

WYKORZYSTANIE ZJAWISKA ELASTO-AKUSTYCZNEGO DO POMIARU NAPRĘŻEŃ*

JULIAN DEPUTAT

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN — Warszawa

1. Wstęp

Metoda ultradźwiękowa jest jedną z intensywnie rozwijanych nieniszczących metod pomiaru naprężeń. Jej szczególne cechy to możliwość pomiaru naprężeń zarówno na powierzchni jak i w objętości ciała, bezpośrednio pomiaru naprężenia (a nie wyznaczanie naprężenia na podstawie zmierzonego odkształcenia), a także możliwość pomiaru bezwzględnych wartości naprężenia, a nie tylko jego zmian. Początki ultradźwiękowych pomiarów naprężeń wiążą się z pracą Bensona i Relsona opublikowaną w roku 1959 [1]. W pracy tej autorzy wykazali istnienie zależności między naprężeniem w ciele stałym a prędkością rozchodzenia się ultradźwiękowych fal poprzecznych, a także zauważyli, że wpływ naprężenia na prędkość fal zmienia się wraz ze zmianą kierunków propagacji i polaryzacji fal względem kierunku naprężenia. Przez analogię do zjawiska elastoptycznego, polegającego na zależności prędkości fal świetlnych od naprężenia, odpowiednie związki dla fal ultradźwiękowych nazwano zjawiskiem elastoakustycznym.

Ultradźwiękowe pomiary naprężeń są techniką młodą. Wiele problemów pomiarowych pozostaje jeszcze otwartymi. W ciągu ostatnich kilku lat obserwuje się jednak szybki postęp zarówno w zakresie teorii rozchodzenia się fal akustycznych w ośrodkach rzeczywistych, w zakresie metod pomiarowych jak też w dziedzinie aparatury i przemysłowych zastosowań.

W referacie przedstawiono główne zasady ultradźwiękowych pomiarów naprężeń i przytoczono przykłady zastosowań tej techniki.

2. Zjawisko elastoakustyczne

W ciałach stałych prędkość fal ultradźwiękowych zależy od stałych sprężystości, gęstości ciała, temperatury, stosunku wymiarów geometrycznych ciała do długości fali i od naprężenia panującego w obszarze, przez który fala przechodzi. Ta ostatnia zależność, uwarunkowana nieliniowością sprężystą materiału leży u podstaw tensometrii ultradźwiękowej.

* Praca wygłoszona na XII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa-Jadwisin, 1986.

Pierwszą pracą, w której uzyskano wyrażenia wiążące prędkość fal ultradźwiękowych z naprężeniem i potwierdzono doświadczalnie otrzymane zależności była praca Hughes'a i Kelly [2]. Według tych autorów prędkości fal ultradźwiękowych wiążą się z naprężeniem zależnościami:

$$\varrho_0 V_{110}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{P}{3K_0} [6l + 4m + 7\lambda + 10\mu] \quad (1)$$

$$\varrho_0 V_{120}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} \left[3m - \frac{n}{2} + 3\lambda + 6\mu \right] \quad (2)$$

$$\varrho_0 V_{111}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3K_0} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad (3)$$

$$\varrho_0 V_{121}^2 = \mu - \frac{\sigma}{3K_0} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right] \quad (4)$$

$$\varrho_0 V_{112}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3K_0} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad (5)$$

$$\varrho_0 V_{122}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad (6)$$

$$\varrho_0 V_{123}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \quad (7)$$

We wzorach tych: ϱ — masa właściwa w stanie naturalnym (dla $\delta = 0$), λ i μ — stałe Lamego, K_0 — moduł sprężystości objętościowej, m , l i n — stałe sprężystości 3-go rzędu, P — ciśnienie hydrostatyczne, σ — naprężenie jednoosiowe, V — prędkość fal ultradźwiękowych. Indeksy przy V oznaczają kolejno: kierunek rozchodzenia się fal, kierunek drgań cząstek (kierunek polaryzacji), kierunek naprężenia jednoosiowego. We wzorach (1) i (2) indeks zero oznacza przypadek ciśnienia hydrostatycznego.

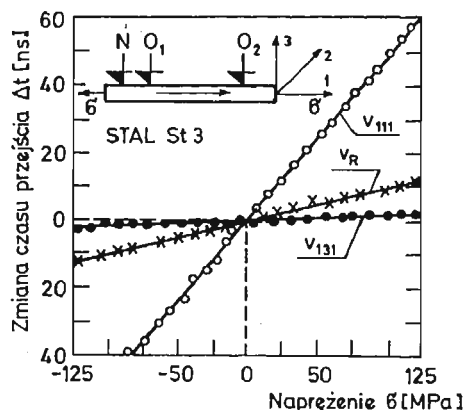
Obszerny przegląd prac teoretycznych dotyczących zjawiska elastoakustycznego można znaleźć w monografiach i artykułach przeglądowych np. [3, 4]. Odmienne podejście autorów i różny stopień stosowanych przybliżeń prowadzą do różnych wzorów końcowych a nawet różnych określeń stałych sprężystości wyższych rzędów. Doświadczenia wykazują słabą nieliniowość zależności prędkość — naprężenie i w praktyce korzysta się z wyznaczonej doświadczalnie dla danego materiału zależności prędkości od naprężenia w postaci:

$$\frac{V - V^0}{V^0} = \frac{t^0 - t}{t} = \beta \sigma \quad (8)$$

gdzie V^0 i V są prędkościami fal w tym samym materiale w stanie naturalnym i w stanie naprężonym, t^0 i t — odpowiednie czasy przejścia fal, β — stała elastoakustyczna materiału dla danej konfiguracji kierunków propagacji, polaryzacji i naprężenia, σ — naprężenie jednoosiowe.

