

## ULTRADŹWIĘKOWE POMIARY NAPRĘŻEŃ Z WYKORZYSTANIEM FALI PODŁUŻNEJ – PRÓBA ZASTOSOWANIA DO BADANIA KONSTRUKCJI MOSTOWEJ

dr hab. inż. JACEK SZELAŹEK

dr inż. PIOTR GUTKIEWICZ

dr SŁAWOMIR MACKIEWICZ

wszyscy Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

### Streszczenie

W pracy przedstawiono ultradźwiękowe badania naprężeń zmiennych w elementach konstrukcji stalowej. Opisano podstawy ultradźwiękowej metody pomiarów naprężeń, podano zależności z jakich na podstawie pomiarów czasu przejścia impulsów fal ultradźwiękowych obliczane są wartości naprężenia. Opisano wykorzystane w badaniach głowice ultradźwiękowe i układ pomiarowy. Pokazano wyniki badania zmian naprężeń w dwóch elementach kratowego mostu kolejowego – w podłużnicach i w wykrzywieniach kratowego dźwigara. Zarejestrowano zmiany naprężeń wywołane przejazdami pojazdów szynowych o różnych masach, poruszających się z różnymi prędkościami, w obu kierunkach. Badania prowadzone dwukanałową aparaturą równocześnie w dwóch podłużnicach pozwoliły na wykrycie asymetrii obciążenia konstrukcji mostu podczas przejazdu pociągu towarowego. Porównano wyniki pomiarów uzyskanych techniką ultradźwiękową z wynikami uzyskanymi techniką tensometrii oporowej.

### 1. Wstęp

W czasie prób obciążenia i podczas eksploatacji, naprężenia i odkształcenia w mostach badane są współcześnie różnego typu czujnikami. Pomiaru takie prowadzone są, między innymi, w celu weryfikacji wyników obliczeń. W pracy [1] wskazano na zasadność ich wykonywania ponieważ opisane w niej badania wykazały, że zmierzone wartości naprężeń w elementach stalowego mostu kratowego są znacząco niższe od wyników obliczeń. Początkowo do badania naprężeń stosowano oporowe czujniki tensometryczne. Od wielu lat stosowane są czujniki światłowodowe instalowane na elementach stalowych i betonowych konstrukcji mostowych, pozwalające nie tylko na monitorowanie odkształceń ale i wykrywanie powstających w konstrukcji pęknięć zmęczeniowych. Zaletami tych czujników są odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, możliwość tworzenia czujników o krótkiej i długiej bazie pomiarowej, niska masa oraz coraz niższy koszt. Praca [2] przedstawia układ czujników światłowodowych położonych na stalowym moście kolejowym. Światłowody zostały na trwałe powiązane z konstrukcją mostu w krytycznych miejscach, a cały system pomiarowy został wyposażony w układ bezprzewodowego przesyłania danych pomiarowych. W pracy [3] przedstawiono wykorzystanie czujników światłowodowych do monitorowania stanu mostu wiszącego wyposażonego w kable wykonane z włókien

węglowych. W publikacji [4] z 2006 roku opisano czujniki światłowodowe zainstalowane na najdłuższym moście wiszącym świata (Tsing Ma Bridge) a w pracy [5] 64-kanałowy system światłowodowy zabudowany na moście drogowym.

Poza czujnikami światłowodowymi do oceny stanu konstrukcji mostowych stosowane są również metody optyczne. Praca [6] opisuje system sztucznej wizji pozwalający na monitorowanie przemieszczeń trudnodostępnych elementów konstrukcji mostowej. Do monitorowania odkształceń stosuje się również czujniki piezoelektryczne w postaci płytek z ceramiki piezoelektrycznej przytwierdzonych do konstrukcji. Czasami stosuje się w tym celu również czujniki wykonane z włókien piezoelektrycznych wykazujące wyższą czułość [7]. Naklejone na badany element czujniki piezoelektryczne działają podobnie jak tensometry oporowe i mają zbliżone do nich wymiary. W wyniku deformacji powstaje na ich okładkach napięcie elektryczne proporcjonalne do odkształcenia. Innym sposobem wykorzystania czujników piezoelektrycznych jest monitorowanie odpowiedzi pobudzanych do drgań piezoelementów. Zastosowanie takich czujników do wykrywania uszkodzeń w konstrukcji żelbetowego mostu opisano w pracy [8].

Przegląd współcześnie stosowanych systemów i czujników monitorujących odkształcenia, zmiany temperatury, rozwój korozji czy pojawiające się oblodzenia konstrukcji przedstawiony jest w pracy [9].

