczą, do przetwornika odbiorczego docierają prawie równocześnie impulsy fali podpowierzchniowej, fali odbitej od dna i fali transformowanej. Mechanizm powstawania takich fal opisano w rozdziale 2.2. Amplitudy fal odbitych i transformowanych są generalnie większe od amplitudy fali podpowierzchniowej. Oznacza to możliwość dokonywania pomiarów przy znacznych odległościach pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, a więc i długich czasach przejścia impulsów. To z kolei pozwala na osiągnięcie wyższego stosunku przyrostu czasu przejścia do zmiany naprężenia i na śledzenie małych zmian naprężeń.

W pomiarach prowadzonych falami podpowierzchniowymi oceniane naprężenie odpowiada naprężeniu uśrednionemu na drodze impulsu to znaczy naprężeniu w powierzchniowej warstwie materiału. Gdy stosowane są fale odbite, impuls fali wędruje dwu- lub wielokrotnie przez grubość elementu. Oznacza to, że naprężenie mierzone tą techniką będzie naprężeniem średnim na grubości blachy czy płyty.

W roku 1990 autor wykonał zestaw głowic na fale odbite przeznaczony do pomiarów zmian naprężeń termicznych w szynach. Celem pomiarów wykonywanych takim zestawem było wyeliminowanie wpływu naprężeń od zginania szyny na wyniki pomiarów sił podłużnych działających w szynach.

Schemat zestawu zaprojektowanego do pomiarów w głowce szyny kolejowej o szerokości 69 mm pokazano na rysunku 46. Głowice nadawcze generują w materiale rozbieżne wiązki fal, które do bliższych głowic odbiorczych docierają jako fale podpowierzchniowe. Do dalszych głowic odbiorczych - jako fale podłużne po jednokrotnym odbiciu od przeciwległej powierzchni głowki szyny. W zestawie wykorzystane jest efekt „lustra” czyli mierzone są czasy różnicowe fal rozchodzących się w dwóch przeciwnych kierunkach, a naprężenia obliczane są na podstawie ich średniej wartości. Czas przejścia fali podpowierzchniowej (między głowicą nadawczą i bliższą głowicą odbiorczą) jest mały w stosunku do czasów przejścia fal odbitych. Dlatego można przyjąć, że zmiany czasów przejścia tych fal wywołane naprężeniem w powierzchniowej warstwie materiału nie wpływają na wartość obliczanego naprężania uśrednionego na grubości elementu.

Pomiary amplitud fal wykazały, że dla odległości pomiędzy odbiornikami równej 500 mm amplituda impulsu odbitego od dna była o 16 dB (około 5 razy) wyższa niż amplituda bardzo już słabego na tej odległości impulsu fali podpowierzchniowej. Czas przejścia fali odbitej był też o 3,2 mikrosekundy dłuższy niż dla fali podpowierzchniowej, co umożliwiało łatwą separację tych dwóch impulsów i pomiar czasu przejścia fali odbitej.



Rys. 46. Schemat zestawu głowic i drogi rozchodzenia się impulsów fal podpowierzchniowych i odbitych w próbce o grubości 69 mm.

Wartość poprawki temperaturowej dla głowicy na fale odbite jest zależna dodatkowo od rozszerzalności cieplnej badanego elementu. Termiczny wzrost grubości elementu wpływa na wydłużenie drogi fali odbitej i tym samym na wzrost wartości poprawki. Dla opisywanej głowicy poprawka temperaturowa, zmierzona na głowce szyny kolejowej w zakresie temperatur od 0 do 70°C, wyniosła blisko 6 ns/°C.

Zestaw głowic na fale odbite wykorzystany został przez autora w pomiarach zmian naprężeń termicznych w szynach toru kolejowego. Zebrane w czasie badań doświadczenia pokazały, że zestawy głowic na fale odbite umożliwiające pomiary czasów przejścia na znacznych dystansach mogą znaleźć zastosowania w pomiarach zmian naprężeń w elementach poddanych rozciąganiu lub ściskaniu. Dzięki długiemu czasowi przejścia i wysokiej względnej dokładności pomiaru uzyskuje się dużą czułość (niski stosunek $\Delta\sigma/\Delta T$) i możliwe są pomiary małych zmian naprężeń liczonych w pojedynczych megapaskalach. Dla pokazanego na rysunku 46 zestawu zmianie średniego naprężenia w szynie o 10 MPa, odpowiadała zmiana czasu przejścia fali odbitej o 9,42 nanosekundy ($\Delta\sigma/\Delta T < 1$).

Mankamentem głowic wykorzystujących fale odbite okazała się konieczność precyzyjnego, powtarzalnego ustawiania ich w tym samym miejscu na powierzchni elementu w czasie kolejnych pomiarów. Zmiany pozycji głowicy powodują, że fala odbija się na innym fragmencie przeciwległej powierzchni, co w przypadku powierzchni chropowatych prowadzi do przypadkowych, liczonych w dziesiątkach nanosekund, zmian czasu przejścia. Innym ograniczeniem takich zestawów jest możliwość prowadzenie pomiarów jedynie w elementach, których temperatura w całej objętości jest stała. Gradienty temperatur spowodowane na przykład nagrzewaniem słonecznym elementu z jednej tylko strony powodują błędy pomiarowe wynikające z wpływu rozkładu temperatury na tor i prędkość propagacji fali.

3.2.2.5. Głowice na podpowierzchniowe fale SH

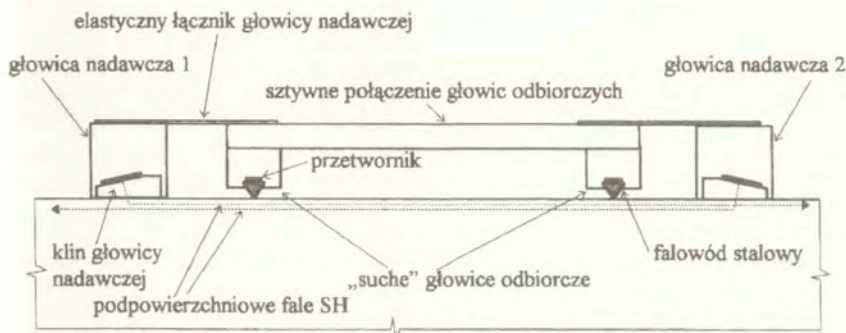
W literaturze technicznej można znaleźć informacje, że generowanie i odbiór podpowierzchniowych fal poprzecznych typu SH (spolaryzowane w kierunku równoległym do powierzchni) jest praktycznie możliwy jedynie głowicami elektromagneto-akustycznymi (EMAT) [130]. Fale takie mogą być jednak wzbudzane skośnymi głowicami piezoelektrycznymi. Na klinach takich głowic osadzone są przetworniki piezoelektryczne wykonujące drgania ścinania, w kierunku równoległym do powierzchni materiału, a ośrodkiem sprzęgającym między klinem a powierzchnia materiału jest ciecz o wysokiej lepkości, zdolna skutecznie przenieść naprężenia ścinające. Kąt klina załamującego wykonanego z PMM, obliczony dla stali i dla temperatury pokojowej zgodnie z prawem Snelliusa, wynosi 24,6°. Pierwszy zestaw głowic na podpowierzchniowe fale SH, wyposażonych w takie kliny, autor zbudował w 1987 roku [131].

W odróżnieniu od głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne typu SV, których przetworniki drgają grubościowo, boczne krawędzie przetworników głowic nadawczych na fale SH są źródłami walcowych fal podłużnych, które propagują się w klinach i w obudowie głowic. Istnieje więc konieczność starannego odizolowanie akustycznego bocznych powierzchni klina załamującego od obudowy i masy tłumiącej przetwornik. W budowanych przez siebie głowicach autor stosował do tego celu warstwy różnych materiałów porowatych lub kilka warstw cienkich folii, między którymi znajdowało się powietrze.

Podobnie jak w głowicach na podpowierzchniowe fale podłużne tak i w wyposażonych w kliny załamujące głowicach na fale SH, obserwowany jest silny wpływ zmian grubości warstwy sprzęgającej na mierzone czasy przejścia. Ten wpływ, bardziej widoczny niż w przypadku głowic na podpowierzchniowe fale podłużne, spowodowany jest stosowaniem gęstego,

lepszego i wolno rozprzyskającego się ośrodku sprzyskającego. W 1989 autor opracował i wykonał zestaw głowic na podpowierzchniowe fale SH z "suchymi" głowicami odbiorczymi, stykającymi się z powierzchnią materiału bez pośrednictwa cieczy sprzyskającej. Schemat budowy tego zestawu pokazany jest na rysunku 47.

Głowice nadawcze wyposażone są w kliny załamujące z przetwornikami na drgania ścinania i sprzyskane są z powierzchnią badanego elementu za pośrednictwem cieczy (żywic



Rys. 47. Schemat budowy zestawu głowic na podpowierzchniowe fale SH z "suchymi" odbiornikami.

epoksydowa). Głowice odbiorcze posiadają falowody wykonane ze stali narzędziowej, o przekroju trójkąta równoramiennego i stykające się liniowo, ostrym "ostrzem" z powierzchnią materiału. Linia styku jest prostopadła do kierunku propagacji fali i równoległa do kierunku polaryzacji fali SH. Na płaskich powierzchniach falowodów naklejone są przetworniki odbiorcze o kierunku polaryzacji równoległym do "ostrza" falowodu. Obie głowice odbiorcze połączone są sztywnym łącznikiem zapewniającym utrzymanie równoległości „ostrzy” falowodów. Po dociśnięciu „ostrzy” do powierzchni materiału, dzięki wysokiemu ciśnieniu na quasi-liniowym styku pomiędzy ich krawędziami a powierzchnią, dochodzi do skutecznego, mechanicznego sprzyskania akustycznego. Fala poprzeczna SH rozchodząca się wzdłuż powierzchni odpromieniowuje walcową falę SH do falowodów głowic odbiorczych. Ta z kolei odbierana jest przez wąskie przetworniki piezoelektryczne na drgania ścinania umieszczone na falowodach.

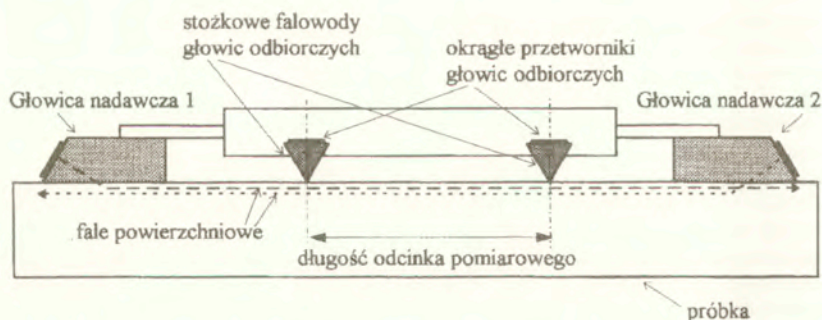
Cechą głowic odbiorczych jest ich symetria. Są one jednakowo czułe na fale SH docierające do nich z 1-szej i 2-giej głowicy nadawczej. Dzięki temu, układem głowic wyposażonym jedynie w cztery przetworniki (dwa głowicy nadawczej i dwa głowicy odbiorczych), możliwe stały się pomiary czasów przejścia z wykorzystaniem efektu „lustra” opisanego w rozdziale 3.2.2.2. W zbudowanym zestawie odległość między „ostrzami” głowic odbiorczych wynosiła 110 mm. W odróżnieniu od zestawów, w których wszystkie głowice posiadają kliny załamujące, w prezentowanym zestawie możliwy jest bezpośredni i dokładny pomiar długości drogi fali w materiale. Jest on równy łatwo mierzalnej odległości między „ostrzami” głowic odbiorczych. Wyniki pomiarów przeprowadzonych opisanym zestawem przedstawione są w rozdziale 4.

3.2.3. Głowice na fale powierzchniowe

Fale powierzchniowe charakteryzują się bardzo niskim współczynnikiem elastoakustycznym. Dlatego też w ultradźwiękowych pomiarach naprężeń wykorzystywane są w "akustycznych ekstensometrach" służących do pomiaru odkształcenia, a nie zmiany czasu przejścia

powodowanego efektem elastoakustycznym. Oznacza to, że w odróżnieniu od układów głowic na fale podpowierzchniowe, w których dąży się do zapewnienia niezmiennej odległości pomiędzy głowicami, głowice na fale powierzchniowe powinny być związane z powierzchnią odkształcającego się materiału. Wadą fali powierzchniowej jest jej czułość na wszelkie zanieczyszczenia znajdujące się na drodze fali. Zanieczyszczeniami takim, wpływającymi na czas przejścia i amplitudę impulsu, mogą być krople cieczy sprężającej wypływające spod głowic. Dlatego też poszukiwano głowic pracujących bez potrzeby stosowania cieczowego sprzężenia. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie pracujących bezkontaktowo głowic wyposażonych w przetworniki typu EMAT. Innym rozwiązaniem jest opracowany w 1984 w IPPT zestaw dwóch głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi, działający bez konieczności stosowania cieczy sprężającej [132]. Składa się on z dwóch stalowych falowodów stykających się liniowo z powierzchnią badanego materiału. Na powierzchniach falowodów umocowane są klasyczne, wyposażone w kliny załamujące głowice na fale powierzchniowe, z których jedna pracuje jako nadajnik, druga jako odbiornik. Linie styku falowodów są równoległe do siebie i prostopadłe do kierunku propagacji fali. Tak zbudowane „suche” zestawy doskonale pracują na płaskich powierzchniach materiałów różniących się nawet znacznie prędkościami propagacji fal powierzchniowych takich jak metale, tworzywa sztuczne, drewno czy nawet papier. Przy pomiarach na elementach chropowatych, gdy falowody z liniowym stykiem nie kontaktują się na całej długości z powierzchnią elementu, mankamentem układu okazuje się zmienna długość odcinka pomiarowego. Długość tego odcinka, na którym mierzony ma być czas przejścia, staje się zależna od lokalnych nierówności powierzchni materiału i położenia punktów styku powierzchni z falowodami.

W roku 1989 autor opracował i wykonał podwójny różnicowy zestaw głowic, w którym odbiorniki fali powierzchniowej stykają się z powierzchnią badanego materiału punktowo i również bez potrzeby stosowania sprzężenia cieczowego [133]. Rozwiązanie to umożliwiło prowadzenie pomiarów czasów przejścia fali powierzchniowej na dokładnie określonej drodze, niezależnie od lokalnych nierówności powierzchni badanego elementu. Schemat układu głowic pokazano na rysunku 48.



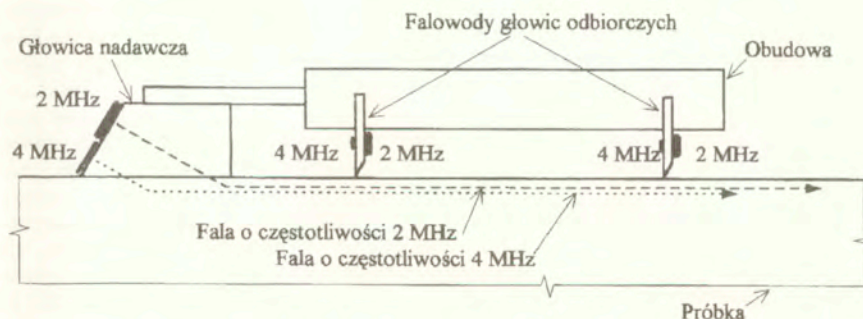
Rys. 48. Schemat układu głowic do pomiarów czasu przejścia fal powierzchniowych.

Fale powierzchniowe rozchodzące się w przeciwnych kierunkach generowane są przez klasyczne głowice nadawcze z klinami załamującymi, z cieczowym sprzężeniem akustycznym. Dwa identyczne stożkowe falowody głowic odbiorczych, umieszczonych sztywno w obudowie, stykają się swymi ostrzami z powierzchnią materiału punktowo, na „sucho”. W miejscach kontaktu, na wierzchołkach falowodów, w wyniku prostopadłej do powierzchni

składowej przemieszczenia fali powierzchniowej, generowana zostaje fala podłużna. Rozchodzi się ona jako fala kulista w kierunku przetworników odbiorczych umieszczonych na płaskich podstawach stożków i jest przez nie rejestrowana. Jednocześnie z falą podłużną, na powierzchni falowodu wzbudzona zostaje fala powierzchniowa. Wzdłuż tworzącej stożka dociera ona do jego podstawy i wreszcie do przetwornika odbiorczego, przez który zostaje również zarejestrowana. Sygnał od fali powierzchniowej dociera jednak do przetwornika później i nie interferuje z pomiarowym sygnałem od fali podłużnej.

Charakterystyka kierunkowości głowic odbiorczych ze stożkowymi falowodami jest kołowa i mogą one odbierać falę powierzchniową docierającą do nich z dowolnego kierunku. Pozwala to, podobnie jak w przypadku zestawu „suchych” głowic na podpowierzchniowe fale SH, na prowadzenie pomiarów czasu przejścia z wykorzystaniem efektu „lustra”, przy pomocy jedynie dwóch przetworników nadawczych i dwóch przetworników odbiorczych.

Rozwinięciem przedstawionego powyżej układu głowic jest różnicowy układ głowic umożliwiający jednoczesny pomiar czasów przejścia fal powierzchniowych o dwóch różnych częstotliwościach. Schemat takiego układu opracowanego i wykonanego przez autora w roku 1990 pokazano na rysunku 49. Układ wyposażony jest w klasyczną głowicę nadawczą z tym, że na klinie załamującym osadzone zostały dwa przetworniki piezoelektryczne, o częstotliwościach rezonansowych równych 2 i 4 MHz. Przetwornik o częstotliwości 2 MHz naklejony został w górnej części klina. W ten sposób fala o niższej częstotliwości, czyli o niższym współczynniku tłumienia w tworzywie sztucznym, pokonuje w materiale klina dłuższą drogę. Układ głowic wyposażony jest w dwie identyczne głowice odbiorcze. Każda z nich posiada stałowy falowód wykonany ze stali narzędziowej (blacha) i stykający się zaostrozonym wierzchołkiem (punktowo) z powierzchnią próbki, w której rozchodzi się fala powierzchniowa



Rys. 49. Schemat budowy zestawu głowic na fale powierzchniowe o częstotliwościach 2 i 4 MHz

Na płaskich powierzchniach falowodów naklejone są odbiorcze przetworniki piezoelektryczne na drgania grubościowe o częstotliwościach rezonansowych odpowiadających częstotliwościom przetworników głowicy nadawczej. Przetworniki odbiorcze mają małe wysokości, porównywalne z długością fali powierzchniowej w stali. Fala powierzchniowa rozchodząca się w próbce, docierając do punktu styku ostrza falowodu z powierzchnią generuje w falowodach falę podłużną oraz fale powierzchniowe. Obie te fale rozchodzą się w kierunku przetworników odbiorczych. Przetworniki te czułe są jedynie na przemieszczenia

normalne do ich powierzchni więc nie rejestrują fali podłużnej, a jedynie później docierające do nich fale powierzchniowe.

Po ustawieniu zestawu na powierzchni badanej próbki pobudzone są kolejno przetworniki nadawcze o różnych częstotliwościach i mierzone różnicowe czasy przejścia fal o dwóch częstotliwościach. W ten sposób możliwy jest pomiar czasu przejścia fal powierzchniowych o dwóch różnych częstotliwościach na dokładnie tym samym odcinku drogi w materiale, bez konieczności odrywania zestawu głowic od powierzchni próbki.

3.3. BADANIA GŁOWIC ELEKTROMAGNETO-AKUSTYCZNYCH

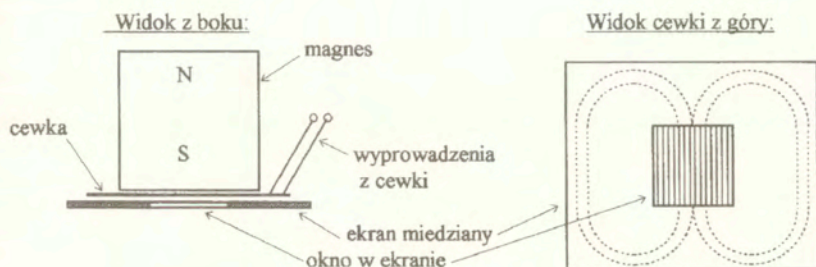
Jak wspomniano w rozdziale 1.3.6 większość budowanych obecnie aparatów do tensometrii ultradźwiękowej, czy ogólnie precyzyjnych pomiarów czasów przejścia impulsów fal ultradźwiękowych, wyposażona jest w przetworniki typu EMAT. Twórcy tych aparatów uzasadniają zastosowanie w nich głowic EMAT tym, że działają one bezkontaktowo, bez potrzeby stosowania sprzężenia akustycznego. W związku z tym pozbawione mają być głównej wady głowic piezoelektrycznych - zależności mierzonego czasu przejścia od jakości cieczowego sprzężenia akustycznego. Rozdział opisuje krótko budowę głowic typu EMAT i przeprowadzone przez autora badania powtarzalności wyników pomiarów czasu przejścia mierzonych takimi głowicami oraz porównanie wyników uzyskiwanych głowicami typu EMAT i głowicami wyposażonymi w przetworniki piezoelektryczne.

3.3.1. Budowa głowic elektromagneto-akustycznych

Głowice typu EMAT generują drgania w wierzchniej warstwie badanego materiału. Głównym mechanizmem powstawania drgań jest siła Lorenza działająca na cząstki przewodzącego materiału, w którym jednocześnie wzbudzone są zmienne prądy wirowe i wytwarzane jest stałe pole magnetyczne. W zależności od wzajemnych kierunków przepływu prądu i pola magnetycznego teoretycznie wzbudzone mogą być wszystkie typy fal. Drugim mechanizmem współdziałającym przy wytwarzaniu drgań mechanicznych jest zjawisko magnetostrykcji, czyli odkształcenia materiału pod wpływem zmiennego pola magnetycznego. Udział tych dwóch mechanizmów w generacji fal zmienia się w zależności od natężenia stałego pola magnetycznego. Dla niskich wartości pola magnetycznego zjawisko magnetostrykcji dominuje. Dla wyższych natężeń pola magnetostrykcja i siły Lorenza są równoważnymi mechanizmami generacji fal. Po nasyceniu magnetycznym warstwy wierzchniej badanego materiału siła Lorenza jest już jedynym mechanizmem wprawiającym cząstki materiału w drgania. Natężenie pola magnetycznego nie tylko wpływa na amplitudę generowanego impulsu ale i na jego fazę ponieważ mechanizm magnetostrykcji i siły Lorenza działają w różnych fazach. Zasady działania i budowa głowic z przetwornikami typu EMAT opisane są między innymi w pracach [113, 134].

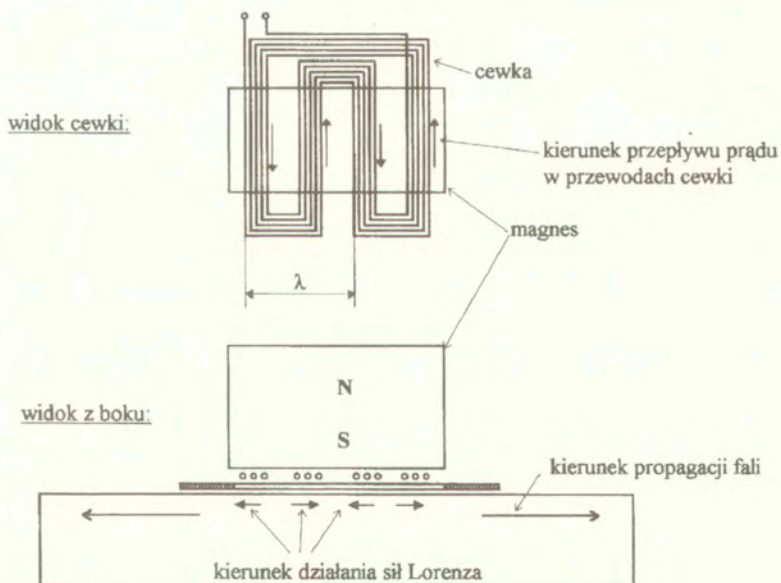
Głowica EMAT składa się z magnesu i cewki nadawczo-odbiorczej lub pary cewek, z których jedna pełni rolę nadajnika, a druga rolę odbiornika. Jako magnesy powszechnie stosowane są dziś bardzo silne i trwałe stałe magnesy neodymowe. Schemat normalnej (generującej fale w kierunku prostopadłym do powierzchni) głowicy typu EMAT na fale poprzeczne pokazano na rysunku 50. Jest to najczęściej stosowana głowica typu EMAT, a w tensometrii ultradźwiękowej wykorzystywana jest do pomiarów dwójłomności akustycznej materiału. W szczelinie między powierzchnią badanego materiału a magnesem znajduje się cewka nadawczo-odbiorcza a pod nią umieszczony jest ekran z materiału przewodzącego (zazwyczaj z folii miedzianej). Zadaniem ekranu jest ograniczenie obszaru generacji prądów wirowych do

wybranego fragmentu powierzchni cewki. Obszarowi temu, w którym zwoje cewki ułożone są równoległe i płynię w nich prąd w jednym kierunku, odpowiada wycięte w ekranie okno. Zmienny prąd płynący przewodami cewki generuje w wierzchniej warstwie materiału zmienne prądy wirowe. Oddziaływanie stałego pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes powoduje, że w tej warstwie powstaje siła Lorentza skierowana prostopadle do przewodów cewki. Siła ta jest głównym źródłem fali poprzecznej rozchodzącej się w kierunku normalnym do powierzchni materiału.



Rys. 50. Schemat budowy normalnej głowicy EMAT z magnesem stałym.

Głowica typu EMAT na podpowierzchniowe fale podłużne różni się ułożeniem przewodów w cewce a schemat jej budowy pokazany jest na rysunku 51. Cewka przetwornika na podłużne



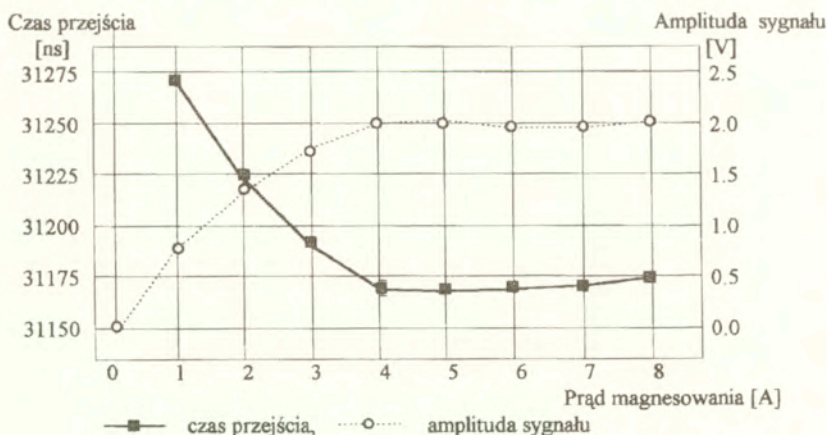
Rys. 51. Schemat budowy głowicy EMAT na podpowierzchniowe fale podłużne.

fale powierzchniowe składa się z kilku meandrów, odległość między którymi wynosi pół długości fali w materiale próbki. Poza równoległymi odcinkami przewodów pod magnesem, reszta cewki jest ekranowana. Siły Lorentza powodują ściskanie i rozciąganie materiału pod sąsiadującymi meandrami cewki i w efekcie generację fali podłużnej w kierunku prostopadłym do przewodów cewki. Wytwarzana w ten sposób fala rozchodzi się w obie strony.

W czasie nadawania impulsu w cewce nadawczej płynie prąd o natężeniu kilkudziesięciu amperów. Dlatego też układy nadawcze do tych głowic muszą spełniać inne wymagania niż układy pobudzające głowice piezoelektryczne. Pomimo tak silnych prądów amplitudy sygnałów akustycznych wytwarzanych przez głowice EMAT są niskie, kilkudziesięciokrotnie słabsze niż sygnałów generowane przez współczesne, ceramiczne przetworniki piezoelektryczne. Jest to główną wadą przetworników typu EMAT. Najczęściej wymienianą zaletą tych przetworników jest ich bezkontaktowy sposób działania. Teoretycznie powinien on eliminować niepożądane wpływy cieczowego sprzężenia akustycznego obserwowane dla głowic piezoelektrycznych. Jednakże skomplikowany mechanizm generacji, jednocześnie działanie sił Lorentza i efektu magnetostrykcji różniących się fazami i dodatkowo zależność fazy generowanego impulsu od grubości szczeliny powietrznej między cewką a powierzchnia materiału (efekt lift-off) [135] powodują, że powtarzalności uzyskiwane w pomiarach czasu przejścia głowicami typu EMAT nie są wyższe niż uzyskiwane głowicami piezoelektrycznymi.

3.3.2. Wyniki badań powtarzalności pomiarów czasów przejścia głowicami EMAT

Jednym z czynników wpływających na wyniki pomiaru czasu przejścia fali poprzecznej wytwarzanej i odbieranej normalną głowicą typu EMAT jest indukcja magnetyczna w materiale. W przypadku głowic wyposażonych w magnesy stałe jej wartość zależy od "mocy" magnesu i grubości szczeliny powietrznej pomiędzy powierzchnią materiału a magnesem lub jego nabiegunkiem. W przypadku pomiarów prowadzonych na stalach twardych magnetycznie natężenie i kierunek pola magnetycznego mogą również zależeć od stanu namagnesowania badanego elementu (od jego historii magnetycznej). Na rysunku 52 pokazano zależność amplitudy sygnału i czasu przejścia fali poprzecznej od prądu



Rys. 52. Zależność czasu przejścia fal poprzecznych przez odcinek 100 mm w stalowej próbce od prądu magnesowania.

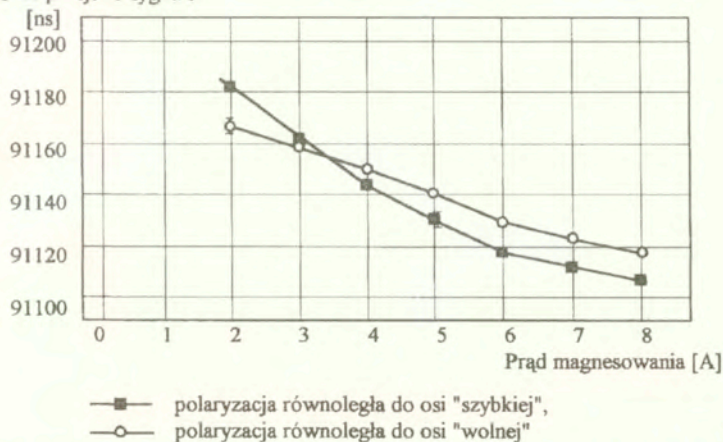
magnesowania. Autor przeprowadził te pomiary na próbce o grubości 50 mm wykonanej z drobnziarnistej stali, o niskiej anizotropii akustycznej. W pomiarach wykorzystana została głowica EMAT, w której stałe pole magnetyczne wytwarzane było przez elektromagnes. Mierzono czas od momentu wzbudzenia fali do czoła pierwszego echa dna próbki.

Widoczna jest wyraźna, wynosząca 100 ns, zmiana zmierzonego czasu przejścia wywołana zmianą natężenia prądu magnesującego. Taka zmiana czasu przejścia odpowiada zmianie obliczonej prędkości fali o 5,2 m/s. Mierzony czas ustala się dopiero gdy natężenie prądu magnesowania wynosi 4 A, co prawdopodobnie odpowiada natężeniu pola prowadzącemu do magnetycznego nasycenia materiału próbki. Nieznaczny wzrost czasu przejścia dla większych prądów magnesowania spowodowany jest najprawdopodobniej wzrostem temperatury próbki nagrzewanej coraz cieplejszym elektromagnesem.

Na rysunku tym pokazano również zależność amplitudy impulsu od wartości prądu magnesującego. Widać, że amplituda ta ustala się również dla prądu wynoszącego 4 A. Potwierdza to fakt, że czas przejścia zmienia się wraz ze zmianą prądu magnesowania aż do wartości prądu, przy której materiał próbki ulega magnetycznemu nasyceniu i jedynym mechanizmem odpowiedzialnym za generację impulsu pozostaje siła Lorentza/

Podobne zależności czasu przejścia od prądu magnesowania autor uzyskał na próbce gruboziarnistego odlewu staliwnego, o silnej anizotropii strukturalnej. Rysunek 53 pokazuje zmiany czasu przejścia impulsów fal poprzecznych od prądu magnesowania dla dwóch różnych kierunków polaryzacji fali poprzecznej.

Czas przejścia sygnału

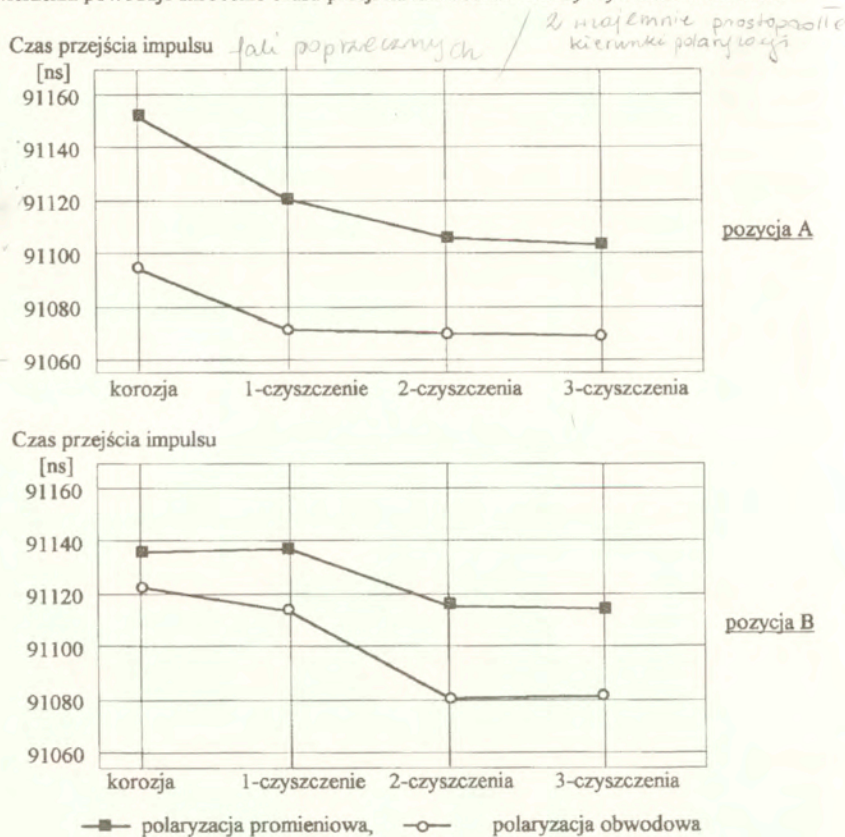


Rys. 53. Zależności czasów dwukrotnego przejścia fal poprzecznych przez staliwną próbkę o grubości 142 mm od prądu magnesowania, dla dwóch kierunków polaryzacji fali.

Widoczne na tym rysunku przebiegi zależności czasów przejścia od prądu magnesowania są różne w zależności od kierunku polaryzacji fali. Oznacza to, że wartość dwójnośności akustycznej mierzonej głowicami typu EMAT może być funkcją nie tylko akustycznej anizotropii teksturalnej, wynikającej z ukierunkowanego ułożenia ziaren materiału, ale i związanej z nią anizotropii magnetycznej.

Autor przeprowadził też badania zależności czasu przejścia impulsów fal poprzecznych wzbudzanych i odbieranych głowicą EMAT od stanu przygotowania powierzchni stalowej próbki. Badania polegały na kolejnych pomiarach czasów przejścia fali dla różnych stanów przygotowania powierzchni próbki w miejscu pomiaru. Pomiarów czasów przejścia przeprowadzono dla dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków polaryzacji. Do badań wykorzystano głowicę EMAT z elektromagnesem zasilanym prądem o natężeniu 7 A. Z wykresów pokazanych wcześniej (rysunki 52 i 53) wynika, że przy prądzie magnesowania o tym natężeniu materiał pod głowicą osiąga stan nasycenia magnetycznego i że głównym mechanizmem generacji fali powinna być siła Lorentza. Wyniki eksperymentów pokazane są na rysunku 54.

Pomiary przeprowadzono kolejno na powierzchni pokrytej produktami korozji oraz po jedno-, dwu- i trzykrotnym oczyszczeniu powierzchni papierem ściernym. Badania przeprowadzono w dwóch miejscach na próbce (pozycje A i B). Maksymalna zmiana czasu przejścia spowodowana różnym stanem powierzchni wyniosła około 45 ns. Generalnie oczyszczenie powierzchni powoduje skrócenie czasu przejścia fali. Jednak zmiany wywołane usuwaniem

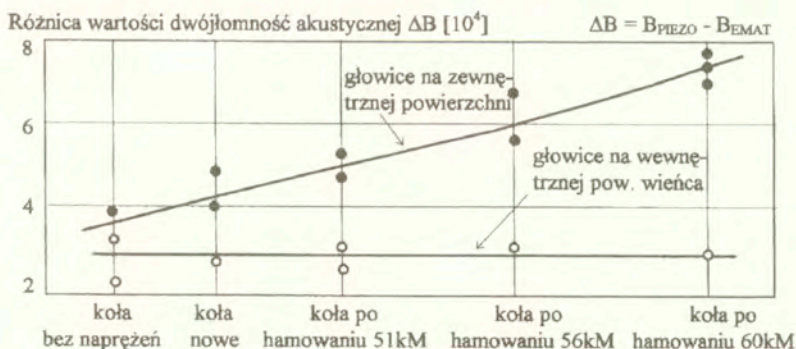


Rys. 54. Zależności czasów przejścia impulsu fali poprzecznej mierzonego głowicą EMAT od stanu powierzchni badanego elementu.

produktów korozji są różne dla dwóch zbadanych położań głowicy. Różnice te spowodowane mogą być różnymi grubościami warstwy produktów korozji oraz lokalnymi nierównościami powierzchni w pozycjach A i B. Wynik tego jakościowego eksperymentu oznacza jednak, że czasy przejścia mierzone bezkontaktowo działającymi głowicami EMAT są, podobnie jak w przypadku głowic piezoelektrycznych, zależne od czystości powierzchni czy też stopnia jej pokrycia produktami korozji.

Przedstawione wyżej zależności czasu przejścia mierzonego normalnymi głowicami EMAT na fale poprzeczne od indukcji magnetycznej, kierunku polaryzacji względem tekstury czy stanu powierzchni mogą tłumaczyć rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów naprężeń wykonanych głowicami z przetwornikami piezoelektrycznymi i typu EMAT w odlewanych, stalowych kołach kolejowych [93]. Staliwo jest materiałem twardym magnetycznie i po pomiarach głowicami EMAT obserwowany jest w nim magnetyzm szczątkowy. Ten magnetyzm wpływa na wielkość i kierunek pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes głowicy w czasie kolejnego pomiaru, a tym samym na kształt wiązki, fazę impulsu i w efekcie na mierzony czas przejścia impulsu fali.

Analiza uzyskanych wyników pokazała, że różnice między wartościami naprężeń własnych w kołach uzyskane głowicami z przetwornikami piezoelektrycznymi i typu EMAT mogą być zależne od wartości naprężenia w kole. Dla wyników pomiarów przeprowadzonych głowicami przykładanymi do wewnętrznej powierzchni wieńca koła, różnica między wynikami pomiarów uzyskanych głowicą piezoelektryczną i głowicą typu EMAT jest stała, niezależna od wielkości naprężenia. To stałe przesunięcie jest wynikiem innego sposobu skalowania obu aparatów. Natomiast dla wyników uzyskanych głowicami przykładanymi do zewnętrznej powierzchni wieńca, różnica ta jest tym większa im wyższe rozciągające naprężenie obwodowe panuje w kole. Różnicę wartości dwójłomności akustycznych zmierzonych głowicami EMAT i piezoelektryczną pokazuje rysunek 55. Wyniki uzyskane głowicą piezoelektryczną przykładaną do obu powierzchni wieńca (zewnętrznej i wewnętrznej) były jednakowe co wyklucza wpływ geometrii wieńca na mierzone czasy przejścia. Zaobserwowana zależność rezultatów uzyskanych głowicą typu EMAT od naprężenia wynika najprawdopodobniej z faktu, że naprężenie panujące w materiale koła wpływa również na własności magnetyczne metalu. Zmiany czasu przejścia mierzone głowicami EMAT są więc rezultatem nie tylko efektu elastoakustycznego, na którym opierają się obliczenia naprężeń, ale dodatkowo wpływu naprężenia na sposób generacji fali ultradźwiękowej głowicą typu EMAT.

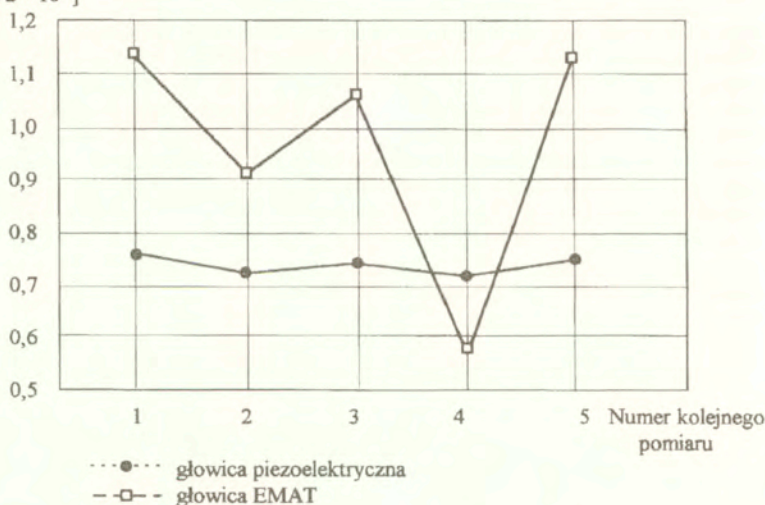


Rys. 55. Porównanie dwójłomności akustycznych zmierzonych głowicami EMAT i piezoelektryczną na kołach stalowych o różnych naprężeniach własnych.

Przykładem trudności w uzyskaniu powtarzalnych wyników pomiarów normalnymi głowicami EMAT na fale poprzeczne, nawet w warunkach laboratoryjnych, są wyniki eksperymentu przeprowadzonego wspólnie przez P. Fuchsa (Hennecke Instrument Group, MILES INC., New Martinsville, WV) i autora na stalowej (stal niskostopowa), obrabianej mechanicznie próbce o grubości 12 mm. Próbka ta była poddana jednoosiowemu rozciąganiu w maszynie wytrzymałościowej, w zakresie naprężeń od 0 do 50 MPa. Celem pomiarów było wyznaczenia wartości współczynnika elastoakustycznego β_B dla materiału tej próbki. Stosowane w pomiarach głowice to głowica normalna typu EMAT na fale poprzeczne o częstotliwości 2,5 MHz, wyposażona w magnes stały, i głowica piezoelektryczna z przetwornikiem o wymiarach 7*7 mm i częstotliwości 4 MHz.

Rezultaty tego eksperymentu pokazuje rysunek 56. Widoczne są zdecydowanie większe rozrzuty wyników uzyskanych głowicą EMAT. Dla głowicy piezoelektrycznej, pomimo tego, że wartości czasu mierzono między różnymi echem dna próbki, uzyskane wyniki mieszczą się w przedziale +/- 5% średniej wartości. Przedział ten dla głowicy EMAT wynosi +/-27% choć wszystkie pomiary prowadzone były z wykorzystaniem tych samych ech dna próbki. Warto dodać, że rozrzut taki odpowiada rozrzutowi prędkości propagacji fali poprzecznej w materiale próbki o około +/- 150 m/s czyli o blisko 5%.

Stała elastoakustyczna β_B
 [1/MPa * 10⁻⁵]

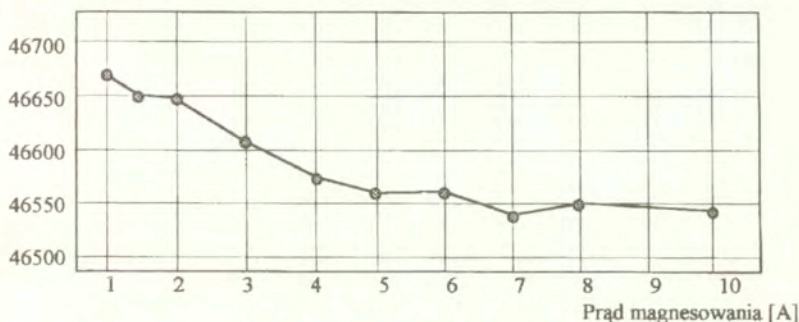


Rys. 56. Porównanie wyników stałych elastoakustycznych uzyskanych głowicami piezoelektrycznymi i EMAT.

Ze względu na niskie amplitudy impulsów powierzchniowych fal podłużnych generowanych głowicami typu EMAT głowice te wykorzystuje się w niektórych pomiarach jedynie do odbioru tych fal, a do ich nadawania stosuje się głowice piezoelektryczne. Autor przeprowadził szereg eksperymentów mających na celu ocenę powtarzalności wyników pomiarów czasów przejścia mierzonych takimi mieszczonymi zestawami głowic.

Rysunek 57 pokazuje zależność czasu przejścia fali podpowierzchniowej od prądu magnesującego zmierzone układem składającym się z piezoelektrycznej głowicy nadawczej i głowicy odbiorczej typu EMAT, z elektromagnesem. Pomiary wykonano zmieniając jedynie prąd magnesowania głowicy EMAT. Sprzężenie akustyczne pod piezoelektryczną głowicą nadawczą było stałe i nie wpływało na zmiany mierzonego czasu przejścia. Uzyskane wyniki pokazują, podobnie jak to było dla głowicy na fale poprzeczne, spadek mierzonego czasu przejścia wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego. Widoczna jest silna zależność czasu przejścia od prądów magnesowania mniejszych niż 6 A. Spadek czasu przejścia wynosi blisko 100 ns co odpowiada błędowi w ocenie prędkości propagacji fali równemu +/- 10 m/s.

Czas przejścia [ns]

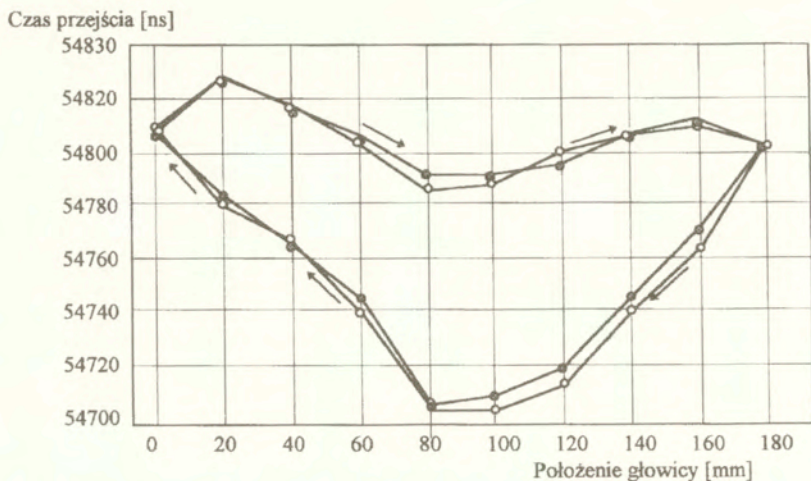


Rys. 57. Zależność czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej między piezoelektryczną głowicą nadawczą i głowicą odbiorczą typu EMAT od prądu magnesowania.

Następny wykres, rysunek 58, pokazuje wyniki pomiarów czasu przejścia zmierzone zestawem składającym się z piezoelektrycznej głowicy nadawczej i głowicy odbiorczej typu EMAT wyposażonej w neodymowy magnes stały. Obie głowice połączone były obudową zapewniającą stałość odległości między nimi. Pomiary wykonano na próbce stalowej przesuwając zestaw głowic na odcinku 180 mm co 20 mm w jednym kierunku, a następnie przesuwając go w przeciwnym kierunku. Zmierzone w czasie badania czasy przejścia tworzą wyraźną i powtarzalną pętlę.

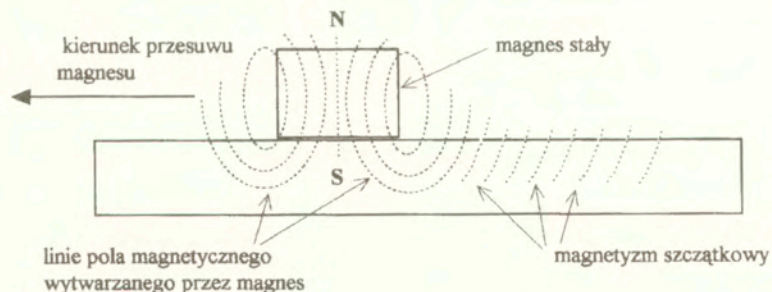
Wysoka powtarzalność wyników oznacza, że sprzężenie akustyczne pod klinem głowicy nadawczej było stabilne i jego ewentualne zmiany nie wpływały znacząco na wyniki. W innym przypadku mierzone czasy przejścia zmieniałyby się w sposób przypadkowy.

Powtarzalne zmiany mierzonych czasów przejścia spowodowane są najprawdopodobniej trwałym namagnesowywaniem wierzchniej warstwy próbki przez przesuwany ponad nią bardzo silny magnes stały. Magnesy wykorzystywane w głowicach EMAT na podpowierzchniowe fale podłużne pozbawione były nabiegunków i stalowych nakładek zamykających pole magnetyczne. Linie pola wytwarzanego przez magnesy stałe, ustawiony swą osią magnetyczną prostopadłe do powierzchni próbki, zamykały się więc przez powietrze. Taki układ linii sił pola oznaczał, że magnetyzm szczątkowy pozostający po pomiarze w materiale zależny był co do wartości i kierunku od kierunku przesuwania magnesu. Spowodowane było to faktem, że na krawędziach magnesu, wskutek rozproszenia pola magnetycznego, kierunki linii pola magnetycznego nie były prostopadłe do powierzchni próbki. W zależności od kierunku przesuwania głowicy magnetyzm szczątkowy pozostający w materiale próbki



Rys. 58. Czasy przejścia zmierzone zestawem składającym się z nadajnika piezoelektrycznego i odbiornika EMAT wyposażonego w magnes stały. Pomiary wykonano przesuwając głowicę co 20 mm w jednym kierunku, na odcinku 180 mm, następnie przesuwając ją w przeciwnym kierunku.

był zgodny z polem rozproszonym z jednej lub z drugiej strony magnesu. Sposób powstawania takiego szczątkowego pola magnetycznego pokazano schematycznie na rysunku 59.



Rys. 59. Schemat powstawania magnetyzmu szczątkowego podczas przesuwania po powierzchni stalowej próbki magnesu stałego zastosowanego w głowicy odbiorczej typ EMAT.

Rysunek 60 pokazuje wyniki pomiarów czasu przejścia wykonane różnicowym układem głowic na podpowierzchniowe fale podłużne. Układ ten składał się z klasycznej (piezoelektrycznej) głowicy nadawczej i dwóch podobnych głowic odbiorczych typu EMAT, wyposażonych w elektromagnesy. Spodziewano się, że w układzie takim zniesiony zostanie wpływ natężenia pola magnetycznego na mierzony czas, zakładając, że fale odbierane są

podobnymi głowicami odbiorczymi, wytwarzającymi w materiale jednakowe pola magnetyczne. Wyniki pokazały jednak silną zależność czasu przejścia od prądu magnesowania elektromagnesów głowic odbiorczych. Zależność ta częściowo spowodowana mogła być nieuniknionym nagrzewaniem się powierzchni próbki od przylegających do niej, i nagrzewających się, rdzeni elektromagnesów. Wzrost temperatury próbki powodował zmianę prędkości propagacji fali jak też zmianę stopnia namagnesowania związaną z zależnością przenikalności magnetycznej stali od temperatury. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na zmianę czasu przejścia mogły być różnice indukcji magnetycznej pod głowicami odbiorczymi wyposażonymi w podobne ale nie identyczne elektromagnesy oraz magnetyzm szczątkowy w powierzchniowej warstwie próbki. Jeszcze jednym czynnikiem mogącym wpływać na czas przejścia fal głowicami wyposażonymi w silne elektromagnesy jest zależność prędkości propagacji fali od stopnia namagnesowania materiału (efekt magnetoakustyczny).



Rys. 60. Zależność czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej zmierzona układem różnicowym (nadajnik piezoelektryczny, dwa odbiorniki EMAT z elektromagnesami) od prądu magnesowania.

3.3.3. Wnioski dotyczące zastosowań głowic typu EMAT do ultradźwiękowych badań naprężeń

Wyniki pomiarów czasu przejścia fal poprzecznych i podpowierzchniowych fal podłużnych przeprowadzonych przez autora głowicami typu EMAT pokazują, że nieuzasadnione jest twierdzenie iż bezkontaktowy sposób pracy głowic EMAT zapewnia większą powtarzalność wyników pomiarów prowadzonych takimi głowicami czy ich zestawami. Opinia taka jest natomiast często wyrażana przez badaczy stosujących głowice tego typu [113, 115, 134, 135, 136]. Jedyną obcą publikacją, w której dokonano porównania wyników uzyskanych głowicami EMAT i piezoelektrycznymi jest praca [137]. Przyrządy, którymi przeprowadzono pomiary opisane w pracy to zbudowany w IPPT aparat DEBRO-30 i amerykański zestaw pomiarowy z głowicami typu EMAT. Autor pracy pisał "...wyniki pomiarów wykonanych dwoma aparatami na powierzchni jezdnej szyn, w szczególności, są najwyraźniej niezgodne. Niezadowolające wyniki muszą być związane z pomiarami prowadzonymi głowicami EMAT. Przyczyna rozbieżności nie jest obecnie znana". I dalej: "Z pomiarów wynika, że DEBRO-30 dostarczył dobre wyniki pomiarów naprężeń w różnych

szynach. Pomiary aparatem z głowicami EMAT, w obecnej chwili, są jak się wydaje zaburzone przez wymagające jeszcze wyjaśnienia efekty związane z powierzchnią szyny" (strona 398). Te niewyjaśnione jeszcze w 1989 roku przyczyny, zgodnie z wynikami uzyskanymi przez autora, to zależność czasu przejścia od kierunku linii pola magnetycznego, natężenia tego pola i magnetyzmu szczątkowego w powierzchniowej warstwie badanych elementów.

Częściowo te niekorzystne zależności można wyeliminować używając zamiast magnesów stałych odpowiednio silnych elektromagnesów. Pomiary prowadzone głowicami typu EMAT z takimi magnesami teoretycznie umożliwiają ich wykorzystanie do odmagnesowania materiału przed pomiarem i do wytworzenia pola magnetycznego dostatecznie silnego, aby jedynym mechanizmem generacji fal były siły Lorentza. Zbudowany w ten sposób układ głowic będzie jednak skomplikowany i ciężki. Wymagał on będzie również intensywnego chłodzenia elektromagnesów, aby nie powodowały one niekontrolowanego nagrzewania badanego materiału. Ograniczy to najprawdopodobniej zastosowania głowic EMAT na podłużne fale podpowierzchniowe jedynie do badań laboratoryjnych.

Często nieświadomą niedogodnością głowic EMAT z magnesami stałymi, szczególnie w warunkach przemysłowych, jest przyciąganie przez nie wszelkich metalowych opiłków. Opiłki takie chętnie gromadzą się w środku magnesu, na powierzchni cewki i są bardzo trudne do usunięcia (oderwania od magnesu). Zważywszy na duże siły przyciskania głowicy do powierzchni elementu (siły magnetyczne) małe nawet opiłki na powierzchni cewki mogą być przyczyną uszkodzenia jej delikatnych przewodów. Również i te trudność wyeliminować mogło by zastosowanie elektromagnesów mogących odmagnesować rdzeń wraz z opiłkami i ułatwić ich usunięcie.

Porównując zalety i wady głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi i przetwornikami typu EMAT, autor wybrał głowice piezoelektryczne. Głównym powodem takiego wyboru była wielokrotnie wyższa skuteczność przetworników piezoelektrycznych. Innym argumentem za wyborem tych przetworników jest możliwość budowy zwartych i lekkich zestawów głowic, mogących znaleźć zastosowanie w pomiarach polowych. Wykonane przez autora badania pokazały, że przetworniki typu EMAT, pomimo bezkontaktowego sposobu działania, są również czułe na stan powierzchni badanego elementu oraz na własności magnetyczne jego powierzchni.

4. BADANIA ANIZOTROPII I WŁASNOŚCI ELASTOAKUSTYCZNYCH STALI

W tym rozdziale autor opisuje wyniki swoich badań nad rozchodzeniem się różnego typu fal w ośrodkach z teksturą. Są to wyniki pomiarów czasu przejścia fal w stalowych próbkach różniących się wartością anizotropii akustycznej wynikającej z istnienia tekstury oraz panujących w ośrodku naprężeń. Krytycznej ocenie poddane są możliwości wykorzystania proponowanych przez innych autorów sposobów eliminowania wpływu tekstury na wyniki ultradźwiękowych badań naprężeń.

Opisane są przykładowe wyniki pomiarów wartości współczynników elastoakustycznych. Te badania wykonane zostały głównie na próbkach poddanych rozciąganiu lub ściskaniu w maszynie wytrzymałościowej.

W przedstawionych w rozdziale pomiarach wykorzystane zostały opracowane przez autora układy głowic na różnego typu fale objętościowe, podpowierzchniowe i powierzchniowe.

4.1. POMIARY CZASÓW PRZEJŚCIA FAL W OŚRODKACH Z ANIZOTROPIĄ TEKSTURALNĄ I NAPRĘŻENIOWĄ

4.1.1. Badania dwójłomności akustycznej

Praktycznie każdy z metali technicznych jest materiałem anizotropowym a jego anizotropia wynika z istnienia tekstury czyli ukierunkowanego ułożenia monokrystalicznych ziaren. Tekstura wyrobów stalowych tworzy się w procesie wytwarzania materiału (krzepnięcia odlewu, kucia czy walcowania). W monokryształach żelaza, w zależności od kierunku propagacji fali względem kierunków krystalograficznych, prędkość fali podłużnej zmienia się od 5430 m/s (dla kierunku 110) do 6410 m/s (dla kierunku 111), a prędkość fali poprzecznej zmienia się od 2480 m/s do 3850 m/s [138]. W stalach konstrukcyjnych zbudowanych z wielu drobnych, różnie zorientowanych ziaren, średnie prędkości tych fal wynoszą 5940 m/s dla fali podłużnej i 3250 m/s dla fali poprzecznej. Takie wartości prędkości przyjmuje się w defektoskopii ultradźwiękowej do lokalizacji wykrywanych wad czy w pomiarach grubości.

W blachach stalowych o małej i średniej grubości, walcowanych na gorąco, założyć można, że anizotropia teksturalna jest jednakowa na całej grubości blachy. W takim przypadku miernikiem anizotropii teksturalnej uśrednionej na grubości jest dwójłomność akustyczna materiału mierzona falami poprzecznymi rozchodzącymi się w kierunku grubości blachy. Wyznaczaną w ten sposób anizotropię B oblicza się jako:

$$(38) \quad B = 2 * (t_1 - t_2) / (t_1 + t_2)$$

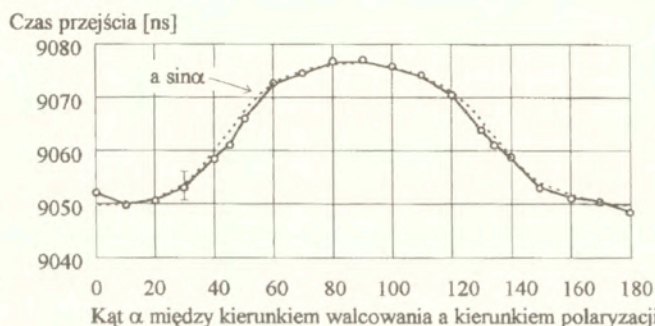
gdzie: t_1 - czas przejścia impulsu fali spolaryzowanej zgodnie z "szybką" osią akustyczną,
 t_2 - czas przejścia impulsu fali spolaryzowanej zgodnie z "wolną" osią akustyczną.

"Szybką" osią akustyczną zwykło się nazywać oś zgodną z kierunkiem walcowania, "wolną" - prostopadłą do niego. W elementach walcowanych na gorąco, takich jak blachy stosowane w konstrukcjach stalowych, anizotropia teksturalna jest zazwyczaj słaba i jej wartość obliczana zgodnie z powyższym wzorem nie przekracza 1%. Na rysunku 61 pokazano zależność czasu przejścia fali poprzecznej przez grubość takiej blachy od kierunku polaryzacji fali względem kierunku walcowania. Pomiar przeprowadzono na próbce Nr 1 wyciętej z niskostopowej blachy o grubości nominalnej 21 mm. Przed badaniami próbka poddana została odprężającej obróbce cieplnej i założyć można, że zmierzona w niej anizotropia akustyczna jest wywołana

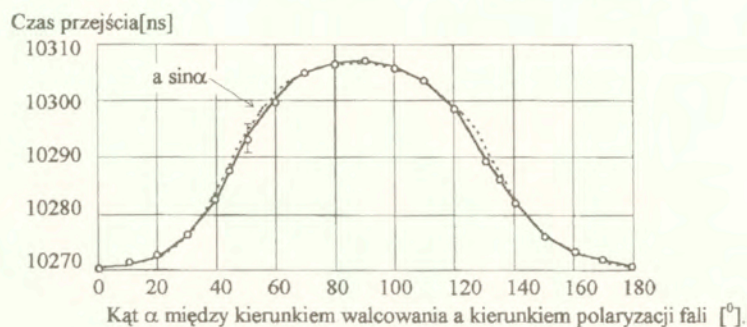
jedynie teksturą materiału. Badania wykonano głowicą "obracaną" o częstotliwości 4 MHz, z przetwornikiem 7*7 mm.

Kątowa zależność czasu przejścia fali poprzecznej pokazuje minimum dla kierunku polaryzacji fali zgodnego z kierunkiem walcowania ("szybka" os akustyczna) i maksimum dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania. Anizotropia akustyczna badanej blachy obliczona zgodnie ze wzorem (38) jest niska i wynosi zaledwie 0,26%. Dla tak niskich wartości anizotropii kątowe zmiany czasu przejścia fali poprzecznej mogą być z dobrym przybliżeniem aproksymowane funkcją $a \sin \alpha$, gdzie a jest odpowiednią amplitudą, pokazaną linią przerywaną na wykresie.