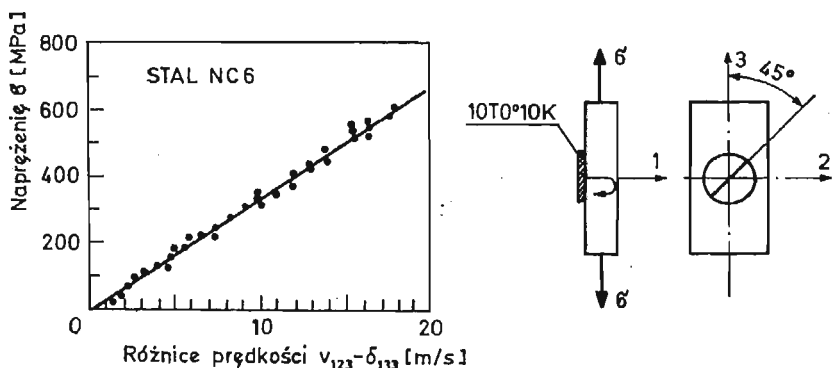
Na rysunku 1 przedstawiono zmiany czasu przejścia fal podłużnych, poprzecznych oraz powierzchniowych R rozchodzących się w kierunku naprężenia przy zmianach wartości i znaku naprężenia. Dane te uzyskano dla próbki ze stali St3 w temperaturze 18°C. Droga fal podłużnych wynosiła 196 mm, a drogi fal poprzecznych i powierzchniowych

107 mm. Przy wzroście naprężenia rozciągającego prędkość fal rozchodzących się w kierunku naprężenia maleje (czas przejścia rośnie). Wzrost naprężenia ściskającego powoduje zwiększenie prędkości fal (czas przejścia maleje).



Rys. 1. Zmiany czasu przejścia Δt fal podłużnych V_{111} , poprzecznych V_{131} i powierzchniowych R rozchodzących się w kierunku naprężenia σ w funkcji naprężenia. Próbka ze stali St3. W ramce rysunku układ głowic ultradźwiękowych: N — głowica nadawcza, O_1 i O_2 — głowice odbiorcze. Zmiany czasu mierzone na drodze między głowicami odbiorczymi

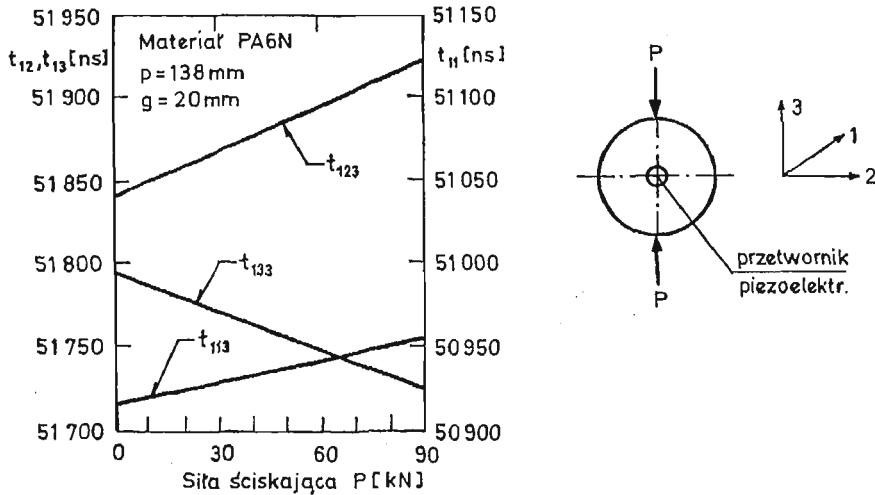
Podobne zależności skalujące można uzyskać dla fal rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia. Wyniki uzyskane dla kilku przypadków przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Zależność między naprężeniem i różnicą prędkości fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia i spolaryzowanych w kierunku naprężenia V_{133} i w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia V_{123} . Próbka ze stali NC6. Obok wykresu umieszczono schemat badania

Na rysunku 2 przedstawiono zależność różnicy prędkości fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia, spolaryzowanych w kierunku naprężenia, i rozchodzących się w tym samym kierunku fal spolaryzowanych prostopadle do kierunku naprężenia od wartości naprężenia rozciągającego σ . Dane przedstawione

na rysunku 2 uzyskano dla płaskorównoległej próbki ze stali NC6. Wykresy na rysunku 3 przedstawiają wyniki badań zależności naprężenie-czas przejścia fal wykonanych w środku krążka z PA6 ściskanego wzdłuż średnicy. Siła ściskająca P działa w kierunku 3. Fale rozchodzą się w kierunku 1.



Rys. 3. Zmiany czasu przejścia fal podłużnych i poprzecznych spolaryzowanych w kierunku działania siły ściskającej i prostopadle do siły ściskającej w funkcji siły ściskającej krążek P . Próbką był krążek z PA6N średnicy 138 mm i grubości 20 mm

Cyfry przy literach t na rysunku oznaczają kolejno kierunek rozchodzenia się fal, kierunek drgań cząstek w fali i kierunek działania siły.

Badania przeprowadzono na krążku grubości 20 mm i średnicy 138 mm. W przypadku fal podłużnych mierzono czas 16 przejść impulsu przez grubość krążka, a dla fal poprzecznych 8 przejść. Przy punktowej sile nacisku P wzdłuż średnicy krążka w jego środku powstaje złożony stan naprężenia, przy czym naprężenie ściskające:

$$\sigma_1 = -2P/\pi g d \quad (9)$$

i rozciągające:

$$\sigma_2 = 6P/\pi g d, \quad (10)$$

gdzie:

d — średnica krążka,

g — grubość krążka.

Na podstawie pomiarów podobnych do tych, których wyniki zamieszczono na rys. 1, 2 i 3 można wyznaczyć wartości współczynników elastoakustycznych dla poszczególnych przypadków. Doświadczenia potwierdzają prostą proporcjonalność między przyrostem prędkości fal ultradźwiękowych i naprężeniem.

Zmiany prędkości zachodzące pod wpływem naprężenia są małe. Przykładowo, dla stali wzrost naprężenia rozciągającego o 10 MPa powoduje zmniejszenie o ok. 0,75 m/s prędkości fal podłużnych rozchodzących się w kierunku naprężenia, poprzecznych o ok. 0,03 m/s, a powierzchniowych o ok. 0,15 m/s. Taki sam przyrost naprężenia powoduje

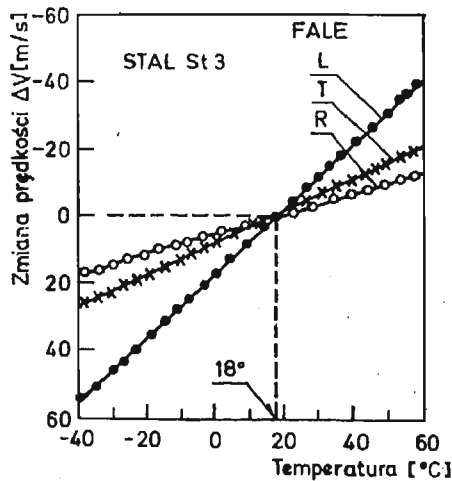
zwiększenie o ok. 0,3 m/s różnicy prędkości fal poprzecznych rozchodzących się prostopadle do kierunku naprężenia i spolaryzowanych:

- a) w kierunku naprężenia;
- b) prostopadle do kierunku naprężenia.