Pomimo szybkiego rozwoju nowych typów czujników najczęściej stosowaną metodą pomiaru odkształceń w elementach mostów stalowych jest nadal tensometria oporowa. Powszechnie znane i szeroko zaakceptowane w środowisku inżynierskim tensometry oporowe wykorzystano również w pomiarach prowadzonych techniką światłowodową opisanych w pracach [9, 2]. Zasady tensometrii oporowej zostały sformułowane ponad 150 lat temu przez Lorda Kelvina. Pierwsze badania z wykorzystaniem tensometrów oporowych przeprowadzono w 1937 roku a w dwa lata później rozpoczęła się masowa produkcja drucikowych czujników tensometrycznych. W czujnikach oporowych wykorzystuje się zjawisko liniowej zależności zmiany oporu elektrycznego  $R$  przewodnika, w którym płynie prąd stały od odkształcenia  $\varepsilon$  [10]. Pomiar zmian oporu elektrycznego  $\Delta R$  tensometru przytwierdzonego sztywno do powierzchni odkształcanego elementu pozwala na określenie odkształcenia powierzchni jako:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R k} \quad (1)$$

gdzie  $k$  – stała tensometru, opisująca bezwymiarowo własności metrologiczne czujnika, wyrażająca stosunek przyrostu względnego rezystancji do wydłużenia względnego.

Znając odkształcenie i korzystając z prawa Hook'a obliczyć można wartość naprężenia:

$$\varepsilon E = \sigma \quad (2)$$

gdzie  $E$  – moduł Younga materiału badanego elementu

Zaletami techniki tensometrii oporowej są: możliwość pomiaru naprężeń wolno- i szybkozmiennych w długim okresie czasu, niski koszt czujników, dostępność czujników różnych typów i wielkości, niewrażliwość na wstrząsy. Stosując rozety tensometryczne składające się z wielu tensometrów ustawionych w różnych kierunkach, możliwe jest nie tylko wyznaczenie wartości naprężeń ale i kierunków naprężeń głównych.

Ze sposobu działania tensometru wynika, że aby zmiana oporu była proporcjonalna do odkształcenia badanego elementu, czujnik musi być sztywno związany z powierzchnią badanego materiału. W porównaniu do początkowo produkowanych czujników drucikowych warunki te lepiej spełniają powszechne dzisiaj czujniki foliowe charakteryzujące się większą powierzchnią przylegania do podłoża i niższą skłonnością do pełzania. Zazwyczaj tensometry mocuje się do powierzchni specjalnym klejem. Dla prawidłowego przyklejenia czujnika konieczne jest staranne przygotowanie powierzchni materiału (usunięcie powłok malarskich, wyrównanie powierzchni, odtłuszczenie, wysuszenie). Stosunkowo długi czas oraz wysoki koszt przygotowania miejsca pomiaru, przyklejenia przetwornika oraz doprowadzenia i połączenia przewodów pomiarowych są głównymi niedogodnościami tej techniki. Dodatkowo standardowe tensometry są wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne oraz wilgoć, są jednorazowe i wymagają zabezpieczenia przed przypadkowym lub celowym (wandalizm) uszkodzeniem. W przypadkach pomiarów w miejscach gdzie tensometry mogą ulec uszkodzeniu stosowane są czasami stalowe osłony mocowane na stałe do monitorowanych elementów, co dodatkowo komplikuje prace przygotowawcze przed pomiarami.

Dodatkowym utrudnieniem w długotrwałych badaniach tensometrycznych mostów jest to, że po pewnym czasie trudno jest sprawdzić czy połączenie klejowe tensometr-obiekt nie uległo degradacji. Aby wyeliminować wpływ degradacji kleju na wyniki pomiarów budowane są tensometry fabrycznie osadzone na cienkiej, stalowej blaszce, którą przytwierdza się do powierzchni elementu metodą spawaniu lub zgrzewania punktowego. Rozwiązanie takie wymaga jednak specjalnej aparatury do montażu tensometrów i dlatego stosowane jest jedynie w ograniczonym zakresie

Z zasady działania tensometru oporowego wynika, że bezpośrednio informuje on jedynie o zmianach odkształcenia na powierzchni elementu, uśrednionych na długości tensometru. Jeśli potrzebna jest informacja o naprężeniach w objętości badanego elementu konieczne jest instalowanie tensometrów na obu przeciwległych powierzchniach elementu oraz odpowiednie przeliczenie stanu odkształceń na powierzchni elementu na stan naprężeń w jego wnętrzu. W przypadku złożonych stanów naprężeń przeliczenie takie może być bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Jednorazowość, skomplikowana instalacja i wymienione wcześniej ograniczenia stanowią podstawowe wady tensometrii oporowej. Do jej zalet można natomiast zaliczyć wysoką czułość, szeroką dostępność różnych typów tensometrów oraz przyrządów i akcesoriów pomiarowych (mostków tensometrycznych, klejów). Dodatkowymi atutami tej metody jest również łatwość automatyzacji pomiarów i rejestracji wyników badań z wielu miejsc pomiarowych a także wieloletnie doświadczenia i ugruntowana pozycja tej techniki w zastosowaniach przemysłowych.

