
**XXV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 20-22 marca 2019**

ULTRADŹWIEKOWE POMIARY NAPRĘŻEŃ – NIECO HISTORII

Jacek SZELAŻEK
IPPT PAN, Warszawa
j.szelazek@gmail.com

1. WSTĘP

Celem pracy jest przedstawienie krótkiej historii rozwoju ultradźwiękowych technik pomiarowych naprężeń w IPPT PAN, w latach 1970-2015. W pracy przedstawiono rozwój aparatury i układów głowic ultradźwiękowych począwszy od pierwszych pomiarów wykonanych przez prof. Juliana Deputata aż do aparatów DEBRO i DEBBIE. Aparaty DEBRO budowane były w IPPT jako ultradźwiękowe mierniki naprężeń mogące współpracować z różnymi układami głowic, zarówno do pomiaru dwójłomności akustycznej jak i do pomiarów falami podpowierzchniowymi. Aparaty DEBBIE pomyślane były jako wyspecjalizowane mierniki naprężeń obwodowych w monoblokowych kołach kolejowych i produkowane są w firmie DEBRO UMS.

2. BADANIA ZJAWISKA ELASTOAKUSTYCZNEGO

Podstawowa dla ultradźwiękowych pomiarów naprężeń praca została opublikowana przez Hughesa i Kelle'go w 1953 roku [1]. Autorzy opisali efekt elastoakustyczny (zależność prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia) i przedstawili wyrażenia pozwalające na obliczenie prędkości fal w materiale poddanym naprężeniu. Sześć lat później Beson i Realsen doświadczalnie potwierdzili ten efekt [2]. Niestety zmiany prędkości fal ultradźwiękowych wywołane naprężeniem są bardzo małe i w owym czasie niemożliwe było wystarczająco precyzyjne wyznaczenie zmian czasów przejścia fal. Ale udało się wyznaczyć zmiany kierunku polaryzacji fali poprzecznej spowodowane działaniem naprężenia.

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. 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. Im wyższa wartość współczynnika elastoakustycznego tym wyższa „czułość” danej fali na naprężenia. Wzór na obliczanie wartości współczynnika na podstawie zmierzonych doświadczalnie zmian prędkości propagacji (lub czasu przejścia) impulsów ultradźwiękowych ma postać:

$$(1) \quad \beta_{ijk} = \frac{(V - V_0)}{V_0 \sigma_1} = \frac{(t_0 - t)}{t \sigma_1}$$

gdzie: β_{ijk} - współczynnik elastoakustyczny; indeksy i, j, k oznaczają odpowiedniokierunki 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.

Ze wzoru wynika, że aby obliczyć wartość naprężenia konieczna jest znajomość czasów przejścia (lub prędkości) fal w materiale bez naprężeń i w materiale z naprężeniem oraz znajomość wartości współczynnika elastoakustycznego.

Pierwsze opublikowane wyniki pomiarów wartości współczynników β_{221} , β_{211} i β_{231} (współczynniki mierzone dla fali podłużnej i poprzecznych rozchodzących się przez grubość próbki poddanej rozciąganiu) opisano w 1962 roku [3]. Pięć lat później, w pracy [4] 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 [5]. 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. Towarzystwa kolejowe finansowały takie 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 [6], a w 1973 ukazała się pierwsza praca opisująca próby zastosowania pomiaru dwójłomności akustycznej we wieńcach kół kolejowych do oceny stanu naprężeń w kołach [7]. W 1976 opublikowana została pierwsza polska praca przedstawiająca możliwości wykorzystania efektu elastoakustycznego do badania naprężeń [8]. Podano w niej wyniki pomiarów współczynników β_{211} i β_{231} dla stali, zmierzonych metodą interferencyjną. 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" [9]. W 1987 roku, w pracy [10] 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. Równoległe z pomiarami współczynników elastoakustycznych rozwijana była aparatura ultradźwiękowa umożliwiającą precyzyjne pomiary czasów przejścia impulsów fal. Badano również zależność współczynników elastoakustycznych od temperatury. Badania Marka Adamskiego wykazały pomijalne zmiany wartości tych współczynników od temperatury w zakresie 0 – 70°C.

Ten skrócony przegląd historii badań nad zjawiskiem elastoakustycznym pokazuje, że już w końcu lat 70-tych zarówno wiedza o zjawisku jak i dokładności uzyskiwane w pomiarach czasu przejścia fal umożliwiły podjęcie pomiarów naprężeń w warunkach laboratoryjnych. Do zastosowań przemysłowych, w warunkach hali fabrycznej czy terenowych, brakowało jeszcze jedynie przenośnej, zasilanej bateryjnie aparatury umożliwiającej pomiary czasu przejścia z nanosekundową dokładnością i specjalnych głowic ultradźwiękowych.

3. BADANIA ZJAWISKA I POMIARY NAPRĘŻEŃ W POLSCE

Pierwsze badania zjawiska elastoakustycznego wykonane w Polsce przez J. Deputata to badania zmian czasu przejścia fal podłużnej i poprzecznej w śrubie poddanej rozciąganiu. W tym przypadku zmiany czasu przejścia są stosunkowo duże ponieważ wynikają zarówno z wydłużenia śruby (zmiana drogi fal) jak i ze zjawiska elastoakustycznego (spadek prędkości fal wywołany naprężeniem rozciągającym).

W początku lat 80-tych J. Deputat nawiązał współpracę z Hutą Katowice zainteresowaną nieniszczącymi pomiarami naprężeń własnych w szynach kolejowych poddanych prostowaniu. Współpraca ta zaowocowała powstaniem w 1982 pierwszego Ultradźwiękowego Miernika Naprężeń zbudowanego na bazie defektoskopu Unipan 511 i zestawu głowic na fale podpowierzchniowe. Aparat zasilany sieciowo był wieli i ciężki. Głowice też. Ale aparatura ta umożliwiła wykonanie wielu pomiarów i zdobycie cennych doświadczeń. W pracowni J. Deputata rozpoczęły się prace nad rozwojem aparatury i układów głowic dedykowanych do pomiarów naprężeń w szynach. Powstał aparat DEBRO-20 (nazwa od pierwszych liter nazwisk Juliana Deputata i Andrzeja Brokowskiego), potem DEBRO-30 i wreszcie zbudowany w roku 2001 przez Krzysztofa Mizerskiego (niestety jedynie w jednym egzemplarzu) aparat DEBRO-35. Cechą odróżniającą powstałą w IPPT aparaturę od innych przyrządów jest to, że zaprojektowane zostały specjalnie w celu pomiarów naprężeń w warunkach przemysłowych i współpracowały z wyspecjalizowanymi układami głowic. A w dużej mierze właśnie od układów głowic zależała łatwość i dokładność pomiaru czasu przejścia fal i tym samym dokładność wyznaczania naprężeń.