Dla aluminium odpowiednie wielkości są prawie dwa razy większe. Wielokrotnie większe zmiany prędkości fal pod wpływem naprężenia występują w żeliwie. Zmiany prędkości fal podłużnych rozchodzących się w próbce żeliwnej prostopadle do kierunku naprężenia osiągają wartość nawet 12 m/s przy przyroście naprężenia o 10 MPa [5], przy czym wielkość tych zmian zależy od gatunku żeliwa. Najbardziej czułe na naprężenie są fale podłużne rozchodzące się w kierunku naprężenia. Dlatego fale te są najczęściej wykorzystywane w badaniach naprężeń. Do pomiarów naprężeń można przyjąć, że dla nominalnie tego samego gatunku materiału wartości współczynników elastoakustycznych są stałe [6].

3. Wpływ temperatury na prędkość fal

Wahania temperatury powodują zmiany wymiarów badanego elementu i wpływają na prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych. Na rysunku 4 podano wyniki badania zmian prędkości fal podłużnych L , poprzecznych T oraz powierzchniowych w funkcji temperatury dla stali St3. W temperaturze 18°C prędkości fal w badanej próbce wynosiły $V_L = 5958$ m/s, $V_T = 3270$ m/s, $V_R = 3040$ m/s. Jak widać, w badanym zakresie temperatur prędkość liniowo maleje przy wzroście temperatury.



Rys. 4. Przyrosty prędkości ΔV fal podłużnych L , poprzecznych T i powierzchniowych R przy zmianach temperatury. Próbką ze stali St3

Wielkość zmiany prędkości fal w stali przy zmianie temperatury o 1°C jest bliska zmianie spowodowanej przyrostem naprężenia o 10 MPa. Jeśli używane są głowice ultradźwiękowe z klinami wykonanymi z tworzywa sztucznego, trzeba liczyć się z ok. cztero-

krotnie większymi zmianami prędkości fal w tworzywie sztucznym niż ma to miejsce w stali. Dlatego przy porównaniu wyników pomiarów prędkości fal konieczne jest stosowanie poprawek temperaturowych lub odpowiednich układów kompensacyjnych.

4. Wpływ niejednorodności materiału

W praktyce interesujące są pomiary przyrostu naprężenia spowodowanego przyłożeniem obciążenia albo też pomiary bezwzględnej wartości naprężenia panującego w materiale.

W pierwszym przypadku można wykonać pomiar czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez ten sam odcinek drogi w tym samym obszarze materiału w stanie początkowym (np. dla $\sigma = 0$) i w stanie końcowym (gdy $\sigma \neq 0$) i wartość zmiany naprężenia wyliczyć z liniowej zależności między przyrostem prędkości i przyrostem naprężenia (8).

W drugim przypadku zwykle jest dostępny materiał tylko w stanie naprężonym, a wartość prędkości czy czasu przejścia fal gdy w badanym obszarze materiału naprężenie nie występuje nie jest znana. Taka sytuacja ma miejsce gdy chcemy wyznaczyć bezwzględną wartość naprężeń, a więc np. przy pomiarach naprężeń własnych. Materiały techniczne wykazują znaczną niejednorodność własności sprężystych i lokalne różnice prędkości fal ultradźwiękowych w materiałach pozbawionych naprężeń mogą być istotne i dla wyznaczenia naprężeń na podstawie pomiarów prędkości nie można przyjąć, że wartość prędkości fal w określonym gatunku materiału w stanie naturalnym (bez naprężeń) jest stała.

Granice niejednorodności właściwości akustycznych materiałów konstrukcyjnych nie są bliżej znane. O skali zjawiska mówią wyniki dokładnych pomiarów prędkości fal, które wykonano na próbkach ze stali NC6 i ze stali węglowej, wyciętych z różnych obszarów tego samego arkusza blachy. Przed pomiarami próbki poddano obróbce odprężającej. W próbkach ze stali NC6 największa różnica prędkości fal podłużnych wynosiła 8,2 m/s fal powierzchniowych 5,2 m/s, fal poprzecznych spolaryzowanych w kierunku walcowania 5,4 m/s, a spolaryzowanych prostopadle do kierunku walcowania 4,9 m/s. Wartości różnicy prędkości fal poprzecznych spolaryzowanych w kierunku walcowania, spowodowanej zmianą naprężenia o 10 MPa, zawierały się w granicach $0,31 \div 0,32$ m/s. W stali węglowej największa różnica prędkości fal podłużnych miała wartość 10,8 m/s, a fal powierzchniowych 6,9 m/s. Dla porównania zmiana naprężenia o 10 MPa powodowała zmiany prędkości fal podłużnych w granicach $0,69 \div 0,72$ m/s, fal poprzecznych $0,06 \div 0,08$ m/s, a fal powierzchniowych $0,12 \div 0,15$ m/s.

Błędy w ocenie naprężenia, jakie mogą powstać na skutek zaniedbania niejednorodności w tych blachach, sięgają setek megapaskali. Przyczyną lokalnych różnic właściwości sprężystych są gradienty temperatur, naprężeń i odkształceń plastycznych w czasie walcowania, kucia czy przeciągania, a także nierównomierny rozkład zanieczyszczeń. Różnice składu i odchyłeń parametrów technologicznych powodują niepowtarzalność właściwości poszczególnych partii materiału. Dlatego występują lokalne różnice prędkości fal w jednym kawałku i odmienne wartości w poszczególnych partiach nominalnie takiego samego materiału.