## **2. Ultradźwiękowe badania naprężeń**

Stosunkowo nowym i mniej znanym sposobem oceny naprężeń jest tensometria ultradźwiękowa. Pierwsze zastosowania tej techniki, rozwijanej w IPPT PAN od blisko 30 lat, to badania naprężeń własnych w szynach i kołach kolejowych [11, 12]. Jedną z przyczyn sukcesu metody ultradźwiękowej w badaniach naprężeń własnych było to, że technika ultradźwiękowa pozwala wyznaczać wartości naprężeń w sposób nieniszczący. Pomiary naprężeń własnych metodami tensometrycznymi są możliwe do wykonania jedynie w sposób niszczący, poprzez pomiar odkształceń powstałych w wyniku relaksacji naprężeń własnych. Na przykład wartości naprężeń własnych w powierzchniowej warstwie materiału można wyznaczyć wierząc otwór prostopadle do

powierzchni i oceniając odkształcenia wywołane uwolnieniem naprężeń w jego pobliżu [13]. Naprężenia w objętości materiału, na przykład podłużną składową naprężeń własnych w szynach kolejowych, ocenia się mierząc odkształcenia spowodowane uwolnieniem tych naprężeń poprzez wycięcie z szyny krótkiego odcinka, na którego obwodzie wcześniej naklejono tensometry [14].

W ultradźwiękowych badaniach naprężeń własnych wykorzystuje się zjawisko elastoakustyczne czyli zależność prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia [15]. Znając czas przejścia fal na określonej drodze w materiale bez naprężeń (czas przejścia zmierzony na przykład w odprężonym wzorcu wykonanym z tego samego materiału co badany element) i w elemencie z naprężeniami wartość naprężenia  $\sigma$  można wyznaczyć jako:

$$\sigma = \beta \frac{t_0 - t}{t} \quad (3)$$

gdzie:  $t_0$ ,  $t$  – czasy przejścia fali odpowiednio w odprężonym wzorcu i w materiale naprężonym,  $\beta$  – stała elastoakustyczna.

Główną trudnością w praktycznych zastosowaniach ultradźwiękowej techniki pomiarów naprężeń jest słaba zależność prędkości fal od naprężenia i wynikająca stąd potrzeba bardzo dokładnego pomiaru czasów przejścia impulsów fal. W warunkach przemysłowych stwarza to konieczność stosowania zaawansowanych elektronicznych układów pomiarowych oraz specjalnych układów głowic ultradźwiękowych zmniejszających wpływ sprzężenia akustycznego na dokładność pomiarów. Dodatkowym utrudnieniem w badaniach naprężeń własnych jest wpływ tekstury badanego materiału na mierzone czasy przejścia i konieczność jej uwzględniania przy analizie wyników pomiarów [16].

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku ultradźwiękowych pomiarów zmian naprężeń. Podstawą takich pomiarów jest rejestracja *zmian* czasu przejścia fal wywołanych zmianami naprężeń. Oznacza to, że do pomiaru można wykorzystać nie tylko słaby efekt elastoakustyczny ale również, wywołany odkształceniem materiału, efekt zmiany odległości między głowicami, między którymi rozchodzi się fala ultradźwiękowa.. Oznacza to również, że w czasie pomiaru jedynymi czynnikami wpływającymi na czas przejścia fal są naprężenie, związana z nim deformacja oraz temperatura, której wpływ można uwzględnić stosując odpowiednie poprawki.

Najpowszechniej stosowanymi ultradźwiękowymi pomiarami zmian naprężeń, specyficznymi ze względu na mierzone elementy, wysokie wartości naprężeń i ich powolne zmiany, są badania naprężeń w śrubach [17, 18]. Naprężenia rozciągające oceniane są w czasie dokręcania śrub lub szpilek na podstawie zmian czasu przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej rozchodzącej się przez długość śruby. Zmiany czasu przejścia fali powodowane są tutaj sumującym się wpływem zjawiska elastoakustycznego oraz wydłużenia śruby.

Literatura opisująca ultradźwiękowe pomiary naprężeń zmiennych w elementach konstrukcji stalowych to dotychczas głównie prace przedstawiające pomiary laboratoryjne. Na przykład w [19] opisane są badania zmian naprężeń w rurze poddanej zmiennemu ciśnieniu wewnętrznemu. Do badania wykorzystano fale ultradźwiękowe rozchodzące się w kierunku osiowym i obwodowym w ścianie rury, co umożliwiło wyznaczenie obu składowych głównych naprężeń. W pierwszych terenowych badaniach zmian naprężeń metodą ultradźwiękową, podjętych w latach 90-tych, wykorzystano fale powierzchniowe o niskiej częstotliwości (0,5 – 1MHz). Badania prowadzono w USA na stalowym wiadukcie, za pomocą działających bezkontaktowo