Współpraca z Hutą Katowice ukierunkowała na kilka lat prace w IPPT na pomiary naprężeń własnych w szynach i zaowocowała powstaniem serii aparatów DEBRO-30, które zostały zakupione od IPPT PAN przez wielu wiodących producentów szyn na świecie. Niestety zainteresowanie ultradźwiękowymi pomiarami naprężeń własnych w nowych szynach zniknęło po wprowadzeniu normy nakazującej oceniać wartości tych naprężeń metodą niszczącą. A szkoda ponieważ ostatnie pomiary wykonane w Hucie Katowice wykazały możliwości innego, łatwiejszego sposobu skalowania aparatury i podniesienia dokładności pomiarów.

4. BADANIA NAPRĘŻEŃ W SZYNACH KOLEJOWYCH PO PROSTOWANIU

Początek lat 80-tych to współpraca Pracowni J. Deputata z Hutą Katowice (były to dobre czasy gdy taka współpraca wspierana była finansowo przez zakłady przemysłowe). Celem badań były nieniszczące wyznaczanie naprężeń własnych w szynach kolejowych poddanych prostowaniu w prostownicy rolkowej. W maszynie tej szyna przechodząc pomiędzy kolejnymi rolkami poddawana jest plastycznemu przeginaniu w płaszczyźnie pionowej, z coraz to mniejszą amplitudą. W rezultacie powstaje prosta szyna z naprężeniami własnymi - rozciągającymi w główce szyny i w stopce, ściskającymi w szyjce. Zbyt wysokie naprężenia mogą być powodem pęknięcia szyny. Rys. 1 pokazuje taki przypadek.

Najwyższą wartość współczynnika elastoakustycznego ma fala podłużna rozchodząca się wzdłuż kierunku działania naprężenia. Dlatego do badania naprężeń własnych w szynach J. Deputat zaproponował wykorzystanie podłużnej fali podpowierzchniowej. Falę taką wzbudza się i odbiera z tej samej powierzchni głowicami kątowymi na fale podłużne, w których kąt klina jest równy pierwszemu kątowi krytycznemu. Początkowo fale te wykorzystywane do wykrywania wad leżących blisko powierzchni [11]. Okazało się, że fale te, rozchodzące się wzdłuż szyny, pod jej powierzchnią, są dobrym kandydatem do badania naprężeń własnych w szynach, w których dominująca jest właśnie podłużna składowa naprężenia własnego.

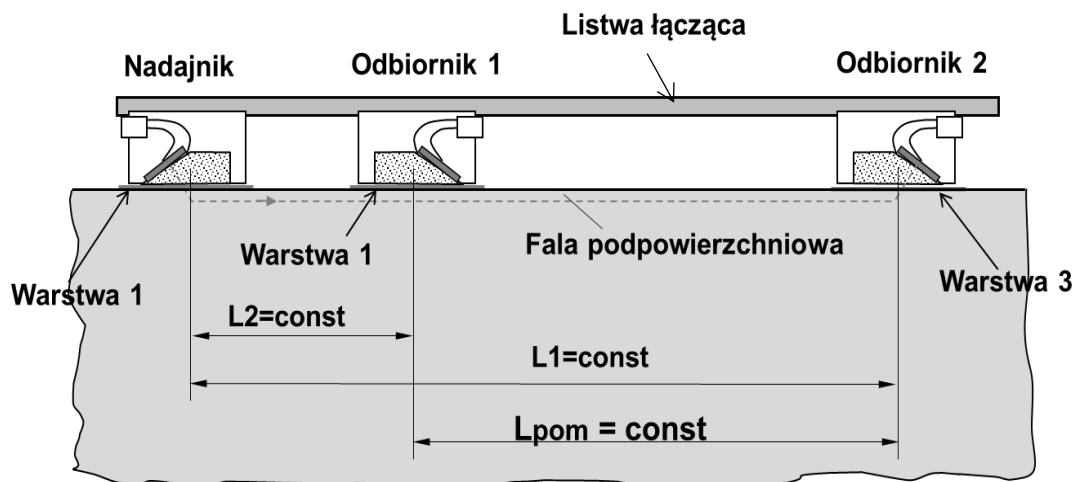


Rys. 1. Skutki bardzo wysokich naprężeń własnych w szynach kolejowych (z *Understanding Stresses in Rails (Part 2)*, January 4, 2014 / Filed under: Rail Maintenance, Jude Igwemezie, • April, 2007)

Do pomiaru czasu przejścia fali podpowierzchniowej wystarczy ustawić w jednej linii, w określonej odległości między sobą, na powierzchni szyny dwie głowice (nadawczą i odbiorczą). Czas przejścia między przetwornikiem nadawczym a odbiorczym jest sumą czasów przejścia fal przez kliny załamujące, dwie warstwy sprzężenia cieczowego i przez materiał szyny.

Zmiana grubości cieczowej warstwy sprzęgającej (woda, olej) o jedynie 0,05 mm powoduje zmianę czasu przejścia o 30 ns. Oznacza to, że dla głowic ustawionych w odległości 100 mm od siebie, nieznaczna zmiana grubości warstwy sprzęgającej odpowiada zmianie obliczanego naprężenia o 125 MPa. Tak wysoka „czułość” na zmiany sprzężenia najprostszego układu głowic praktycznie eliminuje go z pomiarów (choć niektórzy z uporem ciągle stosują takie układy).