5. Uwzględnienie różnic własności sprężystych

W niektórych przypadkach na podstawie pomiarów prędkości fal podłużnych i poprzecznych w badanym materiale i w materiale wzorca bez naprężeń można wyznaczyć prędkość, jaką miałyby fale podłużne w badanym materiale, gdyby był on pozbawiony naprężeń. W płaskim stanie naprężeń wykorzystuje się do tego celu zanedbywalnie małą czułość na naprężenie fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku naprężenia, tak że można przyjąć:

$$\begin{aligned} V_T^\sigma &= V_T^0, \\ t_T^\sigma &= t_T^0. \end{aligned} \quad (11)$$

Na różnicę czasów przejścia fal podłużnych w badanym materiale i we wzorcu mogą składać się różnice czasów przejścia związane z odmiennością właściwości sprężystych Δt_L^σ , z naprężeniami Δt_L^σ i z różnicą temperatury. Przyjmując, że czasy przejścia fal ultradźwiękowych we wzorcu i w badanym materiale odnoszą się do jednej wspólnej temperatury, można napisać:

$$\Delta t_L = t_L^\sigma - t_L^w = \Delta t_L^\sigma + \Delta t_L^\delta. \quad (12)$$

Wartość czasu przejścia fal w badanym materiale dla $\sigma = 0$, potrzebna do wyznaczenia bezwzględnej wartości naprężenia, będzie:

$$t_L^0 = t_L^w + \Delta t_L^\delta. \quad (13)$$

Wartość Δt_L^δ jest poprawką na różnicę właściwości sprężystych materiału badanego i wzorca.

W ośrodkach izotropowych bez naprężeń między prędkościami fal podłużnych i poprzecznych zachodzi związek:

$$V_L^0 = V_T^\sigma \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}, \quad (14)$$

gdzie:

ν — współczynnik Poissona.

Jeśli anizotropia stali jest spowodowana wyróżnioną orientacją ziarn w wyniku odkształcenia plastycznego, to moduł sprężystości objętościowej K jest stały niezależnie od kierunku [7]. Stałość K pociąga za sobą związek:

$$V_L^2 - \frac{4}{3} V_T^2 = K = const. \quad (15)$$

Z (15) otrzymuje się zależności na obliczenie zmiany prędkości i czasu przejścia fal podłużnych, spowodowane różnicami właściwości sprężystych:

$$\Delta V_L^\sigma = \frac{4}{3} \frac{V_T}{V_L} \Delta V_T, \quad (16)$$

$$\Delta t_L^\sigma = \frac{4}{3} \left(\frac{l_T}{l_L} \right)^2 \left(\frac{t_L}{t_T} \right)^3 \Delta t_T, \quad (17)$$

gdzie:

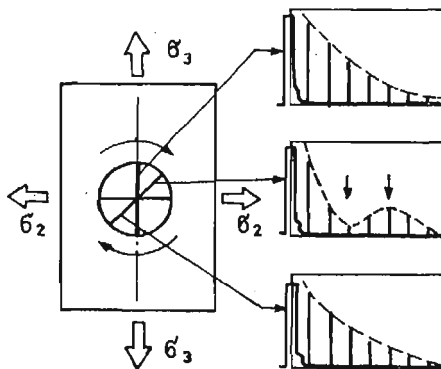
l_L, l_T — drogi fal L oraz T .

Wartość naprężenia oblicza się ze wzoru:

$$\sigma = \frac{1}{\beta_L t_T} [t_L^w + \Delta t_L^s - t_L^g]. \quad (18)$$

6. Pomiary w dwuosiowym stanie naprężenia

Rozpatrzmy płaski dwuosiowy stan naprężenia, jaki występuje np. w cienkim krążku ściskanym wzdłuż średnicy w kierunku 3. Kierunki naprężeń głównych łatwo ustalić, wykorzystując fale poprzeczne rozchodzące się w kierunku grubości krążka. Obracając przetwornik piezoelektryczny wokół jego osi znajduje się dwa prostopadłe względem siebie położenia, przy których obwiednie ciągu ech dna monotonicznie maleją. Orientacja płaszczyzn polaryzacji pokrywa się wtedy z kierunkiem naprężenia głównego. Przy innych orientacjach płaszczyzny polaryzacji na obwiedni ciągu ech dna występują ekstrema (rys. 5). Maksima i minima obwiedni powstają jako wynik interferencji w zgodnej i prze-



Rys. 5. Kształt obwiedni ciągu ech dna próbki płaskorównoległej w dwuosiowym stanie naprężenia dla fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężeń głównych i spolaryzowanych w kierunku naprężenia głównego (wykładniczo zanikające ciągi ech dna) i w kierunku tworzącymi kąt 45° z kierunkami naprężeń głównych (ekstrema na obwiedni ciągu ech dna)

ciwnej fazie fal składowych, na które dzieli się fala poprzeczna, jeśli cząstki nie drgają tylko w kierunku jednego naprężenia głównego [8]. Położenie ekstremum na osi czasu jest zależne od częstotliwości fali, rodzaju materiału i różnicy prędkości fal spolaryzowanych w kierunkach naprężeń głównych, a różnica ta jest proporcjonalna do różnicy wartości naprężeń (rys. 2). Do wyznaczenia znaku i wartości naprężeń głównych σ_2 oraz σ_3 można wykorzystać pomiary czasów przejścia t_{113} fal podłużnych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia oraz t_{133} i t_{123} fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia i spolaryzowanych odpowiednio w kierunku naprężenia i w kierunku prostopadłym do kierunku naprężenia (rys. 3). Na prędkość fal rozchodzących się w kierunku prostopadłym do kierunku naprężeń głównych mają wpływ obydwa naprężenia główne. Można to zapisać:

$$V_{11} = V_{11}^0 (1 + \beta_{11} \sigma_{33} + \beta_{13} \sigma_{22}), \quad (19)$$

$$V_{12} = V_{12}^0(1 + \beta_{12} \sigma_{33} + \beta_{13} \sigma_{22}), \quad (20)$$

$$V_{13} = V_{13}^0(1 + \beta_{13} \sigma_{33} + \beta_{12} \sigma_{22}). \quad (21)$$

Sumy i różnice naprężeń głównych wiążą się z sumami i różnicami względnych zmian prędkości:

$$\frac{V_{11} - V_{11}^0}{V_{11}^0} = \beta_{11}(\sigma_{33} + \sigma_{22}), \quad (22)$$

$$\frac{V_{13} - V_{13}^0}{V_{13}^0} - \frac{V_{12} - V_{12}^0}{V_{12}^0} = \beta_{13-12}(\sigma_{33} - \sigma_{22}), \quad (23)$$

$$\frac{V_{13} - V_{13}^0}{V_{13}^0} + \frac{V_{12} - V_{12}^0}{V_{12}^0} = \beta_{13+12}(\sigma_{33} + \sigma_{22}). \quad (24)$$

Współczynniki elastoakustyczne we wzorach (22÷24) opisują proporcjonalność różnicy i sumy względnych zmian prędkości odpowiednio do różnicy i sumy naprężeń głównych. Wartości tych współczynników można wyznaczyć przy próbie ściskania krążka z badanego materiału. Zależności (22÷24) można zapisać, zastępując prędkości odpowiednimi czasami przejścia fal przez grubość badanego elementu, tak jak to zrobiono we wzorze (8). Do wyznaczenia bezwzględnych wartości naprężeń głównych trzeba znać wartość czasu przejścia fal w stanie badanym i w stanie naturalnym bez naprężeń.