Rysunek 62 pokazuje wyniki pomiarów próbki Nr 2 wyciętej z tej samej blachy co próbka Nr 1. Dłuższe czasy przejścia fal wynikają z nieco większej grubości próbki w miejscu pomiaru. Anizotropia próbki wynosi 0,37% a więc jest większa niż w próbce Nr 1. Wynika to z faktu, że obie próbki wycięte były z innych fragmentów pasa blachy, której materiał poddanych był przeróbce plastycznej w różnym stopniu w zależności od odległości od brzegu walcowanego pasa blachy. Podobnie jak dla pierwszej próbki kątową zależność czasów przejścia można z dobrym przybliżeniem aproksymować funkcją $\sin \alpha$ pokazaną na wykresie linią przerywaną.

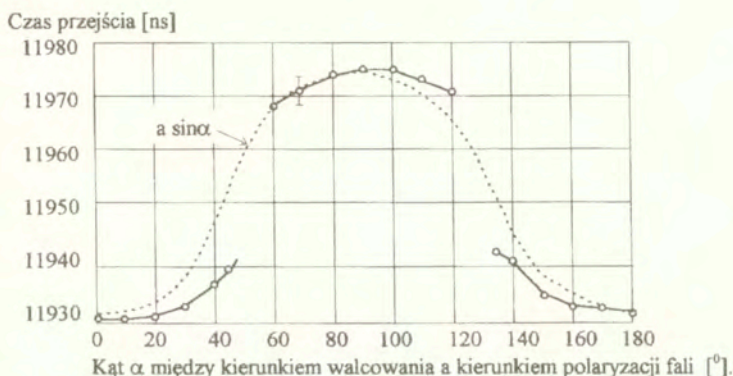


Rys. 61. Zależność czasu przejścia impulsu fali poprzecznej od kąta między kierunkami polaryzacji fali i walcowania w blasce o niskiej anizotropii. Próbka Nr 1.



Rys. 62. Zależność czasu przejścia impulsu fali poprzecznej od kąta między kierunkami polaryzacji fali i walcowania w blasce o niskiej anizotropii. Próbka Nr 2.

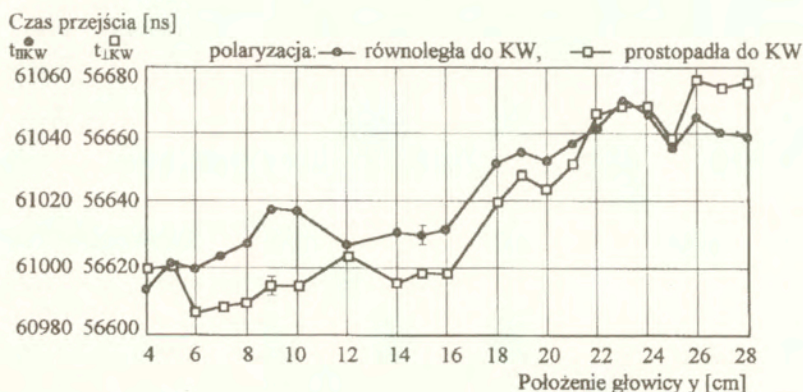
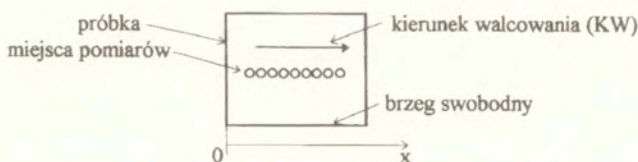
Następny rysunek, 63, pokazuje wyniki podobnych pomiarów przeprowadzonych na próbce Nr 3 wyciętej z blachy wykonanej z innego materiału (stal typu 1562ANb). Grubość blachy wynosiła 19,5 mm a próbka przed badaniami poddana została odprężeniu. Pomiary wykonano tą samą głowicą co pomiary próbek Nr 1 i Nr 2. Wartość anizotropii B badanej blachy jest równa 0,38% a więc jest zbliżona do anizotropii próbki Nr 2 (rysunek 62). Inna jest natomiast kątowa zależność czasu przejścia fali poprzecznej. Dla próbki Nr 3 widoczne są wyraźne „wypłaszczenia” przebiegu czasu przejścia dla kątów α bliskich 0° i 90° . Dla kątów α równych $45 - 60^\circ$ i $120 - 135^\circ$ pomiary były niemożliwe ze względu na zbyt niską amplitudę impulsów. Ten przebieg zmian czasu przejścia, odmienny niż obserwowany dla próbek Nr 1 i Nr 2, wynika z innego typu anizotropii w próbce Nr 3. Najprawdopodobniej jest ona rezultatem nie tylko ukierunkowanego ułożenia ziaren materiału ale i ukierunkowanego ułożenia zanieczyszczeń niemetalicznych rozłożonych na granicach ziaren metalu. Dla porównania, podobnie jak na dwóch poprzednich rysunkach, linią przerywaną pokazano na wykresie przebieg funkcji $a \sin \alpha$.



Rys. 63. Zależność czasu przejścia impulsu fali poprzecznej od kąta między kierunkami polaryzacji fali i walcowania próbki wykonanej z materiału z zanieczyszczeniami. Próbką Nr 3.

Przykładem materiału walcowanego o znacznie silniejszej anizotropii teksturalnej jest specjalna blacha poddana po walcowaniu przyspieszonemu chłodzeniu. Badania anizotropii akustycznej próbki wyciętej z arkusza takiej blachy, próbka Nr 4, autor przeprowadził w 1991 roku. Jeden z boków tej próbki był brzegiem pasa walcowanej blachy (brzeg swobodny). Wyniki pomiarów czasu przejścia fal poprzecznych przez grubość próbki, dla różnych położów głowicy na jej powierzchni, pokazane są na rysunkach 64 i 65. Rysunek 64 przedstawia rozkład czasów przejścia fal poprzecznych o polaryzacjach równoległej i prostopadłej do kierunku walcowania (KW), zmierzonych wzdłuż linii równoległej do kierunku walcowania. Pomiary wykonano w odległości 15 cm od swobodnego brzegu blachy.

Średnia wartość anizotropii B obliczonej zgodnie ze wzorem (38) na długości badanego fragmentu blachy wynosi 7,45%. Oznacza to, że w stosunku do wyników uzyskanych na próbkach Nr 1, 2 i 3 wartość anizotropii uśrednionej na grubości próbki Nr 4 jest blisko 20-krotnie wyższa. Anizotropia tej próbki zmienia się nieznacznie na jej długości (w kierunku walcowania) od 7,4% dla współrzędnej $x=28$ cm do wartości 7,5% dla $x=8$ cm.



Rys. 64. Rozkład anizotropii teksturalnej wzdłuż kierunku walcowania blachy specjalnej.

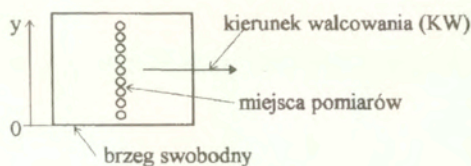
Rysunek 65 pokazuje rozkłady czasów przejścia fal poprzecznych w próbce Nr 4 zmierzonych w różnych punktach, wzdłuż linii prostopadłej do kierunku walcowania (KW) i swobodnego brzegu blachy. Dla tego przekroju blachy widoczne są duże zmiany czasu przejścia fali poprzecznej spolaryzowanej równoległe do kierunku walcowania. Zmiany te sięgają 0,4% średniego czasu przejścia. Wartości anizotropii akustycznej w tym przekroju blachy zmieniają się od 7,6% dla współrzędnej $y=28$ cm do 7,0% dla $y=4$ cm.

Próby pomiarów kątowych rozkładów czasu przejścia fali poprzecznej rozchodzącej się w kierunku grubości blachy nie powiodły się. Było to wynikiem silnej anizotropii umożliwiającej pomiary impulsów spolaryzowanych jedynie w kierunkach osi akustycznych ośrodka lub bliskich tym kierunkom (podobnie jak w próbce Nr 3, rysunek 63).

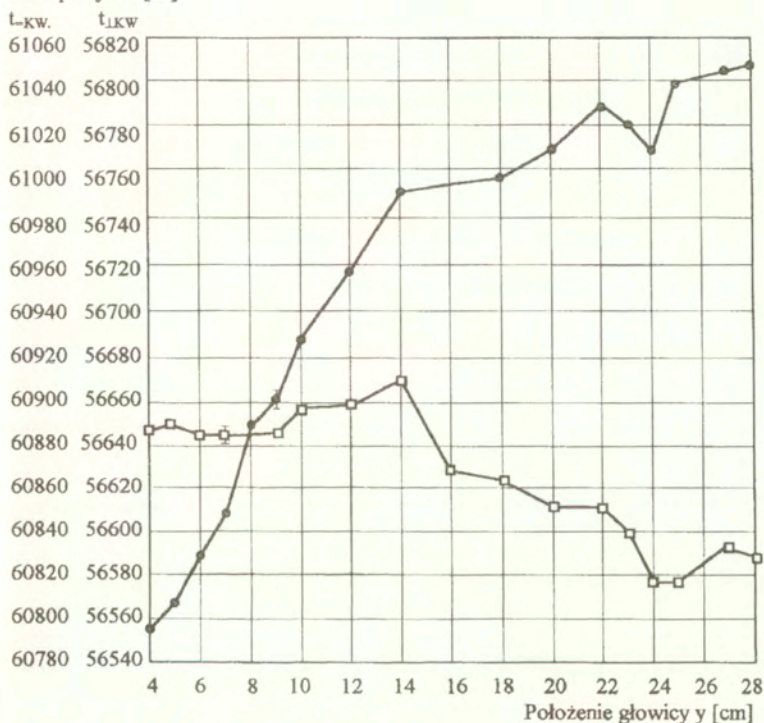
Dla próbki Nr 4 wykonane zostały również pomiary czasu przejścia fal podłużnych propagujących się w kierunku grubości. Razem z czasami przejścia fal poprzecznych o kierunkach polaryzacji zgodnych z kierunkami tekstury, ich znajomość pozwala na obliczenie prędkości unormowanej v^N zgodnie z [64]. Prędkość taką oblicza się jako:

$$(39) \quad v^N_{ij} = \sqrt{\frac{v_{ij}^2}{v_{31}^2 + v_{32}^2 + v_{33}^2}}$$

gdzie: v_{ij} - prędkość fali rozchodzącej się w kierunku i , spolaryzowanej w kierunku j ,
 indeks 3 oznacza kierunek grubości blachy,
 indeks i oznacza kierunek walcowania.



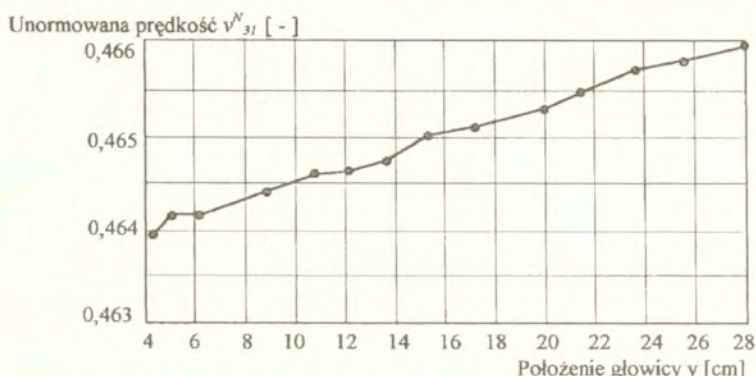
Czas przejścia [ns]



polaryzacja: —●— równoległa do KW, —□— prostopadła do KW

Rys. 65. Rozkład anizotropii teksturalnej wzdłuż linii prostopadłej do kierunku walcowania blachy specjalnej.

Na rysunku 66 pokazany jest rozkład unormowanej prędkości v_{31}^N fali poprzecznej spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem walcowania. Zmiany prędkości unormowanej obliczonej dla położenia określonych odległości y od brzegu blachy, równą od 4 do 28 cm, wynoszą 0,46%. Są więc zbliżone do względnych zmian nieunormowanej prędkości fali poprzecznej w tym przekroju próbki. Oznacza to, że w przypadku tej próbki, charakteryzującej się silną anizotropią, suma kwadratów prędkości fal poprzecznych i podłużnej rozchodzących się w kierunku grubości blachy, nie jest wartością stałą.



Rys. 66. Rozkład unormowanej prędkości v_{3l} (fała poprzeczne rozchodząca się w kierunku grubości, spolaryzowana zgodnie z kierunkiem walcowania) w próbce Nr 4.

Wyniki pomiarów wykonanych na stalowych blachach o podobnych grubościach, ale różnych wartościach anizotropii teksturalnej, przedstawione na rysunkach 61 - 66, pokazują, że kątowe rozkłady prędkości fali poprzecznej rozchodzącej się w kierunku grubości blachy mają różny charakter lub są niemierzalne. W metalach technicznych ukierunkowane zanieczyszczenia materiału mogą być istotnym czynnikiem tworzenia anizotropii akustycznej. Wartość takiej anizotropii „zanieczyszczeniowej” zależna jest od technologii produkcji stali. W odróżnieniu od anizotropii wynikającej z ukierunkowanego ułożenia ziaren, której wartość dla materiału idealnego może być teoretycznie przewidywana, anizotropia w rzeczywistych metalach nie poddaje się proponowanym opisom. Dlatego w zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej autor ograniczył pomiary dwójmnośności akustycznej do kierunków polaryzacji fal zgodnych z kierunkami osi akustycznych materiału i do przypadków gdy kierunki tekstury pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych.

Przykładem gdzie ukierunkowane zanieczyszczenia materiału są głównym czynnikiem tworzenia anizotropii akustycznej są badane przez autora koła kolejowe produkowane w jednej z hut w Australii. W niektórych fragmentach ich wieńców lokalne skupiska ukierunkowanych zanieczyszczeń były przyczyną silnej anizotropii akustycznej o wartości osiągającej 10%. Badania metalograficzne przeprowadzone w takich wieńcach potwierdziły istnienie skupisk zanieczyszczeń niemetalicznych, ułożonych w kierunku obwodowym wieńca, zgodnie z kierunkiem walcowania. Były to małe, pasmowe zanieczyszczenia na tyle drobne, że niewykrywalne metodami ultradźwiękowymi (w czasie badań defektoskopowych). Natomiast ich wkład w ogólną anizotropię materiału był równoważny obwodowemu naprężeniu o wartości do 1200 MPa! Przykład ten pokazuje, że istnienie w materiale zanieczyszczeń, które nie muszą nawet prowadzić do obniżenia własności eksploatacyjnych elementu, praktycznie uniemożliwia stosowanie tensometrii ultradźwiękowej. Pozytywną zmianą zachodzącą w hutnictwie stali jest coraz częstsze stosowanie ciągłego wytopu. Stale wytwarzane w ten sposób charakteryzują się wysoką czystością i w wykonywanych z nich wyrobach problem anizotropii „zanieczyszczeniowej” praktycznie nie istnieje.

Innym wnioskiem z pomiarów przeprowadzonych na próbkach wykonanych z blach jest obserwacja, że w pomiarach czasu przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych zgodnie z kierunkami osi akustycznych, odchylenie kierunku polaryzacji od kierunku tekstury o kąt

równy 5° pociąga za sobą błąd mierzonego czasu przejścia o mniej niż 10% ($\sin 5^{\circ} = 0,0087$). Pozwala to na zachowanie akceptowalnej z praktycznego punktu widzenia dokładności pomiarowej przy badaniach elementów, których kierunki głównych osi akustycznych są znane jedynie z dokładnością do kilku stopni.

Wyniki uzyskane w pomiarach dwójłomności akustycznej w próbce Nr 4 pokazują, że w niektórych materiałach wartość anizotropii akustycznej B nie jest stała. Przykładowo, zmiany czasu przejścia pokazane na rysunku 65 są równoważne zmianom wartości naprężenia o 770 MPa. Oznacza to, że w przypadku takich blach, do wyznaczenia wartości naprężeń konieczna jest znajomość nie tylko średniej wartości anizotropii ale i jej rozkładu na szerokości blachy. Takie podejście zastosowane zostało w pomiarach promieniowych rozkładów naprężeń we wieńcach kolejowych kół kutyh opisanych w rozdziale 5.3.2. Wartość anizotropii teksturalnej w tych kołach zmieniała się w kierunku promieniowym i zmiany te były uwzględniane przy obliczaniu wartości naprężeń.

Opisane powyżej zmiany czasu przejścia fal poprzecznych wywołane były anizotropią wynikającą z budowy materiału (tekstura, zanieczyszczenia). W przeprowadzonych w 1986 z udziałem autora eksperymentach badana była anizotropia naprężeniowa B_{σ} wywołana płaskim stanem naprężeń. Obiektem badań były stalowe krążki poddawane ścisnaniu wzdłuż średnicy. Krążki wykonane były z blachy posiadającej swoją anizotropię teksturalną. Celem pomiarów była ocena możliwości ultradźwiękowych pomiarów naprężeń głównych w materiałach anizotropowych, w płaskim stanie naprężenia.

Pomiary wykonano w stalowych krążkach o średnicy 138 mm i grubości 15 mm. W środku krążka ściskanego wzdłuż jego średnicy, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 66, panuje płaski stan naprężenia a wartości naprężeń głównych opisują równania:

$$(40) \quad \sigma_2 = 2P / \pi g d \quad (\text{ściskanie})$$

$$(41) \quad \sigma_3 = -6P / \pi g d \quad (\text{rozciąganie})$$

gdzie: g - grubość krążka,
 d - średnica krążka,
 P - siła ściskająca.

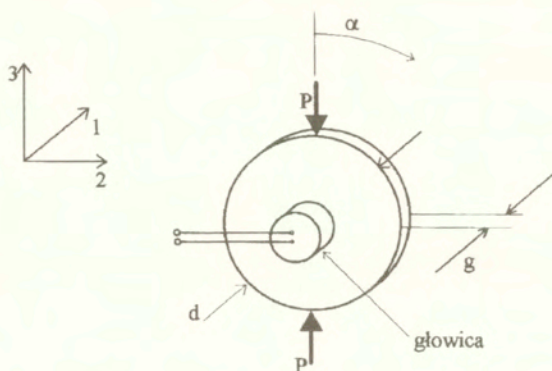
Głowica ultradźwiękowa ustawiona była w czasie pomiarów w środku krążka, fala poprzeczna rozchodziła się w kierunku jego grubości (kierunek I) a kierunek polaryzacji fali zmieniany był przez obracanie głowicy. Schemat pomiaru pokazano na rysunku 67.

Na czas przejścia impulsu fali poprzecznej przez grubość krążka wpływ mają obydwie składowe naprężenia. Dla kierunku polaryzacji tworzącego z kierunkiem 3 kąt α zależność ta opisana jest równaniem:

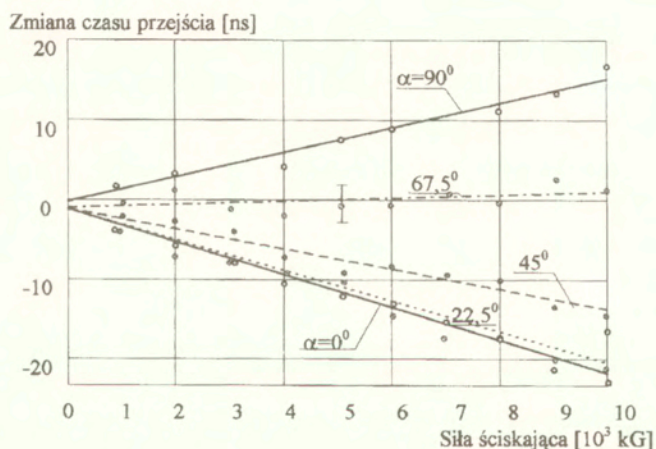
$$(42) \quad \Delta t / t_0 = \sigma_3 [\beta_{133} * \cos \alpha + \beta_{123} * \sin \alpha]$$

gdzie: Δt - przyrost czasu przejścia wywołany przyłożeniem obciążenia,
 t_0 - czas przejścia dla $P=0$,
 β_{133} i β_{123} - współczynniki elastoakustyczne.

Rysunek 68 pokazuje zależność czasu przejścia fali poprzecznej rozchodzącej się w kierunku grubości krążka od siły ściskającej krążek. Krążek ściskany był w kierunku walcowania, czyli w kierunku "szybkiej" osi akustycznej. Pomiary wykonano dla kierunków polaryzacji fali tworzącej różne kąty α z kierunkiem ściskania.



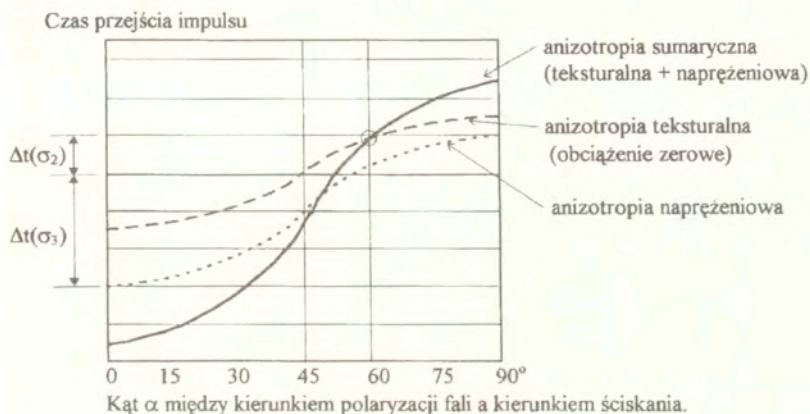
Rys. 67. Schemat pomiarów ultradźwiękowych krążka poddanego ścisnaniu w kierunku jego średnicy.



Rys. 68. Zależności czasów przejścia fal poprzecznych przez grubość krążka poddanego ścisnaniu od siły ścisniającej, dla różnych kierunków polaryzacji fal względem naprężeń głównych.

Zauważalna jest mała zmiana czasu przejścia dla fali o kierunku polaryzacji tworzącej kąt $67,5^\circ$ z kierunkiem siły ścisniającej. Tak nieznaczne zmiany czasu dla tego kierunku polaryzacji wynikają z nałożenia się na anizotropię teksturalną anizotropii naprężeniowej. Składowe naprężenia w środku krążka spełniają warunek $\sigma_3 = -3\sigma_2$. Rysunek 69 wyjaśnia schematycznie nakładanie się anizotropii naprężeniowej i teksturalnej. Zakładając, że kątowe zmiany czasu przejścia fali wynikające z anizotropii teksturalnej i naprężeniowej mogą być aproksymowane

funkcją $a \sin \alpha$, gdzie a jest odpowiednią amplitudą, czas przejścia fali jest niezależny od przyłożonej do krążka siły dla kierunku polaryzacji tworzącego z kierunkiem ściskania kąt 60° .



Rys. 69. Schemat powstawania sumarycznej anizotropii akustycznej w krążku ściskanym wzdłuż średnicy

Wartość anizotropii naprężeniowej wywołanej w badanym krążku ściskanym siłą równą 10 ton wynosi jedynie 0,1%. Pokazuje to jak nikły jest wpływ naprężeń na sumaryczną anizotropię stalowych, walcowanych wyrobów i obrazuje konieczność eliminacji wpływu anizotropii teksturalnej na wyniki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń.

4.1.2. Pomiary czasów przejścia fal podpowierzchniowych

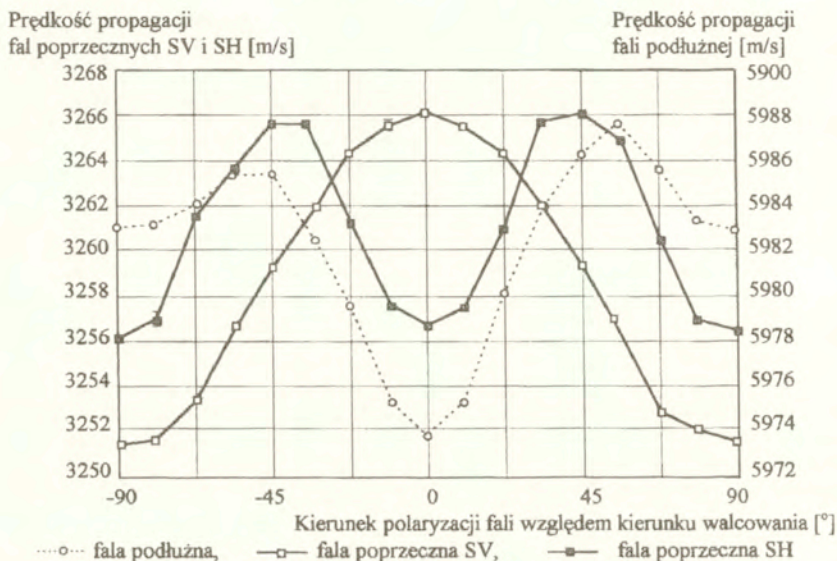
Pomiary prowadzone falami podpowierzchniowymi dostarczają informacji o własnościach akustycznych wierzchniej warstwy materiału. Anizotropia teksturalna A_W badana takimi falami obliczana jest, podobnie jak dla pomiarów dwójtomności akustycznej, jako:

$$(43) \quad A_W = 2 * (t_{II} - t_I) / (t_{II} + t_I) = 2 * (v_I - v_{II}) / (v_{II} + v_I)$$

gdzie: t_{II} - czas przejścia impulsu fali spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem walcowania,
 t_I - czas przejścia impulsu fali spolaryzowanej prostopadłe do kierunku walcowania,
 v_{II} - prędkość impulsu fali spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem walcowania,
 v_I - prędkość impulsu fali spolaryzowanej prostopadłe do kierunku walcowania.

Rysunek 70 przedstawia kątowe rozkłady prędkości podpowierzchniowych fal poprzecznych typu SV i SH oraz podpowierzchniowej fali podłużnej w stalowej blasze o niskiej anizotropii teksturalnej (próbka Nr 1). Dla fali podłużnej maksimum prędkości obserwowane jest gdy rozchodzi się ona w kierunkach tworzących z kierunkiem walcowania kąty około 45° . Minimum prędkości tej fali - gdy rozchodzi się ona w kierunku walcowania. Kątowy przebieg prędkości nie jest w pełni symetryczny i prędkości propagacji fali rozchodzącej się w kierunkach 45° i -45° różnią się o około 2,1 m/s. Dla fali poprzecznej typu SV maksimum i minimum prędkości obserwowane są odpowiednio dla kierunków propagacji 0° i 90° . Prędkości fali poprzecznej typu SH dla kierunków propagacji 0° i 90° są, zgodnie z

oczekiwaniem, zbliżone a maksimum prędkości fala ta uzyskuje przy kierunkach propagacji około $\pm 45^\circ$. Wartości anizotropii teksturalnej, obliczanej zgodnie ze wzorem (43) wynoszą dla fali podłużnej - 0,23%, dla fali poprzecznej SV - 0,43% i dla fali poprzecznej SH - 0,32%. Jak widać wartość współczynnika anizotropii akustycznej jest różna dla różnych typów fal. Przedstawione na rysunku wyniki pomiarów prędkości fal SH uzyskane zostały zestawem głowic o „suchym” sprzężeniu akustycznym, opisanym w rozdziale 3.2.2.5.

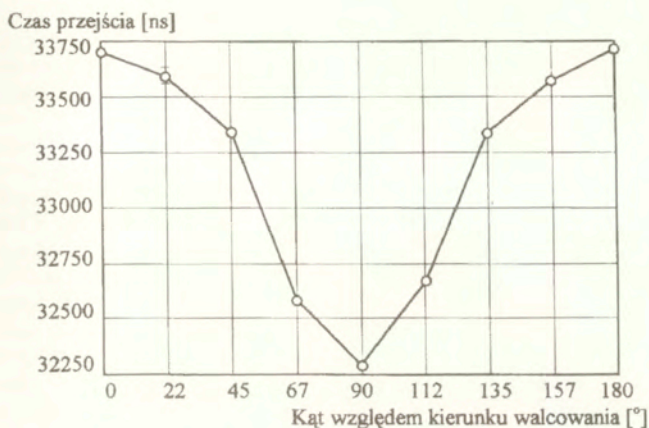


Rys. 70. Kątowe rozkłady prędkości podpowierzchniowych fal poprzecznych i podłużnych w próbce Nr 1.

Pomimo dogodnych warunków pomiarowych (gładka, czysta próbka) i niskiej anizotropii badanej blachy, uzyskane na tej próbce kątowe rozkłady prędkości nie są dokładnie symetryczne względem kierunku walcowania. Przyczyną tej asymetrii jest zapewne to, że fale rozchodzące się w kierunkach innych niż kierunki osi akustycznych, nie są czystymi modami fal poprzecznych i podłużnej. Przy pomiarach prędkości grupowej, jakie stosowane są w tensometrii ultradźwiękowej, na wynik pomiaru wpływać mogą własności zestawu głowic stosowanego w pomiarach takie jak na przykład pozioma charakterystyka głowic nadawczych i dokładność współosiowego ustawienia wszystkich głowic w zestawie.

Kątowe rozkłady prędkości fal powierzchniowych na tej samej próbce pokazane są na rysunku 71. Pomiary przeprowadzono zestawem głowic z „suchym” sprzężeniem akustycznym, opisanym w rozdziale 3.2.3. Kątowy rozkład prędkości jest zbliżony do rozkładu obserwowanego dla fali poprzecznej typu SV z maksimum prędkości dla kierunku rozchodzenia się zgodnego z kierunkiem walcowania i minimum dla kierunku prostopadłego.

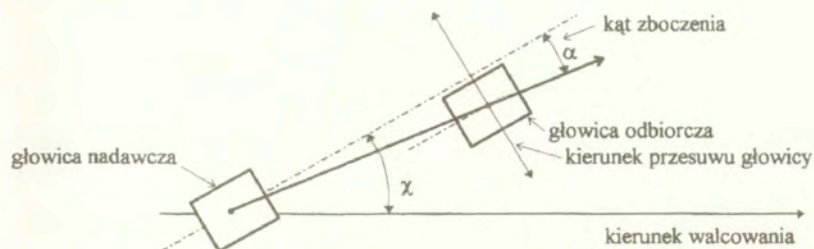
W odróżnieniu od materiałów o słabej anizotropii, w próbce Nr 4 wykonanie kątowych rozkładów prędkości propagacji podpowierzchniowej fali podłużnej okazało się niemożliwe. Możliwe były jedynie pomiary fali rozchodzącej się w kierunkach osi akustycznych. Dla kątów propagacji fali zbliżonych do kierunku walcowania zaobserwowano mierzalne zбочenie fali



Rys. 71. Kątowy rozkład czasów przejścia fal powierzchniowych w próbce Nr 1.

podłużnej (zjawisko obserwowane w monokryształach). Zboczenie fali świadczy o tym, że kierunek transportu energii (potok energii) nie jest równoległy do wektora falowego (nie jest prostopadły do czoła fali), a prędkość grupowa nie jest równa prędkości fazowej.

Schemat pomiaru kąta zboczenia pokazano na rysunku 72. Oś głowicy nadawczej tworzy z kierunkiem walcowania kąt χ . Głowica odbiorcza, ustawiona równoległe do głowicy nadawczej, przesuwana jest do położenia, w którym amplituda odbieranego impulsu jest maksymalna. Położenie to wyznacza kąt zboczenia α .

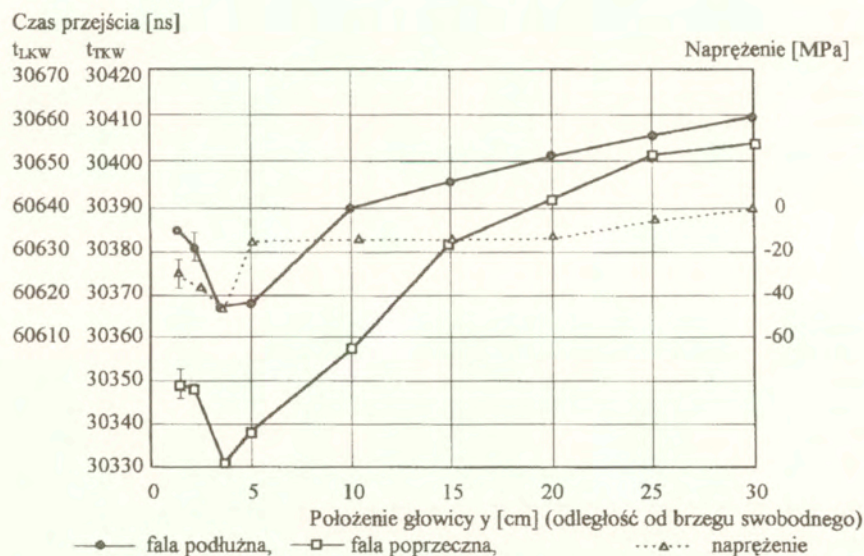
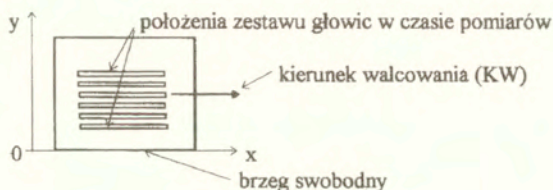


Rys. 72. Schemat pomiaru zboczenia podpowierzchniowej fali podłużnej nadawanej pod kątem χ w stosunku do kierunku walcowania.

Dla kąta $\chi=10^\circ$ kąt zboczenia ma wartość $\alpha=5,5^\circ$. Dla $\chi=20^\circ$ kąt zboczenia $\alpha=9^\circ$. Dla kątów $20^\circ < \chi < 45^\circ$ amplituda fali podłużnej była niemierzalna. Pomiary podpowierzchniową falą podłużną wykonane zgodnie ze schematem jak na rysunku 72 wykazały, że dla kierunków propagacji niezgodnych z kierunkami osi akustycznych, minimum czasu przejścia nie pokrywa się z maksimum amplitudy odbieranego impulsu. Przykładowo dla głowicy nadawczej ustawionej pod kątem $\chi=20^\circ$ minimum czasu przejścia obserwowane było dla kąta α równego

około 4° (maksimum amplitudy dla $\alpha=9^\circ$). Rezultaty te potwierdzają tezę, że w ośrodkach anizotropowych wyznaczanie wartości naprężeń na podstawie pomiaru czasu przejścia fal rozchodzących się w kierunkach innych niż kierunki osi akustycznych i przy stosowaniu w pomiarach małych przetworników generujących w ośrodku rozbieżne wiązki, obarczone mogą być znacznymi błędami.

Wyniki pomiarów czasów przejścia fal rozchodzących się w kierunkach osi akustycznych wykonanych na próbce Nr 4 pokazuje rysunek 73. Są to rozkłady czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych typu SV propagujących się w kierunku walcowania, w różnych odległościach od swobodnego brzegu blachy.

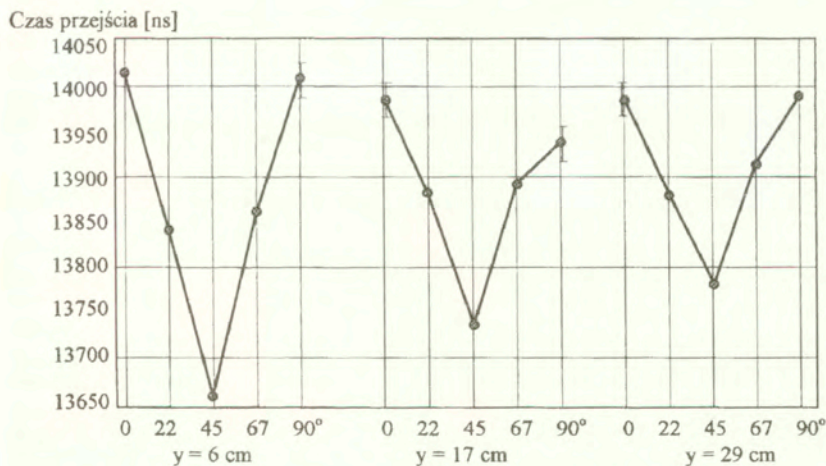
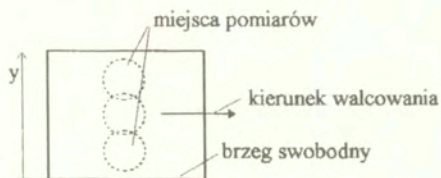


Rys. 73. Czasy przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych SV propagujących się w kierunku walcowania, próbka Nr 4.

Widoczne są zmiany czasów przejścia zarówno fal podłużnych jak i poprzecznych. Najkrótsze czasy zmierzone zostały dla odległości od swobodnego brzegu blachy $y=4$ cm, najdłuższe - dla $y=30$ cm. Oznacza to, że anizotropia A_W powierzchniowej warstwy próbki, podobnie jak anizotropia B uśredniona na grubości blachy (rysunek 65), zmienia się w kierunku

prostopadłym do brzegu blachy. Przyjmując czasy zerowe jak dla $y=30$ cm autor obliczył wartości składowej hipotetycznego naprężenia σ_x w próbce (w rzeczywistości naprężenia w próbce, po odprężającej obróbce termicznej, były równe lub bliskie zero). Wartość σ_x obliczono zgodnie ze wzorem (25) wykorzystującym poprawkę strukturalną. Przebieg wartości tak obliczonych naprężeń na szerokości próbki pokazany jest na wykresie linią przerywaną. Dla współrzędnej y równej od 5 do 30 cm zmiany wartości σ_x zawierają się w zakresie jedynie ± 10 MPa. Świadczy to o poprawnym działaniu poprawki strukturalnej (wartość σ_x jest prawie stała pomimo zmian tekstury). Jedynie przy swobodnym brzegu próbki ($y=0 \div 4$ cm) wartości σ_x są niższe. Ten fragment materiału nie może jednak być traktowany jak ośrodek o symetrii ortorombowej ponieważ podlegał on w czasie przetwarzania blachy (walcowania) odkształceniom plastycznym zarówno w kierunku walcowania jak i w kierunku prostopadłym do niego.

Rysunek 74 przedstawia wyniki pomiarów czasu przejścia podpowierzchniowej fali poprzecznej typu SH, wykonane w trzech obszarach próbki Nr 4. Kierunki propagacji fali tworzyły kąty 0, 45 i 90° z kierunkiem walcowania. Pomiar czasu były możliwe ponieważ w



Rys. 74. Kątowe rozkłady czasów przejścia podpowierzchniowych fal poprzecznych SH w trzech obszarach próbki Nr 4.

ośrodka o symetrii ortorombowej, dla tych kierunków propagacji fali względem kierunku walcowania, prędkość grupowa fali SH jest równa prędkości fazowej i fala rozchodzi się jako czysta fala poprzeczna.

Dla współrzędnej y (odległość od swobodnego brzegu blachy) równej 6 i 29 cm, czasy przejścia w kierunkach zgodnym i prostym do kierunku walcowania są sobie równe. Dla $y=17$ cm uzyskane wyniki pokazują, że warunek $v_{SH}^{IKW} = v_{SH}^{JKW}$, czyli jeden z „niezmienników” proponowanych do wykorzystania przez innych autorów w ultradźwiękowych badaniach naprężeń, nie jest spełniony.

4.2 Wyznaczanie współczynników elastoakustycznych

Wartości współczynników elastoakustycznych zależne są od materiału, w którym rozchodzą się fale, od typu fali ultradźwiękowej, wzajemnej orientacji kierunków propagacji i polaryzacji fali oraz kierunku działania naprężenia. Wartość współczynnika obliczana jest według wzoru (10). Zazwyczaj wartości współczynników elastoakustycznych wyznaczane są na próbkach poddanych rozciąganiu lub ściskaniu w maszynie wytrzymałościowej. Przykładowe wyniki pomiarów wykonanych na próbce o wymiarach 500*140*33 mm poddanej rozciąganiu pokazuje rysunek 75 [139]. Próbką wykonaną była ze stali stosowanej na kute koła monoblokowe. Pomiar polegał na wyznaczeniu czasów przejścia różnego typu fal w materiale próbki, dla różnych sił przyłożonych do próbki (różnych wartości naprężenia rozciągającego). Na osi pionowej odłożono stosunek przyrostu czasu przejścia wywołanego przyłożeniem naprężenia do czasu przejścia przy obciążeniu zerowym.

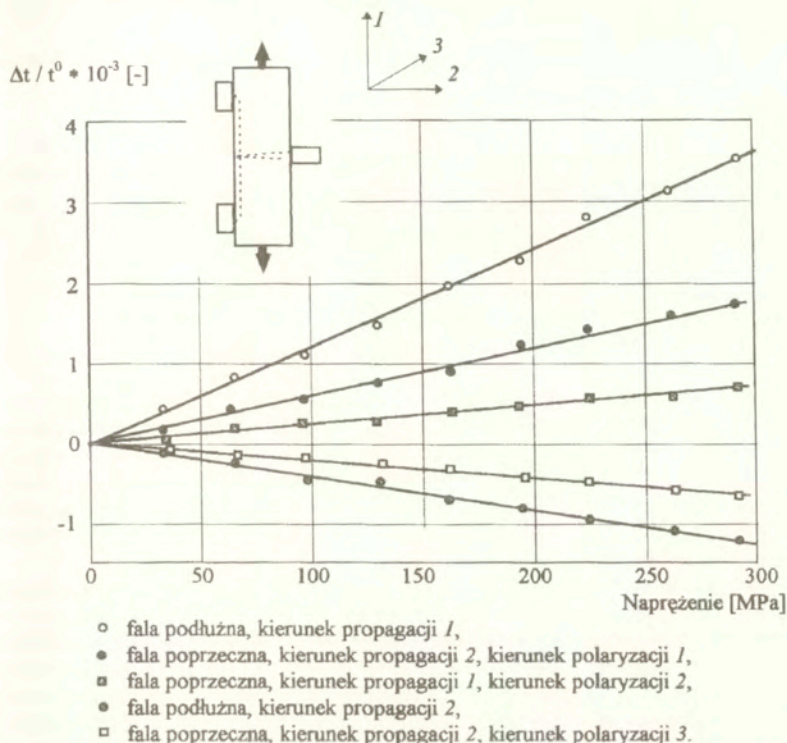
Przyłożenie obciążenia wywołuje największe zmiany czasu przejścia fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku naprężenia i fali poprzecznej, rozchodzącej się prostopadle do kierunku naprężenia ale spolaryzowanej równoległe do niego. Te właśnie fale, jako „najczulsze” wykorzystywane są w tensometrii ultradźwiękowej. Dla fal, w których kierunki drgania cząstek zorientowane są prostopadle do kierunku naprężenia (fala podłużna i poprzeczna rozchodzące się prostopadle do kierunku naprężenia, fala poprzeczna spolaryzowana prostopadle do niego), naprężenie rozciągające powoduje spadki czasów przejścia. Dotyczy to fali poprzecznych i fali podłużnej, rozchodzących się zarówno jako fale objętościowe i jako fale powierzchniowe.

Obliczone dla opisanej próbki wartości współczynników elastoakustycznych wynoszą:

$$\begin{aligned}\beta_{111} &= -1,26 \cdot 10^{-5} \text{ [MPa}^{-1}\text{]}, \\ \beta_{121} &= -0,24 \cdot 10^{-5} \text{ [MPa}^{-1}\text{]}, \\ \beta_{211} &= -0,57 \cdot 10^{-5} \text{ [MPa}^{-1}\text{]}, \\ \beta_{231} &= +0,22 \cdot 10^{-5} \text{ [MPa}^{-1}\text{]}, \\ \beta_{221} &= +0,36 \cdot 10^{-5} \text{ [MPa}^{-1}\text{]}.\end{aligned}$$

Wartości współczynników elastoakustycznych wyznaczonych na podstawie podobnych pomiarów na próbce wykonanej ze stali stosowanej na wały okrętowe wynoszą $\beta_{111} = -1,10 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] i $\beta_{211} = -0,74 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] [140]. W stosunku do stali, z której produkowane są koła kolejowe, różnica wartości współczynnika β_{111} sięga blisko 20%. Obrazuje to wpływ własności sprężystych ośrodka (stali) na zmiany prędkości propagacji fal wywołane naprężeniem. Jednocześnie pokazuje, że stosowanie tensometrii ultradźwiękowej w elementach wykonanych z nieznannej stali, bez uprzedniego wykonania badań jej własności elastoakustycznych, może prowadzić do znacznych błędów wartości ocenianych naprężeń. Około dwukrotnie wyższe niż w stalach wartości współczynników elastoakustycznych

obserwowane są w stopach lekkich (durale, stopy hydronalium). W czystym aluminium wartość współczynnika β_{111} wynosi $7,75 \cdot 10^{-3}$ [MPa⁻¹] czyli jest około 6-cio krotnie wyższa niż dla stali konstrukcyjnych.



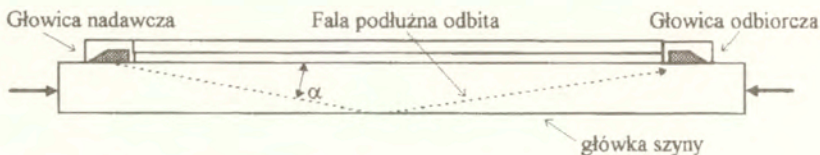
Rys. 75. Wyniki pomiarów współczynników elastoakustycznych stali stosowanej do wyrobu kół kolejowych.

Przygotowanie prostopadłościennych próbek do badań zależności czasu przejścia od naprężenia jest kosztowne. W roku 1990, unikając konieczności wykonywania specjalnych próbek, autor wykonał pomiary współczynników elastoakustycznych β_{111} , β_{211} i β_{231} na odcinkach szyny kolejowych poddanych ścisnaniu i rozciąganiu. Do prób rozciągania badane szyny wyposażone zostały w przymocowane do ich końców uchwyty mocowane w szczękach maszyny. Do prób ścisnienia jedynie końcowe powierzchnie odcinków szyn zostały obrabiane mechanicznie. Pomiary wykonane zostały na odcinkach szyn typu S49 i UIC-60, produkcji Huty Katowice, na 200-tonowej maszynie wytrzymałościowej w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa. W szynie S49 siła 100 ton odpowiadało naprężenie równe 155,5 MPa a w szynie UIC-60 - naprężenie 134,45 MPa.

Przeprowadzone badania obejmowały wpływ naprężenia na czas przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych oraz fal podłużnych rozchodzących się w główce szyny jako fale odbite oraz fale ulegające transformacji. W odróżnieniu od fali podpowierzchniowej czy fali rozchodzącej się w kierunku grubości, fale odbite i transformowane nie rozchodzą się

równoległe do kierunku naprężenia. Dlatego też współczynniki elastoakustyczne dla takich fal to „współczynniki techniczne”, zależne nie tylko od typu fali i badanego materiału ale również od sposobu w jaki fala rozchodzi się między głowicami nadawczą i odbiorczą. Ten z kolei zależy od grubości badanego elementu i odległości między głowicami w zestawie stosowanym w pomiarach.

Schemat rozchodzenia się odbitej fali podłużnej między głowicami nadawczą i odbiorczą pokazany jest na rysunku 76.



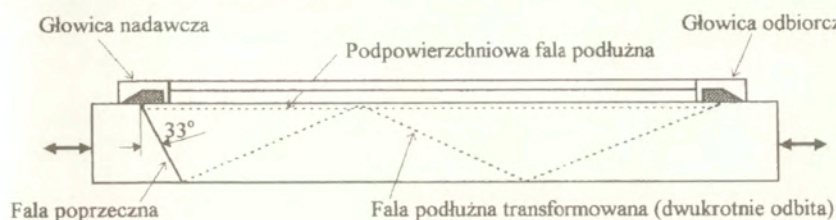
Rys. 76. Schemat pomiaru czasu przejścia podłużnej fali odbitej.

Badania prowadzono na odcinku szyny typu UTC-60 poddanej ścisaniu w maszynie wytrzymałościowej sprzęgając zestaw głowic do boku głowki szyny. W czasie rozciągania lub ścisania szerokość głowki szyny ulega zmianie (współczynnik Poissona) a zmiana ta wpływa na długość drogi fali w materiale. Długość drogi zależna jest również od odległości między głowicami nadawczymi i odbiorczymi w zestawie i dlatego wartość współczynnika elastoakustycznego dla fali odbitej musi być wyznaczana indywidualnie dla każdego zestawu głowic i badanego elementu.

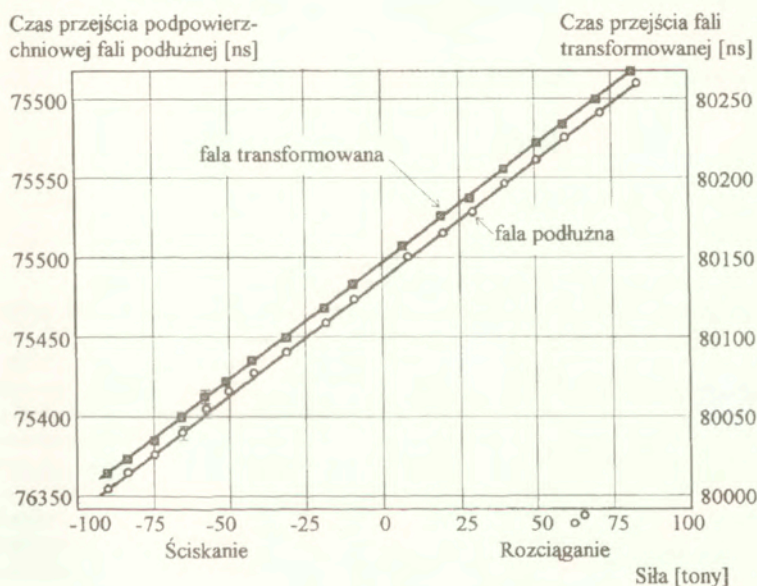
Wartość współczynnika elastoakustycznego β_{11a} dla odbitej fali podłużnej jest jedynie nieznacznie niższa niż dla fali podłużnej rozchodzącej się równoległe do kierunku naprężenia w tym samym materiale. Wynika to stąd, że w badanej próbce kierunek propagacji fali podłużnej jest zbliżony do kierunku naprężenia. Można założyć, że wartość współczynnika elastoakustycznego dla fali podłużnej β_{11a} , rozchodzącej się pod kątem α względem kierunku naprężenia, dla małych kątów α jest równa $\beta_{11a} \approx \beta_{11l} \cdot \cos \alpha$. Wartość współczynnika elastoakustycznego obliczonego przy takim założeniu dla zestawu głowic pokazanego na rysunku 46, z uwzględnieniem zmiany grubości elementu wywołanej naprężeniem, wyniosła $\beta_{11a} = -1,18 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹]. Pomiar wartości współczynnika wykonany na odcinku szyny poddanej ścisaniu do 269 MPa dały wynik równy $-1,19 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹]. Oznacza to, że wartość współczynnika elastoakustycznego dla fali odbitej jest jedynie o 5% niższa od wartości maksymalnej, obserwowanej dla fali podłużnej rozchodzącej się równoległe do kierunku naprężenia (β_{11l}).

W odcinku szyny S49 poddanej ścisaniu i rozciąganiu mierzone były czasy przejścia podpowierzchniowej fali podłużnej rozchodzącej się wzdłuż boku głowki szyny i fali transformowanej rozchodzącej się w główce szyny. Schemat pomiaru pokazany jest na rysunku 77. Głowica nadawcza generuje w materiale wiązkę fal podłużnych i poprzecznych rozchodzących się w głąb materiału. Fala poprzeczna rozchodzi się pod kątem 33° względem normalnej do powierzchni. Fala ta, powstająca również w dalszych odległościach od głowicy wskutek odpromieniowania (patrz rysunek 22, strona 66), po dotarciu do przeciwległego boku głowki szyny ulega transformacji na falę podłużną, która rozchodzi się wzdłuż tego boku. Dzięki rozbieżności wiązki fal podłużnych możliwy był pomiar czasu przejścia fali, która przed dotarciem do głowicy odbiorczej dwukrotnie odbiła się od bocznych powierzchni głowki

szyny. Rozchodząc się taką drogą impuls przebył czterokrotnie szerokość głowki szyny. Wyniki pomiarów zmian czasów przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej i fali transformowanej pokazuje rysunek 78.



Rys. 77. Schemat pomiaru czasu przejścia fal podłużnej podpowierzchniowej i transformowanej w głowce szyny S49.



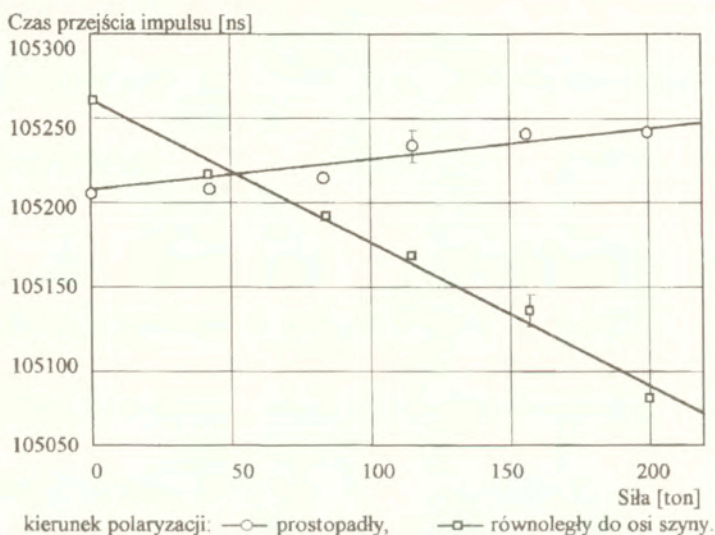
Rys. 78. Zależności czasów przejścia fali podłużnej podpowierzchniowej i fali transformowanej od siły podłużnej w odcinku szyny S49.

Wartości obliczonych współczynników elastoakustycznych dla materiału szyny S49 wyniosły $\beta_{111} = -1,23 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] dla fali podłużnej i $\beta_T = -1,17 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹] dla fali transformowanej.

Specjalnie przygotowany odcinek szyny UIC-60 wykorzystany został do badania zmian czasów przejścia fal poprzecznych rozchodzących się przez wysokość szyny od siły osiowej przyłożonej do szyny. Celem pomiarów było wyznaczenie wartości współczynnika elastoakustycznego $\beta_B = \beta_{123} + \beta_{122}$, wykorzystywanego do obliczania wartości naprężeń na

podstawie pomiarów dwójłomności akustycznej. Rysunek 79 pokazuje zależność zmierzonych czasów przejścia fal spolaryzowanych równolegle i prostopadłe do osi szyny od siły ściskającej. Przebieg zależności wskazuje na początkową anizotropię materiału szyny (anizotropię będącą wynikiem istnienia tekstury i naprężeń własnych). Ta początkowa anizotropia materiału jest kompensowana przez anizotropię naprężeniową, będącą wynikiem ściskania próbki, przy obciążeniu siłą około 50 ton. Przy większych obciążeniach znak anizotropii zmienia się.

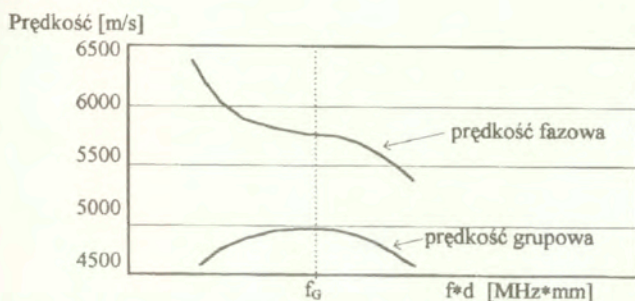
Współczynnik elastoakustyczny $\beta_B = \beta_{123} + \beta_{122}$ obliczony na podstawie wyników uzyskanych w próbie ściskania wynosi $-0,74 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹], a więc jest zbliżony do wartości mierzonych na innych stalowych próbkach.



Rys. 79. Zmiany czasów przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych równoległe i prostopadłe do osi szyny kolejowej poddanej ściskaniu.

Badania odcinków szyn, których wyniki przedstawiono wyżej, wykonane mogły być jedynie na specjalnej maszynie wytrzymałościowej mogącej oddziaływać na próbki siłami liczonymi w setkach ton. W czasie badania naprężeń własnych w szynach brytyjskich autor mierzył zmiany czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej na 5-cio metrowym fragmencie szyny poddanej 4-punktowemu zginaniu. Pomiar prowadzone były na odcinku szyny poddanym zginaniu ze stałym momentem. Badana szyna zginana była w płaszczyźnie symetrii, a zestaw głowic sprzęgany był do płaskiego boku główki szyny, z obu jej stron. Na powierzchniach tych powstawały w czasie zginania szyny ściskające i rozciągające naprężenia o tych samych, znanych wartościach bezwzględnych i przeciwnych znakach. Jako wartość współczynnika przyjęto średnią wartość z pomiarów wykonanych na obu stronach szyny. Pomimo tego, że badania odbywały się na szynie o zmieniającej się krzywiznie wartość obliczonego w wyniku pomiarów współczynnika β_{111} wyniosła zgodnie z przewidywaniami $-1,25 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹].

wyznaczanie współczynników elastoakustycznych fal płytowych. W pracy [141] przeprowadzono analizę teoretyczną różnych modów fal Lamba poszukując fal o dominujących drganiach w kierunku równoległym do kierunku propagacji fali. Drugim kryterium poszukiwań była możliwie niska zależność prędkości grupowej fali od stosunku grubości ośrodka do długości fali (płaskie miejsca na krzywych dyspersyjnych). Do badań wybrane zostały mody symetryczne S1 i S2 oraz częstotliwości fal, dla której ewentualne odchylenia w grubości blachy powodują najmniejsze zmiany prędkości. Na rysunku 80 pokazano schematycznie zależność prędkości grupowej i fazowej dla tego modu od iloczynu częstotliwości fali i grubości blachy ($f \cdot d$ [MHz*mm]), w okolicach wybranej częstotliwości.



Rys. 80. Prędkość fazowa i grupowa dla symetrycznej postaci fali Lamba w pobliżu częstotliwości f_0 .

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały na próbkach wykonanych z blachy o grubości 1 mm. Ich pierwszym etapem był pomiar prędkości grupowej fal Lamba, mod S1, wzbudzanych głowicą skośną o kącie załamania równym $27,2^\circ$ i częstotliwości 3,7 MHz. Przetwornik głowicy nadawczej pobudzany był impulsem wypełnionym o tej częstotliwości. W badaniach wykorzystano zestaw różnicowy (jedna głowica nadawcza i dwie odbiorcze ustawione w jednej linii) a długość odcinka pomiarowego wynosiła 200 mm. Uzyskano prędkości propagacji fali równą 5165 m/s. Pomiar powtórzono na w tej samej blasce po zmniejszeniu jej grubości o 0,03 mm. Zaobserwowana zmiana wyniosła 7 m/s a czyli 0,135% prędkości w stanie wyjściowym.

Wartość współczynników elastoakustycznych wyznaczane były podczas rozciągania próbek w zakresie naprężeń od 25 do 250 MPa. Pomiar zależności czasu przejścia od naprężania wykazały, że możliwy jest jedynie pomiar czasu przejścia impulsu fali modu S1. Pomiar zmian czasu przejścia impulsów modu S2, generowanego głowicą o częstotliwości 7 MHz, nie powiodły się z powodu trudności z odseparowaniem impulsu tej fali od innych modów fal płytowych, rozchodzących się w próbce z różnymi prędkościami.

Wartości współczynników elastoakustycznych obliczonych na podstawie wyników pomiarów modu S1, wyznaczonych dla fali propagującej się zgodnie z kierunkiem walcowania blachy i prostopadle do niego wyniosły odpowiednio $\beta_{S11} = -1,23 \cdot 10^{-5}$ [MPa $^{-1}$] i $\beta_{S1} = -1,18 \cdot 10^{-5}$ [MPa $^{-1}$]. Podobnie jak w przypadku podłużnych fal odbitych i transformowanych, uzyskane wartości są bliskie wartościom współczynnika β_{111} dla podłużnej fali objętościowej czy podpowierzchniowej rozchodzącej się w stali.

Wykonane badania wykazały jednak, że pomimo doboru optymalnej częstotliwości i modu fali, czas przejścia impulsu fali płytowej silnie zależy od zmian grubości blachy. Zmiana grubości mieszcząca się w tolerancji hutniczej jest powodem zmian prędkości fali odpowiadających przyłożeniu naprężenia o wartości około 100 MPa. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym pomiary bezwzględnych prędkości propagacji fal Lamba jest zmieniający się kształt impulsu w zależności od długości odcinka pomiarowego. Konieczność stosowania głowic o różnych częstotliwościach zależnych od grubości badanej blachy jest jeszcze jednym mankamentem stosowania fal Lamba w tensometrii.

W obcych pracach poświęconych pomiarom wartości współczynników elastoakustycznych donoszono o temperaturowej zależności wartości tych współczynników. W Pracowni autora, w roku 1993 przeprowadzono własne badania temperaturowych zależności współczynników elastoakustycznych dla fal podłużnych i poprzecznych. Badania wykonano na odcinku szyny kolejowej posiadającej wysokie i znane podłużne naprężenia własne. W główce szyny wartość naprężeń rozciągających przekraczała 250 MPa a w szyjce szyny panowały naprężenia ściskające o wartości około -200 MPa. W pomiarach przeprowadzonych przez dr M. Adamskiego wykorzystano wykonane przez autora zestaw głowic, dla którego przed eksperymentem, na odprężonej próbce wykonanej z tego samego materiału co odcinek szyny, wyznaczona została poprawka temperaturowa. W odcinku szyny z naprężeniami własnymi zmierzone zostały czasy przejścia fal podłużnej i poprzecznej rozchodzących się w kierunku naprężenia. Pomiary wykonano dla temperatur odcinka szyny wynoszących 18°C i 65°C wykorzystując aparat DEBRO-30 umożliwiający pomiary czasu z dokładnością +/- 1 ns. Jedynymi czynnikami mogącymi spowodować różnicę czasów przejścia fal mierzonych w dwóch temperaturach były zależności prędkości fal w próbce i klinach załamujących głowic od temperatury oraz zależność współczynnika elastoakustycznego od temperatury (zakładając, że w badanym odcinku szyny, w ustabilizowanych warunkach termicznych, wartości naprężeń własnych pozostawały niezmiennie).