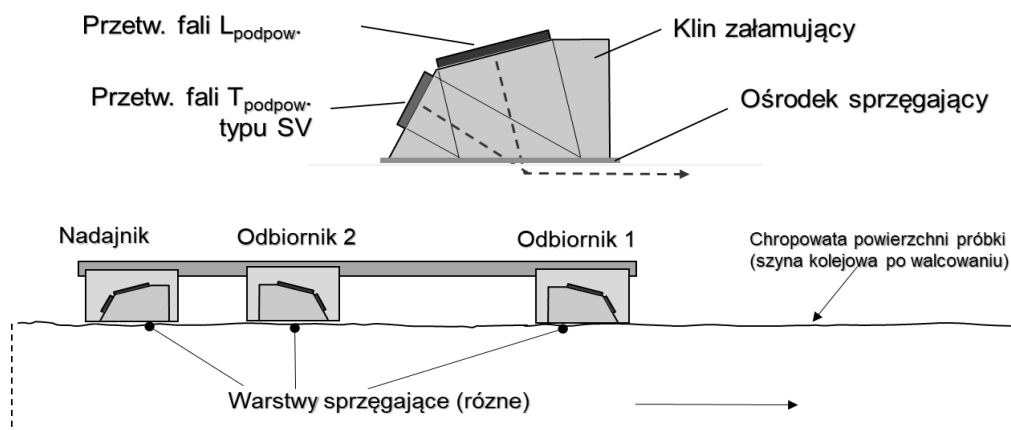
W latach 70-tych zastosowano różnicowy układ głowic, pokazany na rys. 2. Składa się on z jednej głowicy nadawczej i dwóch identycznych głowic odbiorczych ustawionych w jednym uchwycie ustalającym odległości między głowicami.



Rys. 2. Różnicowy układ głowic na podpowierzchniowe fale podłużne.

Jeśli grubości warstw sprzęgających pod obydwoma głowicami odbiorczymi są identyczne, teoretycznie różnicowy czas przejścia równy $tL1 - tL2$ odpowiada czasowi przejścia fali w szynie, na odcinku L_{pom} . Niestety chropowatość powierzchni szyny nie jest jednakowa na całej jej powierzchni i grubości warstw sprzęgających pod odbiornikami nie są jednakowe. Próba wyeliminowania wpływu zmian grubości warstw sprzęgających na mierzone czasy było wykorzystanie nieczulej na naprężenie fali poprzecznej. W latach 80-tych powstał „poprawiony

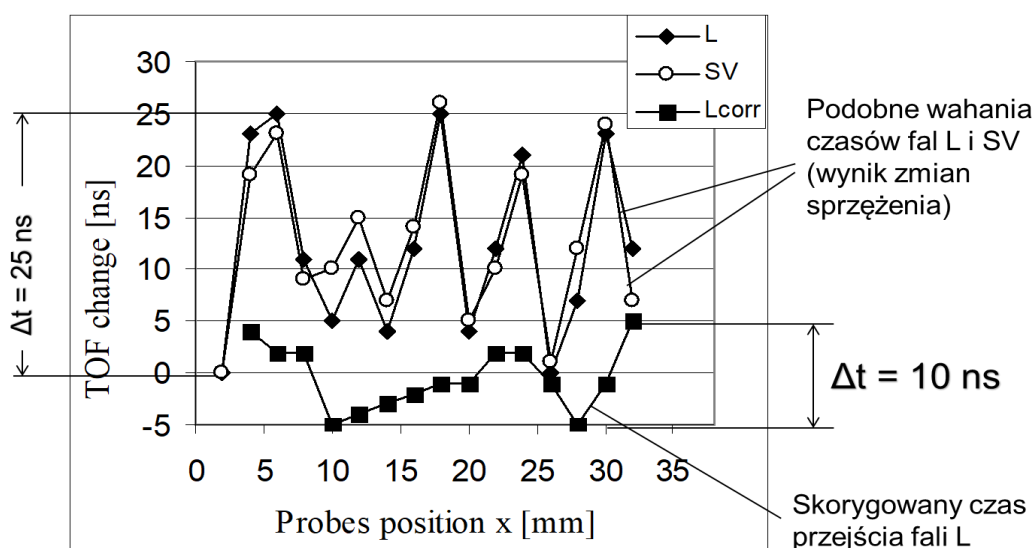
układ różnicowy”. Założono, że jeśli na tej samej drodze w materiale zmierzone zostaną czasy przejścia podpowierzchniowej fali podłużnej (czułej na naprężenie) i poprzecznej typu SV (praktycznie nieczułej na naprężenie) to zmiany czasu przejścia fali poprzecznej będą spowodowane jedynie zmianami grubości warstw sprzęgających. Aby obydwie fale przechodziły przez warstwy sprzęgające w tych samych miejscach i rozchodziły się po tej samej drodze w materiale szyny, zbudowane specjalne, podwójne głowice kątowe. Głowice te pokazuje rys. 3. Na jednym klinie załamującym osadzone są dwa przetworniki. Jeden generuje w szynie falę podłużną (1-szy kąt krytyczny) a drugo poprzeczną SV (2-gi kąt krytyczny) przy czym wielkości przetworników i ich położenia dobrano tak aby obydwie fale przechodziły przez ten sam obszar sprzężenia akustycznego.



Rys. 3. „Poprawiony różnicowy” układ głowic na podpowierzchniowe fale podłużne.