przetworników elektromagneto-akustycznych (EMAT). Przetworniki te działają skutecznie jako nadajniki i odbiorniki fal powierzchniowych i zapewne dlatego właśnie tego typu fale zastosowano w badaniach zmian naprężeń w mostach drogowych [20, 21]. Drugim powodem wykorzystania przetworników EMAT była możliwość generacji i odbioru fal przez warstwę farby pokrywającej elementy mostu. Prędkość fali powierzchniowej słabo zależy od naprężenia dlatego też obserwowane zmiany czasu przejścia tej fali wywołane były głównie odkształceniem elementu (zmianą drogi fal między głowicą nadawczą i odbiorczą). Autorzy stwierdzili możliwość rejestrowania zmian naprężeń wynoszących jedynie około +/-14 MPa. Badania własne prowadzone w IPPT PAN wykazały, że czas przejścia fali powierzchniowej zależy nie tylko od naprężenia ale również od grubości warstwy pokryć malarskich oraz własności sprężystych tej warstwy. Z badań tych wynika, że bez uprzedniej (w warunkach polowych zupełnie niepraktycznej) kalibracji układu pomiarowego, metodą opisaną w pracach [20, 21] możliwe jest wyznaczenie naprężeń jedynie z dokładnością +/-15%. Eksperymenty z przetwornikami typu EMAT pokazały też, że duży pobór energii przez elektromagnesy tych przetworników powoduje, że ich zastosowanie w pomiarach terenowych wymaga korzystania z zasilania sieciowego lub ciężkich akumulatorów o dużej pojemności. Dlatego w opisanych niżej badaniach naprężeń w elementach stalowego mostu kolejowego zastosowano fale podłużne i przetworniki piezoelektryczne, które skutecznie generują te fale przy znacznie mniejszych wymiarach i wielokrotnie niższym poborze mocy.

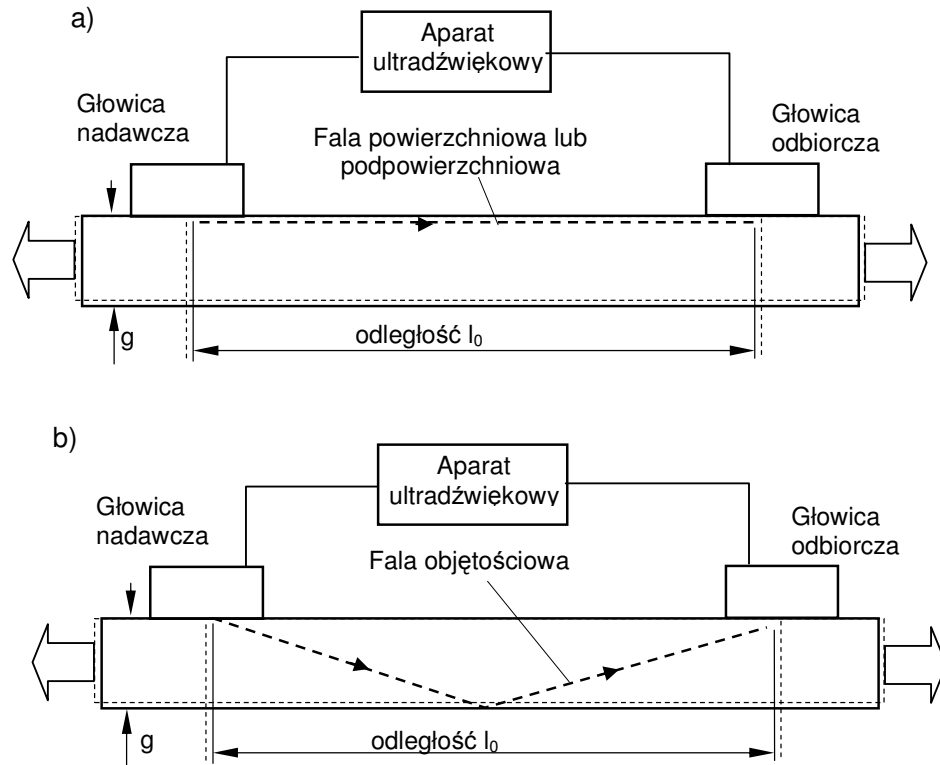
### 2.1. Zasada pomiaru

Schemat ultradźwiękowego badania zmian naprężeń pokazano na rysunku 1. Dwie głowice ultradźwiękowe, nadawcza i odbiorcza, ustawione są przeciwobnie na powierzchni elementu (fragment płaskownika, kątownika, blachy) i połączone przewodami z aparatem ultradźwiękowym umożliwiającym pomiar czasu przejścia fal między głowicami. W stanie nienaprzężonym odległość między środkami głowic, czyli miejscami wnikania do materiału i odbioru fal ultradźwiękowych, wynosi  $l_0$ . Impuls fali ultradźwiękowej, w zależności od budowy głowic i grubości elementu, może dotrzeć do głowicy odbiorczej różnymi drogami. Rysunek 1a pokazuje drogę fali powierzchniowej lub podpowierzchniowej, rozchodzącej się równoległe do powierzchni materiału. Rysunek 1b - drogę fali objętościowej, rozchodzącej się skośnie do powierzchni elementu i docierającej do głowicy odbiorczej po odbiciu od przeciwległej powierzchni elementu.