Jeśli znane są współczynniki elastoakustyczne materiału i w wybranym obszarze zmierzono czasy przejścia trzech typów fal t_{11} , t_{12} , t_{13} , to dane te wystarczają do obliczenia czasu przejścia t_i^0 wybranego typu fal przez ten sam odcinek drogi, gdy naprężenia nie występują. W materiale izotropowym w stanie nieodkształconym prędkość fal poprzecznych nie zależy od orientacji płaszczyzny polaryzacji:

$$V_{12}^0 = V_{13}^0 = V_T^0. \quad (25)$$

Korzystając z zależności (22÷24) otrzymamy wzór na prędkość fal poprzecznych w materiale bez naprężeń:

$$V_{12}^0 = V_{13}^0 = V_T^0 = \frac{1}{m-2} (mkV_{11} - V_{11} - V_{13}), \quad (26)$$

gdzie:

$$m = \frac{\beta_{13+12}}{\beta_{11}}, \quad (27)$$

$$k = \frac{V_{13}^0}{V_{11}^0} = \frac{V_T^0}{V_L^0}. \quad (28)$$

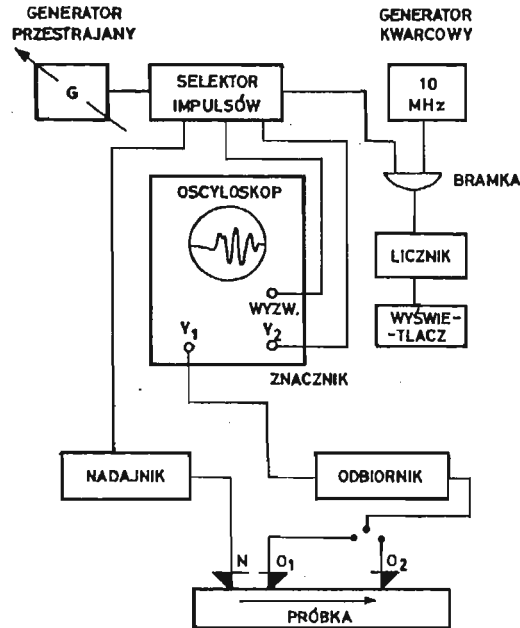
Wartości m oraz k mogą być przyjęte dla danego materiału jako stałe.

7. Aparatura ultradźwiękowa

Przegląd sposobów pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych i opisy odpowiednich układów pomiarowych można znaleźć w wielu dostępnych artykułach i monografiach [9, 10, 11]. Najczęściej są stosowane metody oparte na pomiarze czasu przejścia fal ultra-

dźwiękowych przez stały odcinek drogi w badanym materiale. W zależności od geometrii badanego elementu i stanu naprężenia dobiera się różne układy głowic, mody fal i kierunki propagacji fal. Do wyznaczenia bezwzględnej wartości naprężenia jest potrzebny pomiar bezwzględnej wartości prędkości (czasu przejścia), a nie tylko zmiany prędkości.

Jednym z przyrządów spełniających ten warunek, jest nanosekundowy miernik czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych, zbudowany w IPPT PAN [12]. Przyrząd ten może służyć do pomiaru czasu między dwoma wybranymi impulsami. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6. Generator przestrajany G wytwarza sygnał



Rys. 6. Schemat blokowy nanosekundowego miernika czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych

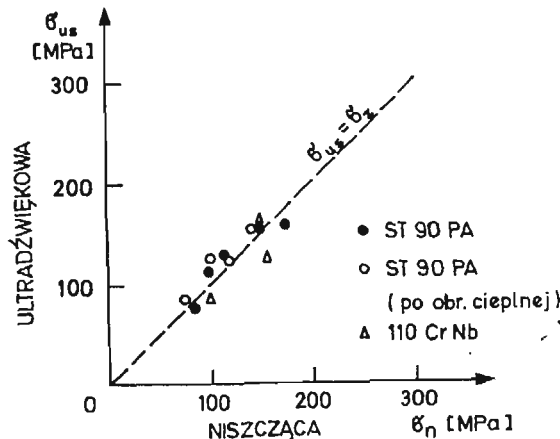
wyzwolenia nadajnika, sygnał wyzwolenia podstawy czasu, sygnał znacznika i sygnał bramki. Sygnał wyzwolenia nadajnika powoduje pobudzenie przetwornika głowicy nadawczej i wysłanie impulsu ultradźwiękowego do badanego materiału. Okres pobudzenia nadajnika wynosi $100 T$. Po upływie czasu równego $9 T$ jest wyzwalana podstawa czasu oscyloskopu. Czas ten jest tak dobrany, aby na ekranie oscyloskopu można było obserwować odpowiednio rozciągnięty sygnał (impuls) odebrany przez przetwornik odbiornika. Na odebrany sygnał, widoczny na ekranie lampy oscyloskopowej, jest nakładany sygnał znacznika czasu (—) pojawiający się po upływie $10 T$ od momentu wyzwolenia nadajnika. Przez precyzyjne strojenie generatora G można tak dobrać okres drgań T , aby znacznik czasu znalazł się w wybranym miejscu na zobrazowaniu odebranego impulsu. Wtedy czas przejścia fali będzie równy $10 T$. Przez zliczenie w czasie równym $10^4 T$ impulsów kwarcowego generatora wzorcowego 10 MHz i po zaokrągleniu wskaźnika ostatniego licznika pomiar czasu T zostanie dokonany z dokładnością $\pm 1 \text{ ns}$. Zakres czasów mierzonych za pomocą przyrządu wynosi $1 \div 1000 \text{ ns}$. Decydujący wpływ na dokładność i pow-

tarzalność pomiarów ma chropowatość powierzchni badanego elementu, od której zależą warunki tworzenia się czoła fali w materiale.