Wpływ temperatury na prędkości fal został wyeliminowany, z wykorzystaniem wcześniej zmierzonej poprawki temperaturowej, przez obliczanie czasów przejścia odniesionych do stałej temperatury. Wartości naprężeń obliczone na podstawie skorygowanych temperaturowo czasów przejścia okazały się niezależne od temperatury odcinka szyny. Oznacza to, że dla stali zależność wartości współczynnika elastoakustycznego od temperatury jest niemierzalna. W opisanym eksperymencie zarówno zakres naprężeń jak i zakres zmian temperatury były wielokrotnie większe niż w pracy [63] sygnalizującej istnienie zależności współczynnik elastoakustyczny-temperatura.

Uzyskane wyniki pokazały, że w zakresie temperatur, w jakich wykonywane są ultradźwiękowe pomiary naprężeń i przy uzyskiwanych w nich dokładnościach pomiarów czasu przejścia, temperaturowe zmiany wartości współczynników elastoakustycznych dla stali mogą być pominięte.

5. ZASTOSOWANIA OPRACOWANEJ APARATURY

W tej części pracy przedstawione są praktyczne zastosowania opracowanej aparatury i głowic. Na początku każdego z rozdziałów opisujących poszczególne przykłady zastosowań techniki przedstawiony jest stan wiedzy w omawianym zakresie i wyniki uzyskane przez innych badaczy.

W pierwszej kolejności opisane są ultradźwiękowe pomiary naprężeń własnych w szynach kolejowych. Badania naprężeń własnych w nowych szynach, po prostowaniu, były pierwszym zastosowaniem zbudowanej w IPPT PAN aparatury.

Rozdział 5.2 zawiera wyniki pomiarów przeprowadzonych przez autora na torach ciągle spawanych, których celem była ocena sił podłużnych panujących w szynach takiego toru.

Rozdział 5.3 przedstawia dorobek autora w badaniach naprężeń własnych w monoblokowych kołach kolejowych zarówno kutych, stosowanych w Europie, jak i lanych, wykorzystywanych w USA.

W rozdziale 5.4 przytoczone są inne zastosowania i wyniki pomiarów wykonanych przez współpracowników autora, opracowanymi przez niego głowicami. Są to badania zmian naprężeń w kolumnach prasy hydraulicznej i pomiary rozkładów naprężeń własnych w wałach okrętowych.

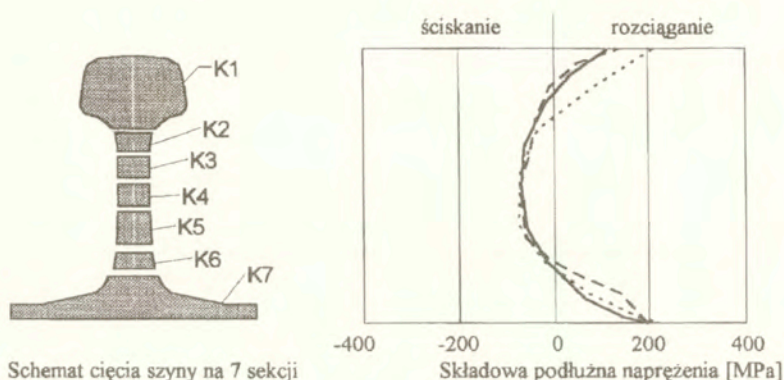
W ostatnim rozdziale autor opisuje nieudane próby zastosowań tensometrii ultradźwiękowej i wyjaśnia powody, z których pomiary nie powiodły się. Powody te wyznaczają istniejące obecnie ograniczenia tensometrii ultradźwiękowej.

5.1. WYZNACZANIE WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W SZYNACH KOLEJOWYCH

5.1.1. Wprowadzenie

Stan naprężeń własnych w nowej szynie jest wynikiem nierównomiernego stygnięcia szyny po walcowaniu na gorąco, krzywizny szyny w czasie stygnięcia i odkształceń plastycznych jakim poddawana jest ona w czasie prostowania. Głównym źródłem naprężeń własnych w nowych szynach kolejowych jest prostowanie w prostownicy rolkowej. W maszynie tej szyna przechodząc pomiędzy kolejnymi rolkami poddawana jest plastycznemu przeginianiu z coraz to mniejszą amplitudą. W rezultacie powstaje prosta szyna z naprężeniami własnymi. Siły wywierane na główkę i stopkę szyny przez rolki maszyny prostującej są na tyle wysokie, że wywołane nimi momenty gnące oraz naprężenia kontaktowe prowadzą do plastycznych odkształceń w większości przekroju główki i stopki. Wynikiem tych właśnie odkształceń jest typowy dla prostowanej szyny rozkład naprężeń własnych, których dominującą składową jest składowa podłużna. Typowe rozkłady wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w trzech szynach różnego typu, po prostowaniu, pokazano na rysunku 81 [142]. Badania przeprowadzone zostały metodą cięcia próbki szyny na siedem podłużnych sekcji i pomiarów zmian długości sekcji wywołanych uwalnianiem naprężeń własnych i pochodzą z laboratorium British Steel, jednego z czołowych producentów szyn w Europie.

Rolki prostownicy są odpowiednio wyprofilowane i stykają się z szyną na całej szerokości profilu główki i szerokości stopki. W czasie prostowania główka lub stopka szyna styka się z rolkami jedynie 4 lub 5 razy. Duża powierzchnia styku rolka-szyna i ograniczona liczba kontaktów z rolkami powodują, że pomimo wysokich sił wywieranych przez rolki na szynę, w szynie po prostowaniu nie obserwuje się lokalnych ekstremów wartości składowej podłużnej w



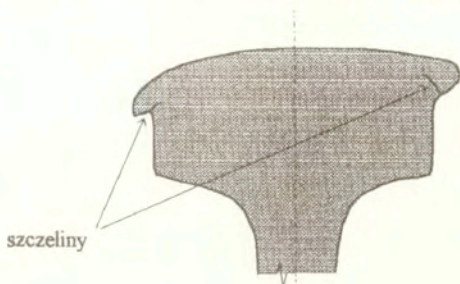
Rys. 81. Typowe rozkłady wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w szynach nowych, po prostowaniu w prostownicy rolkowej.

powierzchniowych warstwach główki i stopki. Dowodem na to są wyniki badań naprężeń metodą niszczącą [143] i metodą dyfrakcji neutronów [144] przeprowadzone na nowych szynach, które wykazały, że żadna ze składowych naprężeń własnych nie wykazuje lokalnych maksimów w warstwie wierzchniej główki ani stopki szyny.

W czasie eksploatacji szyny w torze kolejowym stan naprężeń własnych w szynie zmienia się. Cykliczne obciążenia wywołane naciskami kół na powierzchnie jezdnią szyny prowadzą do narastającego odkształcenia plastycznego warstwy materiału szyny i powstania w główce nowych naprężeń własnych. W odróżnieniu od naprężeń będących wynikiem jednorazowego procesu prostowania, z którymi szyna rozpoczyna życie w torze, naprężenia od kontaktu szyna-koło zmieniają się w czasie. Ich wartości i głębokość na jaką sięgają zależne są od własności mechanicznych materiału szyny, nacisków kół na szynę i od liczby kół, które przetoczyły się po szynie. Inny jest też mechanizm powstawania naprężeń w czasie eksploatacji szyny niż podczas prostowania. W odróżnieniu od trójpunktowego zginania szyny w prostownicy, gdzie odległości między rolkami podpierającymi wynoszą 1,5 + 1,8 metra, w czasie pracy w torze stopka szyny jest podparta podkładami. Znaczenie mniejsza niż w czasie prostowania, i zmienna co do położenia i wielkości, jest powierzchnia kontaktu koło-szyna. Jest ona zależna od profilu koła i główki szyny, od średnicy koła, od chwilowego ustawienia zestawu kołowego na torze i nacisku wywieranego przez koło. Choć statyczna siła z jaką koło wagonu lub lokomotywy działa na szynę, wynikająca z masy wagonu czy lokomotywy, jest mniejsza niż siła nacisku rolki maszynы prostującej to obciążenia wywierane przez koła są powiększone o składową dynamiczną wynikającą na przykład z nierówności toru, drgań podwozi wagonów czy tak zwanych płaskich miejsc na powierzchni tocznej koła. Dynamiczna składowa siły pionowej przekazywanej na szynę przez jedno koło może przekraczać 40 ton [145].

Naciski kół na szynę wywierane są wielokrotnie i w ciągu roku eksploatacji po szynie może się przetoczyć milion kół. Każdy przejazd koła pozostawia mały ślad w postaci lokalnego plastycznego odkształcenia cienkiej warstwy materiału. Sumowanie się tych drobnych ale licznych odkształceń prowadzi do powstania widocznego gołym okiem odkształcenia profilu główki szyny. W skrajnych wypadkach odkształcenia plastyczne prowadzą do „wyphywania”

materiału na boki główki. Zdarza się, że materiał wypchnięty na boki z powierzchni jezdnej szyny, i tworzący „nawisy”, odpada od szyny. Przykład przekroju główki szyny amerykańskiej typu 115 z silnie zdeformowaną główką i widocznymi „nawisami” pokazano na rysunku 82. Dodatkowym czynnikiem zmieniającym profil główki szyny jest ścieranie wierzchniej warstwy materiału zachodzące równoległe z odkształcaniem plastycznym.



Rys. 82. Przekrój główki szyny typu 115 z widocznym zużyciem i odkształceniami powierzchni jezdnej.

W odróżnieniu od naprężeń własnych w nowej szynie, w której dominującą składową jest składowa podłużna, w główce szyny odkształconej plastycznie przez koła pociągów obserwowany jest skomplikowany, trójosiowy rozkład naprężeń własnych. Składowe naprężenia w płaszczyźnie jezdnej szyny, w jej powierzchniowej warstwie, są ściskające a pod nią - rozciągające. Grubość warstwy materiału, w której powstają eksploatacyjne naprężenia własne może sięgać kilkunastu milimetrów.

Zarówno naprężenia własne wywołane prostowaniem szyny jak i spowodowane naciskami kół na główkę szyny wpływają na własności użytkowe toru kolejowego. Zbyt wysokie wartości naprężeń własnych wywołanych prostowaniem mogą być powodem długich pęknięć biegnących wzdłuż szynki, prowadzących do katastrofy kolejowej. Pęknięcia takie, o długości dochodzącej do 20 m opisano w pracy [146]. W pracy [147] opisano inną awarię szyny spowodowaną nadmiernymi naprężeniami własnymi pochodzącymi od prostowania. Szyna, której pęknięcie doprowadziło do wykolejenia pociągu, rozpadła się na kilkadziesiąt fragmentów. Analizując przyczyny katastrofy autorzy pracy stwierdzili, że wysokie naprężenia własne w szynie przed katastrofą były wynikiem niewłaściwie przeprowadzonego prostowania szyny.

Naprężenia własne będące wynikiem nacisków kół na szynę, a szczególnie strefa naprężeń rozciągających pod powierzchnią jezdną szyny, mogą być przyczynami pęknięć zmęczeniowych rozwijających się w główce szyny. Pęknięcia prostopadłe do osi szyny prowadzą do przerwania ciągłości toku szynowego a pęknięcia rozwijające się ukośnie lub równoległe do powierzchni jezdnej powodują powstanie wad w powierzchni jezdnej.

Pierwsze metody oceny naprężeń własnych w nowych szynach to metody niszczące. W pracy [147] opisano opracowaną w USA i stosowaną w Association of American Railroads technologiczną próbę oceny naprężeń w nowych szynach nazwaną „whomper test”. Polega ona na nacięciu sztucznego pęknięcia w szynce próbki szyny o długości około 1 metra i wymuszeniu propagacji pęknięcia wzdłuż szynki. Siłę otwierającą szczelinę wywiera stożkowy

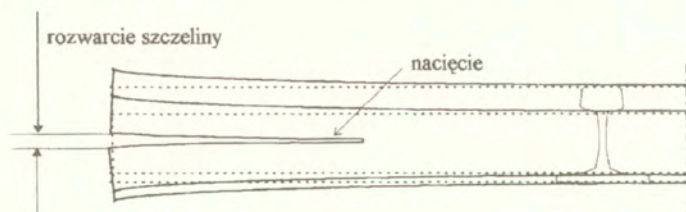
klin wbijany w sztuczne pęknięcie z określoną energią. Schemat badania tą techniką przedstawia rysunek 83. Stan naprężeń własnych w szynie ocenia się na podstawie porównania długości powstałego w ten sposób pęknięcia z pęknięciami w próbkach szyn pozbawionych naprężeń własnych lub z naprężeniami uznanymi za dopuszczalne. Próba ta nie dostarcza więc informacji o wartościach naprężeń własnych w próbce, a jedynie pozwala wyeliminować szyny o naprężeniach "wyższych niż dopuszczalne".



Rys. 83. Schemat oceny naprężeń własnych techniką „whomper test”.

Podobna próba stosowana jest w Polsce, w Hucie Katowice i nazywana jest „próbą kafarową”. Badana próbka szyny po prostowaniu, podparta na dwóch sztywnych podporach, poddawana jest łamaniu przez spadający na nią z określonej wysokości ciężar. O stanie naprężeń własnych świadczy sposób w jaki próbka pęka. Szyny o wysokich naprężeniach własnych, w których zgromadzona jest wysoka energia sprężysta wyzwalająca się podczas pęknięcia, potrafią rozerwać się na wiele fragmentów.

Jeszcze inną technologiczną metodą oceny stanu naprężeń własnych w nowych szynach jest pomiar rozwarcia szczeliny dokonywany podczas przecinania szyny wzdłuż szyjki. Jest to stosowany w niektórych hutach europejskich i amerykańskich prosty sposób przybliżonej oceny stanu naprężeń własnych w szynach, opisany w [148]. Związki między krzywizną główki i stopki szyny po wykonaniu nacięcia wzdłuż osi obojętnej szyny a naprężeniami własnymi przedstawione są w pracach [149, 142]. Schemat pomiaru rozwarcia szyny w czasie cięcia pokazano na rysunku 84. Rozwarcie szczeliny, będące wynikiem uwalniania naprężeń własnych w wyniku cięcia, mierzone na końcu rozcinanej szyny, jest proporcjonalne do długości nacięcia i stanu naprężeń przed przecięciem. Linia przerywaną na rysunku pokazany jest zarys szyny przed nacięciem, linią ciągłą - szyna „rozwarta”, po wykonaniu nacięcia.



Rys. 84. Schemat pomiaru rozwarcia szczeliny przy nacinaniu szyny wzdłuż szyjki.

W hutach brytyjskich stosowana jest metoda cięcia odcinka wyprostowanej szyny na siedem sekcji, pokazanych na rysunku 81, i pomiaru zmian długości sekcji wywołanych uwolnieniem podłużnej składowej naprężeń własnych. Inna metoda niszcząca wykorzystywana jest w hutach francuskich [150]. Polega ona na naklejeniu kilku tensometrów oporowych na obwodzie próbki wyprostowanej szyny, wycięciu „plasterka” zawierającego tensometry i pomiarze odkształceń wywołanych uwolnieniem naprężeń własnych. Głównym tematem pracy [150] jest jednak opis prób prostowania szyny przez jej rozciąganie siłą prowadzącą do uplastycznienia materiału w całym przekroju szyny. Ten nowatorski sposób prostowania, pozwalający na uzyskanie wymaganej prostoliniowości szyny pozbawionej praktycznie naprężeń własnych, okazał się jednak zbyt trudny do zastosowania praktycznego.

Zaletami opisanych wyżej niszczących technik oceny wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w prostowanych szynach jest stosunkowo niski koszt i krótki czas badania oraz proste oprzyrządowania wymagane do przeprowadzenia próby. Inną ważną zaletą są wieloletnie doświadczenia producentów szyn w stosowaniu tych metod. Główną zaś wadą takich technik jest to, że są próbami niszczącymi i informują jedynie jakościowo o wartościach naprężeniach własnych w badanych próbkach szyn.

W roku 1991, pracownicy koncernu Nippon Steel (głównego japońskiego producenta szyn) przeprowadzili rozległe badania niszczące naprężeń własnych w różnych momentach prostowania szyny [151]. Pomiary polegały na naklejeniu na szyny tensometrów oporowych i wycinaniu z nich prostopadłościennych próbek o wymiarach 7*25*50 mm. Z mierzonych tensometrami odkształceń postających wskutek uwalniania naprężeń własnych obliczano wartości tych naprężeń. Badania przeprowadzono na szynach różnego typu przed prostowaniem, po przejściach przez kolejne rolki prostownicy i po zakończeniu procesu prostowania.

W publikacji [152] opisane są wyniki badań zależności naprężeń własnych po prostowaniu od odległościach między rolkami maszyny prostującej. Autor znajduje, że im większa jest odległość między rolkami tym niższe wartości podłużnej składowej naprężeń rozciągających w główce i szyjce szyny. Pokazana jest również korelacja między skróceniem szyny w wyniku prostowania a wartościami naprężeń. Dla odległości między rolkami równej 1350 mm skrócenie szyny wyniosło 0,12% a dla odległości wynoszącej 1800 mm skrócenie wyniosło 0,07%. Odchyłka od prostoliniowości wszystkich badanych szyn po prostowaniu była mniejsza niż 0,3 mm na długości 3 m. Pomiar skrócenia szyny został zaproponowany jako wskaźnik wartości naprężeń w szynach po prostowaniu.

Tensometryczne badania lokalnych odkształceń szyn w czasie prostowania opisane są w pracy [153]. Badania te prowadzone były w czasie przechodzenia szyny przez maszynę prostującą. W pracy porównano wyniki obliczeń wartości naprężeń własnych powstałych w wyniku prostowania z wynikami pomiarów. Sposób obliczania metodą elementów skończonych wartości naprężeń własnych powstających w procesie prostowania opisany jest w pracy [154]. Celem tej pracy było optymalizowanie procesu prostowania tak aby założoną geometrię szyny ociągnąć przy minimalnych wartościach naprężeń własnych.

Wiele awarii szyn ma swą przyczynę w pęknięciach rozwijających się na końcu szyny. Dlatego też ważna jest znajomość stanu naprężeń własnych w nowych szynach, na krańcu szyny powstałym z przecięcia długiej, prostowanej szyny. Autorzy pracy [155], zakładając pewien początkowy stan naprężeń własnych i stosując metodę elementów skończonych, obliczyli rozkład naprężeń własnych na końcu szyny, w strefie przejściowej i długość tej strefy. Stwierdzili, że długość strefy przejściowej wynosi jedynie 1,1 wysokości szyny. Stwierdzili też obecność silnej pionowej składowej naprężenia na swobodnym końcu szyny. Rozciągające naprężenia pionowe osiągają maksymalną wartość w połowie wysokości szyjki i wraz z

naprężeniami wprowadzonymi do materiału w wyniku spawania dwóch szyn (naprężenia spawalnicze) mogą być przyczyną poziomych pęknięć występujących w szycie, w miejscach łączenia szyn.

Eksperymentalne badania skomplikowanych rozkładów naprężeń własnych w główkach szyn eksploatowanych w torze wymagają stosowania innych, bardziej skomplikowanych technik pomiarowych niż badania podłużnej składowej naprężeń w szynach po prostowaniu. W porównaniu z metodami stosowanymi w hutnictwie od badania naprężeń w nowych szynach, są to metody czaso- i pracochłonne. Dlatego też w niektórych pracach badacze ograniczają się do oceny stanu naprężeń jedynie w główce szyny czyli w obszarze, w którym rozwijają się naprężenia własne wywołane kontaktem koło-szyna.

W roku 1980, w pracy [143] opisano wyniki niszczących badań czterech próbek szyn wyciętych z toru oraz dwóch próbek szyn nowych. Badania składowej podłużnej naprężeń własnych polegały na wycięciu z szyny odcinka o długości 356 mm, pocięciu go na pręty o przekroju kwadratowym i boku 7,6 mm i na pomiarze zmiany długości prętów w wyniku uwolnienia naprężeń własnych. Składowe poprzeczne oceniano metodami tensometrii otwarkowej i dyfrakcji promieni X wykorzystując plasterkę o grubości 12,5 mm wycięty z szyny prostopadle do jej osi. Co ciekawe, autorzy uzyskali niskie wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w próbkach nowych szynach. Maksymalna wartość tej składowej osiągała jedynie 55 MPa. Przedstawione w pracy wyniki pozwalają na porównanie wartości naprężeń ocenianych metodą tensometrii otwarkowej i dyfrakcji promieni X. Średnia różnica wskazań uzyskanych tymi technikami wynosi 69 MPa a maksymalna - blisko 200 MPa.

W roku 1983 ukazała się praca [156], w której szczegółowo opisane są niszczące badania naprężeń własnych w szynach wyciętych z toru. Celem pracy było określenie zależności trójwymiarowego stanu naprężeń w szynach poddanych różnym obciążeniom oraz stwierdzenie, czy przy cyklicznych obciążeniach szyny kołami pojazdów obserwowane jest zjawisko plastycznego dostosowania (shakedown). Dlatego autora pracy interesowały głównie wartości naprężeń w główkach badanych szyn. Do oceny składowych poprzecznych naprężeń własnych autorzy zastosował zmodyfikowaną technikę Yasojimo-Machii. Polegała ona na wycięciu z szyny, prostopadle do jej osi, plasterka o grubości około 4 mm, pokrycia jego powierzchni 321 rozetkami tensometrycznymi i uwolnieniu naprężeń własnych przez pocięcie plasterka na kostki o boku 4 mm. Składową podłużną naprężeń oceniono stosując technikę Meiera polegającą na pocięciu odcinka szyny o długości około 40 cm na pręty o przekroju 4*4 mm i pomiarach zmian długości prętów. Analiza odkształceń, zmierzonych tensometrami oporowymi na plasterku i czujnikami elektromechanicznymi dla prętów, pozwoliła na odtworzenie trójosiowego stanu naprężeń w szynach. Dodatkowo autor przeprowadził badania naprężeń własnych na powierzchni jezdnej szyn metodą tensometrii otwarkowej. W różnych punktach tej samej szyny uzyskał wartości różniące się o blisko 100 MPa.

W szczegółowym opisie eksperymentu autor przedstawił między innymi wpływ cięcia próbek piłą taśmową na wyniki. Operacja ta, pomimo starannego chłodzenia i niskiej prędkości cięcia, wprowadza dodatkowe naprężenia własne. Autor przeprowadził doświadczenie na próbce szyny odprężonej i stwierdził, że proces cięcia plasterka szyny na kostki o boku 4 mm wprowadza błąd oceny wartości naprężeń od 33 do 47 MPa. Średnią wartość tak oszacowanego wpływu cięcia wykorzystał jako poprawkę. W wnioskach autor pracy podał, że wartości składowych poprzecznych naprężeń własnych, uzyskane po cięciu plasterka szyny piłą taśmową, należy traktować jako przybliżone. Co do wartości naprężeń własnych istniejących w badanych szynach przed ich eksploatacją (szyny nowe, po prostowaniu), na których tle rozwijały się naprężenia eksploatacyjne oceniane przez autora, to w pracy założono, że ich wartości różnią się nieznacznie, niezależnie od typu szyny i od tego, od

którego producenta pochodzą. Autor zaznacza jednak, że dane o wartościach tych naprężeń są potrzebne i mogą być przedmiotem przyszłych prac.

W cytowanej już pracy [143] oraz w [157] opisane są szczegółowo badania naprężeń własnych w główkach szyn eksploatowanych, wyciętych z toru. Pomiaru polegały na kolejnym wycinaniu z próbki o długości około 254 mm 130 prętów o przekroju kwadratowym i boku około 7 mm. Aby ograniczyć wpływ naprężeń powstających w czasie cięcia szyny na wyniki, opisany wcześniej w pracy [156], cięcie wykonywane było specjalną piłą o małej grubości, tak aby nie wprowadzić do materiału szyny odkształceń plastycznych. Pomiaru zmian długości kolejno wycinanych prętów dostarczały informacji o składowej podłużnej naprężeń własnych. Składowe poprzeczne oceniano na podstawie pomiarów tensometrycznych wykonywanych na plasterku szyny, na którym naklejano około 50 rozetek tensometrycznych. Wartości składowych naprężeń obliczano na podstawie zmierzonych odkształceń stosując metodę elementów skończonych. We wnioskach opublikowanej w 1984 roku pracy autorzy stwierdzają, że opisana technika jest praktycznie jedynym sposobem oceny podłużnych naprężeń w szynach eksploatowanych. Podają też, że ogromne koszty badania, jego czasochłonność i potrzeba stosowania specjalnych pił ograniczają zastosowanie tej techniki. Jeszcze inny eksperymentalny, niszczący sposób oceny wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w szynach opisano w pracy [158]. Próbki szyn o długości 1 metra ze sztucznie wykonanymi pęknięciami w główkach poddawane były trójpunktowemu zginaniu do zniszczenia (złamania). Na bazie mechaniki pękania i znajomości siły przy jakiej szyna pękała oceniano naprężenia własne w główce szyny.

Zastosowanie metody dyfrakcji neutronów w badaniach naprężeń w szynach pozwoliło na rezygnację z kosztownego cięcia próbek szyn piłą taśmową. W roku 1996 przedstawiono wyniki badania poprzecznych składowych naprężeń mierzonych tą metodą w główce eksploatowanej szyny [159]. Przedmiotem badania był plaster szyny wycięty prostopadłe do jej osi. Fakt, że podłużna składowa naprężeń własnych została uwolniona w czasie wycinania cienkiego plastra autorzy wykorzystali do potwierdzenia poprawności skalowania dyfraktometr. Uzyskane przez siebie wartości składowej podłużnej, która powinna wynosić zero, uznają za poprawne choć rozrzut wartości tej składowej przekracza 170 MPa.

Nowe podejście do oceny rozkładów naprężeń własnych w szynach kolejowych przedstawione zostało w 1996 roku w pracy [160]. Autorzy zaproponowali metodę eksperymentalno-numeryczną pozwalającą na odtworzenie pełnego stanu naprężeń w szynie na podstawie pomiarów wykonanych na dwóch plastrach wyciętych z szyny. Jeden z nich wycinany jest prostopadłe do osi szyny a drugi - ukośnie. Autorzy przewidują możliwość badania odkształceń w płaszczyznach plastrów metodą wysokotemperaturowej interferometrii Moiré a uwalnianie naprężeń - metodą odprężającej obróbki cieplnej. W ten sposób niepotrzebne staje się kosztowne i czasochłonne naklejanie tensometrów i, wprowadzające błędy, cięcie plastrów na małe kostki. Nowa metoda eliminuje też potrzebę stosowania sekcji Meiera, wyniki badań której obarczone są również błędami.

W pracy [161] opisane jest nowa procedura obliczania wartości naprężeń własnych w szynach eksploatowanych na podstawie badań metodą dyfrakcji neutronów. Włącza ona do obliczeń nie tylko wyniki pomiarowe ale również zależności fizyczne, które powinny spełniać wyniki oraz bierze pod uwagę, z odpowiednimi wagami, wszystkie informacje związane z zagadnieniem. Autorzy testują metodę aproksymacji fizycznie uzasadnionej korzystając z wyników badań opisanych w pracy [144].

Rozkłady naprężeń własnych w szynach były przedmiotem prac teoretyczno-numerycznych. W pracach [162, 163, 164] podana jest pełna trójwymiarowa analiza problemu naprężeń własnych dla materiału ze wzmocnieniem oraz dowolnego cyklu obciążeń symulującego

warunki eksploatacji. W pracy [162] przedstawione jest rozwiązanie dla belki o przekroju prostokątnym poddanej cyklicznemu zginaniu, w [163] - symulacja naprężeń w szynie pochodzących od jej cyklicznego obciążania kołami. Celem pracy [164] była ocena naprężeń własnych w główce szyny dla różnych krzywizn powierzchni szyny i koła.

Inne podejście do badania naprężeń metodą dyfrakcji neutronów szyn nowych i eksploatowanych opisane jest w pracy [165]. Wymaga ono wycinania z szyn nie dwóch plasterków ale wielu próbek. Składową podłużną naprężenie mierzono na próbkach wyciętych wzdłuż osi szyny, obejmujących szyjkę szyny, środkową część główki i stopki. W pracy porównano wartości tej składowej ocenione metodą niszcząca (cięcie próbek i pomiary odkształcenia) z wynikami dyfrakcji neutronów. W górnej strefie szyjki szyny różnica wartości naprężeń wyniosła blisko 200 MPa.

Z przedstawionego na stronach 125-132 przeglądu wynika różne podejście do badań naprężeń własnych w szynach nowych (po prostowaniu) i szynach eksploatowanych. Można powiedzieć, że większość metod oceny stanu naprężeń w nowych szynach, to proste, zazwyczaj niszczące metody przemysłowe, łatwe do zastosowania w warunkach huty. Wynikiem ich stosowania ma być dostarczenie jedynie informacji o wartościach podłużnej składowej naprężeń na powierzchni jezdnej główki i na dolnej powierzchni stopki a więc maksymalnych wartości naprężeń rozciągających. W badaniach takich przyjmuje się, że składowe poprzeczne naprężeń własnych są nieistotne z punktu widzenia własności użytkowych szyny oraz zakłada się, że wartość dominującej składowej podłużnej naprężenia jest stała na szerokości szyny.

Skomplikowany, trójosiowy rozkład naprężeń własnych w główkach szyn eksploatowanych wymaga zastosowania innych, bardziej skomplikowanych technik pomiarowych i numerycznej analizy naprężeń. Najprawdopodobniej dlatego badania szyn nowych i eksploatowanych prowadzone są zazwyczaj przez różne ośrodki badawcze stosujące różne techniki pomiarowe. Często zakres badania naprężeń w szynach eksploatowanych ograniczony jest jedynie do główki szyny a wartości istniejących w niej wcześniej naprężeń własnych nie są znane.

Przedstawione w cytowanych pracach wyniki pozwalają na ocenę wartości naprężeń ocenianych różnymi metodami i rozrzuty uzyskiwanych wartości. Różnice te są duże, często bliskie wartościom ocenianych naprężeń. W pracy [143] różne wartości naprężeń ocenianych techniką tensometrii otworkowej i dyfrakcji promieni X sięgają 200 MPa. Tyle samo osiąga różnica wartości naprężeń ocenianych w pracy [165] metodą niszcząca i dyfrakcji neutronów a autorzy pracy [159] akceptują rozrzut wartości wyników sięgający 170 MPa. W pracy [144] zwrócono uwagę na niezgodności wyników uzyskiwanych metodami wysokotemperaturowej interferometrii Moiré oraz dyfrakcji neutronów na dwóch plastrach (prostopadłym i ukośnym) wyciętych z szyny. W tej samej pracy autorzy uzyskali ujemną wartość podłużnej składowej naprężeń własnych w główce nowej szyny choć zazwyczaj wartość tej składowej jest dodatnia i większa niż 100 MPa. Zaproponowany w pracy [152] pomiar skrócenia szyny w czasie prostowania, jak przekonał się autor, okazał się niepraktyczny. Oznacza to, że żadna z opisanych w literaturze technik pomiarowych, pomijając koszty ich stosowania, nie spełnia wymagań producentów i użytkowników szyn kolejowych.

Wprowadzenie neutronograficznych badań dwóch plastrów (prostopadłego i ukośnego) oraz fizycznie uzasadnionej aproksymacji wyników, w porównaniu do niedokładnych badań niszczących polegających na cięciu szyny na małe kostki i pręty, umożliwia znaczne skrócenie i obniżenie kosztów badań. Nadal jednak dla producentów szyn, zainteresowanych wartościami naprężeń własnych w szynach po prostowaniu, technika taka jest zbyt droga i czasochłonna. Poza tym, co bardzo istotne, jest technika niszcząca. Dlatego w tym obszarze badań naprężeń własnych, obejmującym nowe szyny, celowe wydało się zastosowanie nieniszczącej, szybkiej i taniej metody ultradźwiękowej.

5.1.2. Wyniki badania naprężeń własnych w szynach po prostowaniu

Silna zależność prędkości propagacji fal ultradźwiękowych od tekstury ogranicza możliwości techniki ultradźwiękowej do badania naprężeń w szynach nowych, po prostowaniu. Odkształcenia plastyczne zachodzące na powierzchni jezdnej głowki szyny oraz panujący w niej złożony stan naprężeń uniemożliwiają dzisiaj ultradźwiękowe badania naprężeń własnych będących wynikiem eksploatacji szyn i cyklicznych, wielokrotnych obciążeń głowki szyny kołami pociągów.

Dzięki dużej powierzchni kontaktu rolek prostownicy z główką i stopką szyny oraz dzięki temu, że szyna przechodzi przez prostownicę jedynie raz, badania ultradźwiękowe nowych szyn możliwe są do wykonania również na powierzchni jezdnej głowki i na dolnej powierzchni stopki prostowanej szyny. Wykonuje się je falami podpowierzchniowymi rozchodzącymi się wzdłuż szyny. Zestaw głowic może być sprzęgany z szyną w wielu miejscach na jej obwodzie, poza miejscami o małych promieniach jak przejście głowki w szyjkę, stopki w szyjkę, krawędziami głowki czy krawędziami stopki. W ten sposób wynikiem badania może być rozkład podłużnej składowej naprężeń na obwodzie profilu szyny.

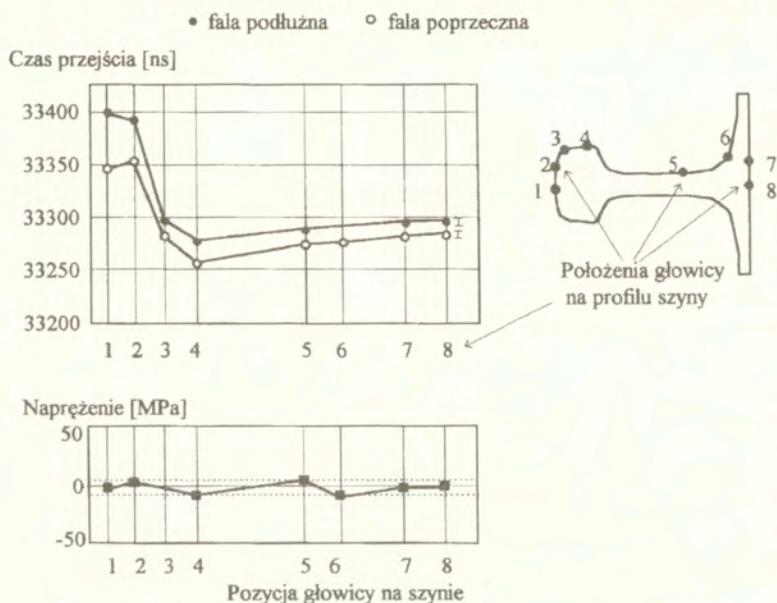
Pierwszą nieniszczącą, ultradźwiękową metodą wyznaczania wartości naprężeń własnych w nowych szynach kolejowych była technika opisana w pracy [166], opracowana w IPPT dla Huty Katowice. Wyniki uzyskane tą techniką w ciągu kilkuletnich pomiarów prowadzonych przez pracowników huty przedstawia praca [167] a zdobyte doświadczenia podsumowane są w pracy [168]. Omawiana technika opiera się na pomiarach czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych w materiale wzorca i w badanej szynie. Wzorzec jest pozbawionym naprężeń odcinkiem szyny tego samego typu, wykonanej z tego samego materiału co szyna, w której naprężenia są badane. Czasy przejścia fali poprzecznej wykorzystywane są do obliczania poprawki strukturalnej opisanej w rozdziale 1.3.4. Poprawka ta pozwala na wykorzystanie do skalowania aparatu jednego wzorca i prowadzenie pomiarów na wielu szynach, mogących nieznacznie różnić się od wzorca strukturą materiału, lub do pomiarów w różnych punktach na obwodzie profilu szyny.

Wyniki pomiarów czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych, rozchodzących się wzdłuż szyny, zmierzonych dla różnych położeń układu głowic na obwodzie nieobrabananej cieplnie i pozbawionej naprężeń własnych szyny pokazano na rysunku 85. Obserwowane na wykresie zmiany czasów przejścia fal są wynikiem zmian struktury materiału spowodowanych różnym stopniem przeróbki plastycznej w czasie walcowania szyny. W rejonie przejścia cienkiej szyjki szyny w maszyną główkę zmiany czasów sięgają 150 ns zarówno dla fal podłużnych jak i fal poprzecznych. Pomimo dużych zmian czasów przejścia fal pokazane w dolnej części wykresu wartości podłużnej składowej naprężeń własnych, obliczone zgodnie ze wzorem (25) wykorzystującym poprawką strukturalną, wahają się jedynie w granicach od 10 do -10 MPa. Świadczy to o poprawnym działaniu poprawki strukturalnej i znaczącej eliminacji wpływu zmian struktury na wyniki pomiaru.

Wartości naprężeń obliczonych jedynie na podstawie czasu przejścia fal podłużnych (bez poprawki strukturalnej) zmieniały by się w granicach +/- 180 MPa. Wszystkie opisane w dalszej części pracy wyniki badania naprężeń własnych w szynach kolejowych uzyskane były z wykorzystaniem poprawki strukturalnej i na podstawie zmierzonych czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych i poprzecznych.

W latach 1988-89 autor przeprowadził szereg badań naprężeń własnych w szynach kolejowych produkowanych w USA. Pomiaru wykonane były aparatem DEBRO-30 wyposażonym w 6-głowicowy zestaw na fale podpowierzchniowe o częstotliwości 4 MHz. Przedmiotem

badania były szyny produkowane w dwóch hutach amerykańskich (huta A w Pensylwanii i huta B w Kolorado). Program badań zorganizowanych przez Association of American Railroads



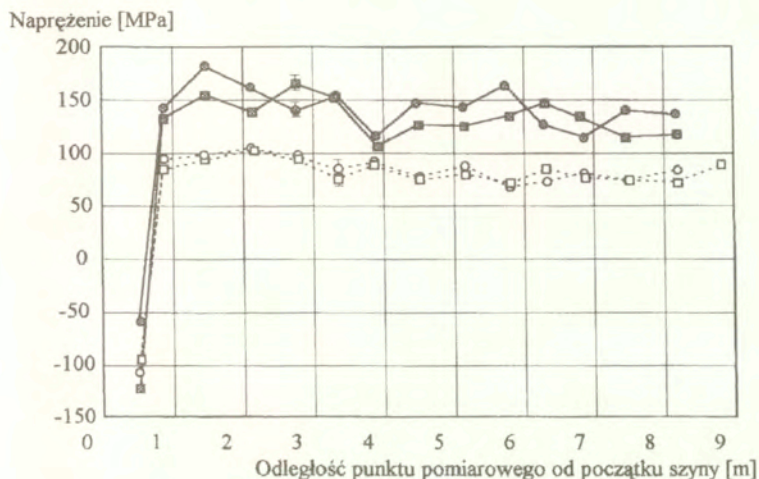
Rys. 85. Czasy przejścia fal podłużnych i poprzecznych zmierzone w różnych częściach szyny pozbawionej naprężen.

obejmował wyznaczanie rozkładów podłużnej składowej naprężeń własnych na długości szyn. Rozkłady te badane były dla różnych położen zestawu głowic na profilu szyny. Celem badań było stwierdzenie wpływu odkształceń jakim poddawana jest szyna w czasie prostowania na wartości naprężeń własnych w szynie po prostowaniu.

Pierwszym eksperymentem był pomiar współczynnika elastoakustycznego stali, z jakiej wykonane były badane szyny. Pomiarzy przeprowadzono na próbce wyciętej z głowki szyny typu 115 RE. Wartość obliczonego w wyniku tego eksperymentu współczynnika elastoakustycznego wyniosła $\beta_{111} = -1,25 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹], a więc tyle samo co dla stali stosowanej na szyny produkowane w Europie.

Dwa następne wykresy, rysunki 86 i 87, pokazują rozkłady podłużnej składowej naprężeń własnych zmierzonych na powierzchni jezdnej i na dolnej powierzchni stopki czterech szyn. W tych miejscach prostowanych szyn podłużna składowa osiąga najwyższe wartości. Pomiarzy przeprowadzono w hucie w Pensylwanii, na czterech szynach leżących w składzie, na płaskim podłożu. Badane były naprężenia na początkowym odcinku szyny o długości około 8 m co odpowiadało w przybliżeniu połowie długości szyny. Badane szyny różniły się sposobem prostowania. Dwie z nich prostowane były w dwóch płaszczyznach (pionowej i poziomej), przy różnych siłach wywieranych przez rolki prostowniczy na szynę. Dwie pozostałe - poddane zostały prostowaniu jedynie w płaszczyźnie pionowej, również przy różnych siłach prostowania.

Rysunek 86 pokazuje wyniki pomiarów wykonanych na powierzchniach jezdnych szyn. Maksymalna wartość naprężenia rozciągającego wynosi około 175 MPa dla wysokich nacisków rolek. Dla niskich nacisków rolek wartości naprężeń są niższe o około 50 MPa.



Szyna prostowana w dwóch płaszczyznach przy: □ - niskich naciskach rolek
 ■ - wysokich naciskach rolek
 Szyna prostowana w jednej płaszczyźnie przy: ○ - niskich naciskach rolek
 ● - wysokich naciskach rolek

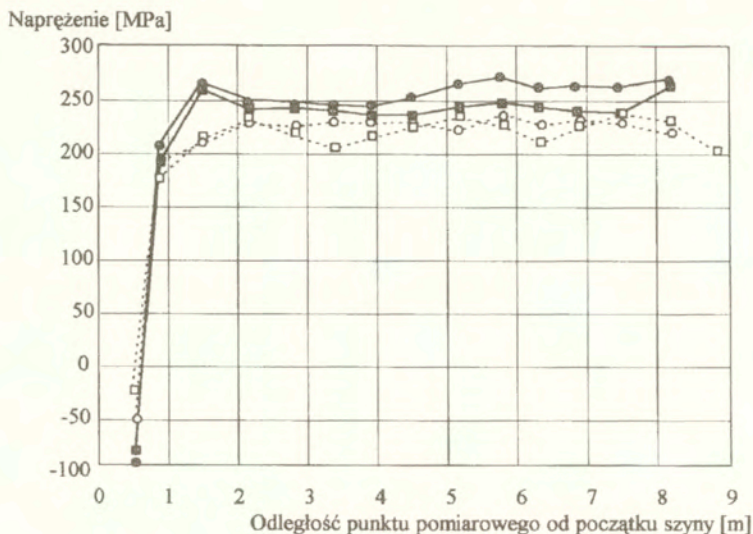
Rys. 86. Przebieg podłużnej składowej naprężeń własnych zmierzonych na powierzchni jezdnej szyn prostowanych przy różnych naciskach rolek maszyny prostującej.

Wykres pokazuje też, że fakt prostowania w jednej lub dwóch płaszczyznach praktycznie nie wpływa na poziom naprężeń własnych na powierzchni jezdnej szyny. Wynika to stąd, że punkty pomiarowe leżały w płaszczyźnie obojętnej szyny przeginanej w czasie prostowania w płaszczyźnie poziomej.

Następny rysunek, 87, przedstawia przebiegi podłużnej składowej naprężeń na długości tych samych czterech szyn tym razem zmierzonych na dolnej powierzchni stopki szyn. Wartości naprężeń są wyższe niż w główce i przekraczają 250 MPa. Mniejsza niż w główce jest też różnica naprężeń zmierzonych po prostowaniu z różnymi naciskami rolek.

Na obydwu wykresach widoczna jest gwałtowna zmiana wartości naprężeń na początku szyny. Skrajne odcinki szyn, o długościach mniejszych niż odległość między rolkami maszyny prostującej, nie są poddawane plastycznemu ugięciom (nie są prostowane). Dlatego rozkład naprężeń własnych na krańcach szyny odpowiada naprężeniom własnym jakie powstały w szynie w czasie stygnięcia materiału, po walcowaniu na gorąco, które nadało szynie kształt.

Długości skrajnych, nie prostowanych odcinków szyny zależne są od konstrukcji maszyny prostującej, od rozstawu i średnicy rolek maszyny. Te krańcowe odcinki są w hutach obcinane i złomowane bądź "doprostowywane" na prasie hydraulicznej.



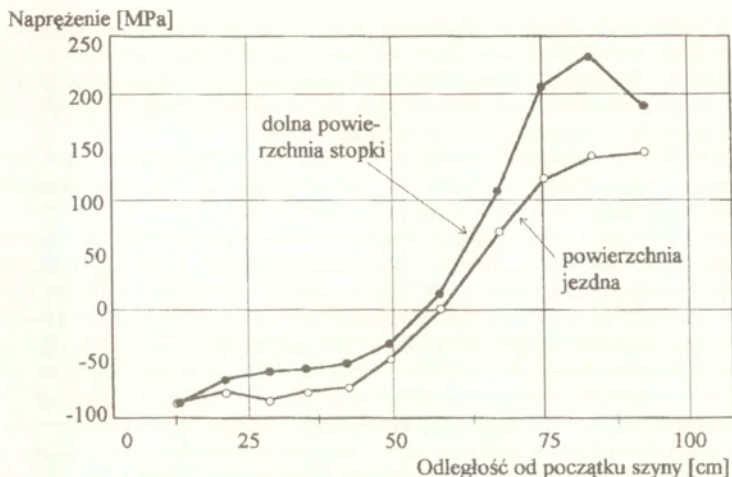
- Szyna prostowana w dwóch płaszczyznach przy: □ - niskich naciskach rolek
 ■ - wysokich naciskach rolek
- Szyna prostowana w jednej płaszczyźnie przy: ○ - niskich naciskach rolek
 ● - wysokich naciskach rolek

Rys. 87. Przebiegi wartości podłużnej składowej naprężeń własnych zmierzonych na dolnej powierzchni stopki szyn prostowanych przy różnych naciskach rolek maszyny prostującej.

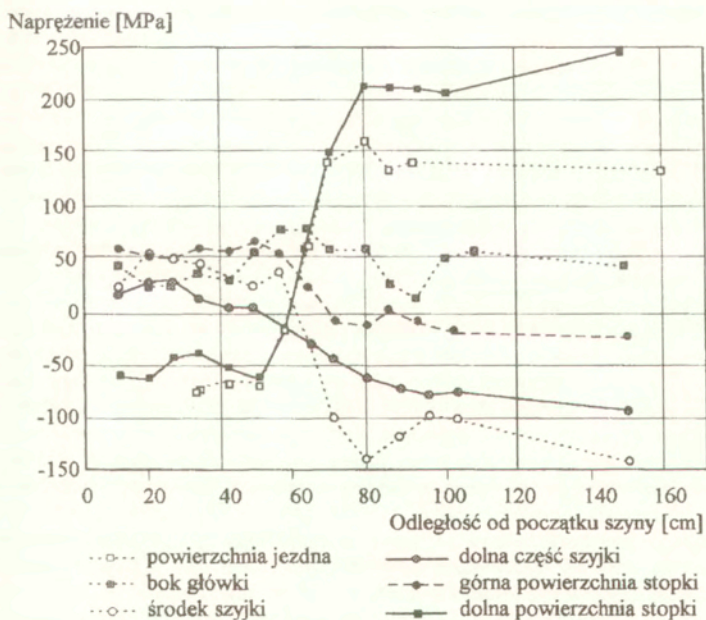
Dokładne pomiary rozkładu naprężeń podłużnych na początkowym odcinku szyny od producenta A, prostowanej jedynie w płaszczyźnie pionowej, przy wysokich siłach prostowania pokazano na rysunku 88. Pomiary wykonano co 7,5 cm na odcinku około 1 metra licząc od początku szyny. Zauważyć można, że na tym odcinku podłużna składowa naprężeń własnych ulega całkowitej przebudowie. Na krańcu szyny, zarówno w główce jak i w stopce, występują naprężenia ściskające, w odległości około 55 cm od początku szyny naprężenia własne osiągają wartości bliskie zera, a w większych odległościach obserwowane są naprężenia rozciągające, typowe dla szyny po prostowaniu. Miejsce gdzie naprężenia w główce i stopce są bliskie zera jest miejscem, w którym po przecięciu szyny składowa pionowa rozciągających naprężeń własnych w szyjce, które mogą być przyczyną pęknięcia szyny, będzie zgodnie z [155] minimalna. Zazwyczaj jednak, ze względów ekonomicznych, długości obcinanych odcinków szyn są mniejsze.

Podobne rozkłady naprężeń na początkowym odcinku szyny pochodzącej od drugiego producenta pokazano na rysunku 89. Pomiary przeprowadzono również co 7,5 cm ustawiając zestaw głowic w 6-ciu położeniach na profilu szyny. Położenia te to:

- powierzchnia jezdna,
- środkowa część szyjki,
- bok główki,
- górna część stopki przy przejściu w szyjkę
- dolna część szyjki,
- dolna część stopki.



Rys. 88. Wyniki badania podłużnej składowej naprężeń własnych na powierzchni jezdnej i na dolnej powierzchni stopki na początkowym odcinku szyny prostowanej w płaszczyźnie pionowej, przy średnich naciskach rolek na szynę. Producent A.

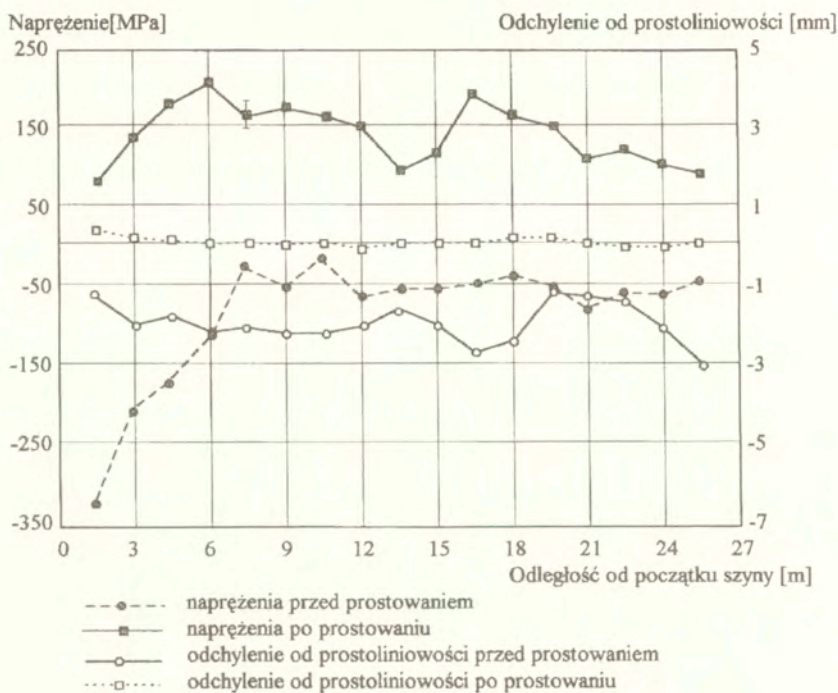


Rys. 89. Rozkłady podłużnej składowej naprężeń własnych na początkowym odcinku 160 cm szyny prostowanej. Producent B.

Podobnie jak w szynie pochodzącej od producenta A widoczna jest przebudowa naprężeń własnych na początkowym odcinku szyny. Podłużne naprężenia na powierzchni jezdnej i na dolnej powierzchni stopki osiągają wartości zerowe dla odległości około 60 cm od początku szyny. Jest to odległość mniejsza niż w przypadku szyny od producenta A, a różnica spowodowana jest innym rozstawem rolek w maszynie prostującej.

Z pomiarów, których wyniki pokazano na rysunku 89 wynika, że w odległościach większych niż 1 metr od końca szyny, przebiegi naprężeń własnych wyrównują się, a wartości naprężeń są zbliżone do wartości obserwowanych w środkowych partiach szyny.

Pokazane na rysunkach 86 i 87 naprężenia zmierzone dla różnych położenia głowicy w środkowej części szyny wykazują wahania sięgające około 80 MPa. Te zmiany wartości naprężeń mogą być spowodowane tym, że szyna przed prostowaniem była lokalnie powyginana. W zależności od miejscowej krzywizny szyny przed prostowaniem materiał szyny w czasie prostowania doznaje różnych odkształceń plastycznych. Te różnice w lokalnych odkształceniach mają swoje odbicie w rozkładzie naprężeń własnych na długości szyny po prostowaniu. W pracy [167] przedstawiono porównanie naprężeń własnych i odchyłeń od prostoliniowości szyny zmierzonych przed i po prostowaniu. Pomiary wykonano aparatem DEBRO-20 i 6-przetwornikowym zestawem głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne. Rysunek 90 pokazuje wyniki pomiarów przeprowadzonych w Hucie Katowice na szynie o długości 27 metrów. Zestaw głowic sprzęgany był z powierzchnią jezdnią szyny a



Rys. 90. Rozkłady podłużnej składowej naprężeń własnych i krzywizny szyny przed i po prostowaniu.

punkty pomiarowe oddalone były od siebie o 1,5 metra. Odchylenie od prostoliniowości mierzone było jako strzałka ugięcia powierzchni jezdnej na długości 2 metrów. Ujemna wartość strzałki ugięcia oznacza, że powierzchni jezdna była wklęsła. W szynie przed prostowaniem, na całej jej długości, widoczne są ściskające naprężenia podłużne. Po prostowaniu obserwowane są naprężenia rozciągające o wartościach od 76 do 208 MPa. Widoczny jest podobny przebieg naprężeń własnych po prostowaniu i odchylenia od prostoliniowości zmierzonego przed prostowaniem. W miejscu gdzie krzywizna szyny przed prostowaniem była maksymalna (odległość od początku szyny równa 16,5 m) obserwowane jest ekstremum wartości naprężenia po prostowaniu. W punkcie, w którym krzywizna szyny była minimalna (odległość 13,5 m), po prostowaniu obserwowane jest minimum wartości naprężenia. Wyniki tego eksperymentu pokazują jaki wpływ na wartości i rozkłady naprężeń własnych w prostowanych szynach może mieć kształt szyny przed prostowaniem. Kształt ten zależny jest od sposobu w jaki ułożona jest gorąca i plastyczna szyna w czasie powolnego stygnięcia po walcowaniu kształtowym. Oznacza to również, że układając gorącą szynę w „łuk” o stałej krzywizmie można wpływać na stan naprężeń własnych w szynie po prostowaniu.

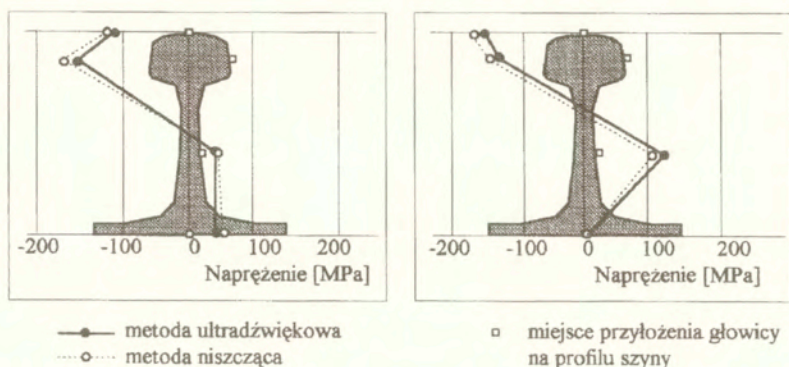
W 1989 roku autor przeprowadził pomiary podłużnych naprężeń własnych w szynach produkowanych w Thionville, dla szybkiej kolei francuskiej TGV [169]. Są to lekkie szyny (49 kg/m), którym stawiane są bardzo wysokie wymagania co do prostoliniowości wynikające z wysokich szybkości pociągów. Na torze zbudowanym z takich właśnie szynach prowadzono próby pociągu rozwijającego prędkość powyżej 500 km/godz. Dlatego te wymagania stawiane maszynom prostującym te szyny są wyższe niż prostownicom przeznaczonych dla innych szyn kolejowych.

Ekipa francuska przygotowała do skalowania aparatu wzorzec (odcinek szyny odprężonej termicznie) oraz zestaw szyn po walcowaniu kształtowym (przed prostowaniem) i po prostowaniu w dwóch różnych prostownicach rolkowych. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych potwierdzano pomiarami niszczącymi, wykonanymi przez ekipę francuską stosującą techniką opisaną w pracy [150]. Pomiary wykonano aparatem DEBRO-20 i 6-przetwornikowym zestawem głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne.

Wyniki uzyskane na dwóch szynach przed prostowaniem pokazano na rysunku 91. Stan naprężeń własnych w tych szynach jest wynikiem odkształceń materiału w czasie walcowania na gorąco nadającego szynom ich kształt oraz chłodzenia materiału szyny po walcowaniu. Pomiary naprężeń prowadzono sprzęgając zestaw głowic do powierzchni jezdnej szyny, na boku główki, w środku wysokości szyki i na dolnej powierzchni stopki szyny. Są to miejsca, w których po pomiarach ultradźwiękowych ekipa francuska naklejała tensometry oporowe i oceniała wartości podłużnej składowej naprężeń metodą niszczącą.

W szynach produkowanych dla kolei TGV, przed prostowaniem, w główce i górnej części szyki oczekiwane były podłużne naprężenia ściskające. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych potwierdziły te oczekiwania wykazując jednocześnie istotne różnice w wartościach naprężeń zmierzonych w obu szynach. Różnice te spowodowane mogły być innymi warunkami w czasie chłodzenia na powietrzu, w otwartej hali (szybkość chłodzenia, równomierność rozkładu temperatury) oraz od sposobu ułożenia szyny w czasie chłodzenia (prosta, wygięta). Największą różnicę w wartościach naprężeń, wynoszącą około 100 MPa, zaobserwowano w szykach szyn. W obu badanych szynach wartości podłużnej składowej naprężenia na dolnej powierzchni stopki były bliskie zeru.

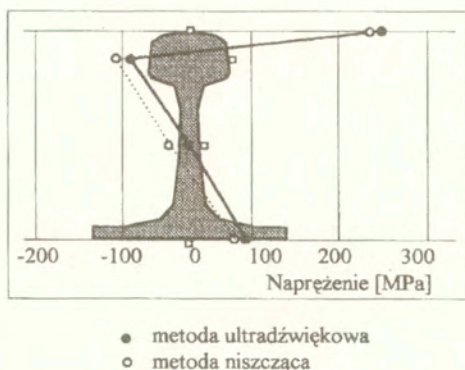
Widoczna jest też doskonała, jak dla dwóch metod wykorzystujących różne zjawiska, zgodność wyników uzyskanych metodą ultradźwiękową i niszczącą metodą tensometryczną.



Rys. 91. Podłużne naprężenia własne zmierzone metodą ultradźwiękową i niszczącą w dwóch szynach przed prostowaniem.

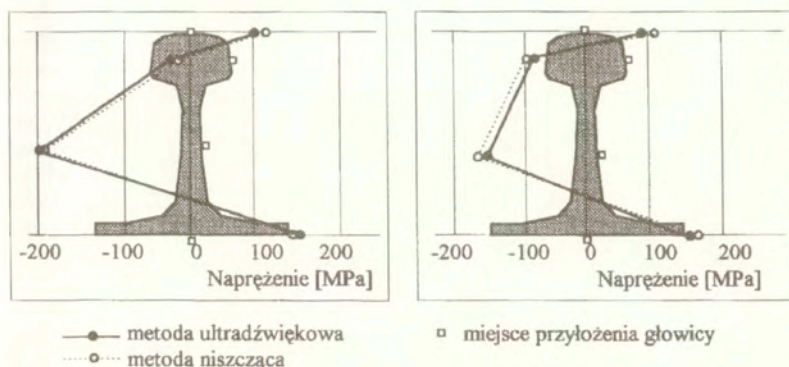
Następny rysunek, 92, przedstawia naprężenia podłużne zmierzone w szynie prostowanej w prostownicy starego typu. Widoczne są bardzo wysokie, osiągające 250 MPa, naprężenia rozciągające w główce szyny, na powierzchni toczonej. Widoczny jest też silny gradient naprężeń powierzchniowych na obwodzie górnej części główki. Na boku główki uzyskano ujemne wartości naprężenia (ściskanie), a różnica między wartościami naprężeń zmierzonych na powierzchni jezdnej i na boku główki wynosi aż 350 MPa. Na dolnej powierzchni stopki szyny zmierzono naprężenia rozciągające o wartości poniżej 100 MPa. Wyniki uzyskane metodą ultradźwiękową zostały również potwierdzone techniką tensometryczną.

Rysunek 93 pokazuje wyniki uzyskane na szynach prostowanych w maszynie prostującej nowego typu, przy różnych jej ustawieniach. Zmiana ustawienia prostownicy polega na zmianie sił jakie wywierają poszczególne rolki na szynę oraz na zastosowaniu rolek prostujących o różnych średnicach.



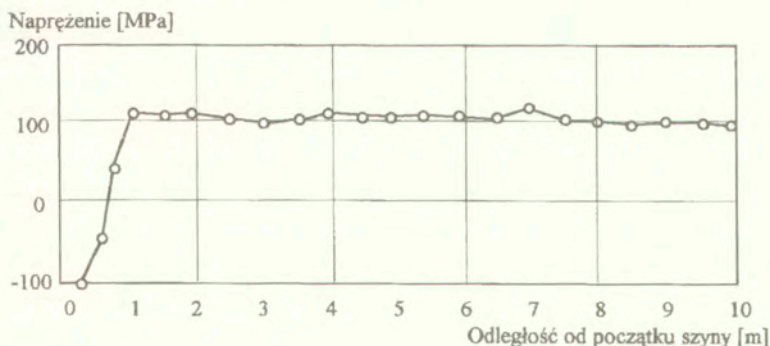
Rys. 92. Podłużne naprężenia własne zbadane metodą ultradźwiękową i niszczącą w szynie prostowanej w starej prostownicy.

W porównaniu z szyną prostowaną w starej prostownicy (rysunek 92) widoczne są zdecydowanie niższe naprężenia rozciągające w główce szyny, osiągające wartości jedynie około 100 MPa. Widoczne są też różnice w wartościach naprężeń w szyjce szyny w zależności od sposobu ustawienia prostownicy. Podobnie jak dla szyn przed prostowaniem widoczna jest bardzo dobra zgodność wyników pomiarów ultradźwiękowych i tensometrycznych.