Dla fali rozchodzącej się równoległe do powierzchni materiału (rysunek 1a) czas przejścia fali między głowicami w stanie nienaprzężonym wynosi

$$t_0 = t_{GN} + \frac{l_0}{V_0} + t_{GO} \quad (4)$$

gdzie:  $t_{GN}$ ,  $t_{GO}$  – czasy przejścia fal odpowiednio w klinach załamujących głowicy nadawczej i odbiorczej,  
 $V_0$  – prędkość fali w materiale badanego elementu bez naprężeń.



Rys. 1. Schemat ultradźwiękowego badania zmian naprężeń:

a – z wykorzystaniem fali propagującej się równolegle do powierzchni (fala powierzchniowa, fale podpowierzchniowe), b – z wykorzystaniem fali objętościowej rozchodzącej się pod kątem do powierzchni materiału.

Fig. 1. Schema of ultrasonic stress monitoring:

a – using ultrasonic wave propagating parallel to the element surface (surface, subsurface waves), b – using bulk wave propagating oblique to the surface.

Jeśli głowica nadawcza i odbiorcza będą sprzęgnięte na stałe z powierzchnią badanego elementu to długość bazy pomiarowej (odległość między środkami głowic) będzie funkcją odkształcenia zależnego od naprężenia. Po przyłożeniu siły rozciągającej w materiale powstaną naprężenia i związana z nimi deformacja powodująca wzrost odległości między głowicami. Przyrost czasu przejścia fali w wyniku przyłożenia obciążenia wyniesie

$$\Delta t = \Delta t^\beta + \Delta t^\varepsilon = \sigma \left( \beta t_0 + \frac{t_0}{E} \right) \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta t^\beta$  – zmiana czasu w wyniku zjawiska elastoakustycznego,  $\Delta t^\varepsilon$  – zmiana czasu w wyniku odkształcenia,  $t_0$  – czas przejścia w stanie bez naprężenia,  $\sigma$ ,  $\beta$ ,  $E$  – odpowiednio naprężenie, stała elastoakustyczna, moduł Younga.

Stała elastoakustyczna  $\beta$  jest wyznaczana doświadczalnie w czasie próby rozciągania. Opisuje ona względne zmiany prędkości propagacji fali (lub czasu przejścia fali na

odcinku o stałej długości) w wyniku przyłożenia jednostkowego naprężenia i obliczana jest z zależności

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 \sigma} = \frac{t_0 - t}{t \sigma} \quad (6)$$

gdzie:  $V, V_0$  – prędkości fali odpowiednio w stanie naprężonym i bez naprężeń,  
 $t, t_0$  – czasy przejścia fali odpowiednio w stanie naprężonym i bez naprężeń  
 $\sigma$  - naprężenie

Wartość stałej elastoakustycznej zależy od rodzaju materiału, w którym rozchodzi się fala, od typu fali i od kierunku propagacji fali względem kierunku naprężenia [11]. Jeśli badanie prowadzone jest falą podłużną rozchodzącą się równoległe do kierunku naprężenia (zgodnie z rysunkiem 1a) to dla stali konstrukcyjnej wartości współczynnika elastoakustycznego  $\beta$  wynosi  $-1,25 \cdot 10^{-5}$  [MPa<sup>-1</sup>]. Ujemna wartość współczynnika oznacza, że zmiany czasu w wyniku działania efektu elastoakustycznego i deformacji materiału sumują się. To oraz najwyższej wartości współczynnika elastoakustycznego dla znanych fal i konfiguracji kierunków propagacji fal oraz kierunków naprężenia powodują, że ten sposób pomiaru zapewnia najwyższą czułość badania liczoną jako zmiana czasu przejścia odniesiona do jednostkowej zmiany naprężenia. Dla układu pomiarowego zgodnie z rysunkiem 1a, przyjmując wartość modułu Younga równą dla stali konstrukcyjnej  $E=210$  GPa i dla odległości między głowicami równej  $l_0=300$  mm, zmiana czasu przejścia  $\Delta t$  wywołana przyłożeniem naprężenia rozciągającego  $\sigma = 1$  MPa wyniesie 0,87 ns. Takie zmiany czasu przejścia są mierzalne wspólną aparaturą również w warunkach terenowych. W badaniu zmian naprężeń w stali falą podłużną rozchodzącą się równoległe do kierunku naprężenia całkowity przyrost czasu przejścia fali podłużnej  $\Delta t$  jest w 72% wynikiem działania zjawiska elastoakustycznego ( $\Delta t^\beta = 0,63$  ns) i w 28% wynikiem odkształcenia czyli zmiany odległości między głowicami ( $\Delta t^\epsilon = 0,24$  ns). Można więc powiedzieć, że w odróżnieniu od tensometru oporowego układ ultradźwiękowy wykorzystujący falę podłużną jest czuły głównie na zmiany prędkości fal wywołane działaniem naprężenia a nie tylko na zmiany czasu przejścia wywołane odkształceniem materiału.