Pomiary z zastosowaniem fal powierzchniowych można prowadzić również za pomocą refraktometru ultradźwiękowego [13]. Za pomocą tego przyrządu wyznacza się przebieg zmian współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych na granicy cieczy wzorcowej i badanej próbki w funkcji kąta padania i mierzy się wartość kątów padania, przy których w próbce powstają fale podłużne, poprzeczne i powierzchniowe (tzw. krytyczne kąty padania). Na podstawie zmierzonej wartości kąta krytycznego dla fal powierzchniowych wyznacza się wartość fazowej prędkości fal powierzchniowych. Dla próbki stalowej dokładność pomiaru prędkości wynosi 0,03%. Zmierzone wartości odnoszą się do niewielkiej objętości materiału, określonej średnicą wiązki i długości wzbudzanej fali powierzchniowej. Przy częstotliwości 10 MHz pole pomiarowe ma średnicę 6 mm, a grubość warstwy badanej wynosi ok. 0,3 mm.

8. Pomiar naprężeń podłużnych w szynach

Technikę opisaną w rozdziale 5 i miernik czasu wg [12] wykorzystano w zbudowanym w IPPT PAN przyrządzie do pomiaru naprężeń podłużnych w główkach szyn kolejowych [14]. Za pomocą nanosekundowego miernika czasu mierzy się czas przejścia fal podłużnych i poprzecznych na ustalonych odcinkach drogi wzdłuż osi szyny. Automatycznie jest rejestrowana temperatura szyny. Na podstawie zmierzonych wartości czasów przejścia fal i temperatury badanej szyny oraz uwzględniając wprowadzone wcześniej do pamięci mikroprocesora wartości czasów przejścia w materiale szyny bez naprężeń, wartości współczynników elastoakustycznych i współczynników temperaturowej zależności prędkości fal — układ logiczny oblicza wartość naprężenia. Miernik ten jest od kilku lat wykorzystywany w Hucie Katowice do kontroli wartości naprężeń własnych w produkowanych tam szynach. Szerokie badania porównawcze wyników uzyskanych metodą ultradźwiękową i metodą niszczącą przez cięcie i pomiar odkształceń w wyniku wyzwalań naprężeń potwierdzają poprawność wyników uzyskiwanych za pomocą miernika.



Rys. 7. Porównanie wyników pomiarów naprężeń metodami ultradźwiękową i niszczącą

Na rys. 7 pokazano przykładowo zestawienie wyników pomiarów naprężeń własnych w szynach uzyskanych metodą ultradźwiękową i niszczącą [15].

9. Pomiar naprężeń w śrubach

Klucze dynamometryczne wskazują wartość momentu dokręcającego. Jeśli opory tarcia w gwincie nie są jednakowe, to przy tych samych wartościach momentu dokręcającego uzyskuje się różne naprężenia śrub, a więc i różną jakość połączeń śrubowych. Ultradźwiękowy „klucz dynamometryczny” jest narzędziem wiarygodnym i niezastąpionym w odpowiedzialnych konstrukcjach z połączeniami śrubowymi.

Naprężenie w śrubach wyznacza się na podstawie pomiaru czasu przejścia fal ultradźwiękowych wzdłuż osi śruby. Zwykle dostępny jest co najmniej jeden koniec śruby i można łatwo uzyskać echo albo echa dna śruby. Jeśli zmierzy się czas przejścia przed dokręceniem ($\sigma = 0$) i po dokręceniu ($\sigma \neq 0$), to zmiana czasu przejścia fal wzdłuż osi śruby jest wprost proporcjonalna do naprężenia i doświadczalnie wyznaczone zależności dla śrub danej konstrukcji mogą posłużyć do pomiaru zmian naprężenia podczas dokręcania.

Na obserwowany przyrost czasu składa się zmiana drogi fali w wyniku wydłużenia sprężystego śruby i zmiana prędkości fal w wyniku działania naprężenia. Naprężenie wzdłuż osi śruby jest niejednakowe. Na swobodnych powierzchniach czołowych naprężenie ma wartość zero. Na odcinkach nakrętek rośnie i najwyższą wartość ma w części gwintowanej zawartej pomiędzy wewnętrznymi powierzchniami nakrętek. W części gładkiej naprężenie osiąga stałą wartość σ_0 .

Gdy celem pomiaru jest wyznaczenie wartości naprężenia w gładkiej części śruby już dokręconej, bez możliwości zmierzenia czasu przejścia t^0 wzdłuż osi śruby nienaprzężonej, sytuacja jest podobna do tej, jaka ma miejsce przy wyznaczaniu naprężeń własnych. I w tym przypadku można wykorzystać fale poprzeczne rozchodzące się wzdłuż osi śruby jako fale odniesienia, mało czułe na naprężenie. Obserwowana zmiana czasu przejścia fal ultradźwiękowych jest proporcjonalna do naprężenia średniego, które jest mniejsze od naprężenia w części gładkiej:

$$\sigma_{sr} = k\sigma_0, \quad k < 1. \quad (29)$$

Z pomiaru znane są wartości czasu przejścia fal podłużnych t_L^0 i poprzecznych t_T^0 przez ten sam materiał i przez tę samą drogę. Naprężenie zmienia wartość stosunku tych czasów. Czasy przejścia t_L^0 , t_T^0 wyrażają zależności:

$$t_L = t_L^0 + \Delta t_L = t_L^0 \left[1 + \left(\beta_L + \frac{1}{E} \right) \frac{\sigma_0}{k} \right], \quad (30)$$

$$t_T = t_T^0 + \Delta t_T = t_T^0 \left[1 + \left(\beta_T + \frac{1}{E} \right) \frac{\sigma_0}{k} \right]. \quad (31)$$

Przyjmując w (30) i (31):

$$p = t_T^0/t_L^0, \quad m = t_T^0/t_L^0, \quad (32)$$

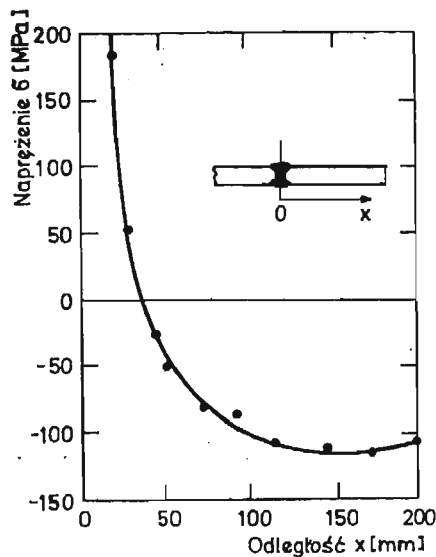
otrzymujemy:

$$\sigma_0 = \frac{(m-p)k}{p\left(\beta_L + \frac{1}{E}\right) - m\left(\beta_T - \frac{1}{E}\right)}. \quad (33)$$

Zależność (33) umożliwia wyznaczenie wartości naprężenia w gładkiej części śruby na podstawie pomiaru czasu przejścia fal podłużnych i poprzecznych wzdłuż osi śruby, jeśli znany jest współczynnik kształtu k oraz stałe materiałowe β_L , β_T i E [16, 17].