Rys. 93. Podłużne naprężenia własne zmierzone metodą ultradźwiękową i niszcząca w dwóch szynach prostowanych w maszynie nowego typu, przy różnych jej ustawieniach.

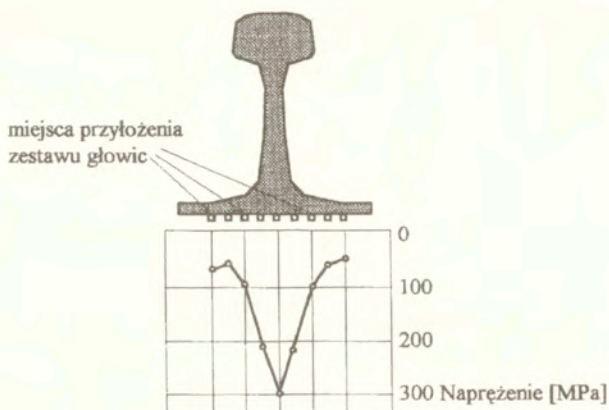
Na jednej z szyn prostowanych w nowej prostownicy autor przeprowadził pomiary rozkładu naprężeń na powierzchni jezdnej, na długości szyny. Wyniki przedstawia rysunek 94. Pomiary wykonane były co 25 cm na początkowym odcinku szyny o długości 10 m. Celem badania było sprawdzenie wahań wartości rozciągających naprężeń powstających w czasie prostowania w nowej prostownicy. Widoczna jest wyraźna przebudowa naprężeń ze ściskających na rozciągające na początkowym odcinku o długości około 1 m. Jest to nieprostowany fragment szyny prezentujący podobny przebieg naprężeń jak w szynach amerykańskich. W porównaniu z



Rys. 94. Rozkład naprężeń podłużnych zmierzonych na główce szyny, na powierzchni jezdnej, na odcinku długości 10 m od początku szyny.

wynikami pomiarów przeprowadzonych na szynach amerykańskich (rysunki 85 i 86) i szynie polskiej (rysunek 89) widoczne są mniejsze zmiany wartości naprężenia na długości szyny. Zmiany te mieszczące się w granicach ± 15 MPa. Tak niskie wahania wartości naprężenia na długości szyny wynikają z kontrolowanego chłodzenia szyny po walcowaniu na gorąco i dbałości o zachowanie jednakowej na całej długości krzywizny gorącej szyny w czasie stygnięcia.

Autor przeprowadził też badania rozkładów naprężeń podłużnych na szerokości dolnej powierzchni stopki w jednej z szyn, w której wykryto wysokie naprężenia rozciągające w stopce. Wyniki pomiarów pokazuje rysunek 95.



Rys. 95. Rozkład naprężeń podłużnych na dolnej powierzchni stopki szyny.

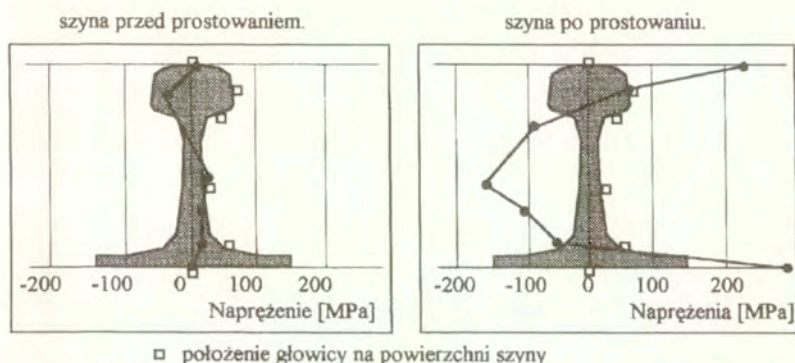
Widoczne jest symetryczny rozkład naprężeń z wyraźnym maksimum naprężeń rozciągających w osi szyny (środek stopki), sięgającym 300 MPa. Naprężenia na bokach stopki są kilkukrotnie niższe i nie przekraczają 70 MPa.

Pokazany na tym wykresie rozkład naprężeń na szerokości stopki obrazuje na ile błędne może być przyjmowane czasami przez producentów szyn założenie, że w nowych szynach wartości podłużnej składowej są stałe na szerokości szyny.

Wysoka zgodność wyników niszczących i ultradźwiękowych, możliwość prowadzenia pomiarów w różnych częściach szyny (główna, szyjka, stopka) oraz szybkość z jaką uzyskiwane były wyniki metodą ultradźwiękową przesądziły o decyzji zakupu aparatu DEBRO-20 przez hutę francuską. Głównym celem zakupu była szybka kontrola stanu naprężeń własnych w szynach prowadzona w czasie regulacji nowej prostownicy. Omawiając wyniki uzyskane na francuskich szynach należy zaznaczyć, że stal stosowana na te szyny pochodzi z procesu ciągłego odlewania i charakteryzuje się wysoką czystością i stałością własności akustycznych. Proces walcowania szyn zapewnia powtarzalność tekstury materiału we wszystkich szynach. Dlatego też wyniki pomiarów ultradźwiękowych były tak powtarzalne i bliskie wynikom sprawdzonej i akceptowanej w środowisku hutniczym metody tensometrycznej.

Duża liczba pomiarów przeprowadzonych na przygotowanym zastawie szyn przez francuskiego producenta przyczyniła się do powstania zmodyfikowanego 6-przetwornikowego zestawu głowic, wyposażonego w szablon. Szablon ten umożliwił dwukrotne wykonanie pomiarów w tym samym miejscu, dla różnych kierunków ustawienia głowicy (sposób opisany w rozdziale 3.2.2.2) i wykorzystanie efektu „lustra”.

W roku 1992 autor przeprowadził badania naprężeń własnych w szynach produkowanych w Wielkiej Brytanii. Pomiary wykonane były aparatem DEBRO-30 wyposażonym w 12-przetwornikowy zestaw głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne, wykorzystujących już efekt „lustra”. Podobnie jak w przypadku badań szyn francuskich, celem badań wykonanych na szynach produkowanych przez brytyjski koncern była ocena podłużnej składowej naprężeń własnych w próbnych szynach przed i po prostowaniu. Przykłady wyników uzyskanych na szynach próbnych przed i po prostowaniu pokazuje rysunek 96. Pomiary wykonano dla 6-ciu położenia głowicy na obwodzie profilu szyny, między innymi na dolnej powierzchni głowki i w dolnej części szyki szyny.



Rys. 96. Podłużna składowa naprężeń własnych w szynach przed i po prostowaniu. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych na szynach próbnych.

Widoczne są niskie wartości naprężeń własnych w szynie przed prostowaniem (w porównaniu z szynami francuskimi). Naprężenia te nie przekraczają -50 i $+35$ MPa. Natomiast naprężenie w szynie po prostowaniu, szczególnie na dolnej powierzchni stopki, osiąga wysoką, wynoszącą blisko 300 MPa wartość. Badania naprężeń własnych w szynach wytwarzanych w koncernie British Steel były związane z pękaniem tych szyn ułożonych w torach linii Trans Canada a prawdopodobną przyczyną awarii pękania były wysokie wartości naprężenia własnych.

Innym elementem toru kolejowego, w którym naprężenia własne mogą wpływać na własności eksploatacyjne są rozjazdy kolejowe. Rozjazdy zbudowane są między innymi z odcinków szyn kolejowych i iglic o innym niż szyny przekroju. W odróżnieniu od prostych szyn przeznaczonych do ułożenia w torze elementy rozjazdu po walcowaniu kształtowym są nie tylko prostowane ale i zginane na zimno. Celem zginania, które jest ostatnia operacja przed montażem rozjazdu, jest nadanie im odpowiedniej krzywizny. W pracy [170] przedstawiono zmierzone rozkłady podłużnych naprężeń własnych w iglicach rozjazdów kolejowych. Iglica poddawana jest trójpunktowemu zginaniu w płaszczyźnie poziomej (równoległej do dolnej powierzchni stopki), a operacja plastycznego gięcia wprowadza do materiału silne naprężenia własne. Wyniki pomiarów tych naprężeń, wykonanych aparatem DEBRO-30 przez dr Marka

Adamskiego, pokazano na rysunku 97. W pomiarach wykorzystano 12-przetwornikowy zestaw głowic. Pomiarzy przeprowadzono dla 13 położenia głowicy na szerokości stopki iglicy, a położenie Nr 8 odpowiada w przybliżeniu pozycji zestawu głowic pod środkiem masywnej szyjki iglicy. Pierwsze dwa wykresy pokazują kolejno naprężenia zmierzone w iglicy przed prostowaniem i po gięciu na zimno. W iglicy przed prostowaniem i gięciem widoczne jest maksimum naprężeń rozciągających, którego położenie odpowiada w przybliżeniu pozycji zestawu głowic pod szyjką iglicy. Po prostowaniu i gięciu obserwowany jest rozkład naprężeń z dwoma maksimami i dwoma minimami dający się aproksymować linią łamaną (linia przerywana na wykresie), typowy dla pręta poddanego plastycznemu zginaniu.

Po pomiarach badaną iglicę poddano odprężającej obróbce cieplnej i po jej wykonaniu pomiary powtórzone. Ich wyniki pokazuje ostatni wykres. Maksymalne wartości naprężeń w odprężonej iglicy wyniosły $+30 \div -20$ MPa. Te nierówne zero wartości naprężeń są spowodowane rozrzutem wyników pomiarowych, których dokładność w tych pomiarach oceniona została na ± 20 MPa. Drugim powodem niezeraowych wartości naprężeń zmierzonych w odprężonej iglicy mogło być niepełne odprężenie materiału.

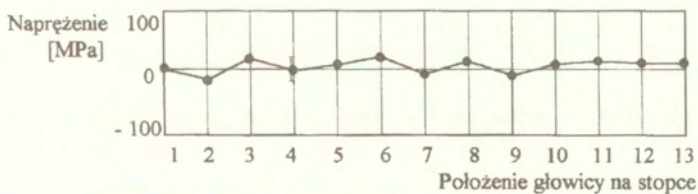
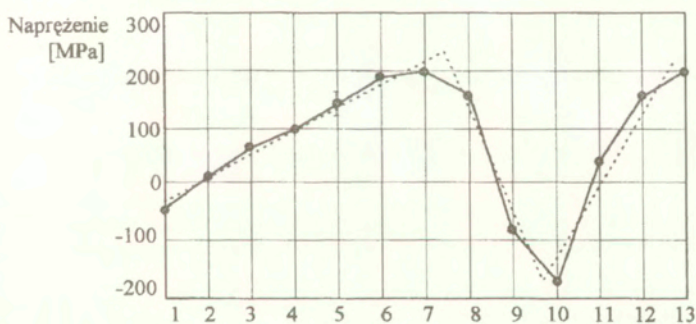
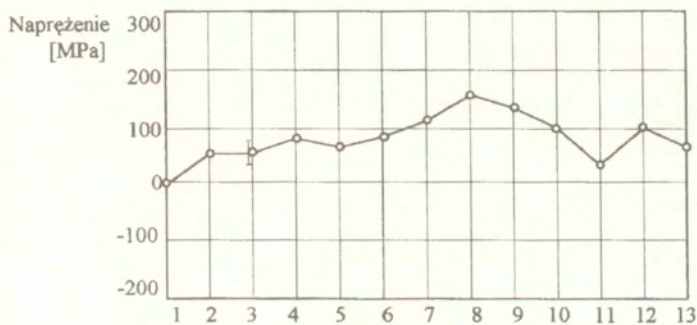
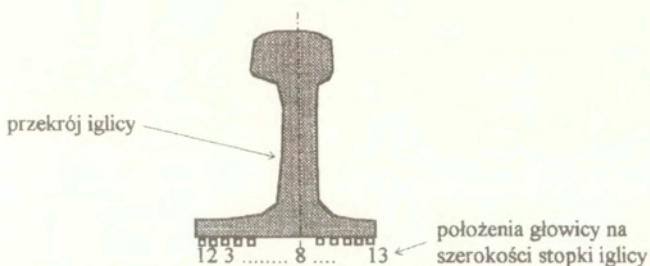
Wszystki wyniki pomiarów naprężeń własnych przedstawione wyżej uzyskane zostały po wyskalowaniu aparatu na wzorcu poddanym odprężającej obróbce cieplnej i wykonanym z szyny tego samego typu co szyna badana. Niedogodnością skalowania aparatury na takim wzorcu jest koszt i czas potrzebny na jego wykonanie. W przypadku produkcji wielu rodzajów szyn, wykonywanych z różnych gatunków stali, koniecznej jest posiadanie kilku wzorców. Użytkownicy aparatów DEBRO przeznaczonych do badań naprężeń własnych w szynach, w współpracy z autorem, poszukiwali metody skalowania eliminującej konieczność skalowania na odprężanych wzorcach.

Na rysunkach 89, 93 i 96, można zauważyć, że rozkłady naprężeń w szynach prostowanych, niezależnie od producenta i stosowanej do prostowania maszyny, posiadają wspólne cechy. Są nimi maksimum naprężeń ściskających w połowie wysokości szyjki szyny (w okolicy osi obojętnej przekroju szyny) i naprężenia rozciągające w główce i stopce szyny. W okolicach przejścia szyjki szyny w stopkę naprężenia własne są bliskie zera. Miejsca o zerowych naprężeniach podłużnych, gdyby znane były ich położenia, mogłyby być wykorzystywane do skalowania aparatu.

Badacze niemieccy, prowadzący badania aparatem DEBRO-30 w Thyssen Forshung, przeprowadzili pomiary naprężeń skalując aparat na górnej powierzchni stopki w pobliżu przejścia stopki w szyjkę, zakładając, że składowa podłużna naprężeń własnych w tym obszarze materiału szyny jest równa zeru. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów porównali z wynikami pomiarów naprężeń metodą tensometrii otworkowej (pomiar odkształceń wokół otworka nawiercanego w środku rozetki tensometrycznej). Jako błąd metody ultradźwiękowej wykorzystującej skalowanie na górnej powierzchni stopki przyjęli różnicę między wskazaniami techniki ultradźwiękowej i tensometrycznej, przyjętej przez prowadzących badania za metodę sprawdzoną i wiarygodną.

W wyniku badań przeprowadzonych na zbiorze wielu szynach uzyskano następujące rezultaty:

dla pomiarów na powierzchni jezdnej -	42% wyników z błędem do 28 MPa, 31% wyników z błędem do 16 MPa, 18% wyników z błędem do 6 MPa, 9% wyników z błędem do 5 MPa.
dla dolnej powierzchni stopki-	42% wyników z błędem do 17 MPa, 31% wyników z błędem do 22 MPa, 18% wyników z błędem do 13 MPa, 9% wyników z błędem do 5 MPa.

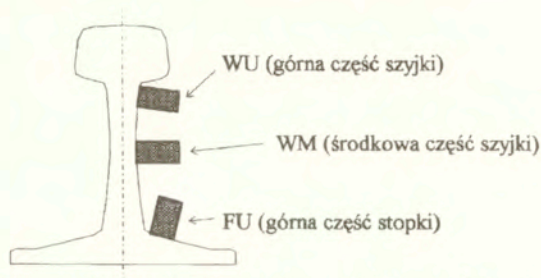


Rys. 97. Rozkład naprężeń podłużnych na stopce iglic poddanej zgięciu na zimno w płaszczyźnie poziomej.

Porównując wyniki pomiarów ultradźwiękowych uzyskanych przy skalowaniu aparatu na odprężonym wzorcu i na górnej powierzchni stopki szyny, stwierdzono, że rezygnacja z odprężonego wzorca nieznacznie tylko zwiększa tak oceniany błąd pomiaru. Jednocześnie nowy sposób skalowania eliminuje potrzebę czasochłonnego przygotowania wzorca i umożliwia prowadzenie badań szyn pochodzących z jednostkowej produkcji próbnej, dla których wykonanie próbek odprężonych jest kłopotliwe lub wręcz niemożliwe.

Można założyć, że przy powtarzalnej produkcji, różnice tekstury w kolejno wytwarzanych szynach, wynikające z walcowania i przeróbki plastycznej stali są małe oraz że tekstura jest stała na długości jednej szyny i w powtarzalny sposób zmienia się na jej wysokości. Założenie to umożliwia ocenę stanu naprężeń bez obliczania poprawki strukturalnej, przy wykorzystaniu w pomiarach jedynie podłużnych fal podpowierzchniowych. Przykładowo, mierząc różnicę czasów przejścia fali podłużnej w szyjce, czyli w miejscu o największych naprężeniach ściskających i w miejscu o zerowych, lub bliskich zeru naprężeniach, można się spodziewać, że różnica tych czasów będzie proporcjonalna do naprężenia panującego w szyjce. Dokładniej, będzie ona zależna od stanu naprężenia w szyjce i, z założenia stałej, różnicy tekstury materiału między szyjką i stopką.

Badacze brytyjscy z British Steel Workington, wykorzystując aparat DEBRO-30, wykonali program pomiarów mierząc czasy przejścia podłużnych fal podpowierzchniowych w dwóch miejscach na szyjce szyny i jednym na górnej powierzchni jej stopki. Położenia głowicy na profilu szyny, przy których wykonywane były pomiary czasów przejścia fal podłużnych pokazuje rysunek 98.



Rys. 98. Miejsca pomiarów czasów przejścia na szynie z naprężeniami własnymi poddanej następnie pomiarowi „rozwarcia szczeliny”.

Poszukiwali oni korelacji różnych kombinacji czasów przejścia fal z wynikami badań niszczących polegających na rozcinaniu szyny wzdłuż szyjki i pomiarze rozwarcia szczeliny (sposób pokazany na rysunku 83). Na podstawie czasów przejścia fali podłużnej zmierzonych dla położenia głowicy WM, FU i WU obliczano różnicę czasów Δt równą:

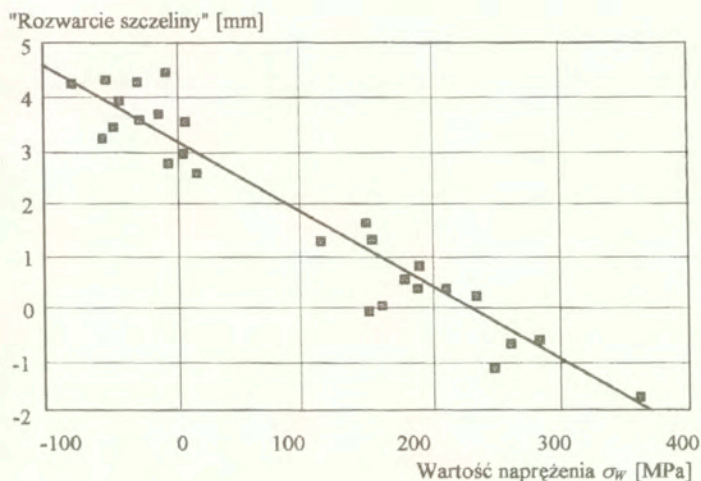
$$(44) \quad \Delta t = t_{WM} - (t_{WU} + t_{FU}) / 2$$

gdzie t_{WM} , t_{WU} i t_{FU} oznaczają czasy przejścia zmierzone odpowiednio dla położenia głowicy WM, WU i FU. Wartość σ_W , opisującą stan naprężeń własnych w szynie i wyrażaną w [MPa] obliczali ze wzoru:

$$(45) \quad \sigma_W = \Delta t / (\beta_{111} * t_0^R)$$

gdzie: β_{111} - współczynnik elastoakustyczny dla fali podłużnej,
 $t_0^R = (t_{WU} + t_{FU}) / 2$.

Na rysunku 99 pokazano porównanie tak obliczonej wartości σ_w z rezultatami pomiarów rozwarcia szczeliny przeprowadzonych na próbkach wyciętych z 27 szyn. Rozwarcie szczeliny, mierzone po nacięciu szyjki szyny na długości 50 cm, w zależności od stanu naprężeń własnych w badanych szynach, zmieniało się od -1,7 mm do blisko 4,5 mm. Ujemna wartość rozwarcia szczeliny oznacza, że w czasie nacinania szczelina się zamykała. Takie odkształcenia obserwowane były w czasie badań szyn przed prostowaniem, w których główkach i stopkach panowały ściskające naprężenia własne. W szynach po prostowaniu obserwowane było rozwieranie się szczeliny.



Rys. 99. Porównanie wartości naprężeń obliczanych zgodnie z wzorem (45) z "rozwarciem szczeliny" mierzonym w czasie niszczącej oceny naprężeń w szynie.

Widoczna jest liniowa korelacja wartości naprężenia σ_w z rozwarciem szczeliny. Odchylenia wartości σ_w od linii korelacji są znaczne i sięgają 80 MPa. Pamiętać jednak należy, że wielkość rozwarcia szczeliny zależna jest nie tylko od wartości naprężeń własnych w szyjce szyny ale od rozkładu naprężeń własnych w całym przekroju szyny. Ten prosty i zgrubny, zaproponowany i zweryfikowany doświadczalnie przez brytyjskich badaczy, sposób badania stanu naprężeń w szynie pozwala jednak na szybkie i co najważniejsze nieniszczące rozróżnianie szyn, w których panują wysokie naprężenia własne.

Badania naprężeń własnych w nowych szynach kolejowych pochodzących od różnych producentów przeprowadzone przez autora w latach 1988 - 1995 dowiodły, że technika ultradźwiękowa jest w stanie dostarczyć istotnych i wiarygodnych informacji o wartościach tych naprężeń. Pomimo swych ograniczeń (pomiar jedynie w wierzchniej warstwie materiału) technika ta spełnia oczekiwania producentów szyn. W odróżnieniu od metod niszczących jest tańsza i wielokrotnie szybsza. Fakt, że stosowana w pomiarach aparatura była przenośna umożliwił autorowi wykonanie pomiarów na wielu szynach leżących w hutach, w składach, bez potrzeby ich transportowania.

Obecnie aparaty i głowice ultradźwiękowe, opracowane i zbudowane w IPPT PAN, stosowane są w badaniach naprężeń u takich producentów szyn kolejowych jak Huta Katowice, UNIMETAL, British Steel i Thyssen Stahl AG. O zaufaniu do metody świadczy fakt, że Thyssen Stahl AG po zakupie aparatu DEBRO-20 z 6-przetwornikowym zestawem głowic zdecydowały się na zakup drugiego, udoskonalonego aparatu DEBRO-30 z nowym zestawem głowic, wykorzystującym efekt „lustra”. Podobnie koncern British Steel po zebraniu doświadczeń w czasie dwuletniej eksploatacji jednego aparatu w Wielkiej Brytanii zdecydował się na zakup drugiego przyrządu przewidując jego wykorzystanie w swej placówce w Kanadzie.

5.2. BADANIA NAPRĘŻEŃ W SZYNACH W TORZE CIĄGŁE SPAWANYM

5.2.1. Wprowadzenie

Przez długie lata szyny leżące w torze kolejowym łączone były ze sobą śrubami i łukami. Dzięki luzom takich połączeń każda z szyn mogła swobodnie zmieniać swoją długość wraz ze zmianami temperatury. W latach 50-tych, dzięki rozwojowi przenośnych urządzeń do spawania elektroiskrowego i termitowego, zaczęto łączyć szyny spoinami. Powstał tor ciągle spawany, który podniósł komfort jazdy, istotnie zwiększył żywotność szyn w torze i zmniejszył koszty związane z utrzymaniem toru.

Zastosowanie szyn ciągle spawanych, których długości dochodzą dzisiaj do kilkudziesięciu kilometrów, spowodowało konieczność kontroli stanu sił podłużnych w szynach. W szynach łączonych spoinami rozszerzalność termiczna materiału szyn prowadzi do powstania w nich sił termicznych. W zimie są to siły rozciągające, a w letnie, upalne dni są to siły ściskające. Siły rozciągające mogą prowadzić do pęknięcia szyn. Siły ściskające, po przekroczeniu granicznej wartości, mogą być przyczyną wybożenia toru i prowadzić do katastrofy kolejowej.

Naprężenia termiczne są głównym źródłem sił działających w szynach i dlatego wszelkie siły podłużne działające w szynach toru ciągle spawanego zwykle się nazywają w literaturze siłami termicznymi. W pracy, pod określeniem sił termicznych, autor rozumie jedynie siły pochodzące od rozszerzalności cieplnej szyn. Siły wywołane opisanymi dalej innymi czynnikami nazywane są po prostu siłami podłużnymi. Rozróżnienie to wydaje się celowe nie tylko ze względu na różne źródła naprężeń podłużnych w szynach ale i dlatego, że siły powstające wskutek różnych czynników zmieniają się w różny sposób w czasie.

Wielkość siły termicznej działającej w szynie przytwierdzonej sztywno do podłoża (odkształcenie w kierunku podłużnym równe zero), jest proporcjonalna do zmiany temperatury szyny, współczynnika rozszerzalności cieplnej stali i modułu Younga oraz do powierzchni przekroju szyny:

$$(46) \quad F_t = \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A$$

gdzie: F_t - termiczna siła podłużna w szynie,

α - współczynnik rozszerzalności liniowej, dla stali równy $1,15 \cdot 10^{-5}$ [$1/^\circ\text{C}$],

Δt - zmiana temperatury w stosunku do temperatury początkowej [$^\circ\text{C}$],

$E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa],

A - powierzchnia przekroju szyny [mm^2].

Można założyć, że zgodnie ze wzorem (46) dla typowej szyny zmiana temperatury o 1°C prowadzi do powstania naprężenia podłużnego równego 2,5 MPa. Dla szyny UIC-60 o powierzchni przekroju poprzecznego równej 7687 mm^2 odpowiada to sile termicznej równej

18,6 kN. W Europie centralnej temperatury szyn zmieniają się w granicach od -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$. W ekstremalnych warunkach klimatycznych, różnica między minimalną a maksymalną temperaturą szyny może dochodzić do 120°C [145]. Oznacza to, że siła termiczna w jednej szynie może zmieniać się w granicach 300 ton!

Przy braku informacji, w których odcinkach toru działają wysokie naprężenia ściskające, jedynym zabezpieczeniem przed wyobczeniem toru jest obniżenie prędkości pociągów i zmniejszenie tym samym dynamicznych sił oddziałujących na tor. W [171] opisano, że w sytuacjach gdy temperatura powietrza przekracza 35°C linia kolejowa Amtrak, na trasie Washington - New York, obniża prędkość pociągów pasażerskich z 110 do 80 mil na godzinę. Podobnie, największe linie kolejowe USA CSX, obniżają prędkości swoich pociągów towarowych o 10 mil na godzinę.

Temperatura szyn zmienia się w cyklach dobowych i rocznych. W ciągu doby najniższą temperaturą szyna osiąga przed świtem a najwyższą po południu. W słoneczne dni temperatura szyny może być o 20°C wyższa od temperatury powietrza. W zimie, temperatura szyny jest zwykle o 5°C wyższa od temperatury powietrza. W pracy [172] opisano sposoby przewidywania temperatury szyny i jej dobowych zmian w zależności od warunków pogodowych, koloru szyny i wysokości posadowienia szyny nad gruntem. Celem pracy było ustalenie jak w różnych porach roku przebiegają dobowe zmiany temperatury szyn leżącej w torze i jakie naprężenia termiczne mogą one wywoływać. Wyniki wieloletnich pomiarów temperatur szyn w Wielkiej Brytanii opisano w pracy [173]. Pomiary temperatur wykonywano w latach 1950 - 1963 i na ich podstawie autorzy określili maksymalne temperatury jakie może osiągnąć szyna w zależności od jej położenia względem kierunku padania promieni słonecznych, otoczenia toru czy wiatrów panujących w danym miejscu.

Innym ważnym czynnikiem zmian sił podłużnych w szynach toru ciągle spawanego jest podłużna „pełzanie” toru. W odróżnieniu od dobowych zmian sił termicznych, siły wywołane pełzaniem zmieniają się przeważnie w długich okresach. Przyczyną pełzania toru są głównie siły hamowania i przyspieszania pociągów. Ogólnie przyjmuje się, że w czasie ruszania pociągu towarowego, na odcinku początkowych 30 m jazdy, jednostkowa siła podłużna oddziałująca na tor wynosić może 33 kN/m. Drugi szacunkowy sposób oceny obciążeń toru siłami hamowania i przyspieszania to przyjęcie, że siły poziome działające na szyny wynosić mogą do 25% nacisku pociągu na tor [174]. Znając masę i opóźnienie ruchu można obliczyć siłę z jaką oddziałuje pociąg na tor, czas tego działania i długość odcinka na jakim siła jest przykładana. Załóżmy masę pociągu równą $4 \cdot 10^6$ kg (50 wagonów po 80 ton każdy). Pociąg jadący z prędkością 60 km/godz hamuje z opóźnieniem $0,1 \text{ m/s}^2$. Przyjmując, że pociąg hamuje równomiernie do zatrzymania długość drogi hamowania wynosi około 1350 m, a czas hamowania 165 sekund. Siła z jaką oddziałują koła pociągu na szyny toru wynosi $40 \cdot 10^4$ kN. Oznacza to, że na długości ponad kilometra i w czasie powyżej dwóch minut, na tor działa stała podłużna siła równa wadze połowy jednego ciężkiego wagonu.

Obecnie, na specjalnych liniach, poruszają się po torach pociągi o długości blisko 6 km przewożące około 10 tysięcy ton rudy żelaza [175]. Tak wielka masa pociągu oznacza, że siła pozioma działająca na tor na długości pociągu może być liczona w setkach ton lub przekroczyć tysiąc ton! Dodatkowym czynnikiem ułatwiającym podłużne przemieszczenia toru są dynamiczne, zmienne oddziaływania toczącego się pociągu na szyny. Powstające drgania toru ułatwiają plastyczne odkształcenia podsypki przenoszącej podłużne obciążenia przekazywane na nią z szyn przez przytwierdzone do szyn podkłady.

Siły hamowania na zjazdach (hamowanie w celu utrzymania stałej prędkości) powodują, że w terenie górzystym, w dolinach pojawiają się w szynach siły ściskające, a na szczytach wzniesień - siły rozciągające. Spiętrzenia sił podłużnych obserwowane są też w miejscach zmiany sztywności konstrukcji toru. Miejscami takimi są na przykład mosty kratowe, na których szyna

jest mocowana bezpośrednio do konstrukcji mostu. Przykłady obliczania rozkładów sił podłużnych spowodowanych hamowaniami pociągów na mostach przedstawiono w [174]. Innym miejscem toru gdzie siły podłużne osiągać mogą wysokie wartości są rozjazdy. W miejscach tych siły z dwóch torów przekazywane są na jeden tor co powoduje spiętrzenia sił podłużnych [176].

W Europie powszechnie stosowany jest jednokierunkowy ruch pociągów (to znaczy po jednym torze pociągi poruszają się jedynie w jednym kierunku). Jeśli na takim torze ustawiony jest znak stop, przed którym wszystkie pociągi (lub ich zdecydowana większość) hamują, to odcinek toru przed znakiem stop poddawany jest wielokrotnie w ciągu jednego dnia działaniom znaczących, jednakowo skierowanych sił podłużnych. Działania tych sił, wraz z wywołanymi ruchem wagonów drganiem rusztorowego, mogą doprowadzić do podłużnych przemieszczeń toru i pojawienia się naprężeń ściskających w szynach w pobliżu znaku stop i naprężeń rozciągających w pewnej odległości przed nim. Jeszcze innym czynnikiem powstawania sił podłużnych w szynach są przemieszczenia toru spowodowane nierównomiernym nagrzewaniem szyn i wynikającymi z tego gradientami sił termicznych na długości toru. Gradienty te mogą być przyczyną lokalnych podłużnych przemieszczeń toru zachodzących w cyklu dobowym. Modelowanie takich przemieszczeń opisane jest w pracy [176].

Ogólnie przyjmuje się, że siła podłużna w szynie ciągle spawanej jest równa zero w nowym torze, w temperaturze, w której wykonano ostatnią spoinę. Tę temperaturę nazywa się temperaturą neutralną toru. Dlatego też w środowisku kolejowym często mówi się nie o siłach powstałych w szynach toru, a o zmianie temperatury neutralnej. Zakłada się, że spadek tej temperatury oznacza powstanie w torze sił ściskających o wartościach wynikających z równania (46).

Problem pomiaru siły podłużnej działającej w szynie z pozoru jest problemem banalnym i sprowadzającym się do wyznaczenia wartości naprężenia panującego w stalowym pręcie poddanym jednoosiowemu rozciąganiu lub ściskaniu. Trudności pomiarowe spowodowane są głównie tym, że pomiary prowadzone muszą być w specyficznych, trudnych warunkach, a wartości mierzonych naprężeń są zazwyczaj niskie i nie przekraczają 50 MPa. Drugim utrudnieniem jest konieczność eliminacji wpływu silnych naprężeń własnych w szynach toru (o składowej podłużnej sięgającej setek megapaskali, opisanych w rozdziale 5.1). Poza nimi w szynach w torze pojawiają się naprężenia spawalnicze obserwowane w pobliżu spoin. Proces spawania, w czasie którego fragment szyny ulega silnemu podgrzaniu, jest przyczyną nie tylko lokalnej zmiany rozkładu naprężeń własnych ale i powstawania w szynie, po jej ostygnięciu, rozciągającej siły podłużnej.

Ruch pociągów powoduje plastyczne odkształcenia fragmentów powierzchni szyny wskutek silnych naprężeń kontaktowych koło-szyna. Nowe naprężenia własne powstają na powierzchni jezdnej główki, a na łukach toru również na wewnętrznej bocznej powierzchni główki. Jeszcze innym źródłem naprężeń podłużnych mogą być naprawy toru wykonywane przy wykorzystaniu napinaczy hydraulicznych wprowadzających w szynę podłużne naprężenia rozciągające.

Pomiary sił podłużnych w szynach toru bezстыkowego muszą być prowadzone w obu szynach ponieważ znaczne różnice sił podłużnych w prawym i lewym toku szynowym mogą być przyczyną wybożenia toru nawet podczas niskich temperatur. Przypadek utraty stateczności toru w zimie spowodowanego pełzaniem tylko jednej z szyn opisany jest w pracy [177].

Siły podłużne panujące w szynach toru ciągle spawanego oceniane są różnymi nieniszczącymi metodami. Jedna grupa metod opiera się na pomiarach odkształceń podłużnych szyn.

Odształcenia te mierzone są tensometrami oporowymi naklejonymi na szynie lub mechanicznymi ekstensometrami. Skomputeryzowany system tensometryczny zainstalowany jest na torze próbnym Association of American Railroads w Pueblo, Kolorado. Produkowane są obecnie tensometry oporowe w szczelnych obudowach, które zamiast przyklejania spawa się punktowo do powierzchni badanego elementu [178, 179]. Według zapewnień producentów tego typu tensometry, pracujące w szerokim zakresie temperatur, mogą przetrwać na torze kilka lat. Jednak ich instalowania na szynach wymaga specjalistycznego sprzętu a same czujniki są kosztowne. W latach 90-tych opracowany został w Polsce ekstensometr elektroniczny umożliwiający pomiary odształcenia podłużnego szyny [180]. Przyrząd ten może być zastosowany po uprzednim wywierceniu w główce szyny otworów i umocowaniu w nich precyzyjnie obrobionych stalowych bolców, pomiędzy którymi dokonywany jest pomiar odległości. W USA opracowano ostatnio zestaw pomiarowy składający się z tensometru oporowego, czujnika temperatury, nadajnika radiowego i baterii. Zestaw ten, przymocowany na stałe do szyny, może zdalnie (na odległość kilkuset metrów) przysyłać informacje o aktualnym odształceniu szyny [181].

Sposobem stosowanym obecnie w PKP jest pomiar podłużnych przemieszczeń szyny względem tak zwanych punktów stałych (np. słupów trakcji elektrycznej). Pomiary wykonywane co około 100 - 200 metrów mogą dostarczyć informacji, na których odcinkach szyna ulega „skróceniu”, a gdzie „wydłużeniu” i stąd wnioskować o rozkładzie sił podłużnych na długości szyny. Jest to jednak metoda bardzo pracochłonna, wymagająca przygotowania specjalnych znaków na szynie, punktów stałych oraz dużej staranności w pomiarach ponieważ mierzone przemieszczenia są zazwyczaj niewielkie. Inną jej wadą jest to, że wynik daje informację uśrednioną na długości około 200 metrów [182].

Zbudowano specjalne termometry szynowe, wyskalowane w jednostkach siły i mające informować o zmianach sił termicznych [183]. Ta technika oceny sił oparta jest jednak na niesłusznym założeniu, że zmiany sił w szynach są zależne jedynie od zmian temperatury i stałe na długości toru.

Trwają prace nad wykorzystaniem zależności siły poprzecznej potrzebnej do określonego wygięcia szyny w płaszczyźnie pionowej [184] od siły podłużnej w szynie. Sposób ten wymaga zastosowania ciężkiego pojazdu pomiarowego wyposażonego w siłowniki hydrauliczne. Koła pojazdu utrzymują szynę na podkładach, a wygięciu ulega jedynie jej odcinek mieszczący się pod pojazdem pomiarowym. Autorzy sygnalizują, że pomiarów tą techniką nie można dokonywać gdy w szynie panują silne naprężenia ściskające ponieważ grozi to niekontrolowanym wybočeniem szyny w płaszczyźnie pionowej. Nie wspominają jednak jak ocenić działające w szynie siły jeszcze przed ich pomiarem. Badana jest też podobna zależność dla siły poziomej [185]. Powodem, dla którego dwie ostatnie metody pomiarów nie znalazły zastosowania jest konieczność zamknięcia toru na czas pomiaru i ich pracochłonność (konieczne jest odpięcie szyny od podkładów) oraz groźba doprowadzenia do wyboczenia szyny i konieczności wykonania jeszcze bardziej pracochłonnej naprawy.

Opracowano szereg metod magnetycznych wykorzystujących szumy Barkhausena i zmiany przewodności magnetycznej wywołane panującymi w szynie naprężeniami. W Polsce, w roku 1982, w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa powstał miernik magnetyczny [186]. Dla kolei węgierskich zbudowany został miernik RailScan wykorzystujący szumy Barkhausena [187]. Miernik ten był testowany również w Polsce [188].

Poważnym utrudnieniem w zastosowaniu metod magnetycznych w warunkach toru jest wysoka czułość metod magnetycznych na drobne nawet wahania składu chemicznego i struktury materiału szyn i związane z nimi różnice własności magnetycznych materiału. W pracy [188] przedstawiono liniowe zależności mierzonego przyrządem RailScan parametru MP (Magnetoelastic Parameter) od siły działającej w szynie, uzyskane na szynie nowej i używanej.

Jednak nachylenie krzywych jest różne i zależne od stanu szyny. Te różnice w czułości metody magnetycznej spowodowane są prawdopodobnie różnicami mikrostruktury różnych szyn. Drugim utrudnieniem są silne i zmienne prądy biegnącej po szynach pochodzące od zasilania lokomotyw elektrycznych oraz od sygnalizacji i komunikacji, które zaburzają wyniki pomiarów metodami elektrycznymi czy magnetycznymi. Podobne problemy, zależności wyników od nieznanych własności magnetycznych badanego materiału, dotyczą pomiarów ultradźwiękowych z zastosowaniem głowic elektromagneto-akustycznych, gdzie fala akustyczna powstaje w wyniku oddziaływania zmiennego i stałego pola magnetycznego.

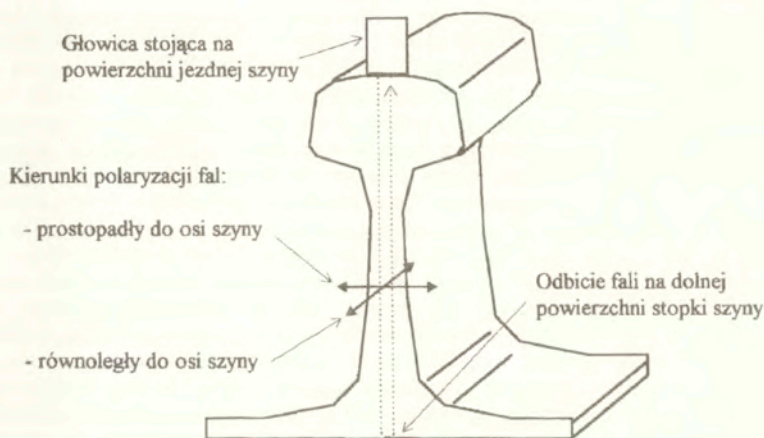
W roku 1979 ukazała się pierwsza praca poświęcona wykorzystaniu techniki ultradźwiękowej w pomiarach sił podłużnych w szynach ciągle spawanych [189]. Jest to raport końcowy prac finansowanych wspólnie przez Federalną Administrację Kolei i Związek Kolei USA. Autorzy wybrali do pomiarów podpowierzchniową falę podłużną rozchodzącą się wzdłuż szyny, jako falę o najwyższym współczynniku elastoakustycznym. Zastosowali różnicowy układ głowic (jedna głowica nadawcza, dwie odbiorcze) wyposażonych w duże, o boku równym 1 calowi, przetworniki piezoelektryczne. Odległość między głowicami odbiorczymi wynosiła 216 mm, a pomiary prowadzone były na szycie szyny, w pobliżu osi obojętnej. Należy zaznaczyć, że w tym miejscu zazwyczaj nieznane ściskające, podłużne naprężenia własne w szynach osiągają maksymalną wartość (patrz rysunek 89 - strona 137, 93-strona 141 i 96 - strona 143). Uzyskane w warunkach laboratoryjnych wyniki pomiarów na kilku odcinkach nowych szyn wykazały rozrzut czasu przejścia w granicach 70 ns, co odpowiada rozrzutowi naprężenia około 150 MPa. Na długości jednej szyny rozrzuty wynosiły +/- 25 ns. Autorzy powiązali te rozrzuty czasów przejścia ze zmianami naprężeń własnych na długości szyny.

W pracy opisano też eksperyment przeprowadzony na szynach w torze próbnym w Pueblo, Kolorado. Pomiary prowadzone w wybranych miejscach toru pokazały dobrą zgodność wyników zależności zmiany wartości wyznaczonego metodą ultradźwiękową naprężenia podłużnego a zmianą temperatury szyny. Wyniki ultradźwiękowych badań naprężeń potwierdzone zostały wynikami pomiarów wykonanych techniką tensometryczną.

W 10 lat później ukazała się praca [190] opisująca pomiary ultradźwiękowe z wykorzystaniem głowic EMAT. Autorzy próbowali wykorzystać fakt, że prędkości podpowierzchniowych fal poprzecznych SH₁ propagujących się w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach zgodnych z głównymi kierunkami tekstury walcowanej stali, w przypadku braku naprężenia, mają takie same wartości [191]. Autorzy pracy założyli, że w szycie szyny odprężonej spełniony będzie warunek równości prędkości fal SH i za mierzone różnice prędkości propagacji fal odpowiedzialne będą naprężenia, głównie dominująca składowa podłużna. Ze względu na kształt szyny, długość odcinka pomiarowego była ograniczona do około 75 mm. Czas przejścia fali SH wynosił więc jedynie 2,3 μs co oznaczało, że czułość układu pomiarowego była bardzo niska. Zmianie naprężenia podłużnego w szynie o 10 MPa odpowiadała zmiana czasu przejścia fali rozchodzącej się w kierunku wysokości szyny jedynie o około 1,5 ns. Autor był świadkiem prób polowych przeprowadzonych głowicami EMAT przez autorów cytowanej pracy na torach ośrodka badawczego w Pueblo. Wykonane tam pomiary potwierdziły obawy co do powtarzalności wyników, a uzyskane rezultaty nie zostały nigdy opublikowane. Podobnie jak w pracy [191] autorzy pracy [192] nie wspomnieli jak na podstawie zaproponowanych przez nich pomiarów obliczyć siłę podłużną w szynie nie znając wartości silnych, ściskających naprężeń własnych w jej szycie.

5.2.2. Badania laboratoryjne

W roku 1990 autor przeprowadził próby wykorzystania pomiarów dwójłomności akustycznej szyn do oceny panujących w nich sił podłużnych. Dwójłomność można mierzyć na całej wysokości szyny, ustawiając głowicę ultradźwiękową na powierzchni tocznej głowki szyny a jej wartość, pomijając wpływ tekstury ośrodka, jest proporcjonalna do różnicy naprężeń podłużnych i poprzecznych (zgodnie ze wzorem (29), strona 44). Schemat pomiaru przedstawia rysunku 100. Przewidywaną zaletą takiego sposobu pomiaru miało być wyeliminowanie, lub znaczące zmniejszenie, wpływu wysokich i nieznanych podłużnych



Rys. 100. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej szyny. Fala poprzeczna rozchodzi się w kierunku wysokości szyny.

naprężeń własnych na wynik pomiaru siły podłużnej w szynie. Fale poprzeczne przechodząc dwukrotnie przez całą wysokość szyny uśredniają informacje o podłużnej i poprzecznej składowych naprężeń własnych na swej drodze. Wiedząc, że suma podłużnych naprężeń własnych po powierzchni przekroju szyny jest równa zero można przyjąć, że wpływ tych naprężeń na czas przejścia fali biegnącej przez wszystkie części szyny, będzie pomijalny. Założyć też można, że wartość składowej poprzecznej naprężeń własnych uśrednionych na wysokości nowej szyny jest mała. W szynach używanych, w odkształconej plastycznie wierzchniej warstwie głowki, poprzeczna składowa naprężeń osiąga znaczne wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Jednak w stosunku do całej wysokości szyny grubość warstwy materiału, w której te naprężenia występują jest mała. Ich wpływ na mierzone czasy przejścia będzie więc proporcjonalnie mały i założono, że nie wpływa on na wartość dwójłomności. Przyjmując wymienione założenia wartość dwójłomności akustycznej powinna być proporcjonalna do wartości wartość jednakowo rozłożonych na powierzchni przekroju szyny naprężeń wywołanych działaniem siły podłużnej.

Wartość dwójłomności akustycznej będzie również zależna od uśrednionej po wysokości szyny anizotropii strukturalnej. Przyjąć można, że dla szyn jednego typu i pochodzących od jednego producenta, tekstura materiału będzie powtarzalna. Drugą zaletą opisywanej metody jest praktyczny brak zależności wartości dwójłomności od temperatury, co dla pomiarów

wykonywanych w szerokim zakresie temperatur eliminuje konieczność stosowania poprawek temperaturowych. Jeszcze jedną cechą metody jest długi czas przejścia fali przez dwukrotną wysokość szyny, co oznacza wysoką względną dokładność pomiaru czasu przejścia. Wadą techniki wykorzystującej fale rozchodzące się przez wysokość szyny jest możliwy wpływ bocznych ścianek wąskiej szyjki na propagację impulsu (zjawisko wpływu bocznej ściany opisane w rozdziale 2.3.2).

Wyniki laboratoryjnych pomiarów zależności czasu przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych równolegle i prostopadłe do osi szyny od naprężenia pokazano wcześniej, na rysunku 79 (strona 122). Obliczona na ich podstawie wartość współczynnika elastoakustycznego β_B wyniosła $-0,74 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹].

W celu sprawdzenia zależności wartości dwójłomności akustycznej od naprężeń własnych w nowych szynach autor przeprowadził pomiary dwójłomności na dwóch próbkach wykonanych z nowej szyny (produkcja Vest Alpine), z których jedna poddana była odprężającej obróbce cieplnej, a druga zachowała stan naprężeń własnych szyny po prostowaniu. W miejscach pomiarów powierzchnia jezdna szyn została wyrównana w celu uzyskania prawidłowego sprzężenia akustycznego głowicy z powierzchnią głowki szyny. Badania laboratoryjne potwierdziły słuszność założeń: różnica dwójłomności akustycznych w szynie z naprężeniami własnymi i bez nich była niewielka. Wpływ anizotropii materiału na błąd w oszacowaniu naprężenia pochodzącego od siły podłużnej autor ocenił na +/-12 MPa. Dodatkowo, laboratoryjne pomiary na kilku próbkach wykonanych z szyn produkowanych w Hucie Katowice (szyny UIC-60) pokazały, że wartość dwójłomności będącej wynikiem anizotropii teksturalnej i naprężeń własnych, dla jednego typu szyn jest praktycznie stała. Badania przeprowadzone na próbkach pokazały jednak, że problemem w pomiarze dwójłomności akustycznej przez wysokość szyny jest wąska szyjka szyny i występujące w niej odbicia rozbieżnej wiązki fal. Możliwość wzbudzenia w szynie wiązki o bardzo małej rozbieżności, eliminującej odbicia w szyjce, ograniczona jest rosnącym wraz ze wzrostem częstotliwości tłumieniem fal oraz ograniczoną wielkością przetwornika przykładanego do zakrzywionej powierzchni jezdnej głowki szyny.

W roku 1991 autor przeprowadził próby pomiarów dwójłomności akustycznej szyn leżących w torze. W badaniach wykorzystano głowicę normalną na fale poprzeczne o częstotliwości 4 MHz i kwadratowym przetworniku o boku 12 mm. Wyniki uzyskane w warunkach torowych pokazały, że rozrzuty czasów przejścia spowodowane nawet niewielkim zużyciem powierzchni jezdnej szyny wykluczają możliwość wykorzystania tej techniki do oceny sił podłużnych. Zniekształcenia głowki szyny powodują zmianę kierunku osi wiązki generowanej w szynie, a to prowadzi do odbić wiązki od ścian szyjki i interferencji impulsów odbitych z impulsami pomiarowymi, rozchodzącymi się bezpośrednio pomiędzy przetwornikiem, a dolną powierzchnią stopki.

W tym samym roku autor wykonał zestaw głowic do pomiaru dwójłomności akustycznej szyny z pominięciem głowki szyny. Fale poprzeczne o polaryzacji równoległej i prostopadłej do osi szyny wzbudzone były nadawczo-odbiorczymi głowicami skośnymi na podpowierzchniowe fale SH i SV sprzęganymi do powierzchni szyjki szyny. Fale te po dojściu do dolnej powierzchni stopki szyny odbijały się od niej i powracały do głowic odbiorczych, a ich drogi w szynie pokazuje rysunek 101. W ten sposób w badaniu omijany miał być obszar głowki szyny z jej zmienną geometrią i zmiennymi, powstającymi wskutek kontaktu koło-szyna, naprężeniami własnymi. Niestety, rozrzuty czasów przejścia mierzonych na próbkach szyn w laboratorium okazały się zbyt duże aby ten sposób pomiaru dwójłomności mógł znaleźć zastosowania. Spowodowało to zaniechanie przez autora prac nad wykorzystaniem pomiarów dwójłomności akustycznej w szynach.



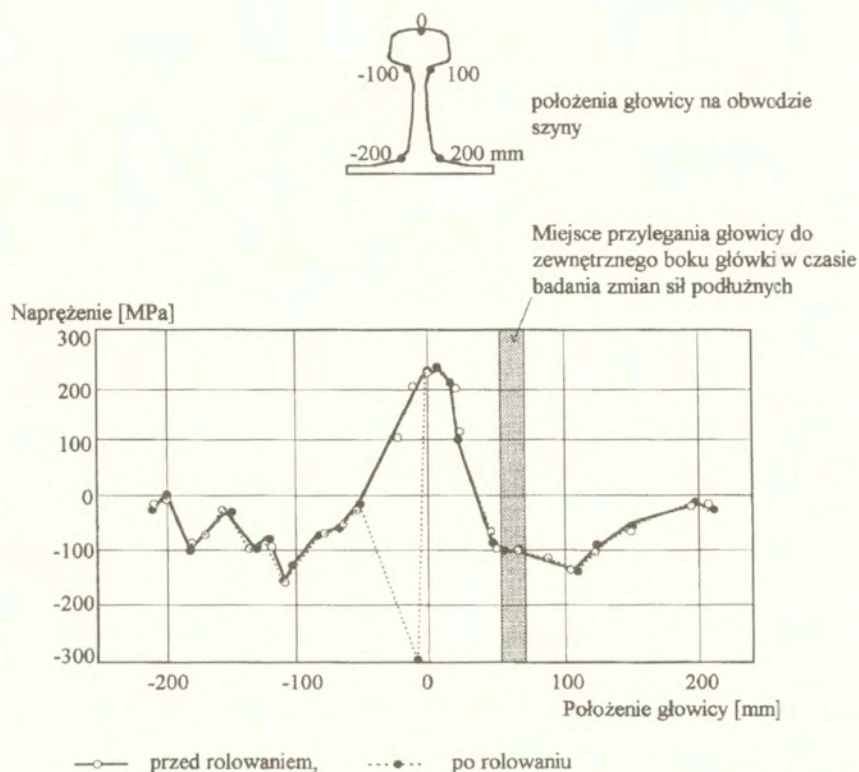
Rys. 101. Położenia głowic i drogi impulsów fal SH i SV w szynie.
(Pomiar dwójłomności akustycznej z ominięciem głowki szyny)

W marcu 1993, na konferencji ERRI, przedstawiciel Instytutu Badań Nieniszczących w Saarbrücken (IZFP), przedstawił projekt wykorzystania głowic EMAT do pomiaru sił w szynach ciągle spawanych [192]. Jednym z proponowanych sposobów miał być pomiar dwójłomności akustycznej mierzonej przez wysokość szyny. Autorzy projektu twierdzili, że stosując głowice EMAT możliwa jest generacja wiązek fal o małej rozbieżności i tym samym wyeliminowanie niekorzystnych odbić od powierzchni bocznych szyki. Po czterech latach prac ukazał się raport ERRI [193] opisujący rezultaty osiągnięte przez zespół badaczy niemieckich. W raporcie brak jest wyników pomiarów dwójłomności akustycznej mierzonej przez wysokość szyny. Według autora potwierdza to jego wnioski o nieprzydatności tej techniki w warunkach polowych. Co ciekawe, raport opisujący szeroko pomiary prowadzone różnego typu falami nie wspomina o zastosowaniu fali podłużnej biegnącej wzdłuż szyny, a więc wykazującej najwyższą czułość na siły podłużne. Według opinii autora wynika to ze stosowania przez zespół niemiecki praktycznie nieprzydatnych do generacji fali podłużnej przetworników typu EMAT.

W dalszej części rozdziału opisane są wyniki pomiarów własnych autora lub wyniki badań przeprowadzonych z jego udziałem. Przedstawione są również, z odpowiednim zaznaczeniem, wyniki uzyskane przez innych badaczy przy wykorzystaniu aparatów DEBRO wyposażonych w głowice opracowane i wykonane przez autora. Opisane badania to pomiary zmian sił podłużnych w szynach, wykonane przy zastosowaniu zestawów głowic na podpowierzchniowe fale podłużne rozchodzące się wzdłuż zewnętrznego boku głowki szyny. Pomiary powtarzane były w wybranych miejscach szyny przy założeniu, że obserwowane zmiany prędkości fali podłużnej spowodowane są jedynie zmianami siły podłużnej w szynie oraz zmianami temperatury szyny. Wpływ zmian temperatury kompensowany był odpowiednimi poprawkami temperaturowymi opisanymi w rozdziale 3.2.2.3. Pozostałe czynniki wpływające na prędkość takie jak skład chemiczny stali, jej tekstura były stałe (powtarzanie pomiarów w tych samych miejscach). Założono też, że stan naprężeń własnych w miejscu pomiaru, na zewnętrznej powierzchni boku głowki szyny odległej od powierzchni kontaktu szyny z kołami, nie ulega zmianie. Założenie to zostało potwierdzone pomiarami wykonanymi w roku 1991 przez dr Marka Adamskiego na szynach poddanych rolowaniu symulującemu obciążenia pochodzące od ruchu pociągów. Rolowaniu poddano szyny o twardościach równych 270 i 370 HB. Naprężenia własne mierzono metodą ultradźwiękową na obwodzie szyn przed i po rolowaniu polegającym na przetoczeniu 10^6 razy koła naciskającego na szynę z siłą 300 kN [194]. Wyniki pomiarów wykonanych na szynie o niższej twardości pokazano na rysunku 102. Widoczne jest, że różnice wartości naprężeń własnych spowodowane rolowaniem szyny, w miejscach poza obszarem kontaktu rolki z szyną są niemierzalne. Wynik uzyskany w miejscu rolowanym

informuje jedynie o znacznej zmianie prędkości propagacji fal w odkształconym plastycznie obszarze natomiast rzeczywistą wartość podłużnej składowej naprężenia w tym miejscu (na wykresie -300 MPa) nie jest znana.

Na rysunku zaznaczono ciemnym prostokątem opisane wcześniej miejsce sprzęgania zestawu głowicy do zewnętrznego boku głowki szyny stosowane w czasie badania zmian sił podłużnych.



Rys. 102. Podłużne naprężenia własne zmierzona na obwodzie szyny przed i po rolowaniu symulującym obciążenia od ruchu pociągów (pomiaru dr M. Adamskiego).

Siły podłużne pochodzenia termicznego są zależne od temperatury szyny. W celu ustalenia różnic temperatur na obwodzie szyny wywołanych nierównomiernym nasłonecznieniem i chłodzeniem przez powietrze szyny autor przeprowadził pomiary temperatur na wyciętej z toru próbce szyny (o stopniu korozji i kolorze takim jak szyny w torach). Próbkę ta była ustawiana w różnych kierunkach w stosunku do kierunku padania promieni słonecznych a na jej obwodzie wykonywane były pomiary temperatury szyny. Drugim celem pomiarów było określenie z jaką dokładnością określane mogą być naprężenia termiczne jeśli w szynie panują nierównomierne rozkłady temperatur. Wyniki pokazały, że w warunkach silnego nasłonecznienia różnice temperatur na powierzchni szyny dochodzić mogą do 2,5°C [195]. W

przybliżeniu oznacza to, że naprężenia termiczne w różnych punktach na profilu szyny, o skrajnych temperaturach, mogą różnić się o około 6 MPa. Określa to również możliwą do osiągnięcia dokładność pomiarów naprężeń termicznych w torach.

Jak wspomniano wcześniej, miejscem pomiarów sił podłużnych w szynie prowadzonych przez autora był w większości zewnętrzny bok główki szyny. Powierzchnia szyny w tym miejscu jest płaska, a szerokość główki jest na tyle duża, że nie występują w niej odbicia fal interferujące z impulsem pomiarowym. Wiadomo, że na boku główki, w miarę oddalania się od powierzchni toczonej, zmieniają się wartości podłużnej składowej naprężeń własnych. Powoduje to, że mierzony czas przejścia zależy od miejsca położenia zestawu głowic na boku główki. W celu sprawdzenia z jaką powtarzalnością należy przykładać głowicę do boku główki, aby rozrzut wyników wynikający z gradientu naprężeń własnych był akceptowalny, autor zmierzył czasy przejścia fal dla różnych położeń głowicy. Pomiary wykonano na próbkach pochodzących z dwóch różnych szyn typu UIC-60 produkcji Huty Katowice i stosowanych powszechnie w PKP. Wyniki pokazały, że dla położenia głowicy w środku wysokości boku główki, powtarzalność przykładania w granicach ± 1 mm, co z łatwością zapewniają odpowiednie szablony przymocowane do głowic, jest wystarczająca. Możliwe błędy w wyznaczaniu wartości naprężenia wynikające z różnic w pozycji głowicy mieszczących się w tych granicach, w zależności od stosowanego zestawu głowic, wyniosły do ± 5 ns. Odpowiada to zmianom wartości obliczanych naprężeń od ± 2 do ± 5 MPa.

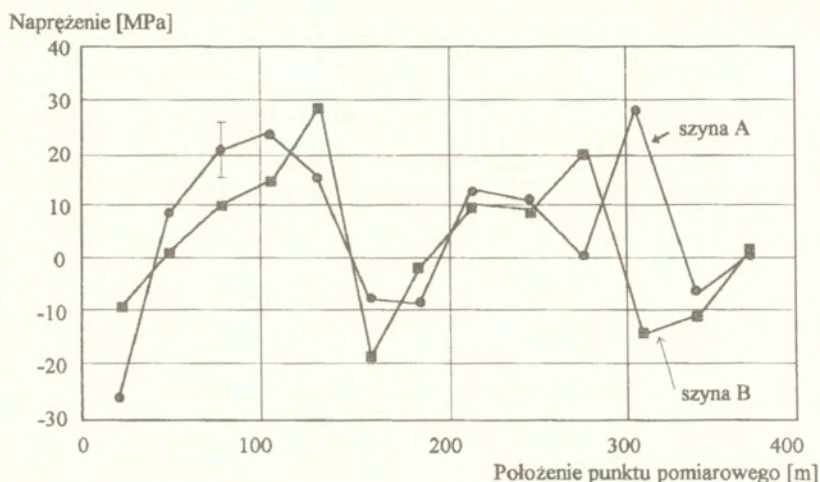
5.2.3. Badania sił podłużnych w szynach toru nowego

W latach 1989 - 1991 autor przeprowadził cykl pomiarów zmian naprężeń w szynach w czasie układania nowego toru [195]. Pomiary wykonano w lipcu na odcinku toru o długości 400 m zawierającego dwa łuki oraz dwa wiadukty (pomiędzy stacją Warszawa Powiśle a mostem kolejowym na Wiśle). Na odcinku tym wybrano 14 punktów pomiarowych na każdej szynie. Pierwszą serię pomiarów wykonano na szynach leżących swobodnie, przed ich przytwierdzeniem do podkładów. Założono, że siły podłużne panujące wówczas w szynach były równe zero. Pozwoliło to na ocenę bezwzględnych wartości sił w szynach na podstawie wyników 2-giej i 3-ciej serii. Drugą serię pomiarów przeprowadzono w tych samych punktach ale po przytwierdzeniu szyn do podkładów, połączeniu ich spoinami w tor bezстыkowy i po regulacji geometrii toru. Trzecią serię - po 13 miesiącach eksploatacji toru. W celu zminimalizowania wpływu zmiennych naprężeń termicznych na wyniki 2-giej serii pomiarowej, pomiary w dwóch pierwszych seriach wykonano w nocy, przy praktycznie stałej temperaturze szyn. Naprężenia termiczne jakiegokolwiek wahań temperatury mogły występować w szynach mieściły się w granicach około ± 5 MPa.