Pomiar falą rozchodzącą się równoległe do powierzchni materiału informuje o zmianach naprężeń uśrednionych na drodze fali w cienkiej, powierzchniowej warstwie materiału. Grubość warstwy, w której naprężenia są uśrednione jest w przybliżeniu równa długości fali ultradźwiękowej. Dla stosowanej w pomiarach fali podłużnej o częstotliwości 2 MHz, rozchodzącej się w stali z prędkością  $V=5940$  [m/s] długość fali  $\lambda$  wynosi około 3 mm.

W przypadku prowadzenia pomiaru falą odbitą od przeciwległej powierzchni elementu (patrz rysunek 1b) informacja o naprężeniach będzie uśredniona na grubości materiału. W tym przypadku zmiana czasu przejścia fali będzie zależała dodatkowo od wywołanej działaniem obciążenia zmiany grubości badanego elementu. W przybliżeniu zmiana czasu przejścia fali odbitej wyniesie

$$\Delta t_R = \frac{\sqrt{l_0^2 + 4g^2}}{V_0} - \frac{t_{OR} \sqrt{(l_0 + l_0 \sigma / E)^2 + 4g^2 (1 - \nu \sigma / E)^2}}{l_0 \sigma [\beta^T + (\beta^{II} - \beta^T) \cos \alpha]} \quad (7)$$

gdzie:  $g$  – grubość elementu,  $\nu$  – stała Poissona,  $t_{OR}$  – czas przejścia fali odbitej w stanie bez naprężenia,  $\alpha = \arctan(2g/l_0)$ ,  $\beta^H$ ,  $\beta^T$  – współczynniki elastoakustycznej dla fali rozchodzącej się odpowiednio równoległe i prostopadłe do kierunku naprężenia.

Przybliżenie polega na założeniu, że wartość współczynnika elastoakustycznego w zależności od kąta między kierunkiem propagacji fali a kierunkiem naprężenia, zmienia się zgodnie z funkcją cosinus. Jak wykazały doświadczenia, przyjmując to przybliżenie popełniany błąd w ocenie wartości stałej elastoakustycznej jest mniejszy od 3 %. Dokładne wartości współczynnika elastoakustycznego dla fali rozchodzącej pod kątem względem kierunku naprężenia mogą być wyznaczone doświadczalnie, podczas próby rozciągania.

W badaniu prowadzonym falą odbitą, przy odległości między głowicami wynoszącej 300 mm oraz grubości elementu stalowego równej 25 mm przyłożenie naprężenia rozciągającego  $\sigma = 1$  [MPa] spowoduje przyrost czasu przejścia fali odbitej o 0,86 ns. Jest to więc przyrost jedynie nieznacznie mniejszy (o 1,16%) niż dla fali podpowierzchniowej, rozchodzącej się równoległe do kierunku naprężenia i „nieczułej” na zmiany grubości elementu.

## 2.2. Aparatura pomiarowa

Do pomiaru czasu przejścia impulsu fal ultradźwiękowych wykorzystano dwukanałową kartę ultradźwiękową ze specjalnym oprogramowaniem, pozwalającą na pomiar czasu przejścia z dokładnością  $\pm 0,3$  ns. w czasie rzeczywistym. Pomiar odbywał się techniką impulsową z częstotliwością powtarzania 500 Hz, regulowaną w granicach od 100 do 3000 Hz. Amplituda sygnału ultradźwiękowego próbkowana była w każdym cyklu w dwóch kanałach z rozdzielczością 8-bitów i z częstotliwością 60 MHz. Pozwalało to na równoczesną wizualizację w czasie rzeczywistym przebiegów zmian amplitudy opóźnienia fali ultradźwiękowej w dziedzinie czasu, przy równoczesnym zapisie zmierzonych wielkości w zbiorze na dysku. Do generacji i odbioru fal zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 1 wykonano dwie specjalne głowice kątowe na fale podłużne. Do pomiaru falą podpowierzchniową kliny załamujące głowic miały kąt równy pierwszemu kątowi krytycznemu. Kąty załamania głowic pokazanych na rysunku 1b były równe około  $70^\circ$ . Głowice wyposażono w silne magnesy stałe zapewniające stabilne sprzężenie akustyczne oraz zachowanie ustalonego położenia głowic względem powierzchni badanego elementu mostu. Głowice połączone były z aparaturą pomiarową ekranowanymi przewodami o długości 25 m.