10. Pomiary naprężeń spawalniczych

Pierwszą próbą wykorzystania zjawiska elastoakustycznego do pomiaru naprężeń spawalniczych była praca [18], w której zmierzono zmiany czasu przejścia fal powierzchniowych przy oddalaniu układu głowic od spoiny na rurze. Ze względu na zakres i technikę praca ma raczej charakter sygnałny. Wykorzystanie precyzyjnych pomiarów ultradźwiękowych z zastosowaniem jednej z metod opisanych w pierwszej części artykułu umożliwia pomiar naprężeń spawalniczych. Znaczenie techniki ultradźwiękowej polega na możliwości kontroli prawidłowości obróbki odpężającej. Na rysunku 8 przykładowo przedstawiono przebieg zmian naprężeń podłużnych w funkcji odległości od spoiny [19].



Rys. 8. Zmiany naprężenia prostopadłego do spoiny w funkcji odległości od spoiny

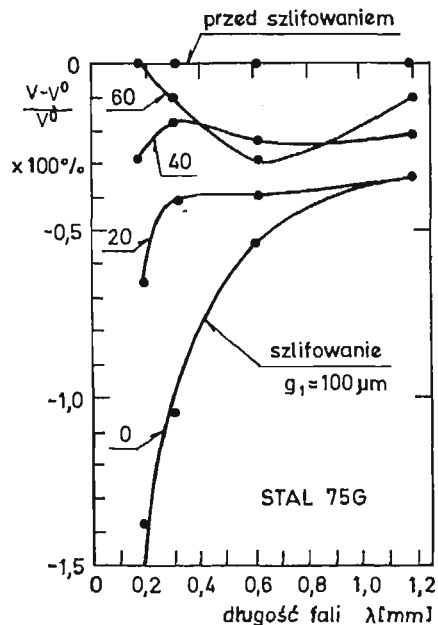
11. Pomiary naprężeń szlifierskich

W pracy [20] przedstawiono wyniki badania naprężeń w wierzchniej warstwie przedmiotów za pomocą ultradźwiękowych fal powierzchniowych. Badania wykonano na obrabianych cieplnie próbkach ze stali typu 75G ($R_m > 1200$ MPa, $R_e > 1000$ MPa). Współ-

czynnik elastoakustyczny fal powierzchniowych w tej stali ma wartość:

$$\beta_R = 1 \cdot 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$$

Pomiary prędkości fal powierzchniowych wykonano za pomocą refraktometru ultradźwiękowego. Pomiar prowadzono na płaskiej powierzchni próbki w obszarze o średnicy ok. 10 mm. Stosowano cztery częstotliwości fal: 15, 10, 5 i 2,5 MHz. Przy tych częstotliwościach długości wzbudzanych w stali fal powierzchniowych wynoszą odpowiednio: 0,2; 0,3; 0,6 i 1,2 mm. Oznacza to, że w każdym z tych przypadków zbierano informacje z warstwy materiału o grubości kolejno: 0,2; 0,3; 0,6 i 1,2 mm licząc od powierzchni próbki. W celu wywołania naprężeń płaska powierzchnia próbek była szlifowana zgrubnie bez chłodzenia, przy jednokrotnym przejściu ściernicy $V_s = 30$ m/s i głębokości skrawania $g_t = 100 \mu\text{m}$. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych podano na rysunku 9, który przedstawia zależność względnych zmian prędkości od długości wzbudzanych fal powierzchniowych dla powierzchni po szlifowaniu zgrubnym oraz po kolejnych szlifowaniach dokładnych $g = 5 \mu\text{m}$ usuwających warstwy naprężone do głębokości 20, 40 i 60 μm . Na prawej osi pionowej naniesiono wartości naprężenia odpowiadające danym zmianom prędkości fal powierzchniowych. Charakter zależności wskazuje, że naprężenia powstające w wyniku szlifowania zgrubnego równoważą się w wierzchniej warstwie grubości bliskiej długości fali powierzchniowej o częstotliwości 2,5 MHz ($\lambda = 1,2$ mm), przy czym blisko powierzchni występują naprężenia rozciągające o wartościach maksymalnych wynoszących odpowiednio 1200 i 500 MPa. Naprężenia rozciągające maleją do wartości bliskich zero, przechodząc na głębokości ok. 60 μm w naprężenia ściskające. Przedstawiają to zależności podane na rysunku 9 uzyskane na próbkach ze stali 75G, szlifowanych zgrubnie przez jednorazowe



Rys. 9. Względne zmiany prędkości fal powierzchniowych w funkcji długości fali dla próbek ze stali w stanie wyjściowym przed szlifowaniem (prosta u góry rysunku), po szlifowaniu zgrubnym $g_1 = 100 \mu\text{m}$ (krzywa najniższej położona) i po usunięciu warstw naprężonych grubości kolejno 20, 40 i 60 μm

usuwanie warstw grubości 100 μm i 50 μm przy najwyższej stosowanej częstotliwości równej 15 MHz ($\lambda = 0,2$ mm). Dane dla stanu wyjściowego układają się wzdłuż linii równoległej do osi naprężeń, co oznacza brak gradientu właściwości sprężystych w kierunku grubości. Po szlifowaniu prędkości fal ultradźwiękowych zależy silnie od długości fali, czyli od grubości warstwy, w której naprężenie jest mierzone. Podana głębokość równoważenia się naprężeń rozciągających i ściskających jest wielkością orientacyjną możliwą do sprecyzowania po rozwiązaniu tzw. zagadnienia odwrotnego [21], dzięki któremu można odtworzyć profil właściwości sprężystych warstwy, opierając się na zmierzonych zmianach prędkości fal powierzchniowych w funkcji częstotliwości. Precyzja odtworzenia profilu naprężenia zależy od stosowanego zakresu zmian częstotliwości. W przytoczonych wynikach doświadczalnych dolna granica częstotliwości (2,5 MHz) wydaje się wystarczająca, natomiast górna granica (15 MHz), ograniczona przez stosowany układ nadawczo-odbiorczy, powinna być o rząd wyższa.