Rezultaty badań wykazały, że w szynach toru bezстыkowego, w temperaturze neutralnej, panują naprężenia dochodzące do 30 MPa. Naprężenia te są wynikiem działania sił powstających w czasie spawania szyn oraz prac prowadzonych na torze już po zakończeniu spawania. Wyniki pomiarów 2-giej serii pokazano na rysunku 103. Na osi pionowej odłożono naprężenia podłużne, na poziomej - położenie punktów pomiarowych na długości badanego odcinka. Widoczne są naprężenia o wartościach od -25 do $+30$ MPa. Oznacza to, że w szynach panują siły zmienne na długości co do wartości i znaku. Ich wahania odpowiadają wahanom temperatury neutralnej szyn wynoszącym od $-25/2,5 = -10^{\circ}\text{C}$ do $30/2,5 = 12^{\circ}\text{C}$ (zakładając, że zmianie naprężenia o 2,5 MPa odpowiada zmiana temperatury neutralnej o 1°C , zgodnie ze wzorem 46).

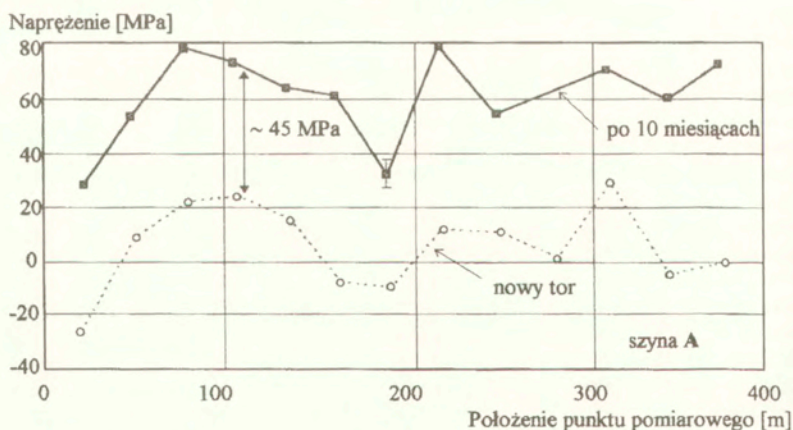
Naprężenia rozłożone są podobnie w obu szynach toru. Oznacza to prawdopodobnie, że zostały one wprowadzone podczas regulacji geometrii toru gdy obie szyny, powiązane podkładami w ruszt torowy, poddawane były jednakowym przemieszczeniom w płaszczyznach

poziomej i pionowej. Widoczne są dwa odcinki toru, o długościach około 100 m, w których szyna poddana jest rozciąganiu. Końcowe odcinki toru oraz fragment toru w środkowej części poddany jest ścisnaniu.



Rys. 103. Naprężenia podłużne w dwóch szynach nowego toru, w temperaturze neutralnej.

Po 13 miesiącach eksploatacji toru, w listopadzie następnego roku, przeprowadzono na szynie A 3-cią serię pomiarów, których wyniki pokazano na rysunku 104.



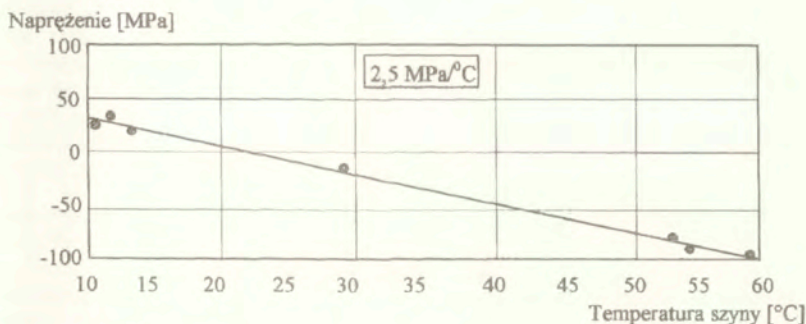
Rys. 104. Naprężenia podłużne w szynie A, zmierzone po 13 miesiącach eksploatacji toru. Linia przerywana - wartości zmierzone na nowym torze, przed oddaniem go do eksploatacji.

Dla porównania, linią przerywaną pokazano wyniki uzyskane w tej szynie po otwarciu toru, w czasie 2-giej serii pomiarowej. W listopadzie temperatura szyny była średnio o 15°C niższa niż w lipcu i dlatego wartości zmierzonych naprężeń są na całej długości toru wyższe niż wartości naprężeń zmierzonych na torze nowym. Spowodowane jest to zmianą temperatury szyny i powstaniem w niej naprężeń termicznych rozłożonych w przybliżeniu równomiernie na długości badanego odcinka. Średnio wartości naprężeń wzrosły o około 40 MPa . Widoczny jest podobny rozkład naprężeń na długości szyny, to znaczy maksimum naprężeń rozciągających w okolicach punktu $100, 220$ i 315 m oraz minimum naprężenia na początku szyny i w okolicach punktu 180 m . Oznacza to, że stan sił podłużnych wprowadzonych do szyn w czasie układania toru zmienił się jedynie nieznacznie w czasie rocznej eksploatacji toru.

5.2.4. Badania dobowych i długookresowych zmian sił w szynach

Dobowe zmiany temperatury wywołują cykliczne wahania wartości sił termicznych w szynach toru bezstyskowego. W torach, których szyny nie przemieszczają się względem gruntu, powstające w szynach siły to siły termiczne. Jeśli jednak w czasie narastania sił termicznych szyna ulega w pewnym obszarze przemieszczeniu w kierunku podłużnym, rozkład sił na długości szyny jest wynikiem sumowania się sił termicznych i sił będących rezultatem przemieszczeń.

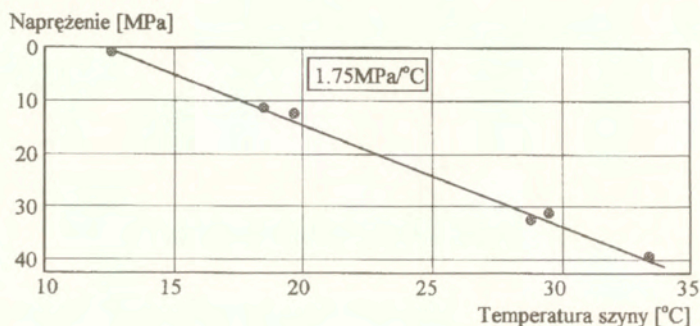
Celem pomiarów, których wyniki pokazane są na następujących czterech wykresach, było zbadanie dobowych i długookresowe zmiany sił w szynach toru ciągle spawanego. Rysunek 105 przedstawia wyniki pomiaru dobowych zmian sił termicznych przeprowadzonych przez autora w szynie nowego, prawidłowo utrzymanego, prostego toru poddanego równomiernej operacji słonecznej na długości kilkuset metrów. W ciągu doby temperatura szyny zmieniła się o 50°C , a panujące w szynie naprężenie o 123 MPa . Oznacza to, że zmiany naprężenia były bliższe przewidywaniom teoretycznym, czyli $2,5\text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$. Założono, że temperatura neutralna szyny wynosi 22°C .



Rys. 105. Zależności naprężenia termicznego od temperatury szyny. Szyna UIC-60.

Na rysunku 106 pokazano wyniki podobnych pomiarów przeprowadzonych na szynie w pobliżu połączeniu łukowego. Widoczna jest również liniowa zależność naprężenia od temperatury ale nachylenie linii jest inne. Zmianie temperatury szyny o 1°C odpowiada zmiana naprężenia termicznego jedynie o $1,75\text{ MPa}$. Niższe zmiany wartości naprężenia niż w przypadku toru, wyniki pomiarów którego pokazano na poprzednim rysunku, spowodowane

są przemieszczaniem się końca jednej z łączonych szyn w połączeniu łukowym. W czasie wzrostu temperatury i narastania w szynie naprężenia ściskającego koniec tej szyny ulegał

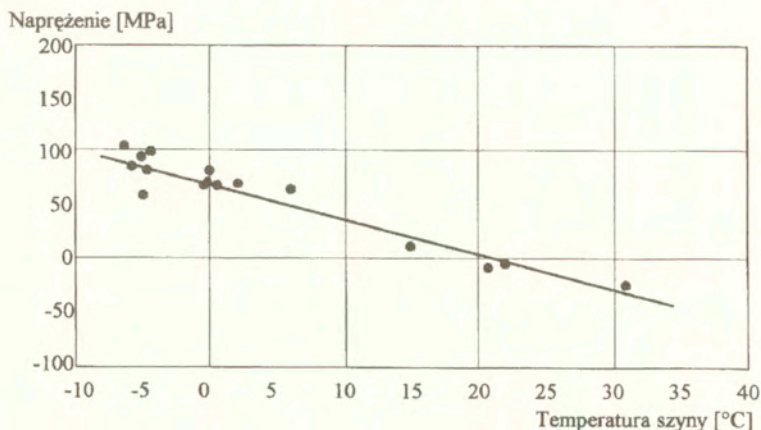


Rys. 106. Zależność naprężenie - temperatura szyny. Pomiar w pobliżu złącza śrubowego.

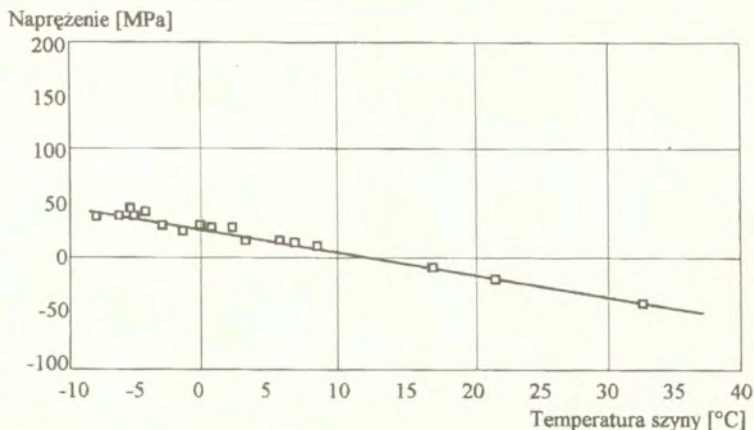
stopniowym, skokowym przesunięciem. W połączeniu widoczne były ślady tego ruchu, słyszalne były również same „skoki” szyny.

Na rysunkach 107 i 108 pokazano wyniki badania długookresowych zależności naprężenie - temperatura szyny zmierzonych na prostym odcinku jednego toru, w dwóch jego punktach, wykonane przez D. Utratę [196]. Pomiarzy te prowadzono w okresie sześciu miesięcy wykorzystując aparat DEBRO-30. Rysunek 106 przedstawia wyniki pomiarów wykonanych w punkcie zlokalizowanym w obszarze drogowego przejazdu, wykres na rysunku 107 - w punkcie oddalonym od przejazdu o kilkaset metrów.

W obszarze przejazdu kolejowego szyny toru były mocniej związane z podłożem niż w innych punktach toru co było spowodowane usytuowaniem ciężkich płyt przejazdu na ruszcie



Rys. 107. Zależności wartości naprężenia termicznego od temperatury szyny w obszarze przejazdu kolejowego (pomiarzy: D. Utrata, Oak Creek, Wisconsin 1994)



Rys. 108. Zależności naprężenia termicznego od temperatury szyny poza przejazdem.
(pomiary: D. Utrata, Oak Creek, Wisconsin 1994)

torowym. W miejscach takich spodziewać się można większych zmian sił podłużnych w szynach wywołanych przemieszczeniami odcinków toru przylegających do rozjazdu i zmianami temperatury szyn.

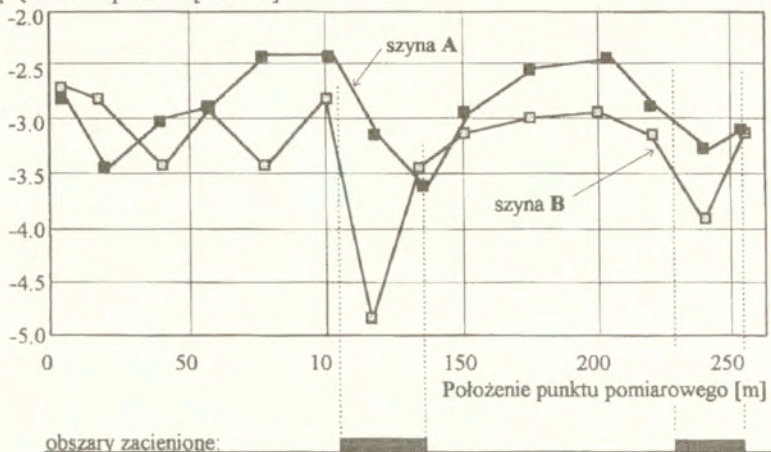
W punkcie pomiarowym w obszarze przejazdu, zmianie temperatury o 1°C odpowiada zmiana naprężenia o około $2,6 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$, jest więc nieco wyższa od przewidywanej teoretycznie. Większy niż w przypadku pomiarów dobowych rozrzut wyników świadczyć może o tym, że obserwowane zmiany naprężeń spowodowane były nie tylko naprężeniami termicznymi ale również przemieszczeniami toru w okolicy rozjazdu.

W punkcie oddalonym od przejazdu zmianie temperatury szyny o 1°C odpowiada średnio zmiana naprężenia o jedynie $1,9 \text{ MPa}$. Różnice w wartości naprężenia termicznego wywołanego zmianą temperatury toru o 1°C obrazują jak stopień przytwierdzenia szyny do podłoża może wpływać na wielkości naprężeń termicznych. Pokazują one również, że obliczanie wartości naprężeń termicznych jedynie na podstawie temperatury szyny, jak to proponowane jest przez autorów jednego z przyrządów dostępnych na rynku [183], dać może wynik obarczony znacznym błędem.

Jeszcze wyższe różnice w zmianach sił podłużnych w szynach obserwowane są na torach poddanych nierównomiernemu nagrzewaniu na długości szyn. Na torach gdzie gradienty naprężeń termicznych wywołują podłużne przemieszczenia szyn, dobowe zmiany temperatury mogą prowadzić do powstawania lokalnych spiężeń sił podłużnych w szynach. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na takim torze pokazuje rysunek 109. Są to rezultaty badań, których autor był uczestnikiem, przeprowadzonych w ciągu jednego dnia, w wielu punktach toru bezстыkowego w Kłaju pod Krakowem [197]. Wykres przedstawia rozkład zmian naprężenia termicznego spowodowanego przyrostem temperatury szyny o 1°C (oś pionowa) na długości toru (oś pozioma).

Pogoda w czasie pomiarów była zmienna (zachmurzenie, pełne słońce, wiatr), a badany tor był w godzinach rannych na dwóch krótkich odcinkach zasłonięty drzewami przed bezpośrednim nasłonecznieniem. Poniżej wykresu pokazane są położenia tych początkowo zacienionych partii toru, w których ściskające naprężenia termiczne narastały wolniej niż w częściach

Naprężenie/temperatura [MPa/°C]



Rys. 109. Wyniki pomiarów dobowych zmian naprężeń termicznych w wielu punktach toru, którego dwa fragmenty były początkowo zacienione.

nasłonecznionych. Można zauważyć, że zmiany współczynnika naprężenie/temperatura [MPa/°C] rozkładają się podobnie w obu szynach i są generalnie wyższe niż teoretycznie przewidywane. Najwyższe zmiany naprężenia zaobserwowano w zacienionych miejscach toru. Te spiętrzenia naprężeń wyjaśnione mogą być tym, że początkowo termiczne naprężenia ściskające tworzyły się w nasłonecznionych częściach toru. Powodowało to nieznaczne, mierzone w milimetrach, przemieszczenia szyn w kierunku chłodniejszych partii toru. Do powstania takich przemieszczeń przyczyniał się ruch pociągów i wywołane ich przejazdami drgania zaś o ich występowaniu świadczyły charakterystyczne odgłosy nieznacznych, skokowych przemieszczeń szyn względem podkładów i przytwierdzeń. Po wyrównaniu się temperatur, w partiach początkowo chłodniejszych, końcowy stan naprężeń jest wynikiem sumy naprężenia termicznego i naprężenia wynikającego z przemieszczeń.

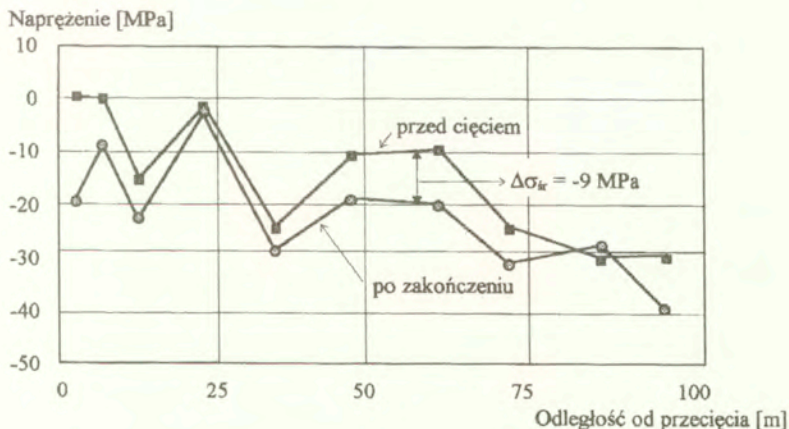
Wyniki pomiarów przeprowadzonych na różnych torach pokazały, że założenie iż zmianie temperatury szyny o 1°C odpowiada zmian naprężenia termicznego równa 2,5 MPa nie jest prawdziwe. Założenie takie przyjmowane jest jednak do skalowania aparatury opartej na wykorzystaniu szumów Barkhausena [188] czy badaniach opartych jedynie na pomiarach temperatury szyny [183]. Uzyskane wyniki pokazują również, że opis sił podłużnych w szynach jedynie zmianami temperatury neutralnej nie obrazuje w pełni wartości sił działających w szynach toru ciągle spawanego. Zgodnie z przewidywaniami, w miejscu połączenia szyn gdzie dochodzi do podłużnych przemieszczeń szyny, zmiany naprężenia termicznego są niższe od przewidywanych. Natomiast w miejscach gdzie tor poddany jest nierównomiernemu na jego długości nagrzewaniu i siły przytwierdzenia pozwalają na podłużne przemieszczenia szyn, zmiany sił wywołane zmianą temperatury o 1°C mogą być znacznie wyższe niż przewidywane. Technika ultradźwiękowa okazała się też sprawnym narzędziem do śledzenia długookresowych zmian sił w szynach. Takie pomiary prowadzone w wybranych miejscach toru, gdzie spodziewane jest narastanie sił ściskających pochodzących od przemieszczeń podłużnych szyn, na przykład w okolicach znaków stop lub na zjazdach, mogą informować o narastaniu naprężeń ściskających i ostrzegać przed niebezpieczeństwem wyboczenia toru.

5.2.5. Badania zmian sił podłużnych w czasie prac torowych

Innym zastosowaniem pomiarów ultradźwiękowych jest kontrola sił podłużnych w czasie napraw szyn czy operacji regulacji temperatury neutralnej (przeprowadzanej przez niektóre koleje wczesną wiosną, przed nadejściem wysokich temperatur). Wyniki pomiarów wykonanych razem z dr M. Adamskim w Szwecji, w czasie odprężania toru, przedstawia rysunek 110. Pomiary przeprowadzono w 10 punktach toru, którego szyny odpięto od podkładów, przecięto, poddano wibracjom, skróceni i ponownie zespanowano w tor ciągły. Teoretycznie, znając temperatury szyny przed przecięciem i po przecięciu oraz długość odcinka, o który szyna została skrócona, obliczyć można o ile zmieniła się wskutek przeprowadzonych operacji wartość siły podłużnej panującej w szynie. Jednak w czasie trwających wiele godzin prac temperatura szyny zmienia się bezustannie i dlatego wartości obliczeniowe nie odpowiadają rzeczywistym zmianom sił występującym w szynach. W czasie opisanych niżej prac temperatura szyny nieustannie rosła.

Autor przeprowadził trzy serie pomiarów ultradźwiękowych. Pierwszą serię pomiarów wykonano przed przecięciem szyn. Drugą - na luźnej szynie, po poddaniu jej wibracjom, zakładając, że w szynach nie działają w tym momencie żadne siły podłużne i wykorzystując ten pomiar do kalibracji. Trzecią serię pomiarów wykonano po zakończeniu prac. Pierwsze pomiary wykonano przy temperaturze szyny równej 8°C , ostatnie - przy temperaturze równej 30°C . Oznacza to, że poza krótkim okresem kiedy szyna pozostawała odpięta od podkładów i mogła się swobodnie przemieszczać (wydłużać) względem podłoża, panujące w niej naprężenia termiczne nieustannie się zmieniały.

Wykres pokazuje rozkład naprężenia w jednej szynie przed i po operacji, na odcinku o długości 100 m od miejsca przecięcia. Zarówno przed jak i po operacji widoczne są ściskające naprężenia panujące w szynie. Średni przyrost naprężenia w szynie, będący jednocześnie wynikiem skrócenia szyny jak i zmiany temperatury szyny, wynosi jedynie -9 MPa . Średnia temperatura szyny w czasie pierwszej serii pomiarowej wynosiła około 10°C , a w czasie trzeciej serii pomiarowej około 30°C .

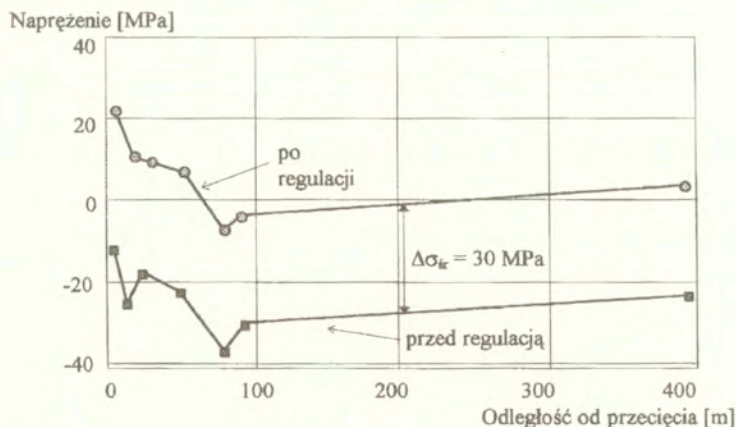


Rys. 110. Naprężenia podłużne zmierzone przed i po regulacji temperatury neutralnej szyny.

Najwyższe wartości naprężenia ściskającego uzyskane zostały na odcinku szyny między metrem 90 i 100, zarówno w pierwszej jak i trzeciej serii pomiarowej. Pokazany na rysunku rozkład sił na długości badanego odcinka szyny i występowanie w szynie po operacji naprężenia ściskającego wynika z nieustannego i nierównomiernego wzrostu temperatury szyny w czasie trwania operacji. Fakt, że najwyższe wartości sił ściskających zmierzone zostały w fragmentach szyny najbardziej odległych od przecięcia spowodowany był tym, że pomiary tej części szyny, zarówno w pierwszej jak i trzeciej serii pomiarowej, wykonano jako ostatnie. W czasie tych pomiarów temperatura szyny była najwyższa, a więc zarówno w szynie przed przecięciem jak i po zakończeniu prac, czyli w szynie przytwierdzonej do podkładów, występowały w niej najwyższe naprężenia ściskające.

Średnia temperatura szyny w czasie prac wzrosła o 20°C . Zakładając, że zmianie temperatury szyny o 1°C odpowiada zmiana wartości naprężenia termicznego o około $2,5 \text{ MPa}$ (tor jednakowo nasłoneczniony, prawidłowo utrzymany) oszacować można, że operacja wywołała w szynie istotną zmianę siły podłużnej. Jej wartość w przybliżeniu jest równa sumie zmierzonego przyrostu naprężenia (-9 MPa) i powstałego w szynie naprężenia termicznego ($2,5 \text{ MPa} \cdot 20^{\circ}\text{C} \cong 50 \text{ MPa}$) czyli łącznie $50 - 9 = 41 \text{ MPa}$. Odpowiada to, przyjmując stosowany w kolejnictwie opis zmian siły w szynie przez zmianę jej temperatury neutralnej, podniesieniu temperatury neutralnej szyny o około $41 [\text{MPa}] / 2,5 [\text{MPa}^{\circ}\text{C}] \cong 16 [^{\circ}\text{C}]$.

Rysunek 111 pokazuje wyniki podobnych pomiarów przeprowadzonych przy bardziej stabilnej temperaturze szyn (prace prowadzone w pochmurny dzień). Różnica pomiędzy skrajnymi temperaturami szyny w czasie pomiarów wynosiła jedynie 6°C . Operacja polegała na odpięciu szyny od podkładów, przecięciu szyny i jej skróceniu, poddaniu szyny naciągowi za pomocą napinaczy hydraulicznych, przypięciu do podkładów i zespawaniu. Celem stosowania napinaczy było wywołanie w szynach naprężeń rozciągających i w ten sposób podniesienie temperatury neutralnej szyn. Długość odcinka, na którym szyna została odpięta od podkładów, i na którym wprowadzono do niej naprężenia rozciągające stosując napinacze, wynosiła 400 m .



Rys. 111. Naprężenia podłużne zmierzone przed i po regulacji temperatury neutralnej szyny z wykorzystaniem napinaczy hydraulicznych.

Podobnie jak w czasie badań opisanych wcześniej, wykonane zostały trzy serie pomiarowe co pozwoliło na wyznaczenie bezwzględnych wartości naprężeń podłużnych w szynie przed i po regulacji. Przed operacją, panowały w szynie zmienne na długości naprężenia ściskające. Zmiana naprężeń podłużnych w szynie, będąca wynikiem regulacji toru, uśredniona na odcinku 400 m, wynosi około 30 MPa. Odpowiadający jej wzrost temperatury neutralnej to około $30 / 2,5 \approx 12^{\circ}\text{C}$.

W odróżnieniu od wyników uzyskanych na szynie o zmieniającej się temperaturze (rysunek 110), w opisywanej szynie przyrost naprężenia rozciągającego jest jednakowy na całej długości badanego odcinka szyny. Wynika to z faktu, że zmiana naprężenia spowodowana była głównie równomiernym wydłużeniem odcinka szyny odpiętego od podkładów, wywołanym działaniem napinaczy hydraulicznych. Biorąc jednak pod uwagę nieznaczny wzrost temperatury szyny w czasie trwania operacji, i przyjmując, że zmianie temperatury o 1°C odpowiada zmiana naprężenia o 2,5 MPa, neutralna temperatura szyny została podniesiona łącznie o $12 + 6 \approx 18^{\circ}\text{C}$.

Badania wykonane w czasie regulacji torów dowiodły, że ultradźwiękowy sposób pomiaru zmian sił podłużnych w szynach toru, dzięki lekkiej i przenośnej aparaturze jest wystarczająco szybki, aby pomiary wykonywane mogły być w czasie prowadzenia prac torowych. W czasie takich prac pomiary mogą być wykonywane jedynie w przerwach między przejazdami maszyn pracujących na torze.

5.3. WYZNACZANIE WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W KOŁACH KOLEJOWYCH

5.3.1. Wprowadzenie

Początkowo koła kolejowe wykonywane były z dwóch części: koła bosego i nałożonej na to koło obręczy. Umożliwiało to stosowanie na koło bosa stali o niższej jakości i tańszej, a na stykającą się z szyną obręcz stali o wyższej wytrzymałości i większej odporności na ścieranie. Obręcz przed nałożeniem na koło bosa była podgrzewana i w czasie stygnięcia zaciskała się na kole tworząc z nim mocne połączenie skurczowe. W wyniku takiego sposobu osadzania obręczy panowały w niej silne rozciągające naprężenia obwodowe. W przypadku powstania w obręczy w czasie eksploatacji poprzecznego pęknięcia naprężenia te działały jak siła otwierająca szczelinę i prowadziły do pęknięcia obręczy. Pęknięcie obręczy to jednocześnie utrata jej połączenia z kołem i możliwość wypadku spowodowanego zsunieniem się obręczy z koła. Stąd potrzeba ciągłej, i do niedawna znanej wszystkim, kontroli stanu obręczy polegającej na uderzaniu obręczy młotkiem i ocenie dźwięku jaki wydaje.

Wprowadzenie do eksploatacji kół monoblokowych (nazywanych też kołami litymi), a więc wykonanych z jednego kawałka stali, wydawało się być remedium na problemy z pękaniem obręczy. Niestety szybki wzrost prędkości pociągów i ładowności wagonów doprowadził do wzrostu mocy hamowania i pojawienia się problemów z naprężeniami własnymi w takich kołach. W czasie hamowania tarcie klocków hamujących o wieniec koła powoduje jego szybkie nagrzanie do wysokiej temperatury. Zwiększenie temperatury powoduje wzrost wymiarów wieńca wskutek rozszerzalności cieplnej i spadek granicy plastyczności materiału wieńca. Tarcza koła nagrzewa się znacznie mniej wskutek powolnego transportu ciepła z wieńca do tarczy i silnego chłodzenia tarczy opływającym ją powietrzem. Dlatego zmiany jej wymiarów wskutek rozszerzalności cieplnej są mniejsze niż wymiarów wieńca. W czasie hamowania gorący i plastyczny wieniec staje się więc "za duży" w stosunku do chłodnej tarczy. To niedopasowanie oraz siły spójności wiążące wieniec z tarczą powodują powstanie w wieńcu obwodowych naprężeń ściskających, które dzięki obniżonej granicy plastyczności prowadzą do odkształceń plastycznych wieńca („skrócenia” jego obwodu). Po zakończeniu hamowania odkształcony wieniec stygnie i wskutek kurczenia się staje się "za mały" w stosunku do tarczy. To ponowne niedopasowanie powoduje powstanie w nim rozciągających naprężeń obwodowych, które pozostają w kole jako naprężenia własne. Tak więc po wielu cyklach hamowania, lub tylko jednym długotrwałym hamowaniu z wysoką mocą, w kole monoblokowym panują, tak jak to było w obręczach, obwodowe naprężenia rozciągające i podobnie jak w obręczach mogą one być przyczyną pęknięcia. W odróżnieniu jednak od kół obręczowanych, gdzie pęknięcie obręczy nie uszkadzało całego koła ani jego połączenia z osią, pęknięcie koła monoblokowego jest groźniejsze. Koło takie często pęka aż do osi lub rozpada się na kilka części i jego awaria prowadzi zazwyczaj do wykolejenia wagonu. Koła monoblokowe, w których naprężenia osiągają granicę plastyczności czyli około 500 MPa, nazywane są w środowisku kolejarzy "kołami wybuchowymi". Niektóre katastrofy spowodowane były awariami kół, które w czasie jazdy rozpadły się na wiele drobnych fragmentów. Te dramatyczne awarie wywołane są gwałtownym uwolnieniem wielkiej ilości energii sprężystej jaką potrafi zgromadzić wieniec koła. Przykładowo w wieńcu typowego koła, w którym panują obwodowe naprężenia rozciągające równe 500 MPa, obwodowa siła rozciągająca działająca we wieńcu równa jest 3.250.000 N a zgromadzona w nim energia równa około 1600 Nm!

W pracy [198] przedstawione są wyniki obliczeń mocy hamowania dla typowego wagonu towarowego zjeżdżającego torem o nachyleniu 2%. Przy obciążeniu wagonu ładunkiem

119.000 kg moc hamowania na jedno koło zapewniająca stałą prędkość wynosi 26,1kW. Czas hamowania z taką mocą wynosić może w amerykańskich warunkach 30 - 40 minut. Oznacza to, że energia dostarczana do wieńca jednego koła w czasie hamowania może wynieść 17,4 kWh.

Straty wynikające z awarii kół spowodowały potrzebę badania kół i eliminacji z eksploatacji kół z groźnymi, wysokimi naprężeniami odwodowymi. Pierwszą stosowaną w kolejnictwie metodą odróżniania kół przegrzanych, w których panować mogą niebezpieczne obwodowe naprężenia rozciągające, była obserwacja odbarwienia tarczy koła. W czasie nagrzewania wieńca do wysokiej temperatury zanieczyszczania czy powłoki farb na wieńcu i przylegającej do niego części tarczy koła odbarwiała się. Przyjęto, że jeśli szerokość odbarwionego pasa jest większa niż 10 cm (4 cale w USA) to koło posiada (prawdopodobnie) niebezpieczne naprężenia rozciągające i należy usunąć je z eksploatacji. Ta prosta reguła przetrwała w USA do początku lat 90-tych. W celu podniesienia wiarygodności metody stosowano specjalne termoczułe farby, którymi malowano pasy na tarczach i wieńcach. Badania niszczące wykonane w latach 80-tych i 90-tych na wielu złomowanych, "odbarwionych" kołach pokazały jednak praktyczny brak związku między szerokością odbarwionego pasa a naprężeniami obwodowymi panującymi we wieńcu.

Prostym sposobem oceny, czy we wieńcu koła panują obwodowe naprężenia ściskające czy rozciągające jest promieniowe przecinanie koła. Rozwieranie się szczeliny oznacza, że w kole panowały przed cięciem naprężenia rozciągające a zaciskanie się informuje o istnieniu naprężeń ściskających. Ten niszczący sposób badania kół (podobny do opisanego w rozdziale 5.2.1 nacinania szyny kolejowej wzdłuż jej sztyki), stosowany przez producentów kół, dostarcza jedynie jakościowej informacji o stanie naprężeń. Tym bardziej, że rozwarcie szczeliny mierzono zazwyczaj jedynie w jednym miejscu na obwodzie wieńca. Ta sama technika badania stosowana jest również dla kół eksploatowanych, w których na naprężenia własne będące wynikiem procesu wytwarzania koła nakłada się złożony stan naprężeń powstałych w czasie kontaktu koła z szyną. Typowe przebiegi zmian rozwarcia szczeliny przy promieniowym cięciu nowych i uszkodzonych cieplnie kół różnych typów przedstawiona są w pracy [199]. W pracy tej opisana jest też metoda odtwarzania stanu naprężeń w kole polegająca na pomiarach odkształceń w czasie wielokrotnego cięcia segmentu koła na coraz drobniejsze fragmenty.

W latach sześćdziesiątych powstały pierwsze prace teoretyczne i eksperymentalne opisujące badania naprężeń w kołach monoblokowych. Liczna grupa prac poświęcona jest obliczeniom naprężeń w kołach. Numeryczne modelowania rozkładów naprężeń we wieńcach kół o różnych kształtach tarczy przedstawione jest w [200]. Numeryczne symulowanie hamowania z różnymi mocami, łącznie z hamowaniem spowodowanym zaciągniętym hamulcem ręcznym wagonu i powstające w ich wyniku naprężenia opisane są w [201]. W pracy [202] przedstawione są wyniki obliczeń metodą elementów skończonych naprężeń powstających w kołach w procesie ich obróbki termicznej a w Japonii metoda elementów skończonych i numeryczna symulacja rozwoju naprężeń we wieńcach wykorzystywana była przy projektowaniu nowych, odporniejszych na hamowania kół monoblokowych [203].

Szereg prac opisuje teoretyczno-numeryczną analizę naprężeń własnych w kołach kolejowych. Sformułowanie problemu analizy naprężeń pochodzących od eksploatacji i będących wynikiem procesu produkcyjnego w monoblokowym kole przedstawione zostało w [204]. W pracy [205] przedstawiona jest wstępna analiza naprężeń własnych w ciałach osiowosymetrycznych poddanych cyklicznym obciążeniom.

W roku 1996 opracowana została eksperymentalno-numeryczna metoda pozwalająca na odtworzenie pełnej informacji o stanie naprężeń w kole kolejowym [206]. W pracy tej zaproponowano trzy sposoby wykonania badań niszczących, w tym wykonanie dwóch cięć koła: jednego w kierunku promieniowym, a drugiego ukośnie. Do pomiarów odkształceń i

przemieszczeń wynikających z uwalniania naprężeń autor proponuje stosowanie metod interferometrii Moiré i Michelsona, czujników przemieszczeń i tensometrii oporowej. W pracy [207] opisany jest sposób rekonstrukcji naprężeń w kole w oparciu o wyniki niszczącego eksperymentu polegającego na wykonaniu dwóch cięć w kole (promieniowego i ukośnego). Do odtworzenia stanu naprężeń autorzy wykorzystują fizycznie uzasadnioną aproksymację wyników oraz informację wynikającą z teorii.

Głównym celem obszernej pracy [208] była ocena naprężeń powstających w wyniku procesu produkcyjnego w monoblokowych kołach wagonu pasażerskiego. Autor modeluje numerycznie procesy obróbki cieplnej wieńca koła odpowiedzialne za końcowy stan naprężeń. Znajomość naprężeń własnych w nowym kole jest według autora kluczowym elementem przy analizie naprężeń w kołach eksploatowanych. Autor zauważa też, że wiele prac opisuje modelowanie rozwoju naprężeń własnych w czasie eksploatacji, pochodzących od kontaktu koła z szyną, niesłusznie zakładając zerowy stan naprężeń własnych w nowych kołach. Wyniki uzyskane w pracy pokazują, że w nowym kole, na głębokości do 3,5 cm licząc od powierzchni tocznej, panują obwodowe naprężenia ściskające. Głębiej, według obliczeń autora, panują obwodowe naprężenia rozciągające. Wyników obliczeń autor nie konfrontuje z wynikami badań eksperymentalnych.

W pracy opisane są również wyniki numerycznego modelowania rozwoju naprężeń w czasie hamowania. Po ośmiu hamowaniach zmiana naprężeń własnych sięga na głębokość około 10 mm licząc od powierzchni tocznej.

W opublikowanej w 1998 roku rozprawie doktorskiej [209] przedstawiony jest sposób częściowej rekonstrukcji początkowego stanu naprężeń w eksploatowanym kole kolejowym. Rekonstrukcja ta jest możliwa, choć dane eksperymentalne nie są do niej wystarczające, dzięki uwzględnieniu w rozwiązaniu zadania innych, poza pomiarami, informacji. Informacje te wynikają z fizyki problemu oraz z teorii. W opracowaniu wyników autor wykorzystał metodę fizycznie uzasadnionej aproksymacji wyników badań. Wykorzystane w pracy wyniki eksperymentalne pochodzą z pracy [210] opisującej promieniowe cięcie koła i pomiary odkształceń powstających w wyniku uwalniania naprężeń metodami tensometrii oporowej oraz interferometrii Moiré. Zastosowana przez autora metoda pozwoliła na odtworzenie stanu naprężeń nie tylko na bocznych powierzchniach wieńca koła ale również w jego wnętrzu.

W roku 1999 ukazał się raport [6] opisujący procedury stosowane w pomiarach odkształceń w czasie promieniowego przecinania koła. Autor stwierdza, że pomiar jedynie rozwarcia szczeliny specjalnymi czujnikami daje jakościową informację o stanie naprężeń we wieńcu koła a zastosowanie tensometrów oporowych, pozwalających na pomiar odkształceń na bocznych powierzchniach wieńca, nieznacznie tylko poprawia uzyskiwane wyniki. Dopiero wykorzystanie interferometrii Moiré pozwalającej na badanie przemieszczeń na całej powierzchni wieńca przy szczelinie, pozwala na odtworzenie przemieszczeń promieniowych i obwodowych oraz pozwala na wykrywanie stref odkształceń plastycznych. We wnioskach autor stwierdza, że współczesna technika interferometryczna może być stosowana w badaniach warsztatowych.

W roku 1973 ukazała się pierwsza praca poświęcona ultradźwiękowym badaniom naprężeń we wieńcach kół monoblokowych [211]. Autorzy zaproponowali pomiar dwójtomności akustycznej materiału wieńca do oceny uśrednionej na jego szerokości wartości naprężenia obwodowego. Niedoskonałość ówczesnej aparatury nie pozwoliła jednak na upowszechnienie się tej techniki. W tym samym czasie prowadzono badania nad wykorzystaniem techniki szumów Barkhausena do pomiarów naprężeń w kołach [41, 212]. Przeprowadzane były też eksperymenty nad wykorzystaniem w pomiarach naprężeń różnych zjawisk magnetycznych [213] i zjawiska magnetoakustycznego [214].

W latach 80-tych badacze amerykańscy i japońscy podjęli wspólne prace nad zastosowaniem techniki ultradźwiękowej wykorzystując rozwijane w USA przetworniki typu EMAT i stosowane w Japonii przetworniki piezoelektryczne [215]. Naprężenia obwodowe oceniane były w oparciu o pomiar dwójmności akustycznej wieńca. Co ciekawe, w celu uzyskania powtarzalnych wyników przetwornikami piezoelektrycznymi autorzy przyklejali je na stałe do powierzchni wieńca. Przedstawione w tej pracy badania ograniczyły się jednak do pomiarów jedynie w jednym punkcie na obwodzie wieńca.

Z przedstawionego przeglądu prac poświęconych badaniom naprężeń własnych w kołach monoblokowych wynika, że, podobnie jak w przypadku szyn, toczą się one dwiema drogami. Jedną z nich to próby odtworzenia stanu naprężeń w kołach w oparciu o skomplikowane pomiary wykonywane w czasie cięcia kół, a więc badania niszczące. Opisane w pracach [105, 207, 209, 210] procedury rekonstrukcji stanu naprężeń we wieńcach kół umożliwiają odtworzenie trzech składowych naprężeń zarówno w kołach nowych jak i eksploatowanych jednak eksperymentalna część, na jakiej bazują, jest czasochłonna i kosztowna. Zapewne dlatego ilość zgromadzonych danych doświadczalnych jest ograniczona. Przykładowo, w pracy [209] analizowane są wyniki pomiarów uzyskanych na jednym tylko kole, a w pracy [6] - na dwóch kołach. Podobnie, choć w badaniach zastosowano metodę nieniszczącą, w pracy [215] przedmiotem badania było jedno tylko koło.

Drugą drogą to próby znalezienia metody nieniszczącej, dającej informację ograniczoną jedynie do wartości średniego naprężenia obwodowego we wieńcu, która byłaby zaakceptowana w środowisku kolejowym. Techniki magnetyczne, wykorzystujące szumy Barkhausena czy zjawisko magnetoakustycznego, nie spełniły pokładanych w nich oczekiwań. Pierwsza z powodów wymienionych przy badaniach naprężeń w szynach. Dodatkowym utrudnieniem w magnetycznych badaniach kół są powszechnie występujące lokalne odkształcenia plastyczne powierzchni wieńców powstające w czasie eksploatacji (uderzenie, zgniecenie, starcie). Druga metoda - poza problemami ze zmiennymi własnościami magnetycznymi materiału różnych kół nie znalazła zastosowania ze względu na wielkość, wagę i problemy z zasilaniem elektromagnesu stosowanego do wzbudzania pola magnetycznego.

Zapewne ze względu na koszty, w niektórych pracach badawczych, których celem była analiza rozwoju naprężeń własnych wywołanych hamowaniami, rezygnowano z rzeczywistego hamowania kół na torze na rzecz symulacji obciążeń cieplnych nagrzewaniem indukcyjnym [122] czy hamowaniem w hamowniach [93]. Argumentem przemawiającym za symulacją rzeczywistej pracy koła jego nagrzewaniem była możliwość precyzyjnej kontroli mocy i czasu nagrzewania. Wadą zaś to, że koła nagrzewane czy hamowane w hamowni nie oddają ciepła do szyny i rozwój naprężeń własnych przebiega w nich inaczej niż w kołach jeżdżących po torach. Zwrócono na to uwagę w pracy [208]. Autor tej pracy, wydanej w 1998 roku, podaje jeszcze jedną przyczynę braku prac opisujących badania rozwoju naprężeń w kołach na torach: brak aparatury umożliwiającej badania w warunkach polowych, metodą nieniszczącą. Warto odnotować, że torowe badania naprężeń w kołach prowadzone były przez pracowników IPPT, na zlecenie Europejskiej Unii Kolejowej, już w 1987 roku a ich wyniki publikowane w raporcie tej organizacji w roku 1989 [9].

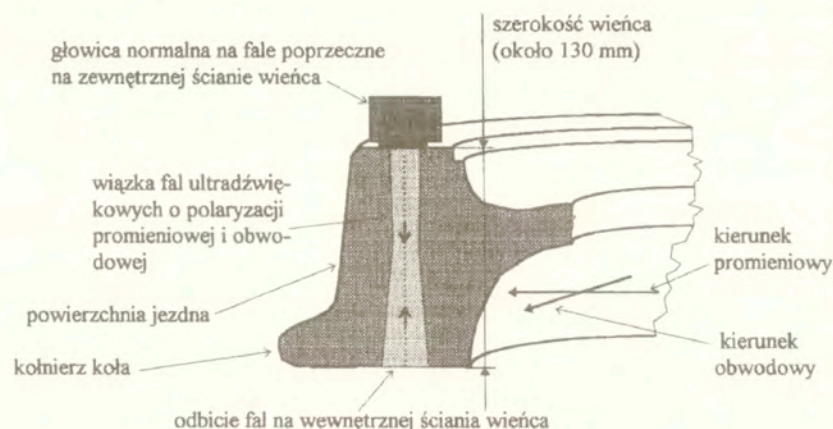
W Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów IPPT badania nad wyznaczaniem obwodowej składowej naprężeń we wieńcach kół kolejowych rozpoczęto w 1986 roku. Zainteresowanie tą nieniszczącą techniką Europejskiej Unii Kolejowej wynikało z narastającej liczby katastrof spowodowanych pękaniem kół. Po wielu latach prób i badań technika ultradźwiękowa, jako jedyna z wielu metod nieniszczących, znalazła akceptację europejskiego środowiska kolejowego. Ta akceptacja była rezultatem zgodności wyników pomiarów

ultradźwiękowych z wynikami uzyskanymi innymi technikami, uznanymi w środowisku kolejowym za techniki wiarygodne. Wyniki badań ultradźwiękowych potwierdziły swą przydatność nie tylko w Europie. Również w Australii, gdzie wykorzystywany jest aparat DEBRO-30, prowadzone badania wykazały dobrą zgodność rezultatów pomiarów ultradźwiękowych z niszczącymi pomiarami tensometrycznymi [216] polegającymi na pomiarach obwodowych odkształceń wieńca w czasie promieniowego przecinania koła.

W dalszej części rozdziału opisane są wyniki pomiarów wykonanych przez autora na kołach produkowanych w Europie (koła kute) i kołach amerykańskich, wykonanych ze staliwa techniką odlewania (koła lane), poddawanych hamowaniom zarówno w hamowniach różnego typu jak i hamowaniom w czasie jazdy po torze kolejowym. Wyniki badań kół europejskich przedstawione są w Raporcie Europejskiej Unii Kolejowej [9] a wyniki badań kół lanych opisują dwa Raporty National Institute of Standards and Technology [93] i [122]. W rozdziale opisano też przykładowe wyniki uzyskane przez innych badaczy stosujących w pomiarach aparaty DEBRO i głowice opracowane przez autora.

5.3.2. Badania stalowych kół kutych

Opisane niżej pomiary naprężeń obwodowych we wieńcach kół monoblokowych prowadzone były aparatami DEBRO-20 i DEBRO-30 oraz różnego typu głowicami. Jedne z nich, głowice normalne na fale poprzeczne, służyły do pomiaru dwójtłumności akustycznej i wyznaczania średniej wartości naprężenia obwodowego na szerokości wieńca koła. Schemat pomiaru pokazany jest na rysunku 112.



Rys. 112. Schemat pomiaru obwodowego naprężenia średniego na szerokości wieńca głowicą normalną na fale poprzeczne (pomiar dwójtłumności akustycznej).

Na rysunku zaznaczono jaśniejszym kolorem kształt wiązki fal poprzecznych rozchodzących się w materiale wieńca. Informacja uzyskiwana z czasów przejścia tych fal jest informacją uśrednioną z objętości walca o wysokości równej szerokości wieńca i średnicy równej średnicy przetwornika głowicy (zazwyczaj 12 mm).

Wartość dwójtłumności akustycznej B w kole, wywołana teksturą materiału wieńca i panującymi w nim naprężeniami, jest wyznaczana jako:

$$(47) \quad B = B^0 + B^\sigma = \frac{2(V_\Theta - V_R)}{V_\Theta + V_R} = \frac{2(t_R - t_\Theta)}{t_\Theta + t_R}$$

gdzie: B^0 - dwójłomność wywołana teksturą materiału,
 B^σ - dwójłomność wywołana naprężeniem,
 V_Θ - prędkość propagacji fali spolaryzowanej w kierunku obwodowym,
 V_R - prędkość propagacji fali spolaryzowanej w kierunku promieniowym,
 t_Θ - czas przejścia fali spolaryzowanej w kierunku obwodowym,
 t_R - czas przejścia fali spolaryzowanej w kierunku promieniowym.

Wartość B^0 wyznacza się doświadczalnie na wzorcach pozbawionych naprężeń, natomiast B^σ równe jest:

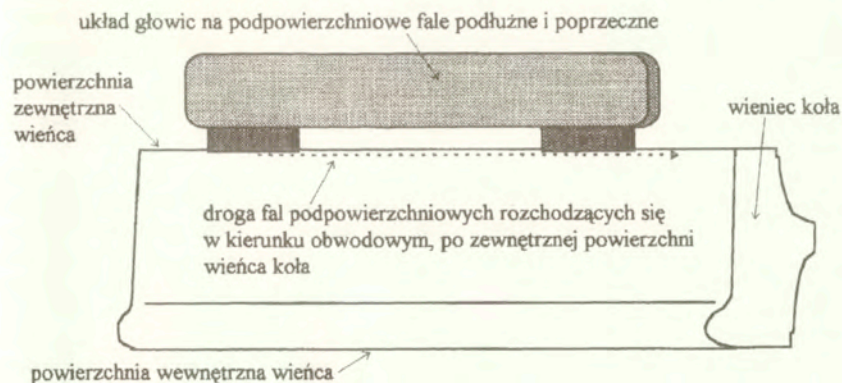
$$(48) \quad B^\sigma = \beta_B (\sigma_\Theta - \sigma_R) \approx \beta_B \sigma_\Theta$$

gdzie: σ_Θ - obwodowa składowa naprężenia,
 σ_R - promieniowa składowa naprężenia,
 β_B - współczynnik elastoakustyczny równy $\beta_{122} + \beta_{132}$.

Założyć można, że wartość składowej σ_R jest mała w stosunku do składowej σ_Θ i można ją pominąć. Znając wartość dwójłomności teksturalnej B^0 i całkowitej B oraz współczynnik elastoakustyczny materiału β_B , z którego wykonane jest koło, obliczyć można wartość składowej obwodowej naprężenia σ_Θ .

Wykorzystanie w pomiarach głowicy generującej wąską, w stosunku do grubości wieńca, wiązkę umożliwiło w kołach o grubych wieńcach (koła nowe, koła do wielokrotnego reprofiliowania powierzchni tocznej) badanie promieniowych rozkładów naprężeń. Jednocześnie, w badaniach kół eksploatowanych, umożliwiło prowadzenie pomiarów z ominięciem plastycznie odkształconego obszaru wieńca przy powierzchni tocznej.

Drugi zastaw głowic, na podłużne i poprzeczne fale podpowierzchniowe, wykorzystywany był do pomiaru powierzchniowych naprężeń obwodowych na dwóch płaskich powierzchniach bocznych wieńca (wewnętrznej i zewnętrznej). Schemat pomiaru naprężeń obwodowych na powierzchni wieńca pokazano na rysunku 113. Fale podpowierzchniowe rozchodzą się wzdłuż



Rys. 113. Schemat pomiaru powierzchniowego naprężenia na zewnętrznej stronie wieńca koła, zestawem głowic na podłużne i poprzeczne fale podpowierzchniowe.

cięciwy. Dla średnicy koła bliskiej 1 m i długości zestawu głowic wynoszącej 200 mm można przyjąć, że fale te rozchodzą się w kierunku obwodowym czyli równoległe do kierunku mierzonego naprężenia. Wartości naprężeń obliczane były z wykorzystaniem poprawki strukturalnej opisanej w rozdziale 1.3.4.

Wartość naprężenia obwodowego obliczonego na podstawie pomiaru czasów przejścia fal podpowierzchniowych to wartość uśredniona w obszarze wyznaczonych przez długość zestawu głowic (około 200 mm wzdłuż cięciwy), szerokość przetworników (7 mm) i grubości około 1 mm. Podobnie jak głowicą normalną na fale poprzeczne, pomiary zestawem głowic na fale podpowierzchniowe mogą być wykonywane dla różnych położań promieniowych na szerokości wieńca (zakładając, że powierzchnia ta jest dostatecznie szeroka).

W latach 1987 - 1988 autor uczestniczył w pomiarach naprężeń w kołach monoblokowych zorganizowanych przez Europejską Unię Kolejową. Pierwszy etap tych badań obejmował pomiary naprężeń w kołach hamowanych w hamowni w Vitry pod Paryżem. Koło poddawane hamowaniu zakładane było na napędzaną oś hamowni i hamowane dwoma klockami hamującymi tak jak w wagonie kolejowym. Hamowane w ten sposób koło osiąga w czasie hamowania temperaturę wyższą niż koło w pociągu, które jest w stałym kontakcie z chłodną szyną odbierającą część ciepła z powierzchni toczonej wieńca. Zaletą badań w hamowni jest możliwość prowadzenia długotrwałych hamowań ze stałą, precyzyjnie kreśloną mocą, trudnych do wykonania na torze.

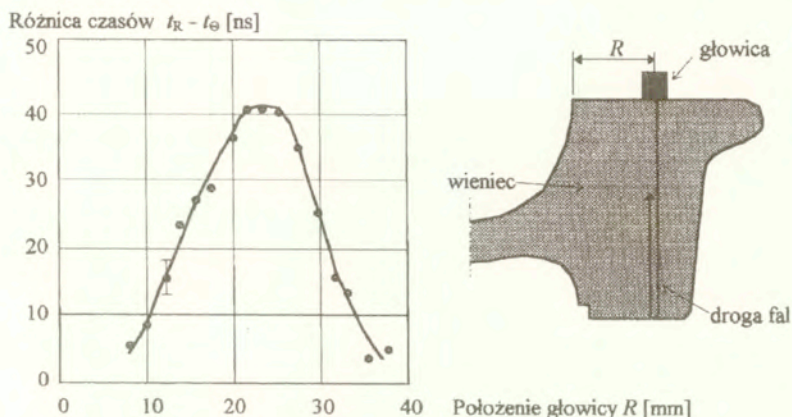
Przedmiotem badań były nowe koła kute, wyprodukowane we Francji. Produkcja takiego koła polega na nadaniu walcowej bryle gorącej stali przybliżonego kształtu koła metodą kucia a następnie na obwodowym walcowaniu w celu nadania materiałowi ostatecznego kształtu. Po walcowaniu cała powierzchnia koła obrabiana jest skrawaniem, a ostatnią operacją jest obróbka termiczna koła. Sposób produkcji powoduje więc, że materiał wieńca może być anizotropowy a kierunek anizotropii teksturalnej pokrywa się z kierunkiem walcowania (kierunkiem obwodowym). Stopień anizotropii zależy od sposobu walcowania, temperatury stali i od materiału, z którego wykonane zostało koło. Nowe koło kute posiada pewien stan naprężeń własnych będących wynikiem niejednorodnych odkształceń plastycznych, rozkładów temperatury w czasie produkcji, sposobu chłodzenia koła po walcowaniu oraz obróbki cieplnej, szczegółowo opisanej w pracy [208].

Przed pomiarami aparatura została wyskalowana na wzorcu wyciętym z koła i poddanemu odprężającej obróbce cieplnej. Zmierzone zostały czasy przejścia podpowierzchniowych fal podłużnej t_L^0 i poprzecznej t_T^0 na obu powierzchniach wieńca oraz wartości dwójłomności akustycznej B^0 dla różnych położań promieniowych głowicy na powierzchni wieńca. Na próbce wyciętej z koła wykonane zostały pomiary współczynnika elastoakustycznego β_B . Uzyskano wartość $\beta_B = 0,79 \cdot 10^{-3}$ [MPa⁻¹]. Współczynnik elastoakustyczny dla podłużnej fali podpowierzchniowej $\beta_{III} = -1,25 \cdot 10^{-5}$ [MPa⁻¹].

Rysunek 114 pokazuje promieniowy rozkład różnic czasów przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych promieniowo t_R i w kierunku obwodowym t_θ , zmierzonych na odprężonym wzorcu. W czasie pomiarów głowica sprężnięta była do szerokiej, wewnętrznej powierzchni wieńca. Największa różnica czasów przejścia fal, wynosząca 42 ns, zmierzona została dla położenia głowicy wyznaczonego przez $R=23$ mm. Różnicy tej odpowiada wartość dwójłomności akustycznej równej $5,2 \cdot 10^{-4}$. Taka sama dwójłomność akustyczna w materiale izotropowym wywołana może być panującym w nim naprężeniem obwodowym równym 66 MPa. Przykład ten pokazuje jak istotne w przypadku badania kół jest prawidłowe skalowanie aparatury i do jakich błędów w ocenie wartości naprężenia prowadzić może nieuwzględnienie wpływu tekstury na wyniki pomiarów. Pokazuje też, że w pomiarach promieniowych

rozkładów naprężeń konieczne jest uwzględnianie promieniowego rozkładu dwójtomności teksturalnej B^0 .

W roku 1987 metoda ultradźwiękowa była nieznaną i nie budziła zaufania. Dlatego głównym celem badań prowadzonych w Vitry była ocena wiarygodności wyników pomiarów



Rys. 114. Różnica czasów przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych w kierunku promieniowym t_R i kierunku obwodowym t_θ w funkcji odległości od wewnętrznej krawędzi wieńca koła.

obwodowych naprężeń własnych metodą ultradźwiękową przez porównanie ich z wynikami wykonanych na tych samych kołach i w tych samych miejscach, przez niezależną ekipę francuską, pomiarów metodą dyfrakcji promieni X i metodą niszczącą. Metoda niszcząca polegała na tensometrycznych pomiarach odkształceń podczas promieniowego cięcia koła i odtworzeniu na ich podstawie rozkładu naprężeń obwodowych w przekroju wieńca. Drugim celem badań było określenie zależności między mocą z jaką koło było hamowane i czasem hamowania a naprężeniami własnymi powstającymi we wieniec koła.

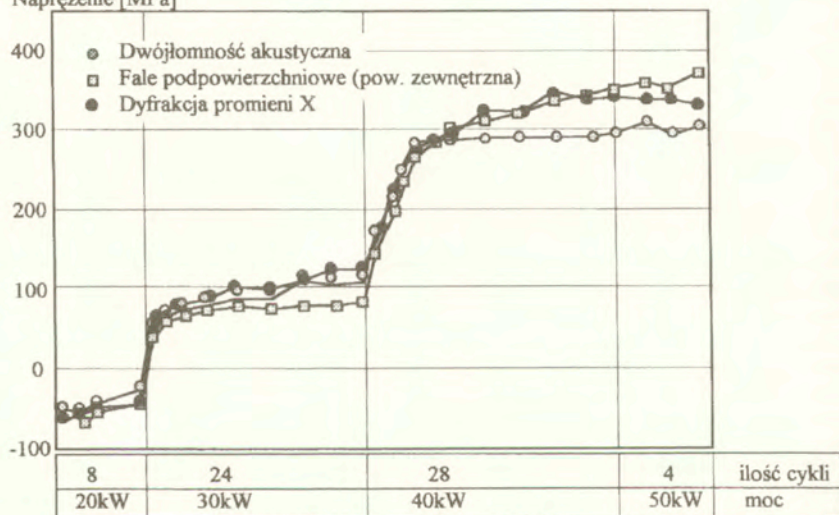
Badania polegały na cyklicznym hamowaniu poszczególnych kół z określonymi mocami i badaniach naprężeń w przerwach między hamowaniami, po ostygnięciu koła. W czasie hamowań klocki hamulcowe ustawione były w środku powierzchni jezdnej koła. Pomiar prowadzono w trzech miejscach na obwodzie koła odległych od siebie o 120° . Dzięki wysokiej jednorodności materiału, z których wykonane były badane koła, wyniki pomiarów w tych trzech miejscach różniły się jedynie nieznacznie o wartości porównywalne z błędem pomiarowym.

Rysunek 115 pokazuje wyniki uzyskane w czasie hamowania jednego z badanych kół. Są to wyniki ultradźwiękowych badań naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca (pomiar dwójtomności zgodnie z rysunkiem 112) oraz naprężeń obwodowych na zewnętrznej powierzchni ocenianych techniką ultradźwiękową, falami podpowierzchniowymi (schemat na rysunku 113) i metodą dyfrakcji promieni X. Pomiar prowadzono były głowicami sprzęganymi do zewnętrznej powierzchni wieńca w połowie jej szerokości (współrzędna $R=20$ mm, rysunek 114).

Badane koło poddane było w sumie 64 cyklom hamownia i studzenia. Każde z hamowań trwało 1 godzinę a moc hamowania rosła od początkowej równej 20 kW do końcowej równej 50 kW. Ilości cykli i moce hamowania pokazane są poniżej wykresu.

W kole nowym, przed hamowaniami panują korzystne obwodowe naprężenia ściskające. Hamowania z mocą 20 kW powodują jedynie nieznaczne zmiany naprężeń. Naprężenia zmieniają znak dopiero po pierwszym hamowaniu z mocą 30 kW. Przyrosty naprężeń rozciągających następują skokowo, po każdorazowym zwiększeniu mocy hamowania. Wynika to stąd, że przy hamowaniach z określoną mocą maksymalna temperatura jaką osiąga wieńiec w czasie hamowania jest stała i poziom naprężeń własnych wzrasta po kolejnych cyklach hamowania nieznacznie lub nie zmienia się. Pierwsze hamowanie z mocą wyższą niż wcześniejsze powoduje, że maksymalna temperatura wieńca osiąga wyższą wartość niż poprzednio, dochodzi do ponownego plastycznego odkształcenia materiału wieńca co prowadzi do przyrostu rozciągających naprężeń własnych. Niestety, maksymalne temperatury koła w czasie badań nie były rejestrowane. Zmierzona została jedynie maksymalna temperatura

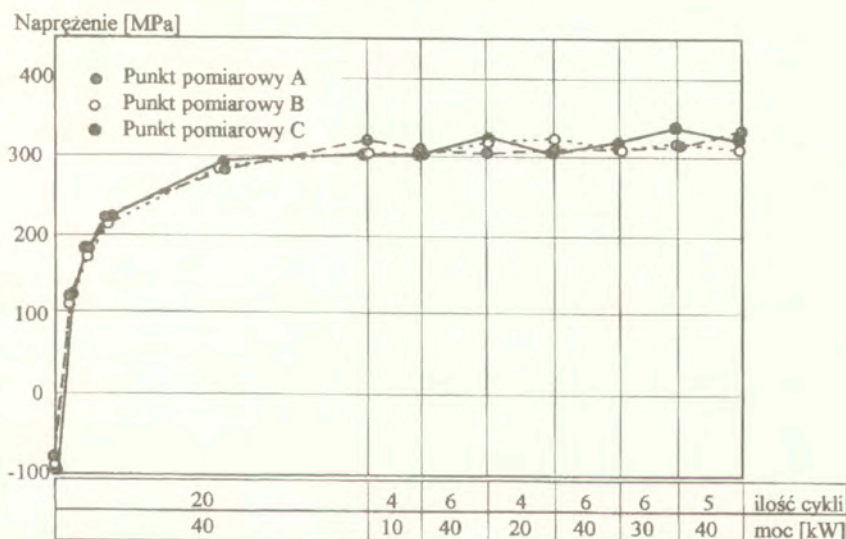
Naprężenie [MPa]



Rys. 115. Naprężenia zmierzone w czasie hamowania koła kutego w hamowni. Porównanie wyników pomiarów ultradźwiękowych i pomiarów metodą dyfrakcji promieni X.

powierzchni jezdnej wieńca po 45 minutach hamowania z mocą 50 kW. Jej wartość wyniosła 550°C. Do pierwszych 40-tu hamowań widoczna jest zgodność naprężeń uśrednionych na grubości i na powierzchni zewnętrznej wieńca. Po dalszych hamowaniach wartość naprężeń uśrednionych jest niższa niż na zewnętrznej powierzchni wieńca co świadczy o powstawaniu rozkładu naprężeń w przekroju wieńca. Widoczna jest też bardzo dobra zgodność wyników pomiarów ultradźwiękowych prowadzonych falami podpowierzchniowymi i rezultatów uzyskanych techniką dyfrakcji promieni X.