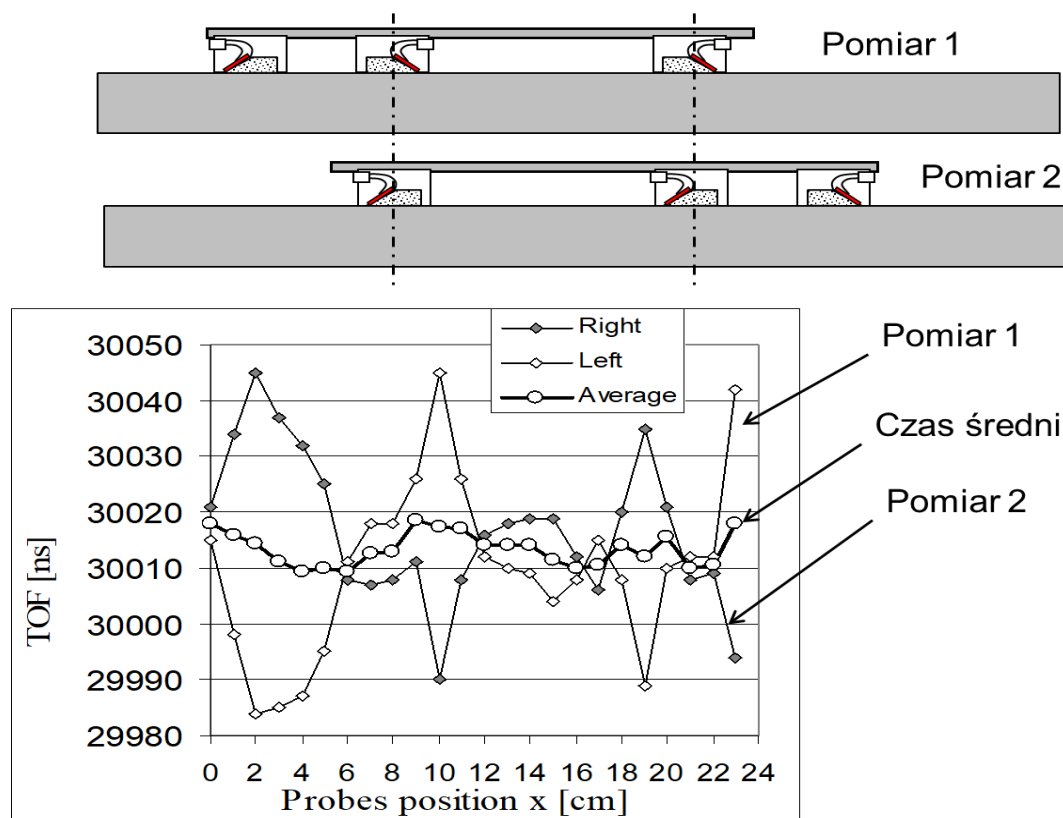
Poprawę powtarzalności wyników uzyskiwanych tym układem zbadano wykonując pomiaru czasu przejścia fal w wielu punktach szyny o stałych na jej długości naprężeniach. Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 4.

Pokazuje on zmierzone czasy przejścia fali podłużnej i poprzecznej oraz „poprawiony” czas przejścia fali podłużnej. Widoczne są podobne wahania czasów przejścia fal podłużnej i poprzecznej co dowodzi, że głównym czynnikiem powodującym rozrzuty mierzonych czasów są zmiany grubości warstw sprzęgających pod głowicami odbiorczymi. Dowodzi to również, że uznawany za „prawie doskonały” różnicowy układ głowic doskonałym nie jest.



Rys. 4. Wyniki pomiarów czasów przejścia „poprawionym różnicowym” układ głowic na podpowierzchniowe fale podłużne.

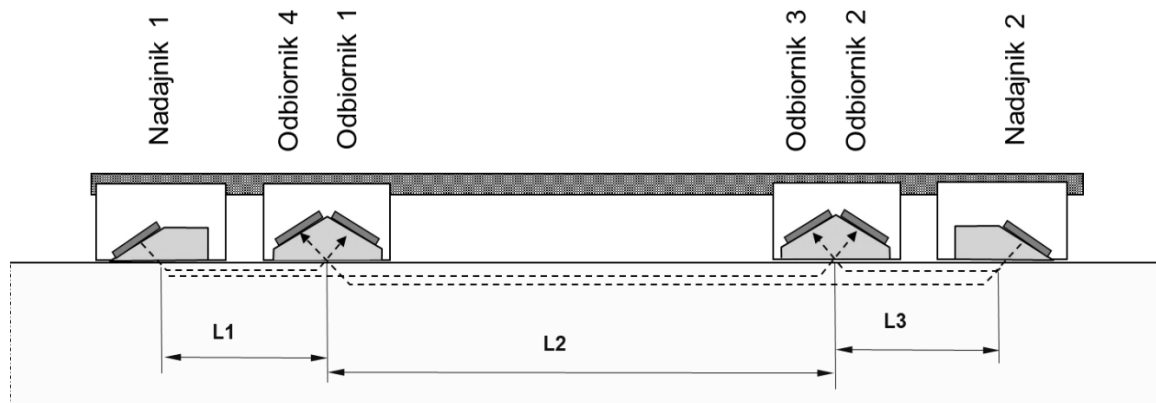
Poprawa powtarzalności pomiarów czasów przejścia „poprawionym” układem, choć dwukrotna, okazała się niewystarczająca. Równocześnie zauważono, że podobną poprawę powtarzalności można uzyskać zwykłym układem różnicowym wykonując w jednym miejscu dwa pomiary. Pierwszy falą rozchodzącą się w jednym kierunku, a drugi, po ponownym sprzęgnięciu głowic tak aby głowice odbiorcze znalazły się w tych samych miejscach co poprzednio, fala rozchodzącą się w przeciwną stronę. Schemat pomiaru „odwracającym układem różnicowym” pokazuje rysunek 5. Do dokładnego ustawiania głowic w tych samych miejscach używano szablonu mocowanego do szyny magnesami.



Rys. 5. Wyniki pomiarów czasów przejścia „odwracającym układem różnicowym”.

Widoczna jest wyraźna poprawa powtarzalności osiągnięta jednak znacznym skomplikowaniem pomiarów (ustawianie szablonu, dwukrotne sprzęgnięcie głowic itp.). Logicznym krokiem w rozwoju układów głowic było więc zbudowanie układu „lustro”, czyli podwojonego układu różnicowego, w którym mierzone były czasy przejścia fal rozchodzących się w dwóch kierunkach, przy jednokrotnym sprzęgnięciu układu do szyny. Schematyczną budowę takiego układu pokazano na rysunku 6.