12. Zakończenie

W pracy przedstawiono główne zasady ultradźwiękowych pomiarów naprężeń w materiałach technicznych, opisano przykładowe układy pomiarowe i kilka zastosowań tej techniki tensometrycznej. Ostatnio obserwuje się szybki rozwój tensometrii ultradźwiękowej, i to zarówno w zakresie aparatury i metod badania, jak i pola zastosowań. W wielu ośrodkach są prowadzone prace podstawowe i wdrożeniowe z tego zakresu. Należy tu wymienić próby zastosowania ultradźwiękowej techniki do odwzorowania pól naprężeń w wewnętrznych obszarach elementów, np. rozkładu naprężeń w otoczeniu zakończenia szczeliny, do badania rozkładu naprężeń wzdłuż toru wiązki fal ultradźwiękowych czy ultradźwiękową tomografię komputerową. Przedstawione przykłady zastosowań zaczerpnięto z prac wykonanych w Pracowni Ultradźwiękowych Badań Materiałów Zakładu Ośrodków Ciągłych IPPT PAN w Warszawie.

Literatura

1. R. W. BENSON, V. G. RAELSON, *Acoustoelasticity*, Product Engineering, No 29, 1959.
2. D. A. HUGNES, G. S. KELLY, *Second-Order Elastic Deformation of Solids*, Phys. Rev., 1959, No 92, 1145.
3. R. E. GREEN, *Treatise on Materials Science and Technology*, V. 3 — Ultrasonic Investigation on Mechanical Properties, Academic Press, 1973.
4. В. М. БОБРЕНКО, А. Н. КУДЕНКО, *Акустическая тензометрия I. Физические основы*, Дефектоскопия, 1980, 2 и *Акустическая тензометрия II. Методы и устройства*, Дефектоскопия, 1980, 12.
5. J. SZYMAŃSKI, W. LENARD, *Zjawisko elastoakustyczne w żeliwie szarym*. Materiały X Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Jadwisin 1980.
6. M. ADAMSKI, J. DEPUTAT, *Strukturalna czułość współczynnika elastoakustycznego*, Materiały XVIII Otwartego Seminarium z Akustyki OSA-81, Gliwice 1981.
7. G. BRADFIELD, *Strength Elasticity and Ultrasonics*, Ultrasonics, 1972, No 10.
8. J. DEPUTAT, *Akustyczne pomiary naprężeń*, PAK 1976 nr 3.
9. R. TRUPELL, C. H. ELBAUM, B. CHICK, *Ultrasonic methods in solid state physics*, Academic Press, London 1969.

10. J. WEHR, *Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych*, PWN, Warszawa 1972.
11. М. А. КРИСТАЛ, Б. Е. ПЕСТОВ, В. В. ДАВИДОВ, В. ТРОИЦКИ, *Электронная аппаратура ультразвуковых установок для исследования свойств твердого тела*, Изд. Энергия, Москва 1974.
12. J. DEPUTAT, *Podstawy i zastosowania tensometrii ultradźwiękowej*, Dozór Techniczny, 3, 1983, s. 95 - 100 i 4, 1983, s. 142 - 149.
13. J. DEPUTAT, A. BROKOWSKI, *Refraktometr ultradźwiękowy*, Patent PRL 107747.
14. J. DEPUTAT, A. BROKOWSKI, *Ultrasonic Measurements of residual stresses in rails*, Proc. 11th World Conference on Nondestructive Testing, Las Vegas, 3 - 8.11.1985, str. 592.
15. A. MIERNIK, K. FLAK, *Pomiary naprężeń własnych w szynach kolejowych za pomocą przyrządu UMN-10*, Materiały 15 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Rynia, 4 - 6.11.1986, Wyd. IPPT PAN, str. 371.
16. J. DEPUTAT, *Ultradźwiękowe pomiary naprężeń w śrubach*, Materiały VII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Referat K-12, Uniejów 1977.
17. J. DEPUTAT, *Ultrasonic technique for measuring stress in screws*, Proc. 9th WCNDT, Report 4 EDD-2, Melbourne 1979, oraz J. DEPUTAT, *Zasady ultradźwiękowych pomiarów naprężeń własnych w materiałach technicznych*, Materiały XI Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Opole 1982, Wyd. IPPT PAN, WSI — Opole SIMP.
18. L. ADLER, K. V. COOK, B. R. DEWOY, R. T. KING, *The Relationship between Ultrasonic Rayleigh Waves and Surface Residual Stress*, Materials Evaluation, 1977 No 35.
19. J. DEPUTAT, *Ultradźwiękowe pomiary naprężeń spawalniczych*, Przegląd Spawalnictwa, 36, 1984 nr 7 str. 10 - 17 i 36, 1984 nr 8 str. 15 - 17.
20. A. BROKOWSKI, J. DEPUTAT, *Nieniszczące pomiary naprężeń w technicznej warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych*, Materiały Szkoły Trybologicznej, Wyd. ITWL, Rynia 1982.
21. I. M. RICHARDSON, B. R. TITTMANN, *Estimation of surface layer structure from Rayleigh wave dispersion II, Sparse data case — analytical theory*, J. Appl. Phys. 1977 No 48.

Резюме

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТО-УПРУГОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Описано основные свойства акустоупругого явления (влияние напряжения на скорость ультразвуковых волн) в конструкционных сталях и возможности использования этого эффекта для измерений остаточных напряжений в металлургических материалах, деталях машин, в элементах конструкций. Подробно представлено ультразвуковой метод измерения остаточных напряжений в железнодорожных рельсах, ультразвуковую аппаратуру для измерения этих напряжений и сравнение результатов полученных ультразвуковой и разрушающими методами.

Summary

USE OF ELASTO-ACOUSTIC EFFECT IN STRESS-MEASUREMENTS

The influence of stress on ultrasonic velocity in steel is investigated and the methods based on this effect are used for residual stress measurements in steel mill products, machine parts, and construction members. We present the detailed description of ultrasonic measurements of residual stress in railway rails, the measuring equipment and comparison of the destructive test results with ultrasonic data.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 1 czerwca 1987 roku.