Rysunek 116 pokazuje wyniki badania obwodowych naprężeń falami podpowierzchniowymi, na zewnętrznej powierzchni wieńca koła hamowanego z początkową mocą równą 40 kW. Wykres pokazuje narastanie wartości naprężenia w trzech punktach na obwodzie koła oddalonych od siebie o 120° . Podobnie jak w kole, dla którego wyniki pokazano na poprzednim rysunku, przed hamowaniami na zewnętrznej powierzchni wieńca panowały bezpieczne, ściskające naprężenia obwodowe. W odróżnieniu od zmian naprężeń pokazanych na rysunku 116 widoczny jest gwałtowny przyrost naprężeń rozciągających już po pierwszym cyklu hamowania. Kolejne cykle hamowania z mocą 40 kW powodują dalszy wzrost wartości naprężeń rozciągających. Następujące po nich cykle hamowania z małą mocą (10 kW) praktycznie nie zmieniają stanu naprężeń na powierzchni wieńca a kolejne cykle hamowań z mocami 20, 30 i 40 kW prowadzą do nieznacznego tylko przyrostu wartości obwodowych naprężeń rozciągających w powierzchniowej warstwie materiału wieńca. Zbliżone wartości naprężeń w trzech przypadkowych miejscach na obwodzie koła świadczą, że zgodnie z oczekiwaniami, stan naprężeń we wieńcu koła poddanego cyklom hamowania jest osiowo-symetryczny (jednakowe wartości na całym obwodzie).

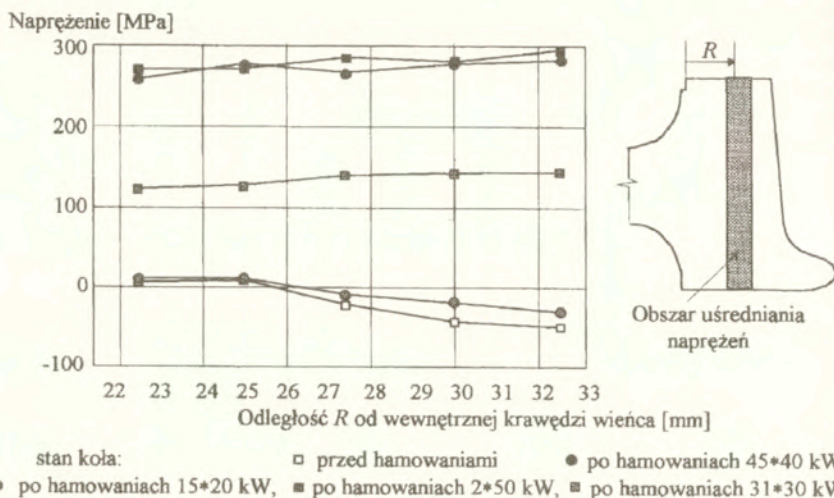


Rys. 116. Obwodowe naprężenia zmierzone falami podpowierzchniowymi, w trzech punktach na obwodzie koła, na zewnętrznej powierzchni wieńca w czasie hamowania koła w hamowni.

Na wybranych kołach przeprowadzono badania promieniowych rozkładów naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca. Wyniki dla koła poddanego kolejno hamowaniom z mocą 20, 30, 40 i 50 kW pokazuje rysunek 117. Są to wyniki badań wykonanych głowicą normalną, przykładaną do zewnętrznej powierzchni wieńca w różnych położeniach hamowania. Przed hamowaniami, dla położen głowicy $R > 26$ mm, widoczne są ściskające obwodowe naprężenia własne. Dla położen głowicy bliższych wewnętrznej krawędzi wieńca, wartości zmierzonych naprężeń były bliskie zera. Hamowania z mocą 20 kW nieznacznie tylko

zmieniły wartości naprężeń. Po hamowaniach z mocą 30 kW zmienił się rozkład naprężeń - maksymalne wartości naprężeń rozciągających obserwowane są dla położenia głowicy bliskich powierzchni tocznej koła. Podobnie, po hamowaniach z wyższymi mocami - maksymalne naprężenia rozciągające wykrywane były w pobliżu miejsca wprowadzania ciepła czyli powierzchni kontaktu wieńca z klockami hamulcowymi.

Należy zaznaczyć, że w przypadku nowego koła hamowanego w hamowni, bez kontaktu z szyną i powstających w jego wyniku odkształceń plastycznych, możliwe było prowadzenie badań ultradźwiękowych w małej odległości od powierzchni tocznej. Natomiast w kołach

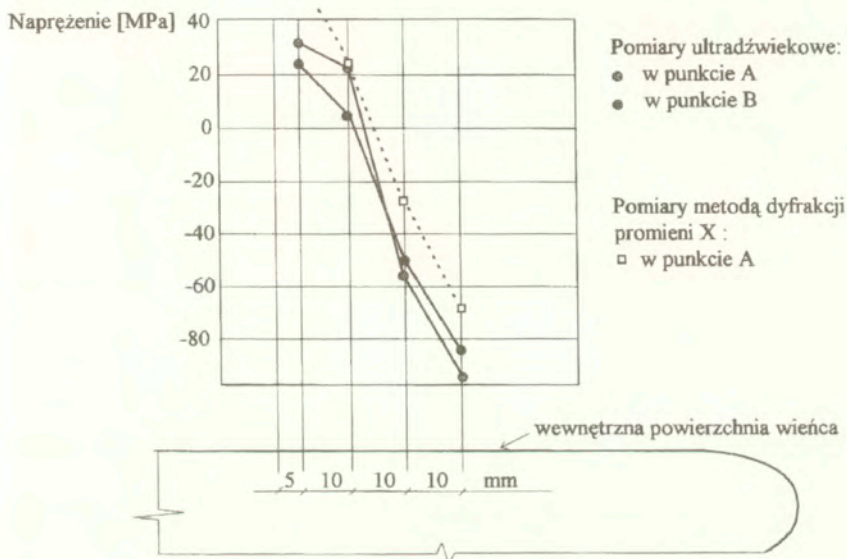


Rys. 117. Wyniki pomiarów promieniowego rozkładu naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca. Pomiary na kołach po hamowaniach z różnymi mocami.

eksploatowanych grubość warstwy, w której panują naprężenia własne wywołane plastycznym odkształceniem powierzchni tocznej może sięgać 20 mm i obszar ten jest poza zasięgiem tensometrii ultradźwiękowej. Należy pamiętać, że pokazane na rysunku 117 wartości obwodowych naprężeń własnych to wartości uśrednione na szerokości wieńca. W rzeczywistości w przekroju wieńca rozkład składowej obwodowej naprężeń jest bardziej skomplikowany.

Następny rysunek, 118, pokazuje zbadane przez autora falami podpowierzchniowymi promieniowe rozkłady obwodowych naprężeń w powierzchniowej warstwie wewnętrznej powierzchni wieńca jednego z kół przed hamowaniami i wyniki uzyskane na tej samej powierzchni techniką dyfrakcji promieni X. W odróżnieniu od promieniowych rozkładów naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i pokazanych na rysunku 117, widoczny jest wyraźny gradient naprężeń na tej powierzchni wieńca. Istnienie tego silnego gradientu potwierdzone zostało wynikami pomiarów metodą dyfrakcji promieni X. Dla położenia głowicy oddalonych więcej niż 15 mm od krawędzi wieńca obserwowane są ścisłające obwodowe naprężenia własne, które w pobliżu kołnierza osiągają wartości bliskie -100 MPa. Bardzo dobra zgodność wyników uzyskanych techniką ultradźwiękową, falami podpowierzchniowymi, i metodą dyfrakcji promieni X uzyskana w czasie pomiarów na

hamowni w Vitry spowodowały, że technika ultradźwiękowa i stosowany tam w pomiarach aparat DEBRO-20 został przez środowisko kolejowe uznany za przyrząd dostarczający wiarygodnych danych o obwodowych naprężeniach własnych w kołach. Dzięki temu, do badań naprężeń w kołach poddawanych hamowaniom w rzeczywistych warunkach, na torze kolejowym, Biuro Badań Europejskiej Unii Kolejowej wytypowało metodę ultradźwiękową i ten właśnie aparat (w latach 80-tych aparat DEBRO-20 był jedynym przyrządem mogącym pracować w warunkach polowych, na torze). Przedstawione niżej wyniki pochodzą z pierwszych w świecie nieniszczących pomiarów naprężeń w kołach, przeprowadzonych w warunkach polowych, czyli rzeczywistych warunkach w jakich koła poddawane są



Rys. 118. Wyniki pomiarów promieniowego rozkładu naprężeń obwodowych na wewnętrznej powierzchni wieńca koła przed hamowaniami. Porównanie wyników badań ultradźwiękowych prowadzonych falami podpowierzchniowymi i metodą dyfrakcji promieni X na tej samej powierzchni.

obciążeniom cieplnym w czasie hamowania. Badania przeprowadzone zostały na torze próbnym w Velimiu (Republika Czeska). Specjalny wagon pomiarowy (pomiaru mocy hamowania, prędkości jazdy i temperatury) prowadziła ekipa kolei niemieckich, koła do badań dostarczyły koleje francuskie.

Cel badań był podobny jak cel pomiarów w Vitry, tym razem jednak w czasie hamowania koło znajdowało się w ciągłym kontakcie w szyną, do której odprowadzane było ciepło z nagrzewającego się wieńca a tarcza koła chłodzona była opływającym ją powietrzem. Pomiaru naprężeń odbywały się w przerwach między hamowaniami, po ostygnięciu koła do temperatury otoczenia. Badania prowadzono tym samym sprzętem i wykorzystując do skalowania takie same odprężone wzorce jak w pomiarach wykonanych w Vitry.

Badane koła były kołami nowymi, zamontowanymi w lekkim wagonie towarowym jeżdżącym po torze z małym obciążeniem. Statyczne obciążenie jednego koła oszacowano jedynie na około 20kN. Oznaczało to, że odkształcenie plastyczne powierzchni tocznej koła powstające w czasie jazdy i wywołane kontaktem z szyną oraz związane z nim naprężenia własne były znikome i nie wpływały na wyniki badań ultradźwiękowych.

W odróżnieniu od warunków panujących w hamowni, w czasie prób na torze pozycja klocka hamulcowego zmieniała się względem wieńca. W czasie pomiarów wagon pomiarowy poruszał się w dwóch kierunkach na owalnym torze próbnym. Niektóre cykle hamowania odbywały się przy jeździe wagonu „w prawo”, inne - przy jeździe „w lewo”. Pochylenie toru powodowało, że klocki hamulcowe, w zależności od pochylenia wagonu, znajdowały się bliżej powierzchni zewnętrznej lub bliżej kołmierz wieńca. Powodowało to nierównomierne nagrzewanie materiału wieńca na jego szerokości. Te rozkłady temperatury znalazły swoje odbicie w rozkładach powstających we wieńcu naprężeń.

Rysunek 119 pokazuje wyniki pomiarów przeprowadzonych na jednym z kół, na którym klocek hamulcowy początkowo przyciskany był do powierzchni tocznej w pobliżu zewnętrznej powierzchni wieńca. Po 26 cyklach hamowania i zmianie kierunku jazdy wagonu klocek przesunął się w pobliże kołmierza koła.

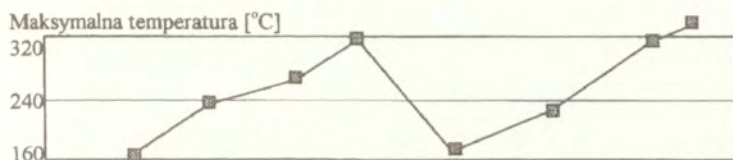
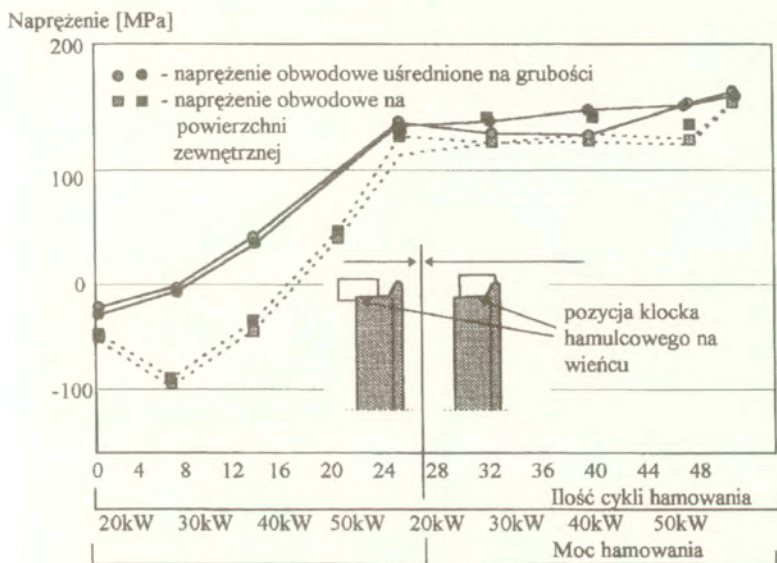
Pomiary ultradźwiękowe wykonywane były w dwóch miejscach na obwodzie koła, leżących na jego średnicy. Liniami ciągłymi pokazane są zmiany naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca (pomiar dwójmności). Liniami przerywanymi - naprężeń powierzchniowych zmierzonych (pomiar falami podpowierzchniowymi) na zewnętrznej powierzchni wieńca. W kole w stanie dostawy (przed hamowaniami) obwodowe naprężenia uśrednione na szerokości wieńca jak i naprężenia w warstwie powierzchniowej to naprężenia ściskające.

Podczas pierwszych cykli hamowania równomiernemu wzrostowi naprężeń rozciągających uśrednionych na szerokości towarzyszył wzrost naprężeń ściskających zmierzonych na zewnętrznej powierzchni wieńca. Wartości tych naprężeń wyrównały się po hamowaniach z większą mocą i po zmianie kierunku jazdy.

Wartości naprężeń w obu punktach pomiarowych były bliskie sobie (największa różnica wartości między dwoma punktami pomiarowymi nie przekroczyła 20 MPa). Potwierdziło to oczekiwanie, że stan naprężeń w kole, podobnie jak w kołach kutyh poddawanych hamowaniom w hamowni, jest osiowosymetryczny.

Temperatura powierzchni tocznej koła była podczas badań mierzona ślizgającą się po niej termoparą. W dolnej części rysunku 119 pokazane są maksymalne temperatury wieńca podczas kolejnych cykli hamowań. Przyrosty naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca, proporcjonalnego do siły obwodowej działającej we wieńcu, są związane z maksymalnymi wartościami temperatury koła w czasie hamowania. Podczas hamowania z mocą 50 kW (cykl Nr 24) temperatura koła osiągnęła 320°C. W następnych cyklach, prowadzonych z niższą mocą, maksymalne temperatury koła były niższe i wartości obwodowego naprężenia uśrednionego ulegały jedynie nieznacznym zmianom. Zamiast przyrostu wartości naprężeń rozciągających widoczny jest raczej nieznaczny ich spadek. Spowodowany on może być odprężającym działaniem cyklicznych zmian temperatury jakim poddawane było koło w czasie kolejnych nagrzewañ i studzeń między hamowaniami. Dopiero ponowne hamowania z mocą 50 kW, powodujące osiągnięcie przez koło temperatury około 330°C, spowodowały mierzalny wzrost naprężeń rozciągających. Dla porównania, maksymalna temperatura koła w czasie hamowania koła z tą samą mocą, w hamowni, wynosiła 550°C czyli była o 220°C wyższa.

Następny rysunek, 120, pokazuje wyniki uzyskane na kole poddanym takiemu samemu programowi hamowań ale przy odwrotnych kierunkach jazdy wagonu po torze. W czasie pierwszych cykli hamowań tego koła klocek hamulcowy opierał się o kołmierz koła a w czasie dalszych - ślizgał się po powierzchni tocznej w pobliżu zewnętrznej powierzchni wieńca.

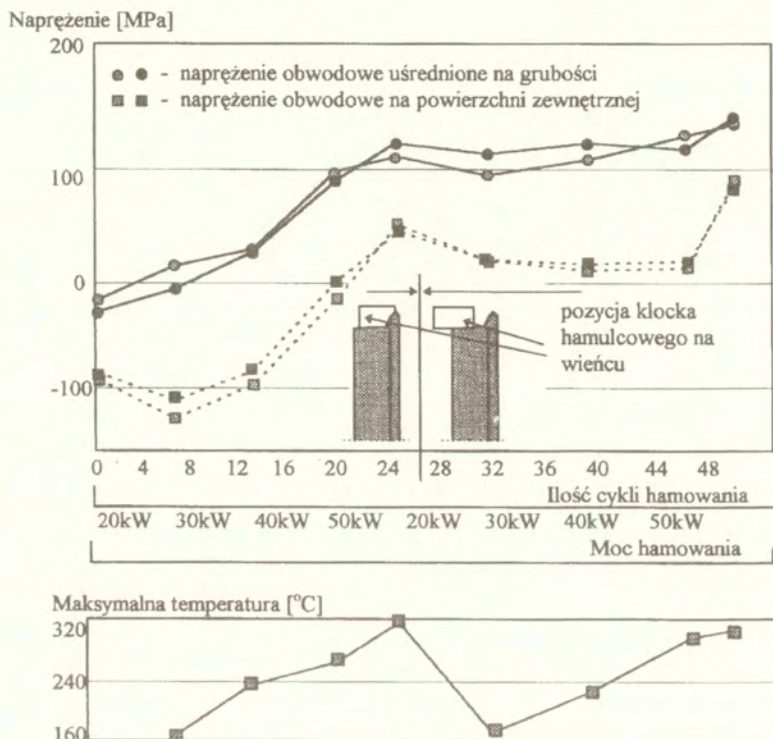


Rys. 119. Naprężenia obwodowe uśrednione na szerokości wieńca i w powierzchniowej warstwie zewnętrznej powierzchni oraz temperatury w kole podczas hamowań na torze próbnym.

W odróżnieniu od koła, dla którego wyniki pokazano na rysunku 119, wartości naprężeń obwodowych mierzonych na zewnętrznej powierzchni wieńca nie osiągają wartości naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca. Są one średnio o około 100 MPa niższe niż naprężenia uśrednione. Dopiero po ostatnich cyklach hamowania z mocą 50 kW, wartości naprężeń obwodowych na powierzchni rosną i osiągają wartości o około 50 MPa niższe niż naprężenia uśrednione.

Inny przebieg zmian obwodowych naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca i w jego powierzchniowej warstwie spowodowany może być również innymi wartościami naprężeń własnych w kole w stanie dostawy (przed hamowaniami). W kole pokazanym na rysunku 119, podobnie jak to było w kołach badanych w hamowni (patrz rysunek 113), wartości naprężeń uśrednionego na szerokości wieńca i powierzchniowego, na zewnętrznej powierzchni wieńca, są zbliżone. Natomiast w kole, którego wyniki badania pokazuje rysunek 120, obwodowe naprężenia w powierzchniowej warstwie zewnętrznej powierzchni wieńca w stanie dostawy osiągają wartość bliską -100 MPa. Oznacza to, że przed hamowaniami w warstwie

powierzchniowej tego koła panowały silniejsze naprężenia ściskające niż naprężenia uśrednione na szerokości wieńca.

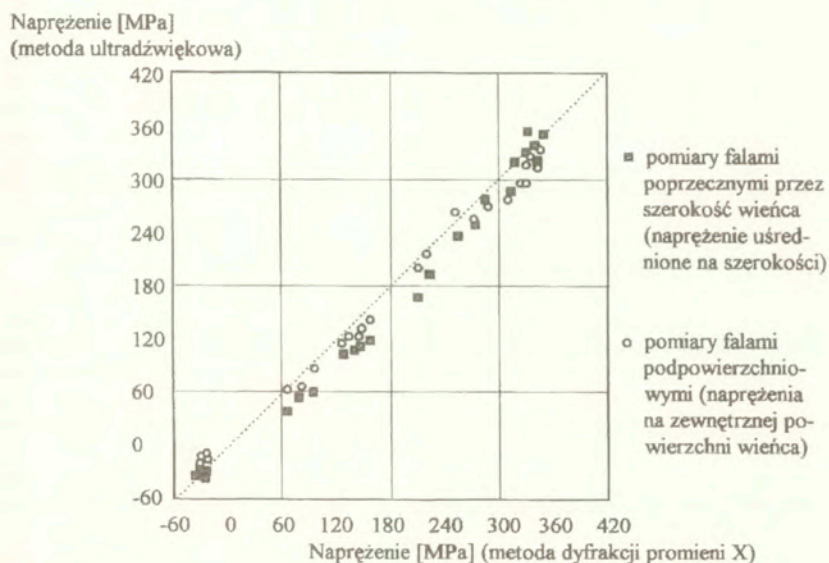


Rys. 120. Naprężenia obwodowe uśrednione na szerokości wieńca i w powierzchniowej warstwie zewnętrznej powierzchni oraz temperatury w kole podczas hamowań na torze próbnym.

Porównanie wartości naprężeń obwodowych powstałych w kołach hamowanych w hamowni i na torze pozwala zauważyć, że dla tych samych mocy hamowania naprężenia w kołach hamowanych w kontakcie z szyną są w przybliżeniu dwukrotnie niższe. Jest to rezultatem znacznie niższych temperatur jakie osiąga koło w czasie hamowania w torze. Przepływ ciepła z powierzchni tocznej koła do szyny zależy od obciążenia koła, od którego zależy wielkość powierzchni kontaktu (dla nacisku rzędu 200 kN powierzchnia styku koło-szyna liczona jest w setkach mm^2). W warunkach toru, maksymalna temperatura jaką osiąga koło w czasie hamowania zależy jest dodatkowo od warunków atmosferycznych (temperatura powietrza, wiatr, szyna sucha lub mokra). Przykładowo, w czasie ostatnich cykli hamowań kół, których wyniki pokazują rysunki 119 i 120, pomimo jednakowych mocy i czasów hamowania, maksymalne temperatury kół różniły się o około 30°C .

Wykorzystanie w badaniach ultradźwiękowych objętościowych fal poprzecznych do pomiaru uśrednionej na szerokości wieńca wartości naprężenia obwodowego i fal powierzchniowych do pomiaru obwodowych naprężeń w powierzchniowej warstwie na jednej z jego powierzchni, pozwoliły na śledzenie nie tylko wartości naprężeń ale i stwierdzenie zachodzących zmian rozkładu naprężeń obwodowych we wieńcu. W kołach, których wyniki badań pokazano wyżej, uśrednione na szerokości wieńca wartości naprężeń obwodowych są podobne i po zakończeniu cykli hamowań osiągnęły wartość około 150 MPa. Jednocześnie dla jednego z nich, wartość naprężenia obwodowego na zewnętrznej powierzchni wieńca wynosi również 150 MPa (rysunek 119), a dla drugiego - poniżej 100 MPa (rysunek 120). Oznacza to, że rozkłady naprężeń obwodowych w przekroju wieńców tych kół, poddanych jednakowym cyklom hamowań, są różne.

Podobnie jak w przypadku kół hamowanych w hamowni, część kół badanych w warunkach toru kolejowego poddana była po zakończeniu hamowań pomiarom naprężeń metodą dyfrakcji promieni X. Zbiorcze porównanie wyników badań ultradźwiękowych i wyników badań metodą dyfrakcji promieni X, dla kół hamowanych w hamowni i na torze, pokazuje rysunek 121. Naniesiono na nim zarówno wyniki badania falami powierzchniowymi (obwodowe naprężenia w powierzchniowej warstwie materiału) jak i wyniki badania dwójłowności (obwodowe naprężenia uśrednione na szerokości wieńca). Widoczna jest wysoka zgodność wyników uzyskanych dwiema metodami, z których każda wykorzystuje inne zjawisko fizyczne.



Rys. 121. Zbiorcze porównanie wartości naprężeń obwodowych zmierzonych techniką ultradźwiękową i metodą dyfrakcji promieni X na kołach kutyh.

Różnice w wartościach naprężeń zmierzonych tymi dwiema metodami mogą być spowodowane także tym, że wszystkie pomiary metodą dyfrakcji promieni X prowadzone były

w zagłębieniach wytrawionych przed pomiarami dnach na powierzchni wieńców. Głębokość tych zagłębień wynosiła od 2 do 3 mm. Powodem prowadzenia pomiarów nie na samej powierzchni a w „dołkach” było wyeliminowanie wpływu odkształceń plastycznych powierzchni wieńców badanych kół na wyniki pomiarów techniką dyfrakcji promieni X. Powierzchniowe odkształcenia plastyczne na powierzchniach kół mogły łatwo powstać w czasie składowania czy transportu kół.

Dzięki udziałowi w programie badawczym Unii Kolei Europejskich możliwe stało się wykazanie, że technika ultradźwiękowa może być z powodzeniem stosowana w badaniach naprężeń własnych w wieńcach kół monoblokowych. Wykorzystując aparaty zbudowane w IPPT pomiary mogły być prowadzone zarówno w laboratoriach czy ośrodkach badawczych, w hamowni czy w warunkach toru kolejowego.

W pięć lat po zakończeniu opisanych wyżej badań aparat DEBRO-30 wykorzystany były w podobnych pomiarach zmian naprężeń w kołach kutych wykonanych ze stali o podwyższonej zawartości węgla. Pomiary prowadzono w Centrum Naukowym Kolejnictwa na zlecenie Europejskiej Unii Kolejowej i opisane są w [217]. Autorzy tej pracy, pracownicy CNTK, wyznaczyli wartość współczynnika elastoakustycznego dla nowego materiału kół, przeprowadzili badania obwodowych naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca i obwodowych naprężeń w powierzchniowych warstwach na obu powierzchniach wieńca. W wnioskach potwierdzili przydatność techniki ultradźwiękowej i stosowanej przez nich aparatury do oceny obwodowych naprężeń własnych w kołach monoblokowych.

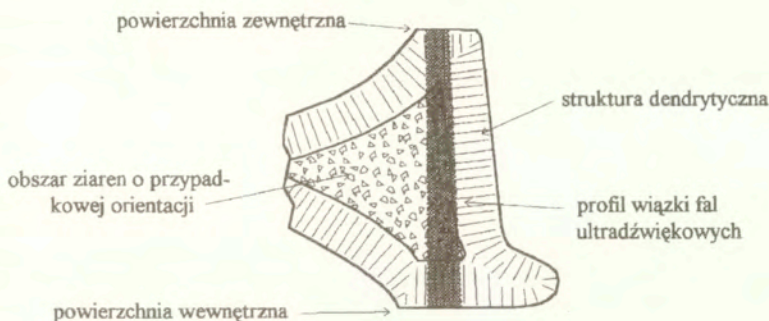
5.3.3. Badania stalowych kół odlewanych

W latach 1992-1995 autor prowadził badania kół wykonywanych jako stalowe odlewy nazywanych kołami lanymi. W badaniach wykorzystano aparat DEBRO-30 wyposażony w jednoprzetwornikową, obracaną głowicę normalną na fale poprzeczne do pomiaru dwójnośności akustycznej i oceny wartości naprężenia obwodowego uśrednionego na szerokości wieńca oraz 12-przetwornikowy zestaw głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne do oceny wartości naprężeń obwodowych w powierzchniowych warstwach materiału na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wieńca. Techniki badania pokazują rysunki 112 i 113 na stronach 170 i 171.

Koła lane są produkowane i stosowane głównie w USA. Zaletą technologii odlewania kół, w porównaniu z technologią kucia i walcowania stosowaną w Europie, jest szybkość z jaką koła lane są wytwarzane. We współczesnych zakładach, koła odlewane są taśmowo, w trwałych, wielorazowych formach grafitowych z szybkością jednego koła na minutę. Inną zaletą techniki odlewania jest ograniczenie obróbki mechanicznej koła jedynie do otworu w piasku. Reszta powierzchni, dzięki dokładności wymiarów zapewnionej stabilnością wymiarową grafitowych form, pozostaje nieobrobiona.

Koła lane wykazują strukturę typową dla odlewu to znaczy powierzchniowa warstwa materiału, o grubości dochodzącej do 20 mm, utworzona jest z długich dendrytycznych ziaren ustawionych prostopadle do powierzchni. Wewnętrzna część wieńca zbudowana jest z ziaren, których orientacja krystalograficzna jest przypadkowa. Strukturę materiału lanego koła w przekroju typowego wieńca pokazuje rysunek 122. Linia przerywaną pokazano na tym rysunku kształt wiązki fal ultradźwiękowych stosowanych w pomiarach dwójnośności akustycznej i ocenie wartości naprężenia obwodowego uśrednionego na szerokości wieńca (przetwornik o średnicy 12 mm, częstotliwość fal 2 MHz).

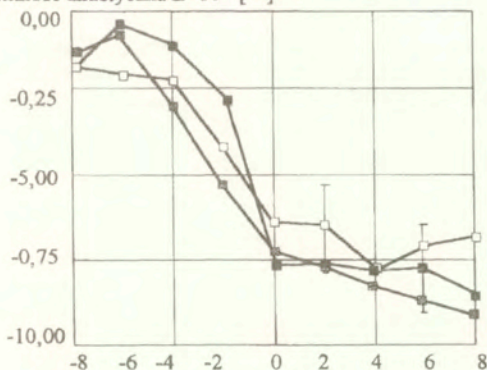
W odróżnieniu od kół europejskich, których badania opisano wcześniej i których znaczna grubość wieńców pozwalała na kilkakrotną naprawę kształtu powierzchni tocznej przez



Rys. 122. Struktura wieńca stalowego koła laneo.

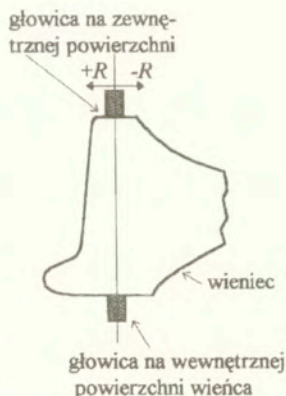
toczenie, badane koła lane posiadały wieńce o małej grubości. Były to koła typu „single use”, dla których nie przewidziano obróbki powierzchni tocznej. W celu sprawdzenie, czy mniejsza niż w przypadku kół europejskich grubość wieńca i jego złożona struktura nie powodują niepożądanych odbić fal od powierzchni tocznej, autor przeprowadził pomiary promieniowych rozkładów dwójłomności akustycznej materiału wieńca dwiema głowicami. Głowice to różniły się szerokością obszaru w jakim uśredniane były prędkości fal poprzecznych. Pomiary wykonane zostały głowicą jednoprzetwornikową, obracaną o przetworniku 12*12 mm i częstotliwości 2 MHz, sprzęganą do zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wieńca, oraz głowicą wieloprzetwornikową, nieobracaną sprzęganą do wewnętrznej powierzchni. Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 123.

Dwójłomność akustyczna $B \cdot 10^{-4}$ [-]



Położenie głowicy R [mm] (względem środka powierzchni zewnętrznej wieńca).

- głowica obracana: ■ - na zewnętrznej powierzchni
 ● - na wewnętrznej powierzchni
 □ - na zewnętrznej powierzchni



Rys. 123. Promieniowe rozkłady dwójłomności akustycznej wieńca koła laneo. Wyniki uzyskane dwiema różnymi głowicami.

Największa różnica wyników pomiarów dwójłomności, wynosząca $0,25 \cdot 10^{-4}$ dla położenia głowic $R = -2$ mm, jest równoważna różnicy wartości obliczanego naprężenia obwodowego równej jedynie 3,2 MPa. Oznacza to, że ewentualny wpływ powierzchni tocznej oraz złożonej struktury materiału na mierzone czasy przejścia fal poprzecznych jest do pominięcia.

Struktura materiału wieńca koła lanego, w odróżnieniu od kół kutyh, zmienia się na obwodzie koła. Jest to wynikiem różnic w strukturze materiału w okolicach otworów (nadlewów), którymi wypływa z formy nadmiar staliwa. Badane koła posiadały na obwodzie 10 nadlewów, umieszczonych na powierzchni tarczy w pobliżu wieńca. Różne warunki chłodzenia gorącego materiału w miejscach nadlewów, zależne od ilości staliwa w nadlewie i od szybkości odprowadzania ciepła z nadlewów powodują, że wahania struktury w okolicach nadlewów są przypadkowe. Te zmiany struktury wewnętrznej materiału wieńca pociągają za sobą wahania dwójłomności akustycznej B^0 materiału. W celu zbadania wpływu tych obwodowych zmian struktury na wyniki pomiarów, badania kół lanych wykonywane były w 20 miejscach na obwodzie koła, co 18° . Pozycje głowic na obwodzie oznaczone jako 1,2,3...10 odpowiadają pozycjom w pobliżu kolejnych nadlewów. Pozycje pośrednie - położeniom między nadlewami. W opisanych niżej pomiarach dwójłomności akustycznej autor stosował jednoprzetwornikową, obracaną głowicę na fale poprzeczne. Do pomiarów naprężeń na powierzchniach wieńca - 12-przetwornikowy zestaw głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne wykorzystujący efekt „lustra”. Głowice te współpracowały z aparatem DEBRO-30. Oceriane były wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i naprężeń w powierzchniowych warstwach materiału na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni wieńca. Badania wykonane w latach 1992-3 obejmowały zestaw kół poddanych nagrzewaniu w cewce indukcyjnej. Badania przeprowadzone w roku 1995 prowadzone były na zestawie takich samych kół poddanych hamowaniom w hamowni.

5.3.3.1. Badania kół nagrzewanych indukcyjnie

Nagrzewanie indukcyjne wykorzystano do symulowania obciążeń cieplnych jakim poddawane są koła kolejowe w czasie hamowania. Na powierzchni jezdnej koła zakładana była cewka a zmienny prąd płynący w zwojach cewki wzbudzał w powierzchniowej warstwie materiału prądy wirowe nagrzewające materiał. Zakładano, że ten szybki sposób nagrzewania kół pozwoli na dokładne kontrolowanie mocy dostarczanej do wieńców kół i na ich równomierne nagrzewanie na całym obwodzie.

W celu wyeliminowania wpływu ewentualnych różnic w składzie chemicznym materiału na wyniki badań przygotowano dla nich dziesięć kół pochodzących z jednego wytopu. Razem z powtarzalną technologią odlewania kół zapewniło to jednakowe własności mechaniczne i akustyczne materiału kół. Badane koła to standardowe koła klasy C (obrabiane cieplnie), stosowane w wagonach towarowych i charakteryzujące się wygiętą, stożkową tarczą.

Dwa z dziesięciu dostarczonych kół pozostawiono w stanie dostawy. Pozostałe koła poddano nagrzewaniom w cewce indukcyjnej z mocami 38, 42 i 45 kW (odpowiednio 51, 56 i 60 KM). Czas każdego nagrzewania wynosił 1 godzinę.

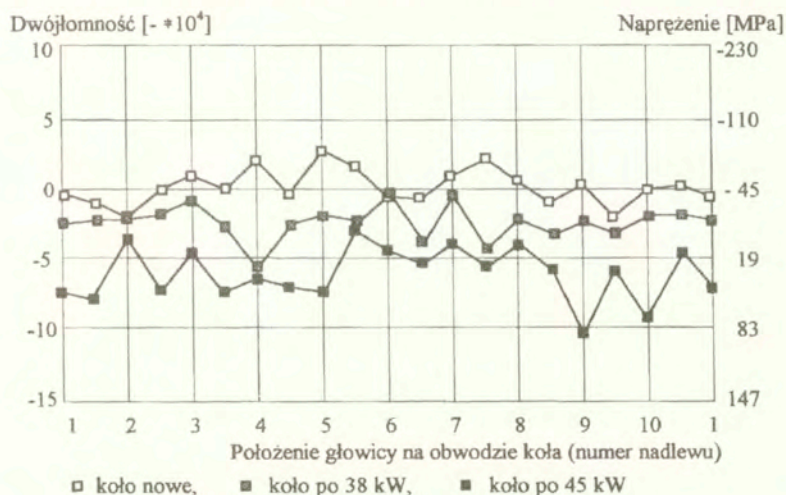
Do skalowania aparatu wykorzystanych zostało 6 bloków wyciętych z kół tego samego typu i poddanych termicznej obróbce odprężającej. Jako czasy przejścia fal t_t^0 i t_r^0 oraz wartość dwójłomności akustycznej B^0 przyjęte zostały wartości średnie z pomiarów na sześciu wzorcach. Dla głowicy sprzężonej do zewnętrznej powierzchni wieńca wartość otrzymanej w tej sposób anizotropii teksturalnej wyniosła $B^0 = -3,5 \cdot 10^{-4}$ [-].

Pomiary dwójłomności akustycznej

Typowe rozkłady dwójłomności akustycznej B na obwodzie kół nowego, po nagrzewaniu z mocą 38 kW i nagrzewaniu z mocą 45 kW pokazuje rysunek 124. Zmierzona wartość to sumaryczny wpływ tekstury materiału (B^0) i naprężenia obwodowego (B^0) panującego we wiencu koła. Na prawej stronie wykresu pokazane są wartości naprężenia obwodowego σ_θ odpowiadające zmierzonym wartościom dwójłomności akustycznej B .

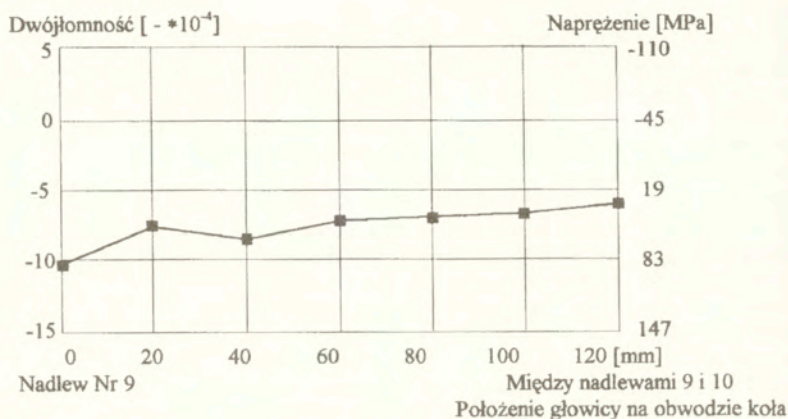
Średnia wartość dwójłomności B dla koła nowego jest bliska zera. Odpowiada jej średnia wartość naprężenia obwodowego równa -45 MPa (ściskanie). Dla kół po nagrzewaniu, wartości dwójłomności są ujemne co odpowiada powstaniu we wiencach kół obwodowych naprężeń rozciągających. W kole poddanym nagrzewaniu z mocą 45 kW, średnia wartość naprężenia wynosi 37 MPa.

W pokazanych na wykresie danych, w odróżnieniu od europejskich kół kutych, widoczne są znaczne wahania wartości dwójłomności na obwodzie kół. Jest to spowodowane cyklicznymi zmianami struktury koła związanymi z obecnością nadlewów. Dla zbioru badanych kół wahania te są tym większe im intensywniejszemu nagrzewaniu indukcyjnemu poddane zostało koło. Przykładowo, w kole nagrzanym z mocą 45 kW wahania wartości dwójłomności dochodzą do $\Delta B = 7,9 \cdot 10^{-4}$ [-] co odpowiada wahanom wartości naprężenia obwodowego równym $\Delta \sigma = 101$ MPa. We fragmencie wieńca poddanego nagrzewaniu z mocą 45 kW, w którym zaobserwowane zostały największe różnice jej wartości dla położzeń głowicy w pobliżu i między nadlewami (położenia głowicy 9 - 9,5, rysunek 124), autor wykonał



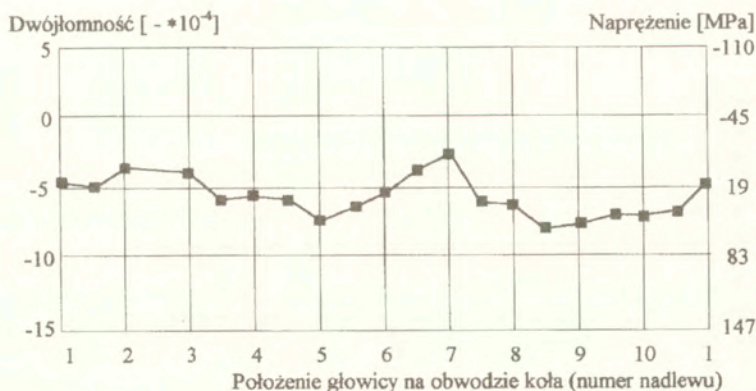
Rys. 124. Rozkład dwójłomności akustycznej na obwodzie koła nowego (przed nagrzewaniem) i odpowiadających jej wartości naprężenia obwodowego.

badania obwodowego rozkładu dwójłomności akustycznej wykonując pomiary co 20 mm w kierunku obwodowym. Wyniki pomiarów pokazuje rysunek 125. Widoczna jest niemal monotoniczna zmiana wartości dwójłomności akustycznej co świadczy o tym, że zmiany jej wartości na obwodzie są wynikiem obwodowego rozkładu powstających we wiencu naprężeń oraz rozkładu struktury materiału, a nie błędów pomiarowych.



Rys. 125. Zmiany dwójłomności akustycznej mierzone co 20 mm w okolicy nadlewu Nr 9 koła poddanego nagrzewaniu z mocą 45 kW.

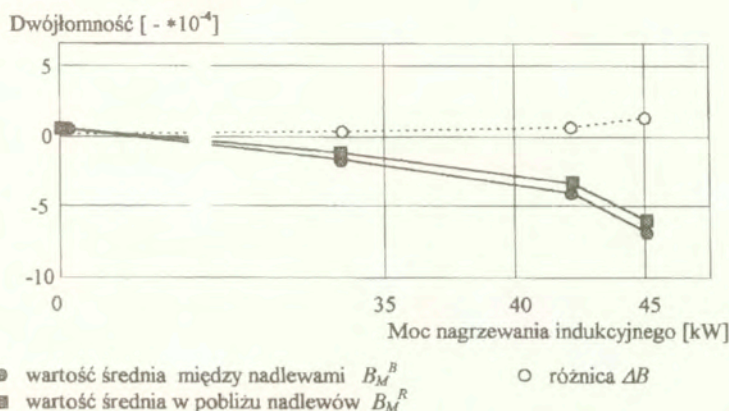
W niektórych badanych kołach nie zaobserwowano cyklicznych zmian wartości dwójłomności akustycznej na obwodzie wieńca, związanych z nadlewami, natomiast ekstrema jej wartości odległe od siebie o około 5 odległości między nadlewami (pół obwodu koła). Przykład wyników pomiarów wykonanych na takim kole, po nagrzewaniu z mocą 45 kW, pokazuje rysunek 126. Widoczne są maksima wartości dwójłomności dla położen głowicy w okolicach nadlewów 2-3 i 7. Taki rozkład naprężen obwodowych spowodowany mógł być tym, że wykorzystana do nagrzewania cewka była owalna i grubość szczeliny między przewodami cewki zmienna na obwodzie. Różne grubości szczeliny powodować mogły nierównomierne nagrzewania koła i wywołanie w nim rozkładu naprężen jak pokazano na rysunku 126.



Rys. 126. Obwodowy rozkład dwójłomności akustycznej zmierzonej na kole po nagrzewaniu z mocą 45 kW i odpowiadających jej wartości naprężenia obwodowego.

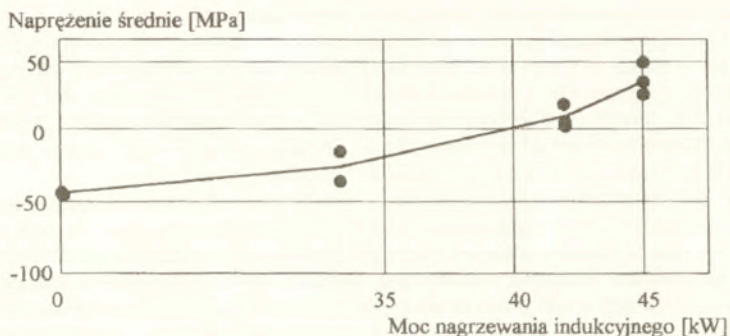
Porównanie wartości dwójłomności akustycznych zmierzonych w kołach nowych (w stanie dostawy) i po nagrzewaniach głowicą ustawioną w pobliżu nadlewów i między nimi pokazuje rysunek 127. Wartości na tym rysunku są średnimi wartościami dwójłomności z 10-ciu pozycji na każdym kole (10 pozycji w pobliżu nadlewów i 10 pozycji między nimi). B_M^R oznacza średnią wartość zmierzoną w pobliżu nadlewów, B_M^B - średnią wartość zmierzoną między nadlewami. Białymi punktami na wykresie pokazano różnicę $\Delta B = B_M^R - B_M^B$ między średnimi wartościami dwójłomności zmierzonymi w pobliżu nadlewów i między nimi.

Widoczny jest nieznacznie szybszy przyrost obwodowych naprężeń rozciągających w fragmentach wieńca pomiędzy nadlewami niż w ich okolicach. Różnice są na tyle małe, że w praktycznych zastosowaniach tensometrii mogą być pominięte. Świadczą one jednak o tym, że zmienne na obwodzie własności magnetyczne materiału wieńca, spowodowane istnieniem nadlewów i związanych z nimi zmian struktury, powodować mogą zmienne na obwodzie koła wartości prądów wirowych i zmienną na obwodzie temperaturę wieńca w czasie nagrzewania w cewce. W efekcie - powiązany z położeniami nadlewów obwodowy rozkład wartości naprężeń własnych po ostygnięciu koła.



Rys. 127. Zmiany średniej wartości dwójłomności akustycznej mierzonej między i w pobliżu nadlewów. Dane dla zbioru 10 kół.

Rysunek 128 pokazuje zbiorcze wyniki pomiarów naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca. Są to uśrednione po całym obwodzie koła wartości naprężeń obwodowych dla 10 badanych kół. W kołach w stanie dostawy panują obwodowe naprężenia ściskające o wartości około -45 MPa. Naprężenia te osiągają wartość zerową po nagrzewaniach z mocą 42 kW. W kołach poddanych nagrzewaniom z mocą 45 kW obserwowane są naprężenia rozciągające o wartościach od 34 do 48 MPa. Dla porównania, w kołach kutych poddanych hamowaniom w hamowni z podobną mocą, obserwowane były naprężenia rozciągające o wartościach sięgających 300 MPa czyli pięciokrotnie wyższych. Ta ogromna różnica wartości obwodowych naprężeń własnych uśrednionych na szerokości wieńca między kołami lanymi i kutymi wynika głównie z odmiennych kształtów tarczy kół. Od kształtu tarczy i jej zdolności do odkształceń sprężystych zależne są wartości i rozkłady naprężeń obwodowych w przekroju wieńca.



Rys. 128. Zbiorcze wyniki pomiarów naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca dla 10 kół poddanych nagrzewaniom indukcyjnym.

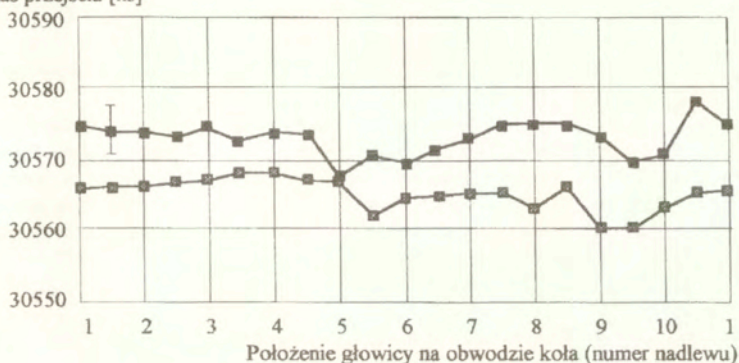
W badanych kołach pomiary dwójłomności akustycznej prowadzone były w 20 miejscach na obwodzie. Taka ilość pomiarów na każdym kole, możliwa do wykonania w warunkach laboratoryjnych, pozwoliła na stwierdzenie cyklicznych, związanych z obecnością nadlewów, wahań wartości naprężeń obwodowych w niektórych kołach. Ustalono, że w praktycznych zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej, celu wyznaczenia średniej wartości naprężenia obwodowego w kołach lanych, naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca, wystarcza wykonanie pomiarów dwójłomności akustycznej w przynajmniej trzech dowolnych punktach na obwodzie. Dla zbadanego zbioru dziesięciu kół, średnia wartość z takich trzech pomiarów nie odbiegała o więcej niż ± 20 MPa od wartości średniej, obliczonej z 20 pomiarów na obwodzie. Możliwość wyznaczania wartości naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca w ten sposób okazała się ważna w przypadku badań kół, w których ślady po nadlewach były niewidoczne i niemożliwe było ustalenie czy w momencie pomiaru głowica kontaktuje się z kołem w pobliżu jednego z nadlewów czy pomiędzy nimi.

Pomiary falami podpowierzchniowymi.

Pomiary czasów przejścia fal podpowierzchniowych wykonano, podobnie jak pomiary dwójłomności akustycznej, w 20 miejscach na obwodzie koła (w pobliżu nadlewów i między nimi). Badania prowadzono na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wieńca zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 113.

Jak pokazano na rysunku 120 materiał koła lanego, w jego powierzchniowej warstwie, zbudowany jest z długich ziaren dendrytycznych. Są to ziarna, których płaszczyzny najgęstszej upakowania zorientowane są równoległe do powierzchni (prostopadle do gradientu temperatury w czasie krzepnięcia materiału). Oznacza to, że fale podpowierzchniowe propagujące się wzdłuż powierzchni wieńca rozchodzą się w materiale o strukturze jednakowej na całym obwodzie koła i na obu powierzchniach wieńca. Rysunek 129 pokazuje czasy przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej mierzone na zewnętrznych powierzchniach, w 20 miejscach na obwodzie dwóch kół przed nagrzewaniem indukcyjnym. Wysoka jednorodność materiału powoduje, że wahania mierzonego czasu przejścia są bardzo małe i powodowane głównie zmiennymi warunkami sprzężenia akustycznego. Dla jednego z kół rozrzut wartości czasu przejścia mieści się w 8 nanosekundach, dla drugiego - w 11 ns. Podobne wahania wartości czasu przejścia fal podpowierzchniowych zaobserwowane zostały na wewnętrznych powierzchniach wieńców.

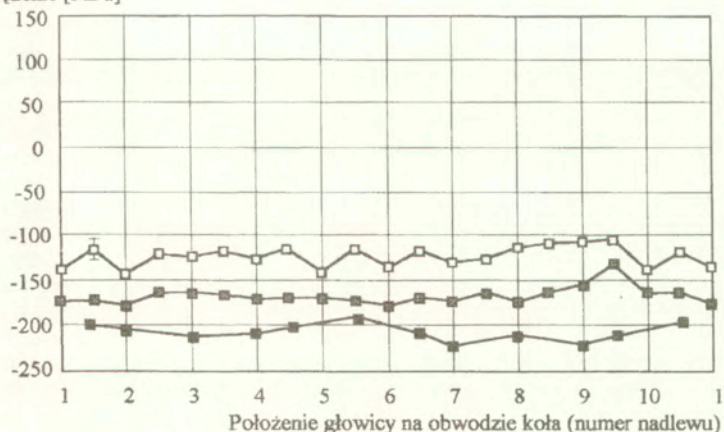
Czas przejścia [ns]



Rys. 129. Obwodowe rozkłady czasu przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych na wewnętrznej powierzchni wieńców dwóch kół w stanie dostawy (przed nagrzewaniem indukcyjnym).

Rysunek 130 przedstawia rozkłady wartości naprężeń obwodowych w powierzchniowych warstwach materiału, zmierzone na zewnętrznych powierzchniach wieńców trzech wybranych kół. Jedno z nich to koło w stanie dostawy, drugie - po nagrzewaniu z mocą 38 kW i trzecie - po nagrzewaniu z mocą 45 kW. W kole w stanie dostawy panują naprężenia własne powstające w czasie stygnięcia materiału wieńca w formie oraz obróbki cieplnej jakiej poddane były badane koła. Widoczne są ściskające naprężenia panujące w kole przed nagrzewaniem, a ich średnia wartość wynosi -123 MPa. Nagrzewanie kół spowodowało, że powstały w nich

Naprężenie [MPa]

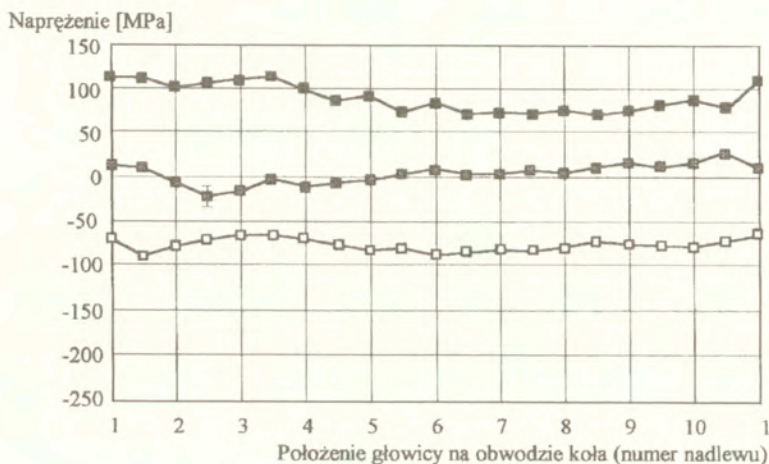


□ - koło nowe, ■ - koło po nagrzewaniu 38 kW, ■ - koło po nagrzewaniu 45 kW

Rys. 130. Naprężenia obwodowe na wewnętrznych powierzchniach wieńców kół w stanie dostawy, po nagrzewaniu z mocą 38 i 45 kW.

obwodowe naprężenia ściskające o wyższych wartościach niż w kole w stanie dostawy (odwrotnie niż naprężenia uśrednione na szerokości wieńca, których przyrosty wywołane nagrzewaniem były dodatnie). Średnia wartość obwodowego naprężenia w kole po nagrzewaniu z mocą 45 kW wynosi -209 MPa czyli jest o 86 MPa niższa niż w kole przed nagrzewaniem.

Następny wykres, rysunek 131, pokazuje obwodowe rozkłady naprężeń w kołach przed i po nagrzewaniach, ale zmierzone falami podpowierzchniowymi na wewnętrznych powierzchniach wieńców trzech kół. W kole nowym panują obwodowe naprężenia ściskające o średniej wartości równej - 87 MPa. W kole po nagrzewaniu z mocą 38 kW wartości zmierzonych naprężeń są bliskie zeru, a w kole po nagrzewaniu z mocą 45 kW panują rozciągające naprężenia obwodowe o średniej wartości równej 88 MPa.

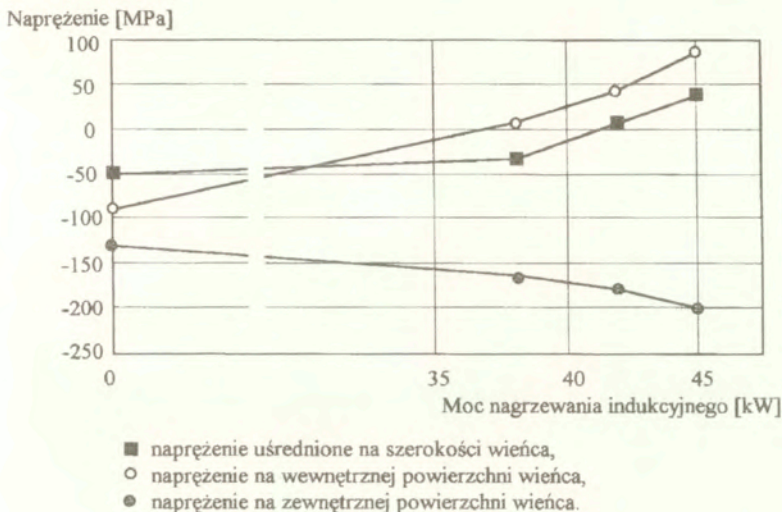


□ - koło nowe, ■ - koło po nagrzewaniu 38 kW, ▣ - koło po nagrzewaniu 45 kW

Rys. 131. Naprężenia obwodowe na zewnętrznych powierzchniach wieńców kół w stanie dostawy, po nagrzewaniu z mocą 38 i 45 kW.

Zmiany naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i w powierzchniowych warstwach materiału wieńca na jego powierzchniach bocznych, w funkcji mocy nagrzewania, pokazuje rysunek 132. Są to wartości uśrednione dla wszystkich pozycji pomiarowych i wszystkich badanych kół nagrzewanych z tą samą mocą. Pokazują one ogólnie kierunki i wartości zmian naprężeń obwodowych w badanym zbiorze kół i sugerują, że wieńce kół po nagrzewaniach poddane są złożonemu stanowi naprężenia - rozciąganiu i zginaniu. Wyniki uzyskane przez autora są dość wiarygodnym potwierdzeniem rezultatów numerycznej symulacji rozwoju naprężeń obwodowych w kołach standardowych poddanych obciążeniom cieplnym [201] i [218].

Badane koła to koła nowe pozbawione występujących lokalnie, w pobliżu powierzchni toczonej, naprężeń własnych od nacisków koło - szyna. Działające w ich wieńcach naprężenia to naprężenia własne powstałe w czasie produkcji i naprężenia powstałe po nagrzewaniu w

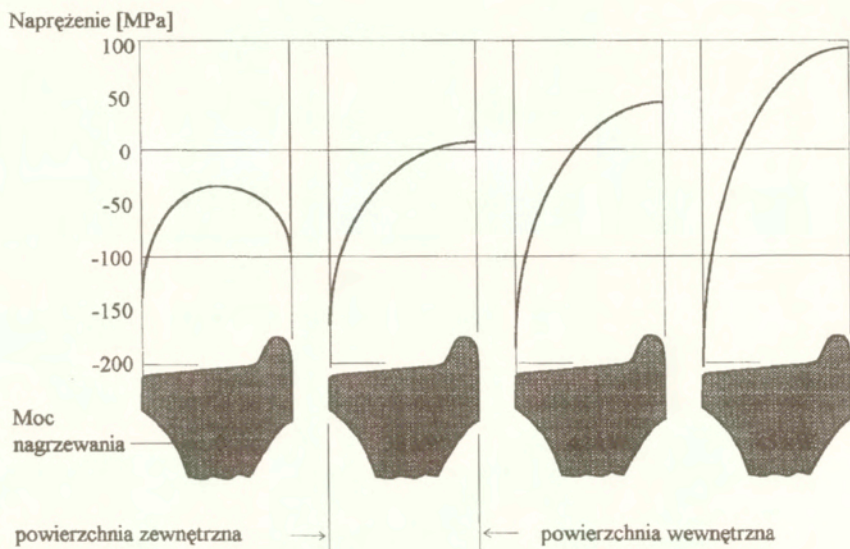


Rys. 132. Uśrednione wartości naprężeń zmierzonych na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wieńca oraz naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca, w funkcji mocy nagrzewania.

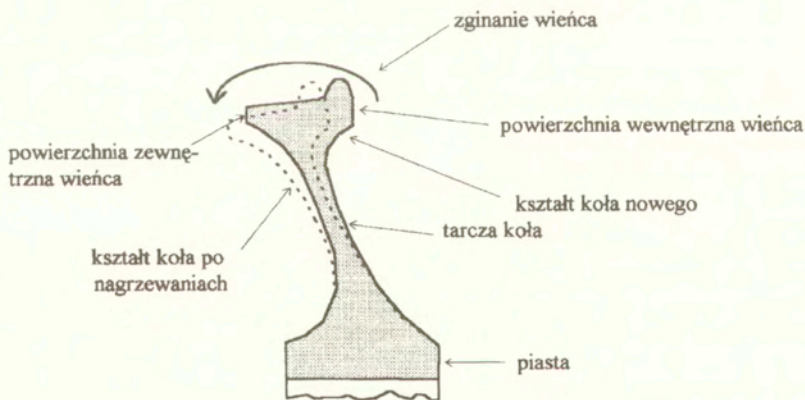
cewce indukcyjnej. Znacząc wartości naprężeń obwodowych na obu powierzchniach wieńca i wartość naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca postulować można przybliżone rozkłady naprężeń obwodowych na szerokości wieńców badanych kół. Rozkłady te, przedstawione na rysunku 133, nie ujmują ewentualnych lokalnych ekstremów wartości obwodowej składowej naprężenia w przekroju wieńca i zakładają jednorodny ich rozkład. Pokazują natomiast narastanie momentu zginającego we wieńcu koła wywołanego powstającymi w nim obwodowymi naprężeniami rozciągającymi i oddziaływaniem tarczy koła. Różnice wartości naprężeń obwodowych na obu powierzchniach wieńca te są tym większe im wyższe było obciążenie cieplne jakiemu poddane było koło (moc grzania).