Rysunek 7 przedstawia postęp jaki dokonał się w precyzyjnych pomiarach czasów przejścia fal podpowierzchniowych w latach 1980 – 2005. Pokazuje on porównanie rozrzutów czasów przejścia fal mierzonych układem składającym się jedynie z głowicy nadawczej i odbiorczej, układem różnicowym i układem „lustro”. Widoczna jest wyraźna przewaga układu „lustro” nad układem różnicowym. Dopiero ten właśnie układ głowic umożliwił wykonanie pomiarów w warunkach przemysłowych, bez czasochłonnego przygotowywania powierzchni szyn przed pomiarem.



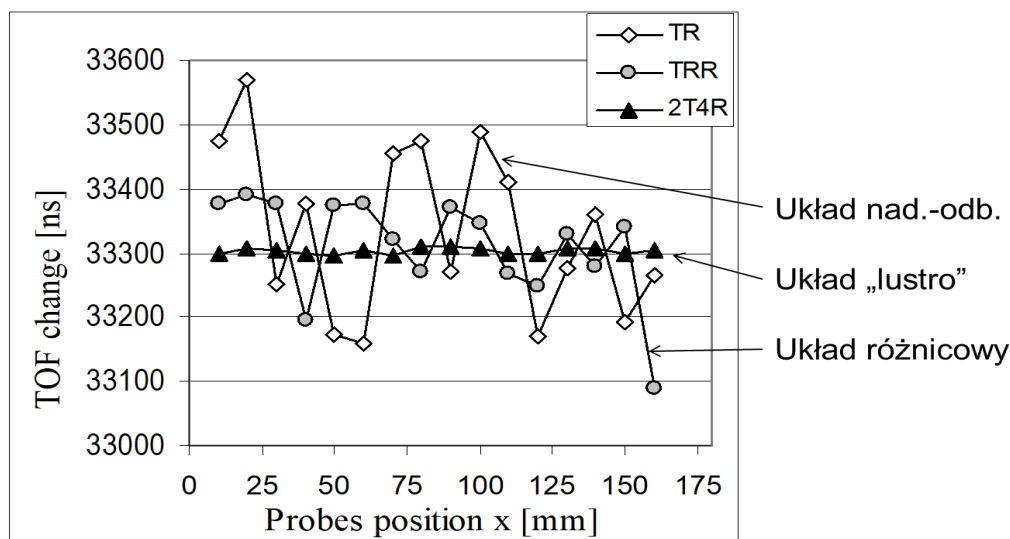
Pomiar 4 czasów przejścia:

t1 – N1→O1 t3 – N2→O3

t2 – N1→O2 t4 – N2→O4

Czas średni $t_{sr} = (t2 - t1 + t4 - t3)/2$ teoretycznie niezależny od grubości warstw sprzęgających

Rys. 6. Schemat budowy układu głowic typu „lustro” na fale podpowierzchniowe.

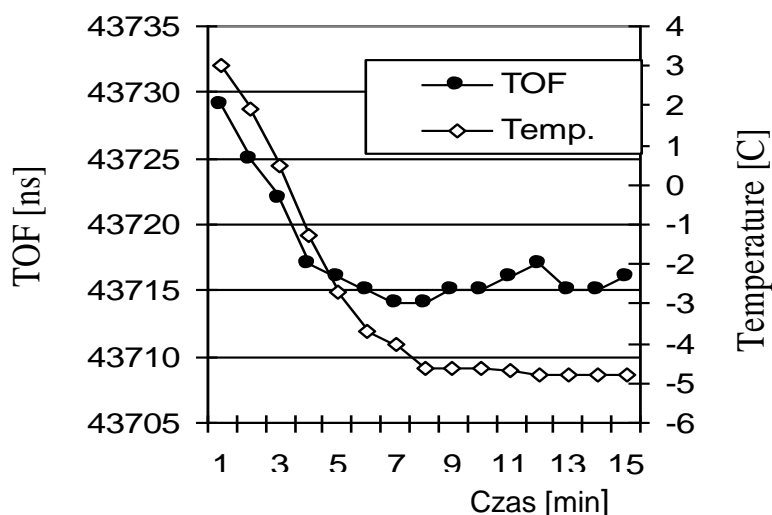


Rys. 7. Porównanie rozrzutów mierzonych czasów przejścia fal podpowierzchniowych najprostszym układem Nadajnik-Odbiornik, układem różnicowym i układem „lustro”.

Głowice 12-przetwornikowe były praktycznie ostatnim etapem rozwoju układów głowic do pomiarów naprężeń w szynach kolejowych. Podjęto jeszcze próbę budowy „podwojonego lustra” z podwójnymi przetwornikami na każdym klinie (łącznie 24 przetworniki umożliwiające pomiary krzyżowych czasów). Aby obliczyć naprężenie dla jednego przyłożenia głowicy konieczne było wykonanie 16 pomiarów czasu przejścia, co przy ręcznych pomiarach stawało się zbyt czasochłonne. Zbudowano jeden prototyp aparatu mierzącego te czasy automatycznie. Jednak nieznaczna jedynie poprawa powtarzalności pomiarów na szynach okazała się niewarta ogromnej komplikacji budowy takiego układu głowic.

W odróżnieniu od badań laboratoryjnych, w praktyce przemysłowej pomiary często wykonywane są w różnych temperaturach. Znana jest zależność prędkości fal od temperatury. Znana jest też rozszerzalność cieplna elementów, z których wykonane są układy głowic. Zjawiska te powodują, że mierzone czasy przejścia, niezależnie od stosowanego układu głowic, są zależne od temperatury zarówno szyny jak i elementów układu głowic i konieczne jest stosowanie poprawki temperaturowej. Dlatego w budowie układów głowic w IPPT zwracano

uwagę na to, aby wartość poprawki była precyzyjnie wyznaczana i możliwie mała. Aby temperatura elementów głowicy stykających się po sprzęgnięciu w powierzchnię szyny możliwie szybko osiągała temperaturę mierzonej szyny, budowane układy głowic miały możliwie małą pojemność cieplną. Wszystkie głowice współpracujące z aparatami DEBRO były wyposażone w czujniki temperatury a przy obliczaniu wartości naprężenia aparaty automatycznie uwzględniały wpływ temperatury na wynik. Rysunek 8 pokazuje jak zmienia się czas przejścia fali podpowierzchniowej oraz temperatura wskazywana przez czujnik głowicy po przyłożeniu prototypowej głowicy typu „lustro” o temperaturze 23°C (wyposażonej w listwę łącząco poszczególne kliny załamujące wykonaną z brązu) do szyny o temperaturze -5°C.