W tensometrii oporowej dąży się do uzyskania możliwie krótkich baz pomiarowych, zapewniających liniowe odwzorowywanie odkształceń szybkozmiennych. Długości baz pomiarowych współczesnych tensometrów oporowych liczone są w pojedynczych milimetrach. W ultradźwiękowych badaniach naprężeń metodą impulsową długość bazy pomiarowej jest wynikiem kompromisu między czułością układu, proporcjonalną do długości bazy i czasu przejścia fal, a możliwością uśredniania wartości naprężeń na odcinku między głowicami. W opisanych niżej badaniach długość bazy pomiarowej wynosiła 300 mm czyli była wielokrotnie większa w porównaniu do rozmiarów tensometrów oporowych. Jednak w przypadku monitorowania zmian naprężeń w wielometrowej długości elementach mostu, poddanych rozciąganiu, ścisaniu lub zginaniu, uśrednianie wyników na długości 300 mm nie miało wpływu na wynik pomiaru.

Czas przejścia ultradźwiękowej fali podłużnej na drodze 300 mm w stali wynosi około 50  $\mu$ s. Tyle samo trwa zmiana wartości naprężenia na długości odcinka pomiarowego. Czas przejścia fali wyznacza więc teoretycznie najwyższą uzasadnioną fizycznie

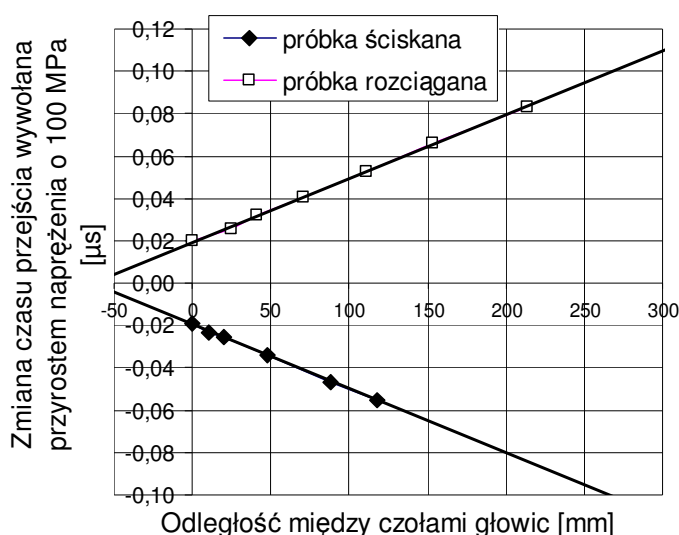


częstotliwość próbkowania (czyli częstotliwość powtarzania aparatu ultradźwiękowego) równą 20MHz. Nawet przy zastosowanej długiej bazie pomiarowej jest ona wielokrotnie wyższa niż możliwa do osiągnięcia częstotliwość powtarzania w układach ultradźwiękowych. W konstrukcjach takich jak mosty, obciążanych przejeżdżającymi po nich pojazdami, długa baza pomiarowa w badaniach ultradźwiękowych nie ograniczana więc możliwości badania szybkich zmian naprężeń.

### 3. Wyniki pomiarów

#### 3.1. Skalowanie układu pomiarowego

Przed pomiarami na moście aparaturę ultradźwiękową wyskalowano na próbkach wykonanych ze stali konstrukcyjnej poddawanych jednoosiowemu rozciąganiu i ścisnaniu w zakresie 0 – 200 MPa dla rozciągania i 0 – 100 MPa dla ścisnania. Ponieważ czułość pomiaru zależna jest od odległości między głowicami wykonano badania zależności zmiany czasu przejścia fali dla naprężeń równych 0 i 100 MPa, dla różnych odległości między czołami głowic. W pomiarach połowych odległość między czołami głowic ustalana była przy pomocy szablonu (patrz rysunek 4). Rysunek 2



Rys. 2. Zmiany czasu przejścia fal wywołane zmianą naprężenia o 100 MPa dla różnych odległości między czołami głowic ultradźwiękowych.

Fig. 2. Time of flight changes resulting from stress increment equal to 100MPa, for various distances between ultrasonic probeheads..

przedstawia liniowe zależności przyrostu czasu wywołanego zmianą naprężenia o 100 MPa od odległości między czołami głowic. Górna linia na wykresie przedstawia wyniki uzyskane na próbce rozciąganej, dolna – na ściskanej. Z uzyskanych wyników obliczono wartość technicznego współczynnika elastoakustycznego dla fali podłużnej (jest to współczynnik uwzględniający łącznie wpływ zjawiska elastoakustycznego i odkształcenia na czas przejścia impulsu fali). Wynosi ona  $\beta_{III T} = 1,77 \cdot 10^{-5}$  [1/MPa]. Stąd obliczona „czułość” układu impulsowego, dla odległości między czołami głowic równej 300 mm (co odpowiada odległości między środkami głowic równej 368mm), wynosi 0,9 MPa/ns (1,1 ns/MPa). Oznacza to, zakładając iż czynnikami wpływającym na mierzone czasy przejścia fal są jedynie efekt elastoakustyczny i odkształcenie