Ten inny niż w przypadku kół europejskich rozkład naprężeń obwodowych wywołany jest wpływem stożkowego kształtu tarczy kół standardowych. Naprężenia rozciągające pojawiające się we wieńcach takich kół prowadzą do wygięcia tarczy koła i do powstania momentu zginającego we wieńcu. Moment zginający, powodujący narastanie naprężeń ściskających na zewnętrznej powierzchni wieńca, działa w płaszczyźnie stycznej do powierzchni jezdnej koła. Odształcenie tarczy wywołane rozciągającymi naprężeniami we wieńcu pokazuje schematycznie rysunek 134.

Planując cykl pomiarów na dziesięciu kołach nagrzewanych indukcyjnie zakładano, że ten sposób wprowadzania ciepła zapewni dokładnie kołowosymetryczne rozkłady temperatur w kołach. Wbrew oczekiwaniom, pomiary obwodowych rozkładów naprężeń na obwodzie kół poddanych nagrzewaniu w cewce wykazały, że w wartościach naprężeń obwodowych na wewnętrznej powierzchni wieńca występują ciągłe zmiany. Autor zauważył korelację między obwodowymi rozkładami wartości naprężeń na wewnętrznej powierzchni wieńca a zmianami szerokości pasa pokrytego kolorowymi tlenkami (odbarwionego w wyniku nagrzewania) i widocznego na tarczy koła. Rysunki 135 i 136 pokazują obwodowe rozkłady naprężeń w



Rys. 133. Prawdopodobne rozkłady wartości naprężenia obwodowego na szerokości wieńców kół poddanych nagrzewaniom z różnymi mocami.

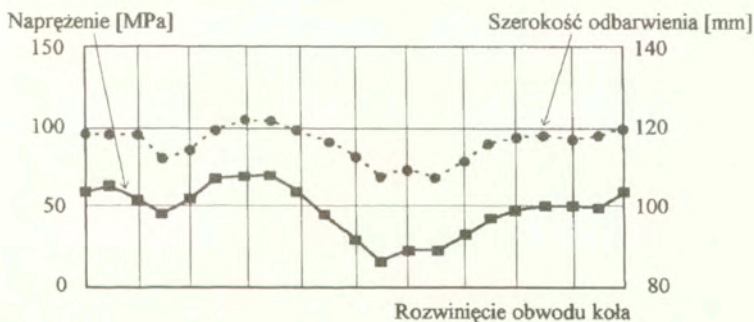


Rys. 134. Odkształcenia stożkowej tarczy i wieńca standardowego koła lanego, poddanego obciążeniom cieplnym.

powierzchniowych warstwach na wewnętrznej powierzchni wieńca i szerokości odbarwionego pasa, dla kół poddanych nagrzewaniom z mocami 38 i 42 kW. Widoczne są wahania wartości naprężenia obwodowego o blisko 50 MPa i doskonała zgodność przebiegów krzywych naprężenia i odbarwienia.



Rys. 135. Obwodowe rozkłady obwodowych naprężeń w powierzchniowej warstwie materiału na wewnętrznej powierzchni wieńca i szerokości odbarwionego pasa. Koło poddane nagrzewaniu z mocą 38 kW.

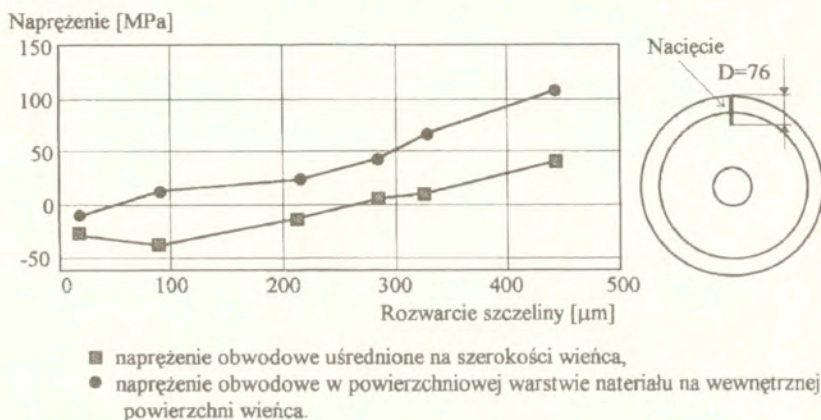


Rys. 136. Obwodowe rozkłady obwodowych naprężeń w powierzchniowej warstwie materiału na wewnętrznej powierzchni wieńca i szerokości odbarwionego pasa. Koło poddane nagrzewaniu z mocą 42 kW.

Tak dobra, niespotykana niestety w kołach eksploatowanych na torach, zależność szerokości odbarwienia od naprężenia obwodowego w kołach nagrzewanych indukcyjnie może być wytłumaczona tym, że powierzchnie badanych kół były czyste, bez śladów korozji i bez powłok malarskich. Dzięki temu możliwe było wykonanie dokładnych pomiarów szerokości odbarwionego pasa. Dodatkowo, wszystkie koła nagrzewane były w podobnych warunkach, w pomieszczeniu zamkniętym. Co ciekawe jest to według wiedzy autora jedyny doświadczalny dowód na istnienie korelacji szerokości odbarwionego pasa z wartością naprężeń obwodowych we wieńcu koła monoblokowego. Został on jednak uzyskany w warunkach dalekich od

spotykanych w praktyce i w kilka lat po zaniechaniu stosowania tej prostej, ale niewiarygodnej, techniki eliminowania kół podejrzewanych o wysokie, niebezpieczne naprężenia rozciągające.

Po zakończeniu opisanych wyżej badań ultradźwiękowych sześć z dziesięciu zbadanych kół poddanych zostało prostym badaniom niszczącym. Polegały one na promieniowym przecięciu koła do głębokości $D=76$ mierzonej od wierzchołka kołnierza koła i ekstensometrycznym pomiarze, również na wierzchołku kołnierza, rozwarcia szczeliny wywołanej uwolnieniem naprężeń obwodowych. Ten sposób badania pozwolił jedynie na jakościowe stwierdzenie, czy we wieńcach badanych kół panowały obwodowe naprężenia ściskające czy rozciągające. Porównanie wartości naprężeń obwodowych wyznaczonych techniką ultradźwiękową i zmierzonego po przecięciu kół rozwarcia szczeliny pokazuje rysunek 137.



Rys. 137. Porównanie wyznaczonych techniką ultradźwiękową wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i zmierzonych na wewnętrznej jego powierzchni z rozwarciem szczeliny po przecięciu koła na głębokości 76 mm.

Dla kół nowych, w których wartości naprężenia obwodowego ocenionego techniką ultradźwiękową są ujemne, zaobserwowano nieznaczne rozwieranie się szczeliny, sugerujące występowanie we wieńcach tych kół naprężeń rozciągających. Jest to zapewne spowodowane występowaniem nieznanymi naprężeń własnych w kołnierzach kół i niefortunnym wyborem wierzchołka kołnierza koła jako punktu pomiaru rozwarcia szczeliny.

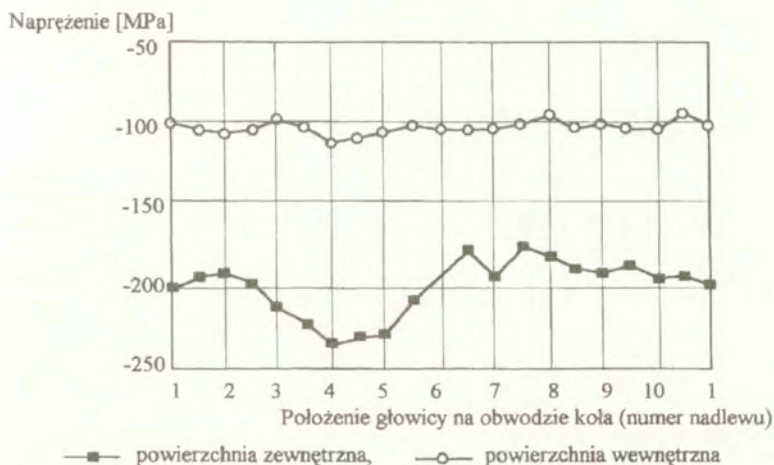
5.3.3.2. Badania kół hamowanych w hamowni

W roku 1995 autor brał udział w cyklu badań naprężeń w kołach lanych poddanych hamowaniu w hamowni w Bensenville. Budowa tej hamowni opisana jest w [198]. W odróżnieniu od standardowych hamowni, w Bensenville hamowane jest nie jedno koło a zestaw kołowy (dwa koła osadzone na wspólnej osi). Napęd przekazywany jest nie na os zestawu lecz przez stykający się z nim drugi zestaw kołowy. Koła zestawu napędzającego posiadają wieńce w kształcie główki szyny i wieńcami tymi stykają się z powierzchniami jezdnyymi kół zestawu badanego. W ten sposób hamownia imituje warunki pracy koła na torze.

Badane koła pozostają w ciągłym kontakcie z „kołami szynowymi”, a klocki hamulcowe dociskane są do badanych kół jak w wagonie towarowym.

Pojemność cieplna koła „szynowego” jest jednak wielokrotnie mniejsza niż szyny i jego temperatura szybko rośnie w czasie hamowania. Tak więc i w tym przypadku spodziewać się można, że maksymalne temperatury osiągane przez koła i przyrosty naprężeń są inne niż w kołach pracujących na rzeczywistych torach kolejowych. Przykładowo, po 30 minutach hamowania z mocą 60 kW koło hamowane osiągało temperaturę około 500°C a „koło szynowe” temperaturę 200°C. Koła poddawane były cyklem hamowań z różnymi mocami i przy różnych położeniach klocków hamulcowych na szerokości powierzchni jezdnej.

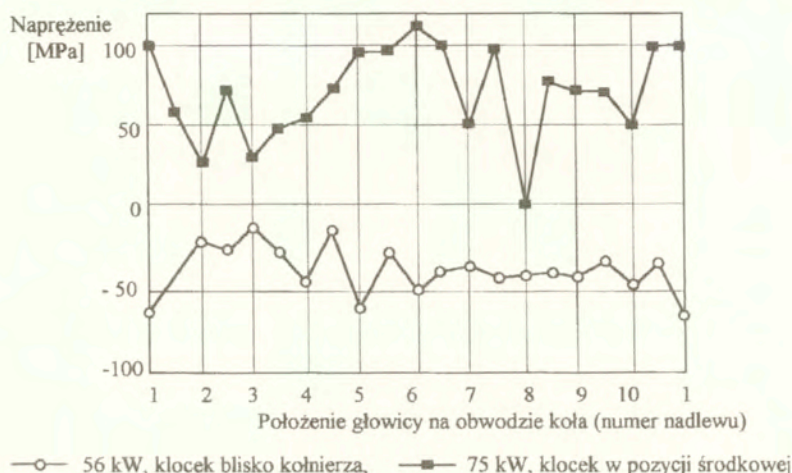
Do badań przygotowano 20 kół tego samego typu co koła badania w latach 1992-3 (koła standardowe ze stożkową tarczą). Badania prowadzono na kołach zamontowanych w hamowni, między kolejnymi cyklami hamowania. Utrudniony dostęp do kół i ograniczony czas przeznaczony na pomiary umożliwił wykonanie pomiarów jedynie w sześciu miejscach (3 miejsca w pobliżu nadlewów, 3 - między nimi). Tylko niektóre koła, po zakończeniu hamowań i po ich zdjęciu z osi zestawu, poddano badaniom w 20 punktach na obwodzie podobnie jak badano koła nagrzewane indukcyjnie. Wyniki pomiarów wykonanych na jednym z tych kół falami podpowierzchniowymi na obu bocznych powierzchniach wieńca pokazuje rysunek 138. Widoczna jest stała wartość naprężenia obwodowego w powierzchniowej warstwie na powierzchni wewnętrznej i zmienne na obwodzie wartości tego naprężenia na powierzchni zewnętrznej. Wartości naprężenia obwodowego na tej powierzchni zmieniają się o więcej niż 50 MPa (podobnie jak w kołach lanych poddanych nagrzewaniom indukcyjnym).



Rys. 138. Obwodowe rozkłady naprężeń obwodowych na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni koła poddanego hamowaniu z mocą 63 kW, z klockiem hamulcowym ustawionym na środku powierzchni jezdnej.

Przykładowe wyniki pomiarów wykonanych głowicą normalną (pomiar dwójłomności akustycznej i ocena wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca) pokazuje rysunek 139. W kole po hamowaniu z mocą 56 kW występują naprężenia ściskające o średniej wartości równej -37 MPa. W kole po hamowaniu z mocą 75 kW średnia wartość

naprężenia wynosi 75 MPa. W odróżnieniu od wartości naprężeń obwodowych badanych falami podpowierzchniowymi, wartości dwójłomności akustycznej wykazują cykliczne wahania związane z obecnością nadlewów i związanych z nimi zmian tekstury materiału wieńca.

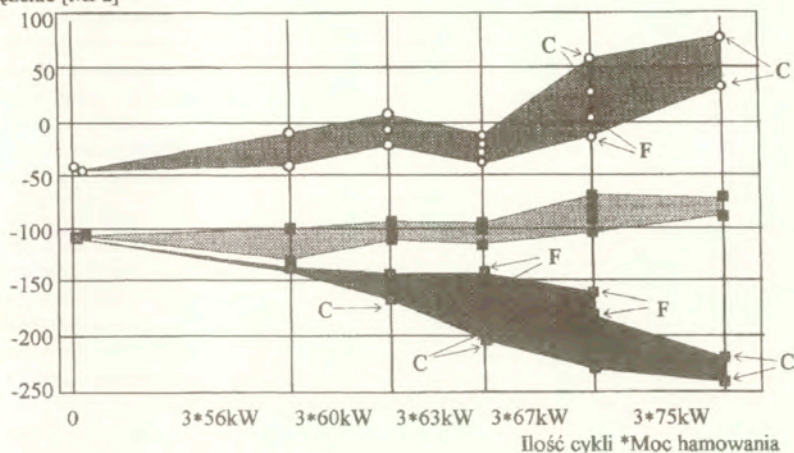


Rys. 139. Obwodowe rozkłady obwodowych naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca w kołach poddanych hamowaniu z mocą 56 kW i klocek hamulcowym w pobliżu kołnierza oraz mocą 75 kW z klocek na środku powierzchni jezdnej.

Zbiorcze zestawienie wyników badań ultradźwiękowych wykonanych na kołach poddanych hamowaniu w Bensenville przedstawia rysunek 140. Jest to zależność średnich wartości naprężeń zmierzonych na obu powierzchniach wieńców i naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca od mocy hamowania.

Na wykresie literami C i F zaznaczono jaka była pozycja klocka hamulcowego względem wieńca koła w czasie hamowania. Obwodowe naprężenia uśrednione na szerokości wieńca, wskutek hamowania z mocami do 75 kW, zmieniają się od ściskających w kołach nowych do rozciągających naprężeń o wartościach 35 - 75 MPa. Wartości naprężeń obwodowych w powierzchniowych warstwach materiału na wewnętrznych powierzchniach wieńców zmieniają się nieznacznie. Nawet po hamowaniach z mocami 75 kW obserwowane są na tych powierzchniach obwodowe naprężenia ściskające o wartościach nieznacznie tylko niższych niż naprężenia panujące w kołach przed hamowaniami. Największe zmiany naprężeń obwodowych zachodzą na zewnętrznych powierzchniach wieńców. Przyrosty naprężeń na tych powierzchniach wynoszą około -150 MPa. Oznacza to, że od początkowych wartości około -100 MPa zmieniają się one do naprężeń ściskających o wartościach -220 ÷ -240 MPa. Pewien wpływ na rozkład naprężeń obwodowych na szerokości wieńca ma pozycja klocka hamulcowego w czasie hamowania. Dla kół hamowanych klockami ustawionymi w środkowej części powierzchni jezdnej przyrosty naprężeń są większe niż dla kół hamowanych klockami ustawionymi w pobliżu kołnierza. Dotyczy to szczególnie naprężeń na powierzchniach wieńca, gdzie zmiany naprężeń spowodowane hamowaniami są największe.

Naprężenie [MPa]



○ - naprężenia obwodowe uśrednione na szerokości wieńca

■ - naprężenia obwodowe w powierzchniowej warstwie na zewnętrznej powierzchni wieńca

■ - naprężenia obwodowe w powierzchniowej warstwie na wewnętrznej powierzchni wieńca

Pozycje klocka hamulcowego: F - klocek hamulcowy przyciskany do kołnierza wieńca koła
C - klocek hamulcowy na środku powierzchni toczonej koła.

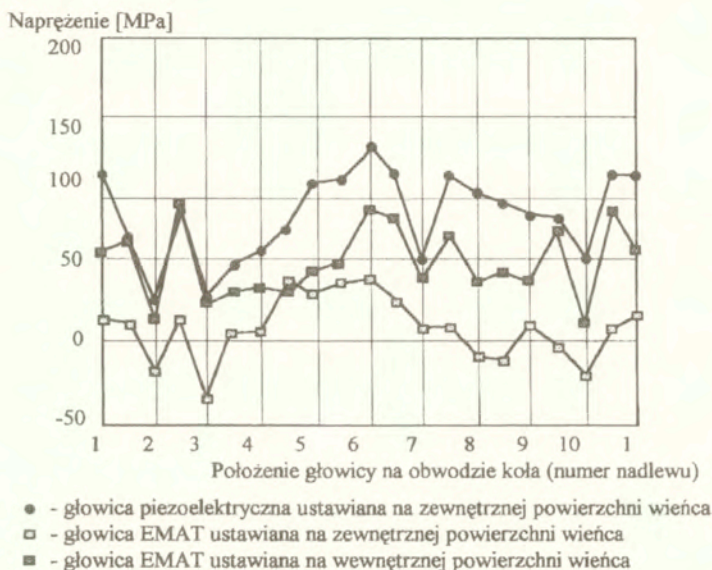
Rys. 140. Zbiornicze zestawienie wyników uzyskanych na kołach poddanych hamowaniu w Bensenville - zależność średnich wartości naprężeń obwodowych zbadanych na obu powierzchniach wieńców i naprężenia obwodowego uśrednionego na szerokości wieńca od mocy hamowania.

Porównując wyniki pomiarów uzyskanych na kołach nagrzewanych indukcyjnie (rysunek 132, strona 191) i hamowanych w hamowni (rysunek 140) widać, że tym samym mocem hamowania i nagrzewania indukcyjnego odpowiadają różne przyrosty naprężeń obwodowych. Są one większe dla kół nagrzewanych indukcyjnie. Różnica ta spowodowana jest tym, że w czasie nagrzewania indukcyjnego cała energia doprowadzana do cewki zamieniana jest na ciepło powodujące wzrost temperatury wieńca leżącego bez ruchu koła. W przypadku hamowania w hamowni z kołami szynowymi szacuje się, że około 50% energii cieplnej powstającej w czasie tarcia klocka hamulcowego o koło pochłaniane jest przez powietrze otaczające koło i oddawane jest do „kół szynowych”.

W kołach nagrzewanych indukcyjnie zmiany naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i naprężeń obwodowych mierzonych na zewnętrznej powierzchni wieńca były podobne. W kołach hamowanych w hamowni przyrosty naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca są kilkakrotnie większe niż zmiany naprężeń na wewnętrznych powierzchniach wieńca. Różnice te świadczą o tym jak istotny wpływ na wartości i rozkłady obwodowych naprężeń własnych w kołach tego samego typu ma sposób realizacji obciążenia cieplnego wieńca koła.

W niektórych kołach poddanych hamowaniu i badanych w 20 punktach na obwodzie zauważono cykliczne zmiany wartości naprężeń obwodowych na obwodzie. Rysunek 141 pokazuje wyniki pomiarów wykonanych na jednym z takich kół. Przedstawione są na nim

obwodowe rozkłady naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca, uzyskane głowicami piezoelektrycznymi i typu EMAT, którymi pomiary prowadziła ekipa amerykańska. Głowica typu EMAT pomiary wykonano dwukrotnie przykładając ją zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wieńca. Głowicą piezoelektryczną autor wykonał pomiary sprzegając ją jedynie do powierzchni zewnętrznej ponieważ niezależnie od powierzchni wieńca, do której głowice sprzegano, uzyskiwane wyniki były jednakowe (patrz rysunek 123 na stronie 183). W kole tym autor zaobserwował falisty rozkład naprężeń na obwodzie z dwoma maksimumami i minimummi. Ten sam rozkład potwierdzony został wynikami pomiarów wykonanych głowicą z przetwornikiem typu EMAT. Jednym z powodów widocznej na wykresie różnicy wartości naprężeń zmierzonych głowicami piezoelektryczną i typu EMAT był różny sposób skalowania obu aparatów.



Rys. 141. Obwodowe naprężenia uśrednione na szerokości wieńca koła lanego, poddanego hamowaniu w hamowni z „kołami szynowymi”. Wyniki uzyskane głowicami z przetwornikami piezoelektrycznym i typu EMAT.

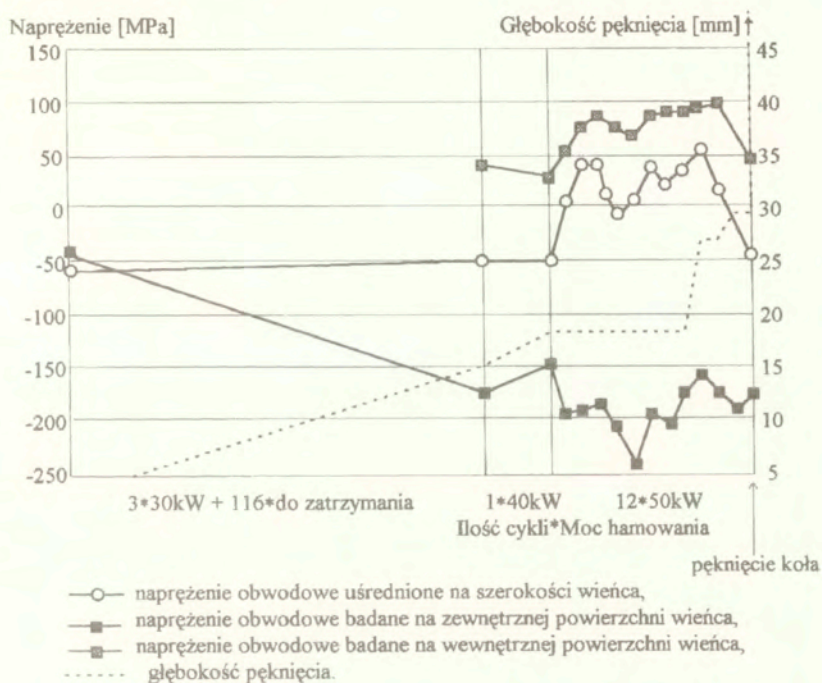
Występowanie dwóch maksimumów i dwóch minimumów wartości naprężeń odległych od siebie o około połowę obwodu sugerowało, że przyczyną takiego rozkładu naprężeń może być owalny kształt koła (wieńce kół lanych nie są obrabiane mechanicznie i odwzorowują kształt formy). W miejscach o „większej” średnicy siły tarcia między klockiem hamulcowym a powierzchnią jezdnią koła mogły być największe co prowadziło by do silniejszego nagrzewania się wieńca koła w tych obszarach i powstawania, po ostygnięciu koła, obwodowych naprężeń własnych o wyższych wartościach. Zjawiska tego nie zaobserwowano w czasie badań kół nagrzewanych indukcyjnie gdzie wielkość szczeliny między powierzchnią jezdnią a cewką indukcyjną była bardziej zależna od kształtu cewki niż drobnych odchyłań wieńca od kolistości.

Analiza fourierowska wyników badań kół poddanych hamowaniu w hamowni [219] potwierdziła okresową zmienność wartości naprężeń obwodowych jednak wskazały na brak

osiowej symetrii rozkładu naprężeń obwodowych. Tym samym wykluczyły owalizację koła jako powód obserwowanych obwodowych rozkładów naprężeń.

Poza badaniami wykonanymi przez autora lub przy jego udziale aparaty DEBRO i zestawy głowic ultradźwiękowych wykorzystywane były również w badaniach odlewanych kół monoblokowych prowadzonych przez innych badaczy. W roku 1993 prof. Julian Deputat przeprowadził pomiary zmian naprężeń obwodowych we wieńcach kół poddanych hartowaniu indukcyjnemu. Hartowana była jedynie powierzchnia toczna koła, więc można było uznać, że anizotropia teksturalna w części wieńca, w której rozchodziły się fale ultradźwiękowe nie była w wyniku obróbki zmieniona. Wyniki pokazały, że proces hartowania powodował w przyrost ściskających (bezpiecznych) naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca średnio o 100 MPa.

W roku 1995 w Centrum Naukowo Technicznym Kolejnictwa prowadzone były badania zmian obwodowych naprężeń własnych w kołach lanych, produkcji amerykańskiej [220]. Rysunek 142 pokazuje przykładowe wyniki uzyskane w czasie hamownia jednego z kół.



Rys. 142. Rozwój obwodowych naprężeń własnych i głębokości pęknięcia we wieńcu koła lanego hamowaniami w hamowni.
(Pomiary wykonane aparatem DEBRO-30 przez zespół CNTK Warszawa).

Celem badań było poszukiwanie korelacji między przyrostami naprężeń obwodowych a rozwojem pęknięcia wykonanego we wieńcu badanego koła. Podobnie jak w kołach nagrzewanych indukcyjnie i hamowanych w hamowni z „kołami szynowymi”, na zewnętrznej

powierzchni wieńca obserwowane były przyrosty naprężeń ściskających. Wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i na wewnętrznej powierzchni wieńca zmieniały się od ściskających w kołach przed hamowaniami do rozciągających po cyklu hamowań. Zaobserwowane spadki bezwzględnych wartości naprężeń po ostatnich cyklach hamowania wywołane były odprężającym działaniem głębokiego już promieniowego pęknięcia we wieńcu. Eksperyment, którego wyniki pokazane są na rysunku 142 doprowadził do zniszczenia koła (pęknięcia wieńca i tarczy aż do piasty) w czasie 12-go cyklu hamowania z mocą 50 kW.

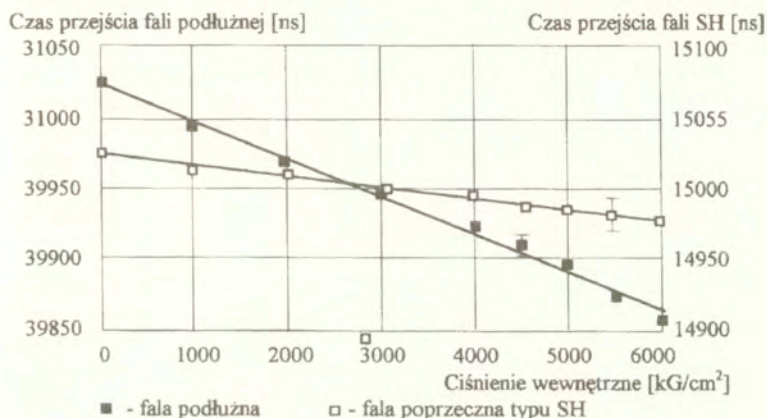
Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez autora i innych badaczy na standardowych kołach lanych pokazują, że w kołach tych, w odróżnieniu od kół kutych i pomijając naprężenia będące wynikiem nacisków koła na szynę, w wyniku obciążeń cieplnych rozwija się złożony stan naprężeń. Wieniec takiego koła poddany jest rozciąganiu i zginaniu. Wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca, podobnie jak w zginanej belce, zmieniają się nieznacznie w stosunku do wartości naprężeń na wewnętrznej powierzchni wieńca. Efekt ten jest szczególnie widoczny w kołach nagrzewanych indukcyjnie. Oznacza to, że optymalnym sposobem wyróżniania spośród kół standardowych kół uszkodzonych cieplnie jest pomiar wartości naprężenia na wewnętrznej powierzchni wieńca. W tym obszarze materiału zmiany wartości naprężenia obwodowego są największe i naprężenie obwodowe osiąga maksymalne wartości. Badanie naprężeń w kołach standardowych prowadzone jedynie techniką pomiaru dwójłomności materiału wieńca, informujące o wartości naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca, nie zawsze pozwoli wykryć i wyeliminować koła o wysokich obwodowych naprężeniach rozciągających. Tym bardziej, że wskutek stwierdzonych wahań anizotropii strukturalnej wywołanej obecnością nadlewów, wyniki pomiarów naprężeń uśrednionych mogą być obciążone błędem lub konieczne jest wykonanie kilku pomiarów i obliczanie ich średniej wartości. Przemawia to za wykorzystaniem w praktycznych badaniach, zakładając, że w USA technika ultradźwiękowa znajduje praktyczne zastosowanie, stanu naprężeń obwodowych we wieńcach standardowych kół lanych jedynie falami podpowierzchniowymi. Pomiary na wewnętrznej powierzchni wieńca mogą dostarczyć informacji o maksymalnej wartości obwodowego naprężenia pochodzenia termicznego. Pomiary na obu powierzchniach wieńca mogą informować o różnicy naprężeń obwodowych na tych powierzchniach, która zgodnie z wynikami pokazanymi na rysunkach 132, 140 i 142 wydaje się być proporcjonalna do obciążenia ceplego jakiemu poddane było koło. Dodatkowym argumentem za badaniami kół lanych falami podpowierzchniowymi jest to, że struktura powierzchni wieńca koła lanego jest jednakowa na całym obwodzie koła i na obu jego powierzchniach (struktura dendrytyczna). Powoduje to, że wahania czasów przejścia fal podpowierzchniowych na obwodzie koła są małe. W przypadku badania jedynie różnicy naprężeń obwodowych na dwóch powierzchniach wieńca stałość struktury, i związana z tym stałość czasów przejścia fal w stanie bez naprężenia, umożliwiła prowadzenie badań bez potrzeby skalowania aparatu.

5.4. INNE ZASTOSOWANIA

Zestawy głowic ultradźwiękowych budowane przez autora wykorzystywane były w badaniach obiektów innych niż szyny czy koła kolejowe. Jednym z pomiarów wykonanych przez autora było badanie zmian naprężeń w grubościennnej rurze stalowej poddanej ciśnieniu wewnętrznemu równemu 6000 atm. W ścianie takiej rury powstaje trójwymiarowy stan naprężenia a wartości naprężeń głównych powiązane są ze sobą i zależą od geometrii rury i wartości ciśnienia [221]. Pomiary przeprowadzono w Zakładzie Wysokich Ciśnień PAN i

wykorzystani w nich 12-przetwornikowy zestaw głowic na podpowierzchniowe fale podłużne i poprzeczne typu SH. Zestaw ustawiany był na zewnętrznej powierzchni rury, wzdłuż jej tworzącej. Fala podłużna wykazuje wysoką „czułość” na składową podłużną naprężenia, fala poprzeczna SH - na składową obwodową. Obydwie składowe naprężenia są dodatnie (rozciąganie). Rysunek 143 pokazuje zależność czasów przejścia tych fal od ciśnienia wewnętrznego.

Przykład ten pokazuje, że w pewnych przypadkach, gdy wartości naprężeń głównych są powiązane, pomiary czasów przejścia fal na jednej tylko powierzchni i rozchodzących się w jednym kierunku pozwalają na wyznaczenie wartości trzech składowych naprężenia. Te same informacje można było uzyskać wykorzystując w pomiarze podłużną falę podpowierzchniową i fale poprzeczne rozchodzące się w kierunku grubości ścianki rury. Czasy



Rys. 143. Wyniki pomiarów zmian czasu przejścia podpowierzchniowych fal podłużnej i poprzecznej typu SH rozchodzących się wzdłuż tworzącej po zewnętrznej powierzchni grubościenniej rury poddanej ciśnieniu wewnętrznemu.

przejścia fal poprzecznych spolaryzowanych w kierunku podłużnym i obwodowym niosły by odpowiednio informacje o uśrednionych na grubości ścianki rury naprężeniach podłużnym i obwodowym.

Do pomiaru zmian uśrednionego na grubości naprężenia promieniowego użyta może być fala podłużna rozchodząca się w kierunku grubości. Czas przejścia tej fali zależny jest jednak również od wartości składowych podłużnej i obwodowej naprężenia.

W dalszej części rozdziału przedstawione są dwa przykłady praktycznego (przemysłowego) wykorzystania tensometrii ultradźwiękowej - w pomiarach zmian naprężeń w kolumnach prasy hydraulicznej oraz w pomiarach rozkładów podłużnej składowej naprężeń własnych w wale okrętowym.

5.4.1. Badania zmian naprężeń w kolumnach prasy hydraulicznej

Obiektem pomiarów były kolumny prasy hydraulicznej w fabryce płyt pilśniowych. Siły prasowania między górną i dolną ramą prasy, pomiędzy które wkładane są prasowane płyty,

przenoszone są przez szereg stalowych kolumn. Kolumny te to stalowe walce o średnicy 350 mm i długości około 6 metrów. Siły rozciągające, którym są one poddane, przenoszone są przez gwinty nacięte na końcach kolumn i specjalne nakrętki opierające się o gniazda w ramach prasy. Pomimo stosunkowo niskich naprężeń obliczeniowych obserwowano przypadki pęknięcia kolumn. W obszarach gwintowanych powstawały pęknięcia zmęczeniowe, których rozwój prowadził do pęknięcia kolumny i unieruchomienia prasy. Jedną z przyczyn powstawania pęknięć mogło być nierównomierne obciążenie poszczególnych kolumn wynikające z różnego stopnia dokręcenia nakrętek.

Kolumny pracują w gorącym, korozyjnym środowisku i w czasie cyklu prasowania polewane są zawieszoną wypływającą ze ściskanych płyt. W takich warunkach wykorzystanie tensometrów oporowych do kontroli równomierności naprężeń w poszczególnych kolumnach było praktycznie niemożliwe. Również inne techniki pomiaru naprężeń, jak metoda dyfrakcji promieni X, nie mogły być zastosowane ze względu na warunki pracy kolumn.

Zaproponowane zostały badania ultradźwiękowe polegające na pomiarach czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych w wybranych miejscach kolumn w czasie gdy kolumny były odciążone oraz w czasie pracy, gdy w kolumnach panowały naprężenia rozciągające. Do pomiarów wybrano zestaw głowic na fale o częstotliwości 2 MHz i długości bazy pomiarowej równej 450 mm. Był to zestaw 6-przetwornikowy wykorzystujący efekt „lustra”. Częstotliwość 2 MHz miała zapewnić uzyskanie impulsów o amplitudach wystarczających do wykonania pomiarów na szorstkich, zabrudzonych powierzchniach kolumn, a długa baza pomiarowa - uzyskanie możliwie wysokiego stosunku przyrostu czasu przejścia do przyrostu naprężenia. Dla zastosowanego zestawu głowic stosunek ten wynosił 1 ns/MPa.

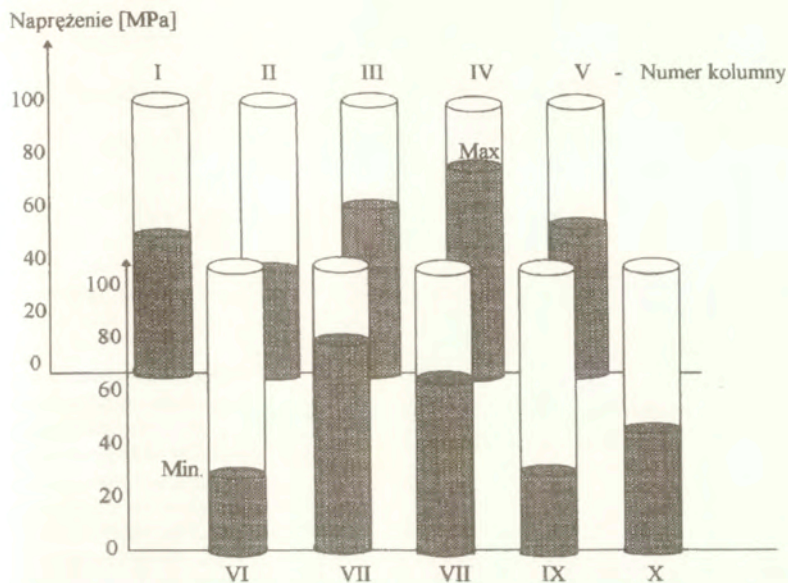
Pomiary w fabryce wykonał dr M. Adamski. Na każdej z kolumn przygotowane zostały trzy miejsca pomiarowe a pozycje głowicy na kolumnie starannie zaznaczono. Te trzy punkty pomiarowe, rozłożone co 120° na obwodzie kolumny, miały wykazać czy kolumna poddawana jest czystemu rozciąganiu czy też nierównomierny rozkład obciążeń przenoszonych przez ramę prasy na nakrętkę wywołuje dodatkowo zginanie kolumny.

Pierwszą serię pomiarów wykonano w czasie gdy prasa pozostawała otwarta zakładając, że w tym czasie siły podłużne przenoszone przez kolumny są równe zero. Drugą serię pomiarów wykonano w czasie prasowania. Pomiary wykonywano w tych samych miejscach co oznacza, że jedyne czynniki mogącymi wpływać na czas przejścia fali były temperatura, naprężenie i zmiany wynikające z niepowtarzalności sprzężenia akustycznego.

Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 144. Są to średnie wartości naprężeń zmierzonych w każdej z kolumn. Ich wartości obliczono przyjmując, że wartość stałej elastoakustycznej dla stali, z której wykonano kolumny wynosi $\beta_{111}=1,25 \cdot 10^{-3}$ [MPa⁻¹] (wartość ta nie była zmierzona doświadczalnie). Średnia wartość naprężenia dla wszystkich dziesięciu kolumn wynosi 51 MPa co oznacza, że średnio każda z kolumn poddana jest rozciąganiu z siłą bliską 2000 ton. Najwyższą wartość naprężenia, równą 80 MPa, stwierdzono w kolumnie Nr 4, a najniższą, równą 29 MPa, w kolumnie Nr 6.

Uzyskane wyniki świadczą, że obciążenia kolumn nie są jednakowe. Przyjmując nawet, że wartości naprężeń wyznaczane są z błędem +/- 10% wynikającym z nieznannej i być może zmiennej wartości współczynnika elastoakustycznego, uzyskane wyniki pokazują, że niektóre z kolumn obciążone są siłami przekraczającymi średnią wartość o około 50%. Te nierównomierne, cykliczne obciążenia mogły być jedną z przyczyn wcześniejszego rozwoju pęknięć zmęczeniowych w kolumnach, w których naprężenia osiągały maksymalne wartości.

Wartości naprężeń mierzonych w trzech miejscach na obwodzie kolumny nie wykazały różnic większych niż błąd pomiarowy wynoszący +/- 10 MPa. Przykładowo w kolumnie Nr IV, poddanej największemu obciążeniu, ich wartości wyniosły 72, 77 i 92 MPa.



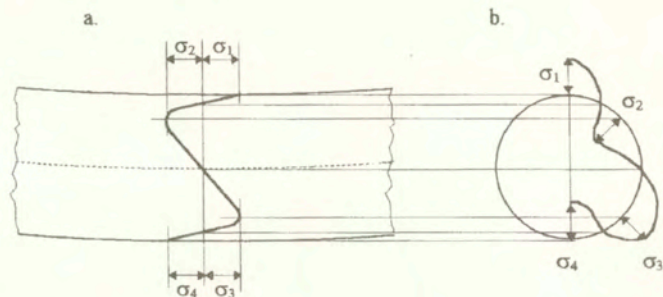
Rys. 144. Wartości naprężeń rozciągających w poszczególnych kolumnach prasy hydraulicznej w fabryce płyt spłśnionych. (pomiarzy dr M. Adamskiego)

Pomiary naprężeń w kolumnach prasy to przykład najprostszego wykorzystania tensometrii ultradźwiękowej. Ocena wartości naprężeń była możliwa pomimo, że bezwzględne wartości prędkości propagacji fal w poszczególnych kolumnach były różne. Wynikało to prawdopodobnie z nieznacznych różnic w składzie chemicznym, strukturze czy wartościach naprężeń własnych w poszczególnych kolumnach wykonanych w różnych okresach i różnych hutach.

5.4.2. Badania rozkładów naprężeń własnych w wałach okrętowych.

Jednym z wymagań stawianych wałom okrętowym jest długookresowa stabilność kształtu. Jedną zaś z przyczyn braku stabilności geometrycznej może być uwalnianie naprężeń własnych w czasie pracy, będące wynikiem zmiennych obciążeń przenoszonych przez wał i wibracji. Odkształcenia wału wywołane uwalnianiem naprężeń własnych zależą od rozkładu tych naprężeń. Jeżeli rozkład ma charakter kołosymetryczny to równomierne zmiany wartości naprężeń własnych nie powodują zmian geometrii wału (ugięcia wału) i jego własności eksploatacyjnych.

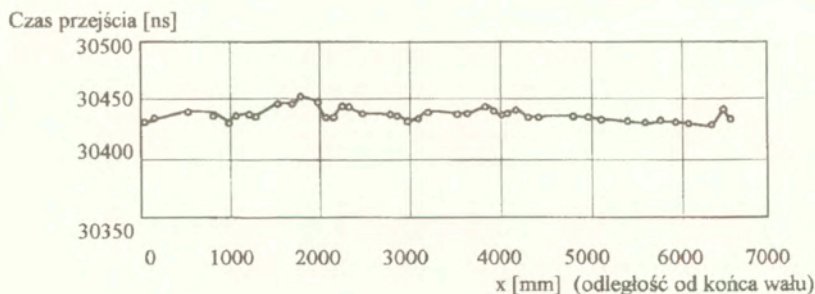
W odkuwce wału należy się spodziewać niskich wartości naprężeń własnych co wynika z niskiej granicy plastyczności gorącej w czasie kucia stali i zachodzących w niej procesów rekrytalizacji. Wysokie naprężenia własne wywołane mogą być w czasie prostowania odkuwki na gorąco, przy temperaturze niższej niż temperatura rekrytalizacji lub podczas prostowania na zimno. Rozkład naprężeń własnych w pręcie o przekroju kołowym, zgiętym na zimno, pokazuje rysunek 145. Rozkład wartości własnych na powierzchni pręta, w układzie biegunowym, tworzy charakterystyczną trójlistną koniczynkę. Oś symetrii tej koniczynki leży w płaszczyźnie działania momentu zginającego pręt [222].



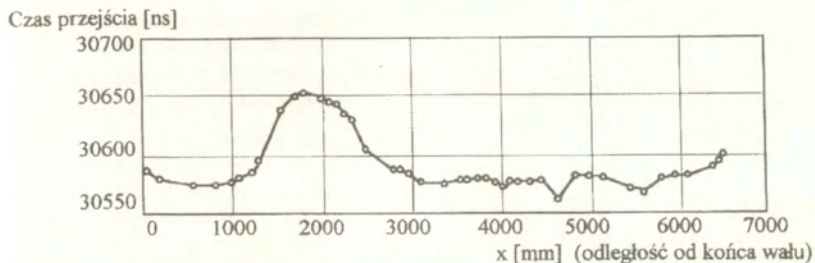
Rys. 145. Rozkłady naprężeń własnych w pręcie o kołowym przekroju poddanym plastycznemu zgięciu.

- a. - w przekroju pręta,
- b. - wartości podłużnej składowej naprężenia na powierzchni pręta w układzie biegunowym.

W roku 1992 zespół pracowników IPPT wykonał badania kilku wałów okrętowych [40]. Badania prowadzone były falami podpowierzchniowymi propagującymi się wzdłuż tworzącej wału. W pracy wykorzystano 12-przetwornikowy zestaw głowic na podłużne i poprzeczne fale podpowierzchniowe o częstotliwości 4 MHz. Rysunki 146 i 147 przedstawiają rozkład czasów przejścia fal na długości jednego z wałów. Są to czasy zmierzone w 46 punktach pomiarowych ułożonych wzdłuż jednej tworzącej. Widoczne są wahania czasu przejścia fali poprzecznej (rysunek 146) mieszczące się w granicach ± 13 ns i wyraźne maksimum czasu przejścia fali podłużnej, dla położenia głowicy $x = 1500 \pm 2000$ mm (rysunek 147). Stałość czasu przejścia fali poprzecznej, niezależnie od podłużną składową naprężenia, oznacza, że właściwości sprężyste materiału wału na jego długości i są stałe. Zmiana czasu przejścia fali podłużnej świadczy o lokalnym spiętrzeniu podłużnej składowej naprężenia. Na tę właśnie składową falą

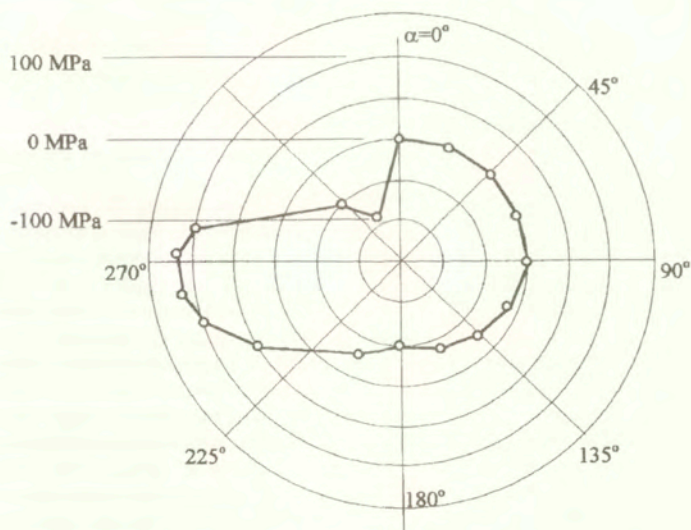


Rys. 146. Rozkład czasów przejścia podpowierzchniowych fal poprzecznych SV (kierunek polaryzacji fal prostopadły do powierzchni) na długości wału okrętowego. Kierunek propagacji fal - wzdłuż tworzącej wału.



Rys. 147. Rozkład czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych na długości wału. Kierunek propagacji fal - wzdłuż tworzącej wału.

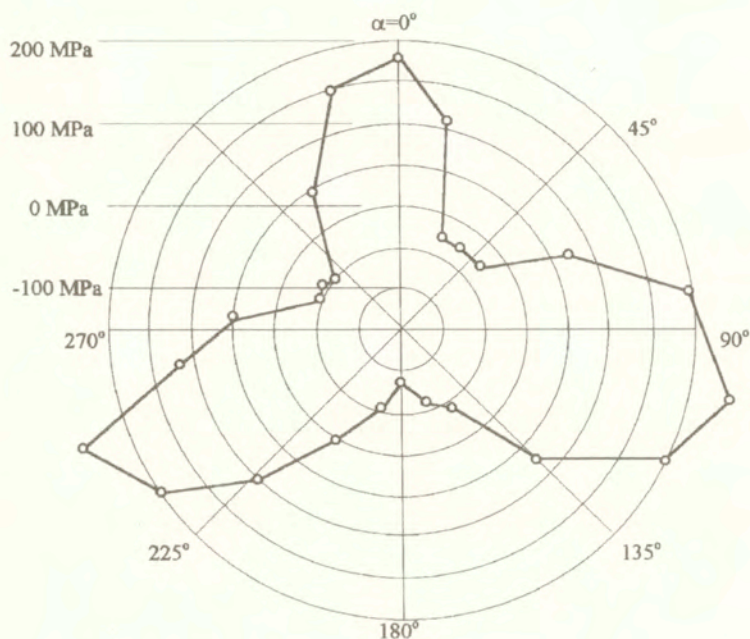
podłużna rozchodząca się wzdłuż tworzącej jest czuła. Dla współrzędnej $x=1600$ mm wykonano pomiary naprężeń na obwodzie walca. Wartości naprężeń obliczono uwzględniając poprawkę strukturalną a ich rozkład na obwodzie wału pokazuje rysunek 148. Widoczny jest niesymetryczny rozkład wartości podłużnej składowej naprężenia na obwodzie. Na części obwodu wyznaczonej kątami α od 0° do 90° wartości naprężeń są równe zero. Dla kąta α równego 270° widoczne jest maksimum wartości naprężeń ściskających, zaś dla $\alpha =$ około 320° - maksimum naprężeń rozciągających. Taki stan naprężeń własnych mógł być wywołany na przykład prostowaniem wału na gorąco, przy nierównomiernym rozkładzie temperatur.



Rys. 148. Obwodowy rozkład podłużnej składowej naprężenia na powierzchni wału.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na obwodzie innego wału pokazuje rysunek 149. Rozkład wartości podłużnej składowej naprężenia na obwodzie wału tworzy symetryczną

koniczynkę. Położenia maksymalnych wartości naprężeń ściskających odpowiadają kątom α równym 0, 105 i 245°. Pomiedzy nimi na obwodzie wału panują maksymalne naprężenia rozciągające. Zaobserwowany rozkład naprężeń na powierzchni tego wału świadczy o tym, że poddany on został zgięciu (prostowaniu) na zimno, na przykład na prasie.



Rys. 149. Rozkład podłużnej składowej naprężenia na obwodzie wału zgiętego na zimno. Naprężenia w powierzchniowej warstwie materiału walca.

Przedstawione wyniki badania wałów pokazują, że technika ultradźwiękowa dostarczyć może ważnych informacji o stanie naprężeń własnych w powierzchniowych warstwach materiału cylindrycznych odkuwek. Elementy takie jak wały okrętowe czy walce hutnicze, w których pomiary naprężeń własnych techniką ultradźwiękową były także prowadzone [140], posiadają zazwyczaj starannie obrobione, gładkie powierzchnie co umożliwia uzyskanie powtarzalnego sprzężenia akustycznego głowic do ich powierzchni. Dodatkowo te odpowiedzialne części maszyn wykonywane są ze stali o wysokiej czystości i jednorodności dzięki czemu własności akustyczne materiału są również stałe. Pozwala to na powiązanie wartości zmian określonych składowych naprężeń własnych z prędkością propagacji fali ultradźwiękowej jednego tylko rodzaju. W przypadku wałów i podłużnej składowej naprężenia taką falą jest fala podłużna rozchodząca się wzdłuż tworzącej. Wiedza o stanie naprężeń w elementach, od których wymagana jest stabilność kształtu pozwala na wyeliminowanie wadliwych elementów lub odpowiednio wczesną poprawę stanu naprężeń przez obróbkę cieplną.

5.5. Nieudane próby zastosowań

Autor próbował zastosować ultradźwiękowe pomiary naprężeń w badaniach naprężeń własnych korbowodów silników wysokoprężnych. W powierzchniowych warstwach korbowodów, poddawanych kulowaniu, panują naprężenia ściskające podnoszące odporność zmęczeniową tych części. Dla producentów interesujące były wartości tych naprężeń oraz wahania wartości naprężeń pomiędzy poszczególnymi korbowodami. Autor wykonał specjalny zestaw głowic na podłużna fale podpowierzchniowe rozchodzące się wzdłuż korby, z klinami załamującymi dopasowanymi do kształtu korby. Częstotliwość fal wynosiła 4 MHz co odpowiadało długości fali w stali równej 1,5 mm. Długość odcinka pomiarowego, ze względu na krzywizny powierzchni korbowodu, była ograniczona jedynie do 45 mm. Pomiary przeprowadzone zostały na dwóch korbowodach, które według informacji producenta różniły się stanem naprężeń. Uzyskane wyniki wykazały, że powtarzalność pomiaru czasu przejścia fal wynikająca z niepowtarzalności ustawienia zestawu głowic na wypukłej powierzchni korbowodu są o rząd większe niż spodziewane różnice wynikające z różnic naprężeń własnych.

Inną nieudaną próbą zastosowania tensometrii były badania piór resorów samochodów ciężarowych. Pióra takie, wykonane z płaskownika ze stali sprężynowej, poddane były obróbce powierzchniowej polegającej na wprowadzeniu silnych naprężeń ściskających w cienkiej powierzchniowej warstwie materiału. Wyniki pomiarów naprężeń własnych na powierzchni wykonanych techniką dyfrakcji promieni X wykazały, że panują na niej naprężenia ściskające o wartościach składowych σ_1 i σ_2 (σ_3 to składowa normalna do powierzchni) dochodzących do 800 MPa. Próby pomiaru składowych σ_1 i σ_2 naprężenia falami podpowierzchniowymi o częstotliwości 4,5 MHz nie powiodły się. Przyczyną niepowodzenia była mała, liczona w dziesiątych częściach milimetra, grubość warstwy, w której wprowadzone zostały naprężenia w stosunku do długości fali wykorzystanej w pomiarach.

W przypadku badania korbowodów przyczyną niepowodzenia była skomplikowana geometria elementu ograniczająca długość bazy pomiarowej i tym samym względną dokładność pomiaru czasu przejścia. W drugim przypadku, pomimo korzystnej geometrii resoru, jego płaskich i równych powierzchni, mała grubość warstwy, w której występowały naprężenia spowodowała, że zmiany ich wartości nie były rejestrowane przez fale podłużne o długości wielokrotnie większej niż grubość tej warstwy. Te dwa przykłady pokazują jedno z ograniczeń zastosowaniach tensometrii ultradźwiękowej. Szybki spadek amplitudy fal podpowierzchniowych i częstotliwościowa zależność tłumienia fal, szczególnie w tworzywach sztucznych klinów załamujących, ograniczają maksymalną częstotliwość fal stosowanych w pomiarach. Autor wykonał zestaw głowic na podłużne fale podpowierzchniowe o częstotliwości 6 MHz, którymi mogą być pomiary prowadzone na gładkich, płaskich próbkach. Dla tej częstotliwości długość fali w stali wynosi około 1 mm czyli jest nadal o rząd większa niż grubości warstw, w których panują naprężenia własne wywołane mechanicznymi obróbkami powierzchniowymi wprowadzającymi naprężenia ściskające.

Drugim ograniczeniem jest konieczność dokonywania pomiarów na dostatecznie długich odcinkach. Oznacza to jednocześnie, że wynik pomiaru będzie informował o wartości naprężenia uśrednionej na długości tego odcinka co ogranicza zastosowania do elementów dużych, poddanych prostym stanom naprężenia. Konieczność dokonywania pomiaru na długim odcinku oznacza też, że badany element musi mieć wystarczającą grubość taką, aby możliwy był pomiar czasu fali podłużnej czy poprzecznej, a nie fal dyspersyjnych.

5.6. Ocena dokładności wyznaczania wartości naprężeń metodą ultradźwiękową

Dokładność z jakimi techniką ultradźwiękową wyznaczane są wartości naprężeń opisana jest wcześniej, w rozdziałach przedstawiających kolejne zastosowania metody. Ogólnie wartość naprężenia wyznaczonego metodą ultradźwiękową zależy od następujących czynników:

1. dokładność wyznaczenia wartości stałej elastoakustycznej,
2. dokładność wyznaczenia poprawki temperaturowej dla zestawu głowic stosowanych w badaniach,
3. stopień usunięcia naprężeń w materiale próbki wykorzystanej do skalowania aparatu,
4. dokładność pomiaru czasu przejścia fal w odprężonej próbce,
5. wpływ ewentualnych różnic anizotropii teksturalnej materiału odprężonej próbki i materiału badanego elementu,
6. dokładność pomiaru temperatury badanego elementu,
7. dokładność pomiaru czasu przejścia impulsu fali ultradźwiękowej w badanym materiale,
8. wpływ ewentualnej różnicy temperatur zestawu głowic i badanego elementu na mierzony czas przejścia impulsu,
9. wpływ sprzężenia akustycznego na mierzony czas przejścia impulsu,
10. wpływ innych składowych naprężenia działających w obszarze rozchodzenia się fal na mierzony czas przejścia impulsu,
11. wpływ nierównoległości kierunku rozchodzenia się fal ultradźwiękowych i kierunku działania składowej naprężenia, której wartość jest wyznaczana,
12. wpływ czynnika ludzkiego.

W przypadku badań prowadzonych falami podpowierzchniowymi i obliczania wartości naprężenia z wykorzystaniem poprawki teksturalnej, błąd wartości obliczonego naprężenia zależy jest dodatkowo od dokładności działania tej poprawki. Eksperyment przeprowadzony na jednej z szyn produkowanej w Hucie Katowice (rysunek 85 na stronie 134) pokazał, że błąd wynikający z uwzględniania w pomiarach poprawki strukturalnej wynosi +/- 10 MPa.

Waga z jaką poszczególne czynniki wpływają na błąd wyznaczania wartości naprężenia zależy od tego jaki element jest badany. W przypadku opisanych w pracy badań monoblokowych kół kolejowych, wykonanych ze stali o wysokiej czystości i według powtarzalnej technologii, wpływ różnic anizotropii teksturalnej między odprężoną próbka a badanymi kołami jest obecnie pomijalny. Podobnie wpływ temperatury na wyniki badania naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca, prowadzonych w zamkniętym pomieszczeniu, jest do pominięcia. Gładkie powierzchnie nowych kół pozwalają na uzyskanie powtarzalnego sprzężenia akustycznego i wysokiej, liczonej w pojedynczych nanosekundach, powtarzalności pomiaru czasu przejścia fal.

Inaczej jest w przypadku badania zmian sił podłużnych w szynach toru ciągle spawanego gdzie pomiary muszą być prowadzone na skorodowanych szynach w szerokim zakresie temperatur. Dlatego do tych badań opracowane zostały specjalne zestawy głowic minimalizujące wpływ chropowatości powierzchni materiału i temperatury na mierzone czasu przejścia fal. Przyjąć natomiast można, że w tych badaniach wpływ ewentualnych zmian tekstury materiału na uzyskiwane wyniki jest pomijalny. Dowodzą tego wyniki pokazane na rysunku 102 na stronie 156 gdzie wartości naprężeń własnych badanych przed i po rolowaniu szyny, w okresie kilku tygodni, różnią się maksymalnie o +/- 5 MPa. Oznacza to, że z podobnym błędem mogą być wyznaczane techniką ultradźwiękową zmiany naprężeń podłużnych w szynach toru ciągle spawanego.

Sposobem weryfikacji wyników uzyskiwanych metodą ultradźwiękową jest porównanie ich z rezultatami uzyskanymi innymi, akceptowanymi technikami. Ze względu na wysokie koszty takich badań jak na przykład dyfrakcja neutronów do porównań wykorzystane były proste, tanie i szybkie metody niszczące. Przeprowadzone porównania wyników badań ultradźwiękowych z wynikami uzyskanymi takimi technikami pokazują, że maksymalne różnice wartości podłużnych naprężeń własnych w nowych szynach, wyznaczonych metodą ultradźwiękową i niszczącą metodą tensometryczną opisaną w [150] wynoszą +/- 15 MPa. Podobne rezultaty przyniosło porównanie wyników ultradźwiękowych badań podłużnej składowej naprężeń w nowych szynach, wykonane bez skalowania na odprężonej próbce a więc techniką eliminującą ewentualny wpływ błędów skalowania na wyniki, z wynikami pomiarów metodą tensometrii otworkowej. Różnice naprężeń wyznaczonych techniką ultradźwiękową i niszczącą wyniosły średnio 17 MPa (maksymalnie 28 MPa) dla pomiarów prowadzonych na główce szyny i średnio 16 MPa (maksymalnie 22 MPa) dla pomiarów na stopce szyny.

Porównanie wartości obwodowych naprężeń własnych w powierzchniowych warstwach materiału wieńca koła uzyskanych techniką ultradźwiękową, falami podpowierzchniowymi, i metodą dyfrakcji promieni X na kole poddanym hamowaniu w hamowni, pokazało, że różnica wartości naprężenia obwodowego wyznaczonego tymi technikami nie przekracza 49 MPa. Porównanie badań wykonanych w kilku punktach na promieniu bocznej powierzchni wieńca pokazało, że średnia różnica wyznaczonych tymi metodami naprężeń wynosi 15 MPa a maksymalna sięga 40 MPa. Należy jednak zaznaczyć, że w tych badaniach pomiary techniką dyfrakcji promieni X prowadzone były w wytrawionych uprzednio zagłębieniach i w innych miejscach na obwodzie koła niż badania ultradźwiękowe.

Wyniki badania naprężeń podłużnych w szynach ciągle spawanych nie były porównane z rezultatami uzyskanymi innymi technikami. Wynika to obecnie z braku wiarygodnej metody mogącej być, podobnie jak technika ultradźwiękowa, wykorzystaną w dowolnym miejscu na długości toru i możliwej do zastosowania na przykład w czasie układania nowego toru.

Maksymalne wartości podłużnej składowej naprężeń własnych w szynach po prostowaniu sięgają w obecnie produkowanych szynach 200-250 MPa. Przyjmując, że wyniki uzyskane akceptowanymi powszechnie w przemyśle metodami niszczącymi są bezbłędne oznacza to, że względny błąd metody ultradźwiękowej, odniesiony do maksymalnej wartości ocenianych w szynach naprężeń, wynosi około 10% ich wartości.

Podobnie w badaniach kół kolejowych, w wieńcach których obwodowa składowa naprężenia osiąga wartości do 400 MPa, względny błąd oceny jej wartości metoda ultradźwiękową oszacować można na około 10%. Ta stosunkowo niska obecnie dokładność metody ultradźwiękowej jest rekompensowana jej inną cechą. Jest nią to, że pozwala na ocenę wartości naprężeń w warunkach w jakich inne techniki nie mogą być dziś stosowane.

Oceniając porównanie wyników nieniszczących badań ultradźwiękowych i pomiarów wykonanych metodami niszczącymi należy pamiętać o jeszcze jednym czynniku. Stosując techniki niszczące wynik badania można uzyskać tylko raz (po pomiarze badany element jest przecięty a istniejące w nim naprężenia bezpowrotnie uwolnione). Nieznany jest więc rozrzut wartości naprężeń własnych wyznaczanych na podstawie badań na przykład techniką tensometryczną. Z konieczności więc wyniki licznych badań ultradźwiękowych porównywane muszą być z wynikami nielicznymi, i o nieznanym rozrzucie, badań niszczących.

6. WNIOSKI

Przedstawione w pracy postępy w dziedzinie tensometrii ultradźwiękowej pozwoliły na zastosowanie tej nowej metody pomiarowej w wybranych dziedzinach techniki. Udane zastosowania były rezultatem prac głównie w dwóch kierunkach:

1. osiągnięcia niezbędnej precyzji i powtarzalności pomiaru czasu przejścia impulsów fal ultradźwiękowych w materiale badanych elementów konstrukcji,
2. wyboru odpowiednich metod pomiarowych to znaczy wyboru typów fal ultradźwiękowych i kierunków ich propagacji względem ocenianej składowej naprężenia.