Rys. 8. Zmiany mierzonego czasu przejścia i wskazań temperatury po sprzęgnięciu układu głowic o temperaturze 23°C do szyny o temperaturze -4°C.

Obserwowane zmiany czasu sięgają około 17 ns (co jest dla tego układu głowic równoważne zmianie naprężenia o ponad 40 MPa). Spowodowane one są zmianami prędkości fal w klinach załamujących, rozszerzalnością cieplną klinów i listwy ustalającej odległość między nimi oraz zmianami temperatury i prędkości fal w wierzchniej warstwie szyny. Mierzony czas stabilizuje się dopiero po około 7 minutach! Aby skrócić czas stabilizacji temperaturowej i zminimalizować poprawkę temperaturową ostatnie budowane głowice miały:

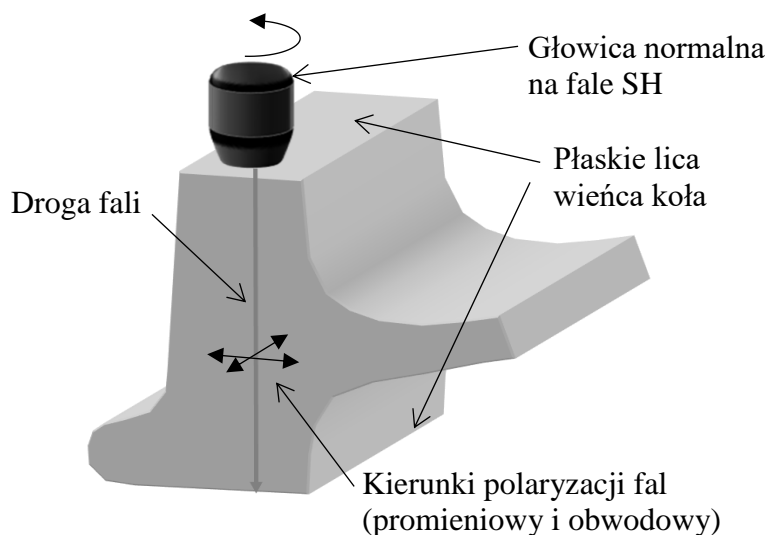
- kliny załamujące o możliwie małej wysokości (krótka droga fal w tworzywie sztucznym, niska pojemność cieplna klinów, szybki ich nagrzewanie lub chłodzenie),
- z obu stron klinów stalowe płytki przyspieszające transport ciepła z szyny,
- listwa łącząca poszczególne kliny wykonana z INVAR-u,
- izolacja termiczna zespołu klinów z przetwornikami od pozostałych elementów zestawu głowic (obudowa, elektronika itp.),
- silne magnesy neodymowe przyciągające poszczególne kliny do powierzchni szyny.

Można zaryzykować twierdzenie, że dopiero tak budowane zestawy głowic umożliwiają prowadzenie szybkich i jednocześnie wiarygodnych pomiarów w warunkach przemysłowych. Choć budowane w IPPT zestawy były opisywane w literaturze i nie są dla nikogo tajemnicą, wielu badaczy nadal korzysta z prostych układów nadajnik-odbiornik lub układów różnicowych. O ile w warunkach laboratoryjnych (gładkie próbki, stała temperatura) możliwe jest osiągnięcie nimi poprawnych rezultatów, o tyle w warunkach huty czy toru kolejowego wyniki takich pomiarów muszą rodzić wątpliwości.

4. BADANIA NAPRĘŻEŃ W MONOBLOKOWYCH KOŁACH KOLEJOWYCH

Problem badania naprężeń obwodowych w monoblokowych kołach kolejowych, wywołanych ciepłem dostarczanym do wieńca koła podczas hamowania klockami hamulcowymi, był znany od dawna. W USA badania kół rozpoczęto w roku 1997 i wraz z badaczami japońskimi kontynuowano w latach 80-tych. Podobne badania prowadzono w Niemczech. Równoległe badania kół rozpoczęto w IPPT. Do pomiaru czasu przejścia fal wykorzystywano najpierw aparaty DEBRO-20 potem DEBRO-30.

Wszystkie prowadzone w tym czasie pomiary, nie tylko w IPPT, prowadzone były metodą echa w ten sposób, że głowica normalna na fale SH (spolaryzowane równoległe do powierzchni) sprzęgana była do jednego z lic koła jak pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat pomiaru czasu przejścia fali poprzecznej SH przez szerokość wieńca koła kolejowego

Mierzono najpierw czas przejścia (czas do 1-szego echa) dla polaryzacji fali zgodnie z kierunkiem obwodowym. Następnie głowicę obracano o 90° i mierzono czas przejścia dla polaryzacji promieniowej. Wartość naprężenia obwodowego obliczano z wyrażenia:

$$(2) \quad B = B^0 + B^\sigma = \frac{2(V_\Theta - V_R)}{V_\Theta + V_R} = \frac{2(t_R - t_\Theta)}{t_\Theta + t_R}$$

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 fragmentach kół pozbawionych naprężeń. Natomiast B^σ równe jest:

$$(3) \quad B^\sigma = \beta_B (\sigma_\Theta - \sigma_R) \approx \beta_B \sigma_\Theta$$

gdzie: σ_Θ - obwodowa składowa naprężenia,

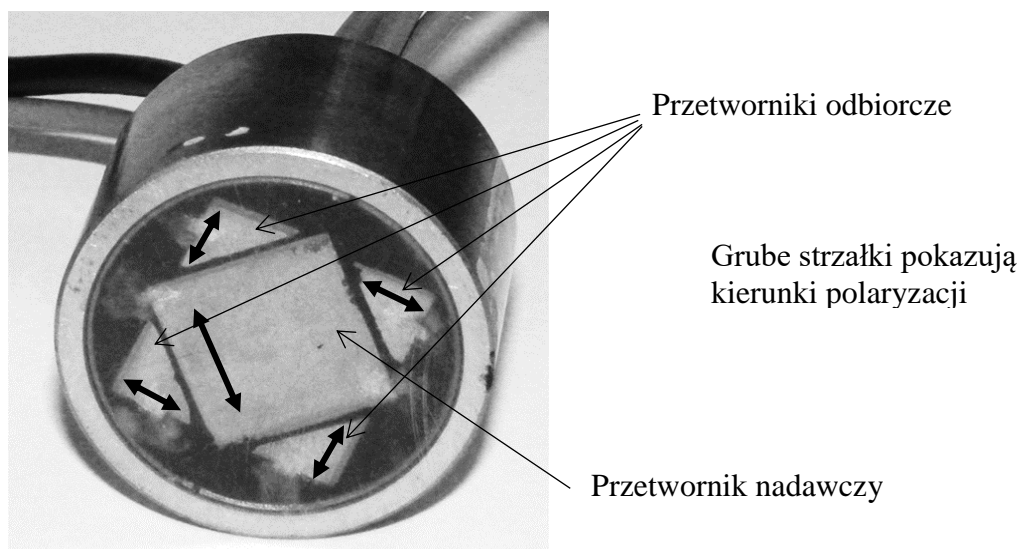
σ_R - promieniowa składowa naprężania (pomijalnie mała),

β_B - współczynnik elastoakustyczny równy $\beta_{122} + \beta_{132}$.

Stosunkowo szybko przekonano się, że metoda ultradźwiękowa jest praktycznie jedynym nieniszczącym i wiarygodnym sposobem oceny naprężeń w kołach i metoda została szeroko zaakceptowana.

Równolegle rozwijane były metody pomiarowe wykorzystujące przetworniki EMAT (pracujące bez potrzeby stosowania ośrodków sprzęgających ale generujące słabe sygnały) i piezoelektryczne (wymagające stosowania lepkich ośrodków sprzęgających ale dające silne sygnały). Pierwsze rozwijano w Niemczech i USA, drugie w Polsce.

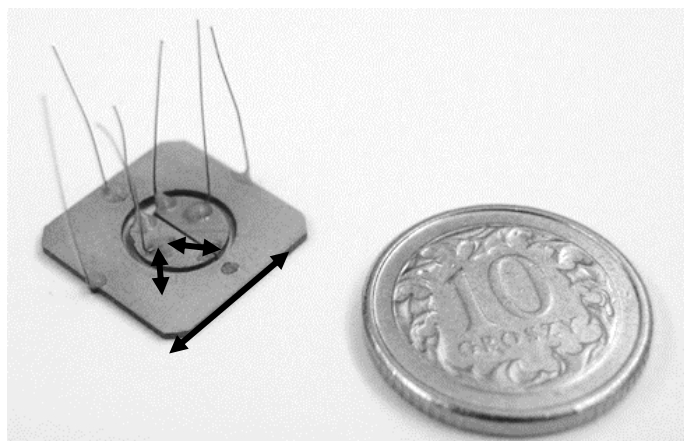
Pomiary prowadzone przetwornikami piezoelektrycznymi wykazały, że mierzone czasy przejścia głowicą obracaną (w celu zmiany kierunku polaryzacji fali) są zależne od zmieniających się w czasie pomiaru warunków sprzężenia. Należy pamiętać, że ośrodkiem sprzęgającym dla fal poprzecznych SH jest ciecz o wysokiej lepkości (np. żywica epoksydowa), która powoli rozplywa się pod głowicą powoli i jej grubość ulega zmianom. Dlatego podjęto próby pomiaru czasów przejścia fal o dwóch różnych polaryzacjach bez potrzeby obracania głowicy. Pierwszą nieobracaną głowicą była głowica 5-przetwornikowa. Współpracowała ona z prototypem aparatu DEBBIE i wykorzystana została do badań naprężeń w odlewanych koła amerykańskich. Głowica posiadała jeden przetwornik nadawczy o kierunku polaryzacji pod kątem 45° względem kierunku promieniowego i 4 małe przetworniki odbiorcze, po dwa z kierunkiem polaryzacji promieniowej i obwodowej. Fala poprzeczna rozchodząc się w anizotropowym materiale wieńca koła (anizotropia wynika z tekstury i naprężenia), rozkłada się na dwie składowe o kierunkach polaryzacji zgodnych z kierunkami głównymi anizotropii. Dzięki temu czasy przejścia fal odbieranych przez dwie pary przetworników odbiorczych odpowiadają czasom przejścia fal o polaryzacji promieniowej i obwodowej. Układ przetworników pokazano na rysunku 10.



Rys.10. Pierwsza, 5-przetwornikowa, nieobracana głowica do pomiarów dwójłomności akustycznej.

Wyniki pomiarów wykonanych taką głowicą pokrywały się z wynikami uzyskanymi głowicami obracanymi. Okazało się jednak, że średnica czoła głowicy (części przylegającej do lica koła) jest zbyt duża, co uniemożliwiało pomiary kół o wąskich licach. Dlatego następnym krokiem było umieszczenie przetworników odbiorczych nie na zewnątrz przetwornika nadawczego a w wyciętym w nim otworze. Powstała głowica 3-przetwornikowa, pokazana na rysunku 11, stosowana w aparatach DEBBIE. Ciekawostką wykorzystania 3-przetwornikowej głowicy jest między innymi to, że wszystkie normy opisujące wymagania stawiane głowicom normalnych dotyczą jedynie głowic z 1 lub 2 przetwornikami.