Wykonanie opisanych badań stało się możliwe dzięki spełnieniu dodatkowo innego typu warunków. Jednym z nich było to, że informacje o stanie naprężeń w kołach, szynach czy wałach były potrzebne. Drugim była szybkość z jaką wykonywane były badania i wykorzystanie w nich przenośnej i zasilanej z baterii aparatury zbudowanej specjalnie w tym celu w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów. W opinii autora, w pomiarach prowadzonych w warunkach przemysłowych czy polowych, ten ostatni warunek jest niemal równie ważny jak uzyskanie wystarczającej dokładności pomiarowej. W niektórych zastosowaniach, jak badania zmian naprężeń w szynach toru ciągle spawanego, bez jego spełnienia pomiary byłyby wręcz niemożliwe. Tak jak praktycznie niemożliwe byłoby zamknięcie na kilka godzin ruchliwej linii kolejowej.

1. Osiągnięcie wymaganej precyzji pomiaru czasu przejścia fal w elementach konstrukcji stało się możliwe dzięki rozwojowi konstrukcji układów głowic piezoelektrycznych. Przeprowadzone porównania dokładności pomiarów uzyskiwanych głowicami wyposażonymi w przetworniki piezoelektryczne i typu EMAT wykazało, że głowice piezoelektryczne pozwalają na prowadzenie pomiarów z nie gorszą dokładnością niż głowice elektromagnetoakustyczne. Badania wykazały, że czasy przejścia fal mierzone głowicami typu EMAT silnie zależą od indukcji magnetycznej w ośrodku i od magnetyzmu szczątkowego materiału w miejscu pomiaru. Wykazana zastała również zależność czasu przejścia od przygotowania powierzchni, które wiąże się ze stopniem usunięcia z powierzchni tlenków metalu i zmianą grubości szczeliny między zwojami cewki przetwornika EMAT a powierzchnią metalu. Wnioskiem wypływającym z porównania możliwych do osiągnięcia dokładności pomiaru czasu przejścia głowicami typu EMAT i głowicami z przetwornikami piezoelektrycznymi jest, zdaniem autora, przewaga tych ostatnich. Dodatkową cechą głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi jest to, że pozwalają one na wzbudzenie w metalach wszystkich rodzajów fal wykorzystywanych w tensometrii ultradźwiękowej, w tym fali o najwyższym współczynniku elastoakustycznym („najczulszej” na naprężenie), a więc podpowierzchniowej fali podłużnej. Generacja tej właśnie fali przetwornikami typu EMAT jest mało efektywna. Inną ważną z punktu widzenia zastosowań cechą układów głowic piezoelektrycznych jest niski pobór mocy i możliwość ich współpracy z aparatami zasilanymi z baterii. Cechy te są pozbawione głowice typu EMAT pobierające w czasie generacji fal prąd o wysokim natężeniu.

2. W pracy wykazano, że głównym czynnikiem rozrzutów wyników pomiarów prowadzonych głowicami piezoelektrycznymi jest wpływ zmiennej grubości warstw sprzegających. Prace nad rozwojem układów głowic koncentrowały się głównie na eliminacji tego niepożądanego wpływu. W rozwoju głowic przeznaczonych do pomiaru dwójmności akustycznej badania zaowocowały konstrukcją głowicy wyposażonej w jeden przetwornik nadawczy i kilka odbiorczych umożliwiającej pomiar czasu przejścia fal o dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji bez konieczności obracania głowicy i tym samym zmiany warunków

sprzężenia akustycznego. To usprawnienie w poważnym stopniu umożliwiło akceptację techniki w przemyśle.

Rozwój konstrukcji układów głowic na fale podpowierzchniowe, od sztywnego układu różnicowego, poprzez elastyczne układy różnicowe, układy obracane aż do wieloprzetwornikowych układów wykorzystujących efekt „lustro”, doprowadził do 20-krotnego obniżenia wpływu zmian grubości warstw sprzęgających na mierzone czasy przejścia. Praktycznie dopiero układy głowic typu „lustro” pozwoliły na prowadzenie pomiarów bez czasochłonnego przygotowywania powierzchni elementu przed pomiarem. Było to równocześnie spełnieniem wspomnianego wcześniej warunku co do szybkości pomiarów wymaganej w warunkach przemysłowych.

Doświadczalnie zbadano wpływ wzajemnych relacji odległości między poszczególnymi głowicami w zestawie i wielkościami przetworników na wartości mierzonych czasów. W wyniku tych badań wykazano, że w pomiarach mogą być stosowane głowice wyposażone w przetworniki małe, znacznie mniejsze niż stosowane przez innych badaczy i opisane w literaturze. Pozwoliło to na jednoczesne organicznie rozmiarów zestawów głowic, ich masy i zredukowanie wpływu temperatury na wyniki pomiarów. Zmniejszenie masy zestawów głowic oraz wykorzystanie magnesów z ziem rzadkich do „przyciągania” głowic do powierzchni stalowych elementów i uzyskania powtarzalnych sił sprzęgających, poprawiło odporność zestawów na uszkodzenia mechaniczne spowodowane na przykład upadkiem zestawu.

3. Wyniki badań wplywu temperatury na czas przejścia mierzone wieloprzetwornikowymi zestawami głowic na fale podpowierzchniowe pokazały, że dla takich zestawów, przeznaczonych do pomiarów w szerokim zakresie temperatur, obserwowana jest nieliniowa zależność mierzonego czasu przejścia od temperatury. Pomiary zależności prędkości propagacji fali podłużnej od temperatury w materiale, z którego wykonane są kliny załamujące głowice skośnych wykazały, że zależność ta jest różna dla tworzyw produkowanych przez różnych wytwórców. Przeprowadzone pomiary umożliwiły dobór optymalnego kąta klina załamującego i uzyskanie w szerokim zakresie temperatur impulsów o dostatecznych dla pomiaru amplitudach.

Efektom badań nad wpływem temperatury na wartości mierzzonego czasu przejścia była nowa konstrukcja zestawów głowic. Zastosowano w nich Invar, czyli materiału o zerowej rozszerzalności cieplnej, jako łącznik ustalający odległości między poszczególnymi głowicami i wyznaczający długości odcinków pomiarowych. Przepływ ciepła między zestawem a badanym elementem ograniczony został jedynie do części zestawu zawierającej głowice. Od temperatury tej właśnie części zestawu, wskutek rozszerzalności cieplnej i związanych z temperaturą zmian prędkości fal w klinach załamujących, zależy jest mierzony czas przejścia. Ograniczona została pojemność cieplna głowic zestawu dzięki czemu jego nagrzanie lub oziębienie do temperatury powierzchni badanego elementu nie powoduje mierzalnych zmian temperatury tego elementu w obszarze, w którym propagują się fale. Dzięki wprowadzeniu opisanych zmian w konstrukcji głowic czas wyrównywania się temperatur został skrócony o połowę.

4. Badania przeprowadzone układami głowic na podpowierzchniowe fale typu SH i fale powierzchniowe z opracowanym przez autora „suchym” sprzężeniem akustycznym pokazały, że możliwy jest odbiór tych fal głowicami piezoelektrycznymi bez potrzeby stosowania cieczy sprzęgających. Opracowany zestaw głowic na fale powierzchniowe o dwóch różnych częstotliwościach, w którym falowody głowic odbiorczych stykają się z powierzchnią badanego elementu punktowo, umożliwił pomiary czasu przejścia fal o różnych częstotliwościach na dokładnie tym samym odcinku pomiarowym.

Zaproponowano wykorzystanie w tensometrii ultradźwiękowej fal transformowanych i odbitych pozwalających na pomiary czasu przejścia impulsów na znacznych odległościach między nadajnikiem i odbiornikiem, nieosiągalnych przy badaniach prowadzonych filami powierzchniowymi. Powiększenie długości odcinka pomiarowego umożliwiło osiągnięcie wysokiego stosunku przyrostu czasu przejścia do jednostkowej zmiany naprężenia i wykorzystanie takich układów do pomiarów zmian naprężeń z dokładnościami liczonej w pojedynczych megapaskalach. Zbadane przez autora wartości współczynników elastoakustycznych dla fal odbitych i transformowanych, rozchodzących się skośnie w stosunku do kierunku naprężenia, wykazały nieznaczne tylko różnice w stosunku do wartości współczynnika β_{11} czyli współczynnika o maksymalnej wartości.

5. Badania naprężeń w kołach i szynach kolejowych oraz porównanie wyników uzyskanych techniką ultradźwiękową i innymi, znanymi i akceptowanymi metodami pomiarowymi, pozwoliły udowodnić, że tensometria ultradźwiękowa jest wiarygodną i skuteczną techniką pomiarową. Warunkiem niezbędnym do przeprowadzenia badań była współpraca z Europejską Unią Kolejową i Związkiem Kolei Amerykańskich oraz zapotrzebowanie kolejnictwa na rozwiązanie problemu oceny wartości naprężeń własnych w kołach i szynach.

Wyniki badań obwodowych naprężeń własnych w kołach kolejowych, dzięki nieniszczącemu charakterowi i możliwości wykonywania pomiarów wielokrotnie w tych samych miejscach na kole, wzbogaciły wiedzę o zmianach naprężeń obwodowych w wieńcach kół. Wykazały, że stan naprężeń w wieńcu koła zależy nie tylko od mocy i czasu hamowania, temperatury otoczenia ale i od historii obciążeń cieplnych jakim podane było koło. Wykorzystanie w pomiarach zarówno poprzecznych fal objętościowych dostarczających informacji o wartości naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca jak i fal powierzchniowych informujących o naprężeniach w powierzchniowych warstwach materiału na obu bocznych powierzchniach wieńca, pozwoliło na wykrycie w wieńcach standardowych kół lanych złożonego stanu naprężenia: rozciągania i zginania. Potwierdziło to istnienie w kołach naprężeń obwodowych o rozkładach, których charakter przewidziano wcześniej stosując numeryczną symulację rozwoju naprężeń własnych będących wynikiem termicznych obciążeń kół.

Dzięki wykonaniu pomiarów w wielu punktach wieńca możliwe stało się badanie obwodowych rozkładów naprężeń. Wykryte zostały odstępstwa od kołowej symetrii rozkładu naprężeń na obwodzie. W przypadku kół nagrzewanych indukcyjnie spowodowane one były nierównomiernym działaniem układu grzewczego, co udowodnione zostało znalezieniem korelacji między wartością naprężenia obwodowego i odbarwieniem koła.

Uzyskane rezultaty spowodowały, że w praktycznych zastosowaniach, których celem jest jedynie poznanie średniej wartości naprężenia obwodowego działającego w wieńcu, w pewnej odległości od powierzchni toczonej, stosowanie tensometrii ultradźwiękowej jest już dzisiaj powszechnie akceptowane.

Wnioskiem z doświadczeń zebranych podczas badań podłużnej składowej naprężeń własnych w nowych szynach kolejowych poddanych prostowaniu jest to, że metoda pomiarowa stosowana w hutach musi być nie tylko metodą nieniszczącą ale również musi być metodą szybką. Badania naprężeń prowadzonych w czasie regulacji maszyny prostującej są ilustracją pomiarów, w którym szybka reakcja na zmiany wartości naprężeń wprowadzanych do materiału szyny jest konieczna ze względów ekonomicznych. Próby oceny wartości naprężeń bez potrzeby skalowania aparatury ultradźwiękowej na odprężonych wzorcach, są przykładem pomiarów, których szybkości i prostocie nie dorównuje dzisiaj żadna z innych znanych technik. Istotnym czynnikiem ograniczającym czas pomiarów jest postęp w konstrukcji zestawów

głowic ultradźwiękowych eliminujący konieczność czasochłonnego przygotowywania powierzchni szyny przed każdym pomiarem.

Badania zmian sił podłużnych w szynach toru ciągle spawanego przeprowadzone przez autora w warunkach polowych wykazały, że powszechnie przyjmowane w środowisku kolejowym określenie sił podłużnych w szynach wyłącznie za pomocą temperatury neutralnej nie oddaje rzeczywistego stanu sił w szynach. Z definicji temperatura neutralna to temperatura szyny, w której działająca w niej siła podłużna jest równa zero. W praktyce zaś wartość temperatury neutralnej przyjmowana jest jako wynik pomiaru temperatury szyny w momencie, w którym wykonana została ostatnia spoina zamykająca tok szynowy. Przeprowadzone badania pokazały, że w tak mierzonej temperaturze, w szynach toru ciągle spawanego mogą działać znaczne siły podłużne, zarówno ściskające jak i rozciągające. Badania wykonane na różnych torach, w różnych ich fragmentach (przejazdy, złącza, miejsca poddane różnemu nasłonecznieniu) wykazały też nieprawdziwość założenia, że jednostkowej zmianie temperatury szyny odpowiada stały przyrost siły podłużnej.

Badania wykonane w czasie układania nowego toru i w czasie prac regulacyjnych prowadzonych na szynach ciągle spawanych dowiodły, że pomiary ultradźwiękowe są już dzisiaj w stanie dostarczyć wiarygodnych informacji o bezwzględnych wartościach sił podłużnych w szynach toru. Informacje te, dzięki pomiarom prowadzonym specjalnie do tego zbudowanymi aparatami i głowicami, mogą być uzyskane bez wpływu na przebieg prac torowych i bez ich spowalniania. Monitorowanie zmian sił podłużnych w szynach, będących wynikiem zarówno zmian temperatury jak i działania sił pochodzących od hamowania pociągów, może być prowadzone bez potrzeby okresowego zamykania toru czy nawet zmniejszania prędkości pociągów.

Opisane w pracy zastosowania łączy wspólna cecha: badane elementy są masywne i duże a oceniane w nich naprężenia mają wysokie wartości. Zapewne ograniczenie tensometrii ultradźwiękowej do badania takich właśnie elementów będzie jej towarzyszyło również w przyszłości i nie znajdzie ona zastosowania w badaniach naprężeń w elementach małych, o wymiarach liczonych w pojedynczych centymetrach, lub pomiarach naprężeń o niskich wartościach. Natomiast w niektórych zastosowaniach, w badaniach elementów spełniających powyższe wymagania, tensometria ultradźwiękowa wydaje się być dzisiaj jedyną skuteczną metodą pomiarową. Przykładem tego są badania zmian naprężeń w kolumnach prasy hydraulicznej gdzie wykorzystanie innych metod praktycznie nie jest możliwe.

6. Nowe obszary zastosowania tensometrii ultradźwiękowej określone będą według autora dwoma czynnikami:

1. uzasadnioną ekonomicznie potrzebą pomiaru naprężeń z dokładnościami możliwymi do uzyskania techniką ultradźwiękową czyli dokładnością rzędu ± 20 MPa,
2. spełnieniem wymagań co do kształtów i wielkości elementów, w których tensometria ultradźwiękowa ma być wykorzystana.

Opisane w rozdziale 5.5 nieudane próby pomiarów pokazują, że istotnym warunkiem aby pomiary mogły być wykonane jest odpowiednia wielkość i prosta geometria elementu. Dlatego też nowych obszarów zastosowania tej techniki należy poszukiwać w dziedzinach, w których stosowane są elementy takie jak płyty, blachy, rury czy walcowane kształtowniki poddane prostym stanom naprężeń.

Przykładem istniejących już obecnie a dotąd niewykorzystanych możliwości tensometrii ultradźwiękowej, jak się wydaje autorowi, są badania naprężeń spawalniczych i stopnia odprężania elementów spawanych. W konstrukcjach stalowych naprężenia spawalnicze

osiągają wartości równe granicy plastyczności materiału, a kierunki naprężeń głównych są, w przypadku prostych spoin, znane. Przewiduje się w przyszłości zastosowanie rur spiralnie spawanych do budowy rurociągów podmorskich. Wymagania dotyczące odporności na korozję naprężeniową najprawdopodobniej zmuszą wykonawców takich rurociągów do odprężania materiału w okolicach spoiny i kontroli stopnia odprężenia. Wydaje się, że jedną z technik, która będzie mogła znaleźć zastosowanie w rutynowych, nieniszczących badaniach stopnia odprężenia takich rur będzie właśnie technika ultradźwiękowa.

Istotnym ograniczeniem zastosowań tensometrii ultradźwiękowej jest, i prawdopodobnie pozostanie, silny wpływ anizotropii akustycznej wywołanej istnieniem tekstury na prędkości propagacji fal. Proponowane sposoby uwzględnienia tego wpływu nie są jeszcze wystarczająco „pewne”, aby znaleźć zastosowanie w badaniach materiałów technicznych. Innym mankamentem sposobów pomiarów z wykorzystaniem związków między prędkościami różnych typów fal, propagujących się w rozmaitych kierunkach względem kierunków anizotropii teksturalnej, jest konieczność wielokrotnych pomiarów prowadzonych różnego typu głowicami czy ich zestawami.

Poza zasięgiem tensometrii ultradźwiękowej pozostają obecnie również obszary materiału poddane odkształceniu plastycznemu, jak powierzchnie jezdne eksploatowanych szyn czy powierzchnie toczone kół kolejowych, i wywołane tymi odkształceniami strefy działania złożonych stanów naprężeń własnych. W takich przypadkach obszarami badań ultradźwiękowych mogą być jedynie te fragmenty materiału, do których odkształcenia plastyczne nie sięgają. Należy jednak pamiętać, że w tych obszarach mogą występować naprężenia własne wywołane odkształceniami plastycznymi i mogą one wpływać na prędkości propagacji fal.

Nadziejemy na choć częściowe ułatwienia w ocenie naprężeń techniką ultradźwiękową w wyrobach walcowanych budzi coraz powszechniejsze stosowanie stali pochodzących z ciągłego odlewania, charakteryzujących się wysoką czystością i jednorodnością. Coraz częściej z takich właśnie stali są produkowane wyroby hutnicze (blachy, kształtowniki), z których następnie budowane są konstrukcje. Dzięki powtarzalności procesów technologicznych odznaczają się one powtarzalną anizotropią teksturalną. Umożliwia to wykorzystanie znajomości tekstury na przykład blachy w ocenie stanu naprężeń w konstrukcjach wykonanych z tej blachy. Dowodem na to są doświadczenia w badaniach kół kolejowych, w których w miarę stosowania coraz nowszych typów stali wpływ wahań anizotropii teksturalnej na wyniki pomiarów maleje. W kołach produkowanych obecnie w różnych krajach ze stali typu R7 wpływ anizotropii teksturalnej na wynik badania obwodowych naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca może być pominięty.

Nowymi materiałami dla tensometrii ultradźwiękowej mogą być stopy lekkie stosowane w przemyśle lotniczym do budowy płatowców. Stopy te charakteryzują się blisko dwukrotnie wyższymi wartościami współczynników elastoakustycznych niż stale. Jeszcze innym materiałem, w którego badaniach tensometria ultradźwiękowa może znaleźć zastosowanie jest szkło. Tworzywo to coraz częściej jest stosowane w ścianach kurtynowych, z lekką konstrukcją metalową, w których tafle szkła poddawane są obciążeniom. Wydaje się, że cechami, które mogą ułatwić ultradźwiękowe pomiary naprężeń w szkle są niskie współczynniki tłumienia fal i bezpostaciowość szkła wraz z wynikającą z niej niską anizotropią akustyczną. Zazwyczaj też powierzchnie tafli szklanych są gładkie co korzystnie wpływa na zmniejszenie błędów pomiarowych wynikających z wahań grubości warstw sprzęgających. Znane są już doniesienia o potrzebie kontroli stanu naprężeń własnych w taflach szklanych stosowanych w budownictwie.

Nowe zastosowanie techniki, nad którym autor pracuje, to wykorzystanie fal ultradźwiękowych w pomiarach zmiennych naprężeń pochodzących od obciążeń zewnętrznych. Obecnie pomiary takie podczas prób obciążeń mostów, zbiorników ciśnieniowych czy rurociągów wykonuje się przy wykorzystaniu tensometrów oporowych. W porównaniu z takimi tensometrami, których instalacja na powierzchni wymaga jej oczyszczenia, odłuszczenia potem naklejenia tensometru, odczekania do utwardzenia się kleju, „tensometr ultradźwiękowy” nie wymaga przygotowań i może być używany wielokrotnie. Zestawy głowic na fale powierzchniowe z „suchym” sprzężeniem akustycznym są gotowe do pracy wraz z ich dociśnięciem do powierzchni.

Poszerzeniem wiedzy o zmianach naprężeń może być wykorzystanie w pomiarach fal podłużnych ulegających odbiciom czy transformacjom. Zmiany czasu przejścia takich fal zawierają informację o wartości naprężenia uśrednionego na grubości elementu. Wraz z pomiarami falą powierzchniową, lub podpowierzchniową falą podłużną, możliwe więc jest uzyskanie danych o naprężeniach na powierzchni i naprężeniu średnim czyli informacji pełniejszej niż dostarczana przez tensometry oporowe.

7. LITERATURA

- [1]. Kish A., Samavedam G., Recent Investigations on Lateral Stability of Continuous Welded Rail Track, *Bulletin of American Railway Engineering Assoc.*, Vol. 688, 1982, pp.565-569.
- [2]. Adamski M., Towpik K., *Badania Rozkładów Naprężeń w Iglicach Rozjazdowych*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, Nr 41, 1995, str. 47-56.
- [3]. informacja niepublikowana, 1993: J. Sanford, Mechanical Engineering Dept., University of Maryland, College Park, USA.
- [4]. Mahtar J., Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes, *Transactions, American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 56, 1934, pp.249-354.
- [5]. Roliński Z., *Tensometria oporowa - podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań*, WNT Warszawa, 1981.
- [6]. Czarnek R., Experimental Determination of Released Fields in Cut Railroad Car Wheels, US Department of Transportation, Federal Railroad Administration, DOT/FRA/ORD-97/06 Final Report, February 1999.
- [7]. Klug H.P., Alexander L.E., *Stress Measurement in Metals: X-Ray Procedures*, 2nd edition, John Wiley & Sons, NY, 1974.
- [8]. Porter J.F., Bruss M.E., A Miniature X-ray Diffraction System for the Determination of Residual Strain States, *Proc. Pressure Vessels & Piping Conference*, ASME, Minneapolis 1994, Session NDE-1A.
- [9]. Effect of Frequent Braking on Residual Stress Field in the Wheel Rim, Office of Research and Experiments UIC, B-169 Report 2, Utrecht 1989.
- [10]. Allen A., Measurement of Internal Stress within Bulk Materials Using Neutron Diffraction, *NDT International*, No. 14, 1981, p. 235.
- [11]. Root J.H., Holden T.M., Klassen R.J., Smallman C., Maxfield B., Gore N.R., Neutron Diffraction Measurements of Residual Stress in Rails, *Rail Quality and Maintenance for Modern Railroad Operation*, eds.: J.J. Kalker, D.F. Cannan, O. Oringer, Kalker J.J. et al, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1993, pp.315-324.
- [12]. Broszura aparatu do pomiarów naprężeń w szynach, MAV (Koleje Węgierskie), Budapeszt 1997.
- [13]. Augustyniak B., Chmielewski M., *Badania za pomocą efektu Barkhausena rozkładu naprężeń na modelu węzła skrzyżowania wiązarów okrętowych poddanych operacji naprawy poprzez zaspawanie*, *Mat. 26 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących*, Szczyrk, październik 1997, zeszyt 2, str. 255-261.
- [14]. Mutton P.J., Examination of Retarder Damage in Ore Car Wheels, BHP Melbourne Research Laboratories, Draft Report, September 1989.
- [15]. Kaminski D.K., Jiles D., Biner S.B., Sablik M.J., Stress Detection in Steels Through Variation in Magnetic Properties, *Rev. of Progress in Quantitative NDE*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, eds., Plenum Press, New York, 1993, Vol. 12, pp.1831-1839.
- [16]. Utrata D., Storm A., Negley M., Stress Measurement in Railroad Rail Using Ultrasonic and Magnetic Techniques, *Review of Progress in Quantitative NDE*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, eds., Plenum Press, New York, Vol. 14, pp.1912.
- [17]. Shibata M., Ono K., *Magnetomechanical Acoustic Emission - a New Method for Non-destructive Stress measurement*, *NDT International*, No. 14, 1981.
- [18]. Lipinski L., Ultrasonic detection of stresses, *Proc. Conf. "Ultrasound 81"*, Praha 1981, Vol. 3.

- [19]. Chern E.J., Heyman J.S., Determination of material stress from the temperature dependence of the acoustic natural velocity, Proc. IEEE Ultrasonic Symposium, Chicago 1981.
- [20]. Schneider F., Pitsch H., Goebels K., Nondestructive Detection and Analysis of Stress States with Polarized Ultrasonic Shear Waves, Rev. of Progress in Quantitative NDE, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, eds., Plenum Press, New York, 1984.
- [21]. Schramm R.E., Clark A.V., Mitraković D.V., Schaps S.R., McGuire T.J., Residual Stress Detection in Railroad Wheels: An Ultrasonic System Using EMATs, NISTIR 3968, Report No. 23, National Institute of Standards and Technology, Boulder, May 1991.
- [22]. Malecki I., Teoria fal i układów akustycznych, PWN, Warszawa 1964.
- [23]. Hughes D.A., Kelly G.S., Second-Order Elastic Deformation of Solids, Physical Review, Vol. 92, 1953, p. 1145.
- [24]. Deputat J., Własności i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnego, Prace IPPT, Nr 28/1987.
- [25]. Benson R., Realsen V.G., Acoustoelasticity, Product Engineering, No. 29, 1959.
- [26]. Crecraft D.I., Ultrasonic Wave Velocities in Stressed Nickel Steel, Nature, Vol. 195, September 22, 1962, No. 4847, pp.1193-1194.
- [27]. Crecraft D.I., The measurement of Applied and Residual Stresses in Metals using Ultrasonic Waves, Journal of Sound and and Vibration, Vol. 5, No.1, 1967, pp.173-192.
- [28]. Egle D.M., Bray D.E., Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 60, 1969, p.741
- [29]. Benson R.W., Development of Nondestructive Methods for Determining Residual Stress and Fatigue Damage in Metals, NASA Marshall Space Flight Report, 1968, Contract No. NAS8-20208
- [30]. King R.R., Birdwell J.A., Bray D.E., Clotfelter W.N., Risch E.R., Improved methods for nondestructively measuring residual stress in railway wheels, Proc. 9th Symposium on NDE, San Antonio, April 25-27, 1973, pp.91-105.
- [31]. Deputat J., Ultradźwiękowe pomiary naprężeń, Mat. V KKBN, Koszalin 1976, str.58-66.
- [32]. Beszta L., Pawłowski Z., Pomiar naprężeń własnych za pomocą powierzchniowych fal ultradźwiękowych, Mat. IX KKBN, Frombork 1979, str. 121.
- [33]. Szymański J., Lenard W., Zjawisko elastoakustyczne w żeliwie szarym. Mat. X KKBN, Jadwisin 1980, Wyd. SIMP, str.155.
- [34]. Adamski M., Deputat J., Strukturalna czułość współczynnika elastoakustycznego, mat. XXVIII Otwarte Seminarium z Akustyki, Gliwice 1981, str.21.
- [35]. Mignona R.B., Clark A.V., Roth B.B., Vold C., Acoustic Stress Measurements in Aluminum and Steel Considering Differences in Texture in Rolled Plates, Proc. Ultrasonic International Symposium, Halifax, NS, July 1983.
- [36]. Fukuoka H., Toda H., Hirakawa H., Sakamoto H., Toya Y., Elastoacoustic measurements of residual stress in the rim of railroad wheels, Wave propagation in inhomogeneous media and ultrasonic nondestructive evaluation, Vol. 6., G.C. Johnson (ed.), ASME, NY, 1984, pp.185-193.
- [37]. Hirao M., Ogi H., Fukuoka H., Resonance EMAT system for acoustoelastic stress measurement in sheet metal, Rev. Sci. Instruments, Vol.64, No.11, November 1993, pp.3198-32054.
- [38]. Hirao M., Ogi H., Fukuoka H., Advanced Ultrasonic Method for Measuring Rail Axial Stresses with the Electromagnetic Acoustic Transducers, Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 5, 1994, pp. 211-223.

- [39]. Clark A.V., Shaps S.R., Measurements of Plane Stress States Using Electromagnetic-Acoustic Transducers, Rev. of Progress in Quantitative NDE, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, eds., Plenum Press, New York, Vol.14, 1995, pp.1877-1883.
- [40]. Schramm R.E., Van Clark Jr. A., McGuire T.J., Ultrasonic Measurement of Residual Stress in Railroad Wheel Rims, Proc. Tenth International Wheelset Congress, Sydney, Australia, 27 September 1992.
- [41]. Iwand H.C., A Comparative Analysis Using Barkhausen Noise Analysis, Ultrasonic Birefringence and Saw Cutting Techniques in Determination of Residual Stress in Railroad Wheels, Thesis, University of Nebraska, Lincoln, 1988.
- [42]. Tanala E., Bourse G., Fremiot M., DeBellevil J.F., Determination of near surface residual stress on welded joints using ultrasonic methods, NDT&E International, Vol. 28, No. 2., 1995, pp.83-88.
- [43]. Schneider E., Hintze H., Dalichow M., Ultrasonic Technique for the Evaluation of Stress States in Railroad Wheels and Rails, Proc. World Conf. on Railway research, June 17-19, 1996, Colorado Springs, CO, USA, pp.425-430.
- [44]. Utrata D., Stress Measurement in Railroad Rail Using Ultrasonic Birefringence, Association of American Railroads Report, Chicago, February 1996.
- [45]. Walaszek H., Abdallahoui Y., Lieurade H.P., Potentialities of ultrasonics for evaluating residual stresses: Influence of microstructure, Proc. 15 World Congress on NDT, Poma 2000, (www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn785/idn785.htm)
- [46]. Adler L., Cook B.R., Dewey B.R., King R.T., The Relationship Between Ultrasonic Rayleigh Waves and Surface Residual Stress, Materials Evaluation, July 1977, pp.93-96.
- [47]. Husson D., Bennett S.D., Kino G.S., Measurement of Surface Stresses Using Rayleigh Waves, Report No. 3503, E.L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, October 1982.
- [48]. Husson D., Bennett S.D., Kino G.S., Rayleigh Wave Measurement of Surface Stresses, Rev. of Progress in Quantitative NDE, D.O. Thompson and D.C. Chimenti (eds.), Plenum Press, New York 1984, pp.1293-1303.
- [49]. Jassby K.M., Ahron R., Ahroni A., Longman D., Ultrasonic Time Intervalometer for Quantitative Studies of Surface Properties of Solids, Proc. Conference "Ultrasonics", Brighton 1985, pp.207-213.
- [50]. Budenkov G.A., Zinzhenko R.W., Zinzhenko W.A., Nedveckaja O.W., Polankin G.A., Ocenka naprężonego sostojania izdelii iz serogo czuguna akusticzeskim metodom, Defektoskopija, Nr 5, 1998, str.3-7.
- [51]. Clark A.V., Fuchs P., Schaps S.R., Fatigue Load Monitoring in Steel Bridges with Rayleigh Waves, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 14, No. 3, 1995, pp.83-98.
- [52]. Adamski M., O zależności elastoakustycznej w materiale anizotropowym, Materiały XIV KKBN, Kiekrz 1985, Wyd. ITWL, str.17.
- [53]. Krautkrämer J., Krautkrämer H., Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, Berlin 1961.
- [54]. Obraz J., Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT Warszawa, 1983.
- [55]. Gurwicz A.K., Kuzmina L.I., Spravocnyje diagrammy napravlennosti iskatelnej ultrazvukovyh defektoskopov, Kijew, Technika, 1980.
- [56]. Bray D.E., Stanley R.K., Ultrasonic Techniques in Nondestructive Evaluation. Nondestructive Evaluation, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [57]. Kusakin N.A., Ultrazvukovyje metody kontrola, Wyd. „Technika”, Kijów 1972.
- [58]. Aleszyn N.I., Belyj W.E., Wopilkin A.X., Woszczanow A.K., Ermolow I.N., Gurwicz A.K., Metody akusticzeskogo kontrola metalov, Moskwa, Maszynostrojenie, 1989.

- [59]. Eagle D.M., Bray D.E., Nondestructive Measurement of Longitudinal Rail Stresses, FRA/ORE-77/34, January 1987, Department of Transportation, National Technical Information, Springfield, Virginia, 22161.
- [60]. Salama K., Wang J.J., Barber G.C., The Use of Temperature Dependence of Ultrasonic Velocity to Measure Residual Stress, Rev. of Progress in Quantitative NDE, Thompson D.O. and Chimenti D.E. eds., Plenum press, NY 1983, Vol. 2B, pp.1355-1365.
- [61]. Wallace L. Anderson K., Ultrasonic Velocity Dependence on Stress and Pulsed Heat Energy, Rev. of Progress in Quantitative NDE, Thompson D.O. and Chimenti D.E. eds., Plenum press, NY 1984, Vol. 3B, pp.1157-1164.
- [62]. Mott G., Temperature Dependence of Ultrasonic Parameters, Rev. of Progress in Quantitative NDE, Thompson D.O. and Chimenti D.E. eds., Plenum press, NY 1984, Vol. 3B, pp.117-1148.
- [63]. Kobori O., Iwashimizu Y., Effects of Stress and Temperature on Ultrasonic Velocity, Elastic Waves and Ultrasonic NDE, S.K. Data, J.D.Achenbach and Y.S.Rajapakse (Editors), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1990, pp.339-343.
- [64]. Srinivasulu N.C., Srinivasan M.N., Bray D.E., Residual Stress Measurements in Ductile Cast Iron Using L_{CR} Ultrasonic Technique, PVP-Vol.216/NDE-Vol.9, NDE: Applications, Advanced Methods Codes and Standards, ASME 1991, pp.49-54.
- [65]. Adamski A., Ultradźwiękowa metoda pomiaru naprężeń własnych w materiale z teksturą, Rozprawa Doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1998.
- [66]. Thurston R.N., Brugger K., Third order elastic constants and velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media, Phys. Rev. A, Vol. 133, 1964, p.1604.
- [67]. Mahadevan P., Effect of Frequency on Texture-Induced Ultrasonic Wave Birefringence in Metals, Nature, Vol. 211, 1966, pp.621-622.
- [68]. Crecraft D.I., Ultrasonic measurement of Stresses, Proc. Ultrasonic for Industry 1967 Conference, University of Warwick, Canterbury, England.
- [69]. Sayers C.M., Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates, J.Phys.D: Appl.Phys., Vol. 15, 1982, pp.2157-2167
- [70]. Allen D.R., Sayers C.M., The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combination technique, Ultrasonics, Vol. 22, 1984, p.179
- [71]. Thompson R.B., Wormley S.J., Johnson J.C., Utrata D., Elastic and Acoustoelastic Properties of Railroad Steel, Rev. of Progress in Quantitative NDE, Thompson D.O. and Chimenti D.E. (eds.), Plenum press, NY, Vol. 14
- [72]. Toda H, Fukuoka H., Aoki A., R-Value Acoustoelastic Analysis of Residual Stress in a Seam Welded Plate, Jap. Appl. Phys., Vol. 23, 1983, pp.86-88.
- [73]. King R.B., Fortunko C.M., Determination of In-Plane Residual Stress State in Plates Using Horizontally Polarized Shear Waves, J. Appl. Phys, Vol. 54, 1983, pp.1339-1354.
- [74]. Lee S.S., Smith J.F., Thompson R.B., Absolute acoustoelastic measurements of stress in textured plate with arbitrary stress orientation, Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 5B, Thompson D.O., and Chimenti D.E. (eds.), Plenum Press, NY 1986.
- [75]. Janssen M., Zuidema J., An Acoustoelastic Determination of the Stress Tensor in Textured Metal Sheets Using the Birefringence of Ultrasonic Shear Waves, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 5, 1985, pp.45-52.
- [76]. McLouchlan D.T., Alers G.A., Measurement of thermal stress in railroad rails using ultrasonic SH waves, Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Thompson D.O. and Chimenti D.E. (eds.), Plenum Press, NY 1986, Vol. 6B, p.1559.

- [77]. Clark Jr. A.V., Moulder J.C., Measurement of Residual Stresses in Slightly Anisotropic Aluminum Alloy Specimen by the Method of Acoustic Birefringence, National Bureau of Standards Report, Boulder, Colorado 80303, 1985
- [78]. Thompson R.B., Lee S., Smith J.F., Angular Dependence of Ultrasonic Wave Propagation in a Stressed, Orthotropic Continuum: Theory and Application to the Measurement of Stress and Texture, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, 1986, pp.921-931.
- [79]. Li Y., Thompson R.B., Lee S.S., Ultrasonic Measurement of Texture of Cubic and Hexagonal Materials, *Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Thompson D.O. and Chimenti D.E. (eds.), Plenum Press, NY 1990, Vol. 9, p.1781.
- [80]. Brokowski A., Deputat J., Ultrasonic measurement of residual stress in rails, *Proc. 11 World Conference on Nondestructive Testing, Las Vegas 1985*, Vol. 1, Taylor Publ. Co. Dallas.
- [81]. Dike J.J., Johnson G.C., An Acoustoelastic Technique for the Complete Evaluation of Plane States of Residual Stress, *Proc. of the IUTAM Symposium on Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, University of Colorado, Boulder, August 1980.
- [82]. Lewandowski J., Acoustic and dynamic properties of two-phase media with non-spherical inclusions, *Ultrasonic*, Vol. 33, No 1, 1995, p.61
- [83]. Lewandowski J., Determination of material parameters and texture of a polycrystalline aggregate from ultrasonic measurements, *NDT&E International*, Vol. 32, 1999, pp. 383-396.
- [84]. Hidemann E., Wellenausbreitung in festen Körpern, *Fiat - Review of German Science 1939-1946, Physics of Solids. Part 1.*, Wisbaden, 1948, pp.154-178.
- [85]. Hirao M., Ogi H., Fukuoka H., Resonance EMAT system for acoustoelastic stress measurement in sheet metal, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 64, No.11, November 1993, pp.3198-3205.1
- [86]. Khedher A., de Halleux B., High Accuracy Method of Measuring Travelling Time of Ultrasonic Waves, *Rev. of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, Thompson D.O., Chimenti D.E., (eds.), Plenum Press, New York, 1993, pp. 147-155.
- [87]. Fujii I., Kawashima K., Digital Measurement of Ultrasonic Velocity, *Rev. of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 14, Thompson D.O., Chimenti D.E., (eds.), Plenum Press, New York, 1995, pp.203-209.
- [88]. Wehr J., *Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych*, PWN, Warszawa 1972.
- [89]. Lu W.Y., Maxfield B.W., Kuramoto A., Ultrasonic Velocity Measurements by Correlation Methods, *Proc. 1990 Spring Conference on Experimental Mechanics*, SEM, Bethel, Ct, 1990, pp.279-284.
- [90]. Wormley S.J., Forouraghi K., Li Y., Thompson R.B., Papadakis E.P., Application of a Fourier Transform-Phase-Slope Technique to the Design of an Instrument for the Ultrasonic Measurement of Texture and Stress, *Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, (eds.), Plenum Press, NY, 1990, pp.951-958.
- [91]. Stańczyk W., Mizerski K., Deputat J., Pomiary czasu przejścia fal ultradźwiękowych z nanosekundową dokładnością, *Prace XXX Otwartego Seminarium z Akustyki*, Gdańsk 1983, *Wyd. PTE*, tom II, str.391.
- [92]. Fortunko C.M., Peterson G.L., Chick B.B., Renken M.C., Preis A.L., *Rev. of Scientific Instruments*, Vol. 63, No. 3, 1992, pp.3477.
- [93]. Schramm R.E., Szeląg J., Clark, Jr. A.V., Dynamometer-induced Residual Stress in Railroad Wheels: Ultrasonic and Saw Cut Measurements, *NISTIR 5043*, Report No. 30, National Institute of Standards and Technology, Boulder, March 1995.

- [94]. Defektoskop Ultradźwiękowy UTM-12, Instrukcja Obsługi i Opis Programu, ULTRAMET 1999, Radom
- [95]. Clark A.V Jr., Fukuoka H., Mitraković D.V., Moulder J.C., Characterization of residual stress and texture in cast steel railroad wheels, Ultrasonic, Vol. 24, September 1986, pp.281-288.
- [96]. Schramm R.E., NIST Technical Note 1399, Report No. 32, Ultrasonic Instrument to Measure Hoop Stress in Cast-Steel Railroad Wheel Rims, March 1998.
- [97]. E.A. Mandracchia, Proc. European Conf. on NDT, Firenze 16-19 November 1997, Vol. B, pp.541-546.
- [98]. Schneider E., Herzer R., Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels, Proc. 7th ECNDT Copenhagen 26-29 May 1998.
- [99]. Gori M., Development and Qualification of an Ultrasonic Method for the Evaluation of Residual Stress in the Rim of Railroad Wheels, CISE SpA - DSD/SME, Via Reggio Emilia 39, 20090 Segrate, 12081 - I, 20134 Milano, Italy.
- [100]. del Fabro V., Catot B., Mesure par ultrasons des contraintes sur roues neuves, Revue générale des chemins de fer, Mai 1996, pp. 15-20.
- [101]. niepublikowana informacja uzyskane w Iron Ore BHP, Port Hedland, Australia.
- [102]. informacja od dr Walerego V. Wysoczańskiego, Politechnika Radomska, Wydział Budowy Maszyn, Radom.
- [103]. Opis techniczny aparatu Hupetron-Z, Euroelectroprogress, 10 maja 1000, 756 61 Rožnov pod Radhostem, Republika Czeska.
- [104]. Bray Don E., Current Directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques, Proc. 15 World Congress on NDT, Roma 2000, (www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm)
- [105]. Raport dla Huty Katowice, IPPT PAN, 1982.
- [106]. Splitt G., Ultrasonic Probes for Special Tasks - the Optimum Probe for Each Application, NDT-net, September 1996, Vol.1, No. 09, (www.ndt.net/article/wcndt00/apers/splitt2/splitt2.htm)
- [107]. Deputat J., Ultrasonic technique for measuring stress in screws, Proc. 9 World Conference on Nondestructive Testing, Melbourne 1979, Paper 4, EDD-2.
- [108]. Pilarski A., Szelażek J., Wpływ rozmiaru ośrodka na prędkość impulsu fal ultradźwiękowych, Mat. VIII KKBN, Kazimierz nad Wisłą, październik 1978, Referat K-7, str.81-82
- [109]. Pilarski A., Szelażek J., Uwagi o pomiarze prędkości impulsów fal ultradźwiękowych w ośrodkach ograniczonych. Mat. XXVII Otwartego Sem. z Akustyki, Puławy 1980, str.185-188
- [110]. Kwaszczyńska-Klimek A., Szelażek J., Wpływ krawędzi na pomiar czasu przejścia impulsu fal ultradźwiękowych, Mat. 14 KKBN, Kiekrz 1985, ref. R-29.
- [111]. Szelażek J., Metoda przemieszczenia głowicy ultradźwiękowej w zastosowaniu do pomiarów nieciągłości materiałów, praca doktorska, Prace IPPT PAN, Nr 23/1987.
- [112]. Maxfield B.W., Fortunko C.M., The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs), Materials Evaluation, Vol. 41, November 1983, pp.1399-1408.
- [113]. Maxfield B.W., Kuramoto A., Hulbert J.K., Evaluating EMAT Designs for Selected Applications, Materials Evaluation, Vol. 45, October 1987, pp.1166-1183.
- [114]. Łypaciewicz G., Piezoelektryczne układy nadawczo-odbiorcze dla celów ultrasonografii, Prace IPPT PAN, Nr 22/1995.
- [115]. Gori M., Certo M., Patelli G., Aruta L., Ultrasonic Assessment of Residual Stresses in the Rim of Railway Solid Wheels, Proc. EC NDT'98, Copenhagen 26-29 May 1998.

- [116]. Scruby C.B., Dewhurst R.J., Hutchins D.A., Palmer S.B., Laser generation of ultrasound in metals, *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Sharje R.S., (ed.), Academic Press, Vol. V, 1982, pp.281-327.
- [117]. Monchali J.-P., Héon R., Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Perot interferometer, *Material Evaluation*, Vol. 44, 1986, pp.1231-1237.
- [118]. Drinkwater B., Cawley P., An Ultrasonic Wheel Probe Alternative to Liquid Coupling, *Rev. of Progress in Quantitative NDE*, Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds.), Vol. 14, Plenum Press, New York 1995, pp.983-989.
- [119]. Grandia A., Fortunko C.M., NDE Applications of Air-Coupled Ultrasonic Transducers, 1995 IEEE International Ultrasonic Symposium, Seattle, Washington, November 1 - 10, 1995.
- [120]. Carlson N.M., Johnson J.A., Rodriquez J.G., Enhancement of LaserEMAT Ultrasonics, *Rev. of Progress in Quantitative NDE*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (eds.), Plenum Press, New York, 1994, Vol.13, pp.709-715.
- [121]. Szelążek J., Głowica ultradźwiękowa do pomiaru dwójłomności akustycznej, Patent Nr PL 167941, 22 listopada 1995.
- [122]. Schramm R.E., Szelążek J., Clark A.V., Residual Stress in Induction-Heated Railroad Wheels: Ultrasonic and Saw Cut Measurements., NISTIR 5038, Report No. 28, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado. May 1995.
- [123]. Razygraev N.P., Ermolov I.N., Scherbinski V.G., Proc. Of the Seventh All Union Conference on Nondestructive Monitoring, Kiev 1974,p.110
- [124]. Ermolov I.N., Razygraev M.P., Scherbinski V.G., Study of Shaping Process for Acoustic Field of a Head-Type Wave in Test Medium, *Trans. Soviet J.NDT (Defektoskopija)*, Vol. 14, No.11, November 1978, pp.953-958.
- [125]. Couchman J.C., Bell J.R., Prediction, detection and characterization of a fast surface wave produced near the first critical angle, *Ultrasonics*, Vol. 16, No. 6, November 1978, pp.272-274.
- [126]. Ermolov I.N., Razygraev N.P., Shcherbinskii V.G., Attenuation of Ultrasonic Main Waves with Distance, *Trans. Soviet J.NDT (Defektoskopija)*, No. 1, January 1979, pp.37-40.
- [127]. Srinivasan M.N., Chudu S.N., Brey D.E., Alagarsamy A., Ultrasonic Technique for Residual Stress Measurements in Ductile Iron Continuous Cast Round Bars, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 20, No. 5, September 1992, pp.331-335.
- [128]. Bray D.E., Tang W., Evaluating Stress Gradients in Steel Plates and Bars with the L_{CR} Ultrasonic Wave, *PVP-Vol.347, Approximate Methods in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping Components*, ASME 1997, pp.157-164.
- [129]. Brokowski A., Szelążek J., Set of ultrasonic probeheads for the measurement of time of flight of ultrasonic pulses, Patent USA, Nr 5,549,001, August 27, 1996.
- [130]. Rao B.P.C., Raj B., Hübschen G., Salzburger H.J., Time-of-Flight Measurements with Shear Horizontal Waves, Proc. 7th European Conference on Non-Destructive Testing, 26-29 May 1998, Broendby, Denmark.
- [131]. Deputat J., Szelążek J., Zastosowanie głowic skośnych fal poprzecznych SH w badaniach ultradźwiękowych, *Materiały XVI KKBN, Szczecin*, 15-17 września 1987, str.70-73.
- [132]. Pęski Z., Ranachowski J., Sposób i urządzenie do wytwarzania akustycznych fal powierzchniowych, Patent 142 739, 21 stycznia 1984
- [133]. Szelążek J. Przyrząd do pomiaru prędkości propagacji powierzchniowych fal ultradźwiękowych, Patent Nr 150769, 26 lutego 1991

- [134]. Alers G.A., Burns L.R., EMAT Designs for Special Applications, *Materials Evaluation*, Vol. 45, October 1987, pp.1184-1194.
- [135]. Hirao M., Ogi H., Fukuoka H., Advanced Ultrasonic Method for Measuring Rail Axial Stresses with Electromagnetic Acoustic Transducer, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 5, 1994, pp.211-223.
- [136]. Kristan J., Garcia G., EMAT evaluates railroad wheels, *Advanced Materials & Processes*, No.11, 1998, pp.25-27.
- [137]. Utrata D., Experience with two ultrasonic-based measurement techniques for residual stress determination in railroad rails, *American Railway Engineering Association, Bulletin 733*, Chicago 1989.
- [138]. Parnell B., *Physical Acoustic*, W.P. Mason (ed.), Vol. IV, Moskwa 1973, pp.167.
- [139]. Deputat J., Szelązek J., Adamski M., Brokowski A., Kieu Van L., Nieniszczące badania naprężeń własnych w kolejowych kołach monoblokowych, *Mat. 16 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących*, Szczecin, 15-17 września 1987, Ref. R-9, str.75-81
- [140]. Deputat J., Adamski M., Gołjasz J., Kalisiewicz J., Ultrasonic Technique for Investigation of Residual Stresses in Cylindrical Forgings, *Engineering Trans., IFTR* (editor), Vol. 41, pp.61-67.
- [141]. Pilarski A., Szelązek J., Deputat J., Ditre J., Rose J.L., High-frequency Lamb modes for ultrasonic tensometry, *Proc. Conf. Non-Destructive Testing 92*, C.Hallai and P.Kulcsar (eds.), 1992 Elsevier Science Publishers. pp.1044-1049.
- [142]. Hodgson W.H., Residual Stresses in Rail, *Proc. International Conf. on Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*, Delft June 1992, Kalker J.J et al (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp.61-76.
- [143]. Schilling C.G., Blake G.T., Measurement of Triaxial Residual Stresses in Railroad Rails, *United States Steel Corporation, Technical Report 76-H-046(019-1)*, February 20, 1980.
- [144]. Gnäupel-Herold T., Brand P.C., Prask H.J., Neutron Diffraction Investigation of Residual Stresses in Transverse/Oblique Rail Slices subjected to Different Grinding Strategies, *National Institute of Standards and Technology, Center for Neutron Research, Draft Report*, 1998.
- [145]. Towpik K., *Utrzymanie nawierzchni kolejowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- [146]. Steel R.K., Joerms M.W., Utrata D., Carpenter G.F., Catastrophic web cracking of railroad rails, *Residual Stress in Rails*, Vol.1, Orringer O. et al (eds.), 1992 Kluwer Academic Publishers, The Netherlands 1992.
- [147]. Igwamezie J.O., Kennedy S.L., Gore N.R., Residual Stress and Catastrophic Rail Failure, *Proc. International Conf. on Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*, Delft June 1992, Kalker J.J et al (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp.325-336.
- [148]. Bramfitt B.L., *Residual Stresses in Rails - Measured by Web Sawcut Method*, International Symposium on Rail Steels, October 1992, Iron and Steel Society, Inc.
- [149]. Wineman S.J., McClintock F.A., A Saw-cutting Test for Estimating Stress Intensity as a Rail Web Crack Due to Residual Stresses, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol.13, 1990, pp.21-27.
- [150]. Deroche R.Y., Stress Releasing and Straightening of Rail by Stretching, *International Heavy Haul Conference*, Colorado Springs, CO, September 1988, paper 88-HH-17.

- [151]. Urashima C., Sugino K., Generation Mechanism of Residual Stress in Rails, Proc. III Residual Stresses Conf., 23-26 July 1991, Tokushima University, Japan, Fujiwara H. (ed.).
- [152]. Jericho E., Schinen mit geringeren Eigenspannungen, Eisenbahn Technische Rundschau, Vol. 46, Oktober 1997, pp.663-666.
- [153]. Guerike W., Weiser J., Schmedders H., Dannenberg R., Ursache von Schinen-Eigenspannungen infolge Rollenrichtens und Beitrag zur Verringerung, Eisenbahn Technische Rundschau, Vol. 46, Oktober 1997, pp.655-663.
- [154]. Geuricke W., Simulation als Voraussetzung zur Minimierung der Eigenspannungen beim Richten von Profilen und Schienen, Wiss. Zeitschrift der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg 36, Heft 4, 1992, pp.29-34.
- [155]. Wineman S.J., McClintock F.A., Residual Stresses Near Rail End, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 13, Elsevier Science Publishers 1990, pp.1-9.
- [156]. Groom J.J., Determination of Residual Stresses in Rails, Final Report for US Department of Transportation, No DOT/FRA/ORD-83/05, May 1983.
- [157]. Schilling C.G., Blake G.T., The Measurement of Triaxial Residual Stresses in Railroad Rails - Measurement and Analysis Techniques, Experimental Techniques, Vol. 1, No 9, September 1984, pp.25-31.
- [158]. Abdurashitov A.Y., Georgiev H.N., Mezohova N.Y., Reikhart V.A., Method for Evaluation Residual Stresses in Railroad Rails, (translated from Zivodska Laboratoriya), Vol. 57, No. 4, April 1991, pp.57-58.
- [159]. Brand P.C., Prask H.J., Hicho G.E., Residual Stress in Steel Railroad Track Measured by means of Neutron Diffraction, NISTIR 5912, Materials Science and Engineering Laboratory, October 1996.
- [160]. Magiera J., Orkisz J., Karmowski W., Reconstruction of residual stresses in railroad rails from measurements made on vertical and oblique slices, WEAR, Vol. 191, 1996, pp.78-89.
- [161]. Magiera J., Orkisz J., Application of the meshless finite difference method to physically based approximation of experimental data, Proc Second ECCM, Cracow, June 26-29, 2001.
- [162]. Orkisz J., Cecot W., Prediction of Actual Residual Stresses Resulting from Cyclic Loading in Kinematic Hardening Material, Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, D.R.J. Owen, Oñate E. and Hinton E (eds.), CIMNE, Barcelona 1997, pp.1039-1042.
- [163]. Cecot W., On Application of the Zarka Approach to Estimation of Residual Strains and Stresses in Railroad Rails, Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, D.R.J. Owen, Oñate E. and Hinton E (eds.), CIMNE, Barcelona 1997, pp.1873-1878.
- [164]. Krok J., Cecot W., Pazdanowski M., Shakedown analysis of residual stresses in railroad rails with kinematic hardening taken into account, Proc. Second ECCM, Cracow, June 26-29, 2001.
- [165]. Webster P.J., Mills G., Wang X., Kang W.P., Residual Stress Measurements in Rails by Neutron Diffraction, Proc. International Conf. on Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, Delft June 1992, Kalker J.J et al (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp.307-314.
- [166]. Deputat J., Brokowski A., Szeląg J., Mizerski K., Stańczyk W., Opracowanie metody pomiaru naprężeń własnych w szynach metodą ultradźwiękową. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej IPPT PAN, Warszawa, 1981.

- [167]. Struk S., Miernik A., Fiak K., Wyznaczanie naprężeń własnych w szynach kolejowych, *Mat. II Seminarium „Nowoczesna obróbka cieplna wyrobów hutniczych i wytwarzanych z nich elementów”*, 9-13 października 1985, Gliwice-Wisła 1985, str.72-81.
- [168]. Deputat J., Szelażek J., Kwasczyńska-Klimek A., Miernik A., Experiences in Ultrasonic Measurements of Rail Residual Stresses, *Proc. Int. Conf. on Residual Stresses in Rails*, Cracow, April, 1990
- [169]. Measures des Contraintes Residuelles dans les Rails par Ultra Sons, *Raport UNIMETAL*, March 1989.
- [170]. Adamski M., Towpik K., Badania rozkładów naprężeń w iglicach rozjazdowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, Nr 41, 1995.
- [171]. Keeney K., The Heat's On: Time to Resolve Track Buckling Woes, *Modern Railroads*, December 1988, p.5.
- [172]. Edel K.O., Computersimulation des Auftretens der Schienentemperaturen, *Schienen der Welt*, February 1991, pp.15-27
- [173]. Richards J., Weather and site effects on rail temperatures, *The Railway Gazette*, June 19, 1964, pp. 505-512.
- [174]. Esveld C., *Modern Railway Track*, MRT-Production, Duisburg 1989, West Germany.
- [175]. Materiały promocyjne BHP Iron Ore, Port Hedland, Australia.
- [176]. Czyczyła W., Towpik K., *Mat. Konferencji Drogi Kolejowe '97*, Kraków-Kościelisko 5-7 grudnia 1997, str.65-73.
- [177]. Bałuch H., Gawel K., Oczykowski A., Towpik K., Wyboczenie toru bezстыkowego w warunkach zimowych, *Drogi Kolejowe*, Nr 4, 1986.
- [178]. Informacja techniczna firmy JPTechnologies Inc., 1430 Cooley St., San Bernardino, CA 92408, USA.
- [179]. HITEC Products Inc., *Weldable Strain Gauges and Temperature Sensors Catalogue*, Ayer, MA, 2000.
- [180]. Broszura aparatu do pomiaru sił w szynach, *Politechnika Krakowska, Wydział Dróg i Mostów*, 1995.
- [181]. Sluz A., Kish A., Reed D., Factors Affecting Neutral Temperature Changes in Continuously Welded Rail, *Proc. American Engineering and Maintenance Assoc., Railroad Track Technology Conference*, Chicago 13-15 September 1999.
- [182]. Wytyczne utrzymania torów bezстыkowych, *Dyrekcja generalna PKP, Naczelny Zarząd Utrzymania Kolei*, Warszawa 1988.
- [183]. *Rail Stress Monitor - Model 328, Operating Instruction*, Electrologic Pty Ltd, Sydney, Australia 1990.
- [184]. Kish A., Coltman M., New technique for rail longitudinal force measurement and rail resistant capacity evaluation, *American Railway Engineering Association, Bulletin* 272.
- [185]. Barylski A., Koc W., Kuć K., Szymczak C., Wilk A., Badania sił osiowych w szynie przy wymuszonych przemieszczeniach poprzecznych, *Mat. IX Konf. Naukowej „Drogi Kolejowe”*, Zakopane- Kościelisko, 5-7 listopada 1997, str. 33-44.
- [186]. Development of apparatus for measuring the longitudinal forces in rails laid in the track, *ORE D150 Report*, Utrecht 1983.
- [187]. Posgay G., Molnar P., Investigations using magnetic Barkhausen noise measurement, *NDT Methods and Equipment*, MetalElektro, Hungary, 1997.
- [188]. Kłosek K., Grabczyk J., Zajac B., Jasiński I., Wykorzystanie urządzenia typu RailScan do pomiarów naprężeń w torze bezстыkowym dla potrzeb PKP, *Mat. Konf. „Drogi Kolejowe”*, Org. CNTK i Politechnika Warszawska, Spała 1999, str. 83-96.
- [189]. Egle D.M., Bray D.E., Application of the Acoustoelastic Effect to Rail Stress Measurement, *Materials Evaluation*, Vol. 37, March 1979, pp.41-55.

- [190]. McLaughlan D.T., Burns L.R., Alers G.A., Measurement of stress in steel structures with SH wave EMATs, Rev. of Progress in Quantitative NDE, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (eds.), Vol. 7B, Plenum Press, New York 1988, pp.1399-1404.
- [191]. Thompson R.B., Lee S.S., Smith J.F., Microstructure Independent Acoustoelastic Measurement of Stress, Applied Physics Letters, Vol. 44, 1984, pp.296
- [192]. Materiały niepublikowane, informacja od dr M. Adamskiego.
- [193]. ERRI Report D 202/RP, Improved Knowledge of Forces in CWR Track (Including Switches), October 1997, Utrecht.
- [194]. Deputat J., Szelążek J., Adamski M., Experiences in Ultrasonic Measurements of Stresses in Rails, FRA/ERRI International Conf on Rail Quality and Maintenance for Modern Railroad Operation, Delft, 24-26 June 1992, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, Vol. 1, pp.169-183.
- [195]. Szelążek J., Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails, NDT&E International, Vol. 25, No. 2, 1992, pp. 77-85.
- [196]. Utrata D., Longitudinal Stress Measurements in Rail Using the DEBRO-30 Ultrasonic Stress Meter, Association of American Railroads, Technical Center Report No. R-866, Chicago, July 1994.
- [197]. Towpik K., Adamski M., Badania zmian temperatury neutralnej szyn w eksploatowanych torach bezстыkowych. Mat. IX Krajowej Konf. Naukowo-Technicznej „Drogi Kolejowe”, Kraków-Zakopane, listopad 1997, str. 333-344.
- [198]. Gallagher M.T., Polzin M.A., Christie C.D., Railroad Wheel Flange Failures: Causes and Preventions, ASME - Rail Transportation, Vol. 5, 1992, pp.155-163.
- [199]. Deputat J., Naprężenia własne i pękanie kół monoblokowych, Problemy Kolejnictwa, CNTK, Zeszyt 110, Warszawa 1992.
- [200]. Opinsky A.J., Understanding Rim Failure in Freight Car Wheels, Association of American Railroad, Report No. R-500,, Chicago1987.
- [201]. Johnson M.R., Robinson R.R., Opinsky A.J., Detone D.H., Railroad Wheel Back Rim Face Failures: III - Residual Stress Calculations on 33" D One-Wear Freight Car Wheels, Association of American Railroads, Technical Center Report No. R-560, Chicago 1983.
- [202]. Kuhlman C., Gallagher M., The significance of material properties on stress developed during quenching of railroad wheels, Proc. 1988 Joint ASME/IEEE Railroad Conference, Eds. V.T. Hawthorne, T. Kneschke, Book No. 100265, pp.55-63.
- [203]. Hirakawa H., Sakamoto H., New Design Concept for Railroad Wheels, The Sumitomo Research, No. 31, November 1985, pp. 137-146.
- [204]. Orkisz J., Residual Stress Analysis in Railroad Car Wheels Working in Service Conditions, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, Nr 1-2, Vol. 28, 1990, str. 161-169.
- [205]. Hołowiński M., Bobrov E., Analysis of Residual Stresses in Railroad Car Wheel by FEM, Francis Bitter National Magnet Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 1994.
- [206]. Orkisz J., A Method of Full 3D Residual Stress Reconstruction in Railroad Vehicle Wheels Using Physically Enhanced Data from Destructive Measurements, Report for U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, August 1996.
- [207]. Orkisz J., Skrzat A., Reconstruction of residual stresses in railroad vehicle wheels based on enhanced saw cut measurements, formation and benchmark tests, WEAR, Vol. 191, 1996, pp. 188-198.
- [208]. Gordon J., Estimation of Residual Stresses in Railroad Car Wheels Resulting from Manufacture and Service Loading, Master Thesis, Tufts University, 1998.