Jednym z ważnych doświadczeń zdobytych podczas budowy głowic do pomiarów kół była konieczność stosowania możliwie grubej warstwy ochronnej zabezpieczającej przetworniki od kontaktu z chropowatymi, skorodowanymi i zanieczyszczonymi powierzchniami kół. Stosowanie bardzo lepkiej cieczy do sprzęgania głowic wymaga silnego



Rys.11. Układ przetworników w 3-przetwornikowej, nieobracana głowica do pomiarów dwójłomności akustycznej.

docisku głowicy do koła. W aparacie DEBBIE siła ta wywołana jest wstępnie dociskiem głowicy ręką a potem utrzymywana przez 16 magnesów neodymowych umieszczonych na obwodzie głowicy. Siła ta jest na tyle duża, że ewentualne opiłki metalowe bez trudności wbijają się w warstwę ochronną przetworników. Początkowo warstwy te miały około 0,4 mm. Zdarzało się, że przetworniki pękały w wyniku docisku do nierówności powierzchni koła lub łamane były przez twarde zanieczyszczenia. Dlatego współcześnie przetworniki osłonięte są grubą, liczącą około 1,5 mm warstwą ochronną wykonaną z mieszaniny korundu i żywicy epoksydowych.

1. PODSUMOWANIE

Referat opisuje krótko rozwój technik i głowic budowanych w IPPT do ultradźwiękowych badań naprężeń. Poza pracami nad głowicami z przetwornikami piezoelektrycznymi wykonano również układy nadawcze i odbiorcze do przetworników EMAT i serię nieobracanych przetworników tego typu. Zebrane doświadczenia, a szczególnie niskie amplitudy uzyskiwanych sygnałów oraz trudne do wyeliminowania wpływu namagnesowania materiału na wyniki, spowodowały zakończenie tych prac.

Choć „moda” na ultradźwiękowe pomiary naprężeń w porównaniu z latami 80-tymi osłabła to nadal w literaturze światowej pojawiają się prace opisujące takie pomiary. Na rynku pojawiły się przyrządy do pomiarów naprężeń zarówno falami podpowierzchniowymi (naprężenia w szynach, naprężenia spawalnicze) jaki i do pomiarów dwójłomności akustycznej (naprężenia w kołach, płytach, elementach płasko-równoległych). Czasami opisywane w nich głowice ultradźwiękowe budzą zdziwienie. Proponowane są w nich proste, mało praktyczne układy głowic, które być może w warunkach laboratoryjnych mogą spełnić swoje zadania lecz do pracy w warunków przemysłowych się zupełnie nie nadają. Na przykład dostępny jest na rynku aparat do badania naprężeń w kołach, w którym wykorzystana jest głowica z jednym przetwornikiem kwarcowym. Niczym nie osłonięty przetwornik kwarcowy (koło jest jedną z elektrod!) dociskane jest sprężynką do powierzchni koła. Zmiana kierunku polaryzacji dokonywana jest przez obrót dociśniętego do koła przetwornika. Kryształ kwarcu jest twardy i wytrzymały i taki sposób pomiaru może być prawdopodobnie wykonywany wielokrotnie na gładkich, czystych próbkach w laboratorium. Natomiast w warunkach kolejowego warsztatu naprawczego taki sposób badania wygląda na zaproszenie do katastrofy.

Podobnie wątpliwe układy pomiarowe opisywane są w pracach poświęconych pomiarom naprężeń prowadzonym falami podpowierzchniowymi. Od dawna wiadomo, że wpływ zmian grubości warstwy sprzęgającej pod głowicami na mierzony czas przejścia praktycznie uniemożliwia sensowne wykorzystanie układu głowic składającego się jedynie

z głowicy nadawczej i odbiorczej. A jednak takie układy głowic nadal są wykorzystywane! Na dodatek w jednej z prac opisujących wykorzystanie takiego prostego układu wykorzystano plexi (czyli materiału o wysokim współczynniku rozszerzalności cieplnej) jako materiał łącznika ustalającego odległość między głowicami. Układ taki musi być niezwykle czuły na małe nawet zmiany temperatury (o czym autorzy pracy nie wspominają).

Można odnieść wrażenie, że mimo znacznej liczby publikacji naukowych ukazujących się w renomowanych czasopismach naukowych, eksperymenty w dziedzinie ultradźwiękowych pomiarów naprężeń często prowadzone są „od nowa” tak jakby nie istniała długa już historia tych badań. Nazbyt też często autorzy pracujący w laboratoriach twierdzą, że ich układy pomiarowe mogą być „już dziś” zastosowane w badaniach przemysłowych. Niestety tak nie jest o czym świadczą dwa opisane wyżej przypadki.

Przykładem aparatury możliwie dobrze (zdaniem autora) dostosowanej do warunków przemysłowych jest aparat DEBBIE. Mały, stosunkowo lekki, odporny na uszkodzenia mechaniczne, z pojemnym akumulatorem (możliwym do kupienia praktycznie wszędzie), z prostą klawiaturą, którą można umyć, prosty w obsłudze, umieszczony w mocnej torbie i wyposażony w pancerną głowicę, której warstwę ochronną można wielokrotnie poddawać renowacji. Być może wadą tego aparatu jest to, że można nim mierzyć jedynie monoblokowe, kuto-walcowane koła kolejowe co zdecydowanie ogranicza jego zastosowania (i grono ewentualnych nabywców). Wydaje się, że o poprawności konstrukcji aparatu świadczy fakt, że od około 30 lat cieszy się ciągle zainteresowaniem.

LITERATURA

- [1]. Hughes D.A., Kelly G.S., Second-Order Elastic Deformation of Solids, Physical Review, Vol. 92, 1953, p. 1145.
- [2]. Benson R., Realsen V.G., Acoustoelasticity, Product Engineering, No. 29, 1959.
- [3]. Crecraft D.I., Ultrasonic Wave Velocities in Stressed Nickel Steel, Nature, Vol. 195, September 22, 1962, No. 4847, pp.1193-1194.
- [4]. 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.
- [5]. Crecraft D.I., Ultrasonic Wave Velocities in Stressed Nickel Steel, Nature, Vol. 195, September 22, 1962, No. 4847, pp.1193-1194.
- [6]. 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
- [7]. 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.
- [8]. Deputat J., Ultradźwiękowe pomiary naprężeń, Mat. V KKBN, Koszalin 1976, str.58-66.
- [9]. 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.
- [10]. Deputat J., Własności i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnych, Prace IPPT, Nr 28/1987.
- [11]. Razygraev N.P., Ermolov I.N., Scherbinski V.G., Proc. Of the Seventh All Union Conference on Nondestructive Monitoring, Kiev 1974,p.110