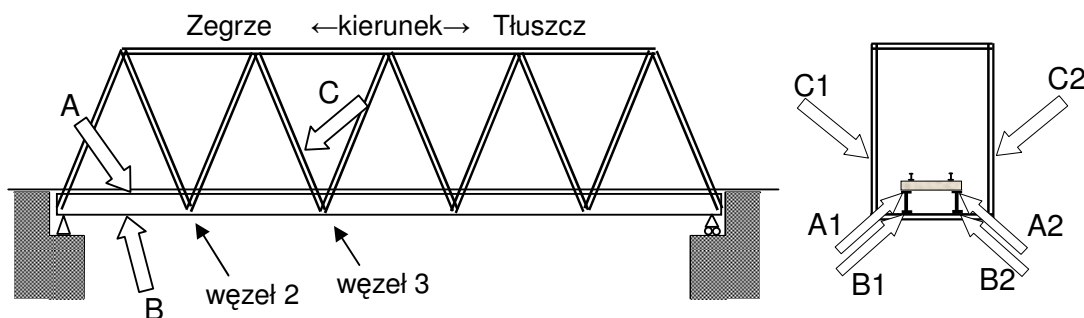
materiału, że mierząc w warunkach polowych zmiany czasu przejścia z dokładnością  $\pm 1$  ns, błąd obliczanej wartości naprężenia wynosi  $\pm 1,1$  MPa.

Dla porównania na próbce poddawanej rozciąganiu wykonano pomiary tensometryczne, w których wykorzystano tensometry foliowe typu TFS10/120-W o oporności  $120 \Omega$  stałej  $K=2,15$  przyklejone klejem cyjanoakrylowym Tree Bond, podłączone do układu pomiarowego w układzie półmostka. Wyniki pomiarów tensometrycznych wykazały zgodność z wynikami obliczeń z dokładnością nie gorszą niż 2%.

### 3.2. Pomiary zmian naprężeń w elementach mostu

Opisaną wyżej aparaturą ultradźwiękową wykonano badania zmian naprężeń w elementach mostu kolejowego. Naprężenia wywoływane były przez przejeżdżające mostem pojazdy szynowe o różnej masie, poruszające się z równymi prędkościami. Podobnie jak w tensometrii oporowej przyjęto, że w stanie bez obciążenia zewnętrznego naprężenia własne w elementach mostu, naprężenia pochodzące od masy własnej konstrukcji i naprężenia montażowe są równe zero.

Badany most kolejowy o rozpiętości 40 m to spawano-nitowana stalowa konstrukcja wykonany jako kratownica Warrena o wysokości 8 m. Most ustawiony jest nad Kanałem Żerańskim, w Nieporęcie, na jednotorowej trasie Radzymin-Legionowo. Szyny toru kolejowego łączone są spoinami (tor ciągle spawany) i leżą na drewnianych podkładach podpartych na dwóch dwuteowych podłużnicach o wysokości 800 mm. Dźwigary mostu i wykrzyżowania wykonane są jako belki spawane z ceowników o różnych grubościach, łączonych płaskownikami. Schematycznie konstrukcję mostu pokazano na rysunku 3. Na rysunku tym pokazano strzałkami miejsca, w których wykonano pomiary ultradźwiękowe. Punkty pomiarowe znajdowały się na dwuteowych podłużnicach, w połowie długości odcinka między krańcem (węzeł 1) a drugim węzłem kratownicy, na dolnej i górnej półce obydwu podłużnic (punkty A i B), oraz na jednym z wykrzyżowań (punkty C). W punkcie B2 (górną powierzchnią dolnej półki dwuteowej podłużnicy) zainstalowano tensometry oporowe.



Rys. 3. Schemat konstrukcji mostu i miejsca wykonanych pomiarów ultradźwiękowych  
Fig. 3. Schema of bridge construction and spots of ultrasonic measurement

Rysunek 4a pokazuje dwie głowice na podłużne fale podpowierzchniowe przyłożone do górnej powierzchni dolnej półki prawej (od strony południowej) podłużnicy dwuteowej (miejsce pomiarowe B2). Widoczny jest szablon ustalający odległości między głowicami. Rysunek 4b przedstawia głowice ustawione na wykrzyżowaniu (punkt pomiarowy C2). Ponieważ grubość płaskownika wykrzyżowania, do którego sprzęgnięto głowice wynosiła 8 mm, odległość między głowicami w pomiarach na

wykrzyżowaniach wynosiła jedynie 110 mm. Na zdjęciach widoczne są lokalnie usunięte powłoki malarskie.



Rys. 4. Głowice ultradźwiękowe na konstrukcji mostu:  
a – na dolnej półce podłużnicy (miejsce pomiarowe B2), b – na  
wykrzyżowaniu (miejsce pomiarowe C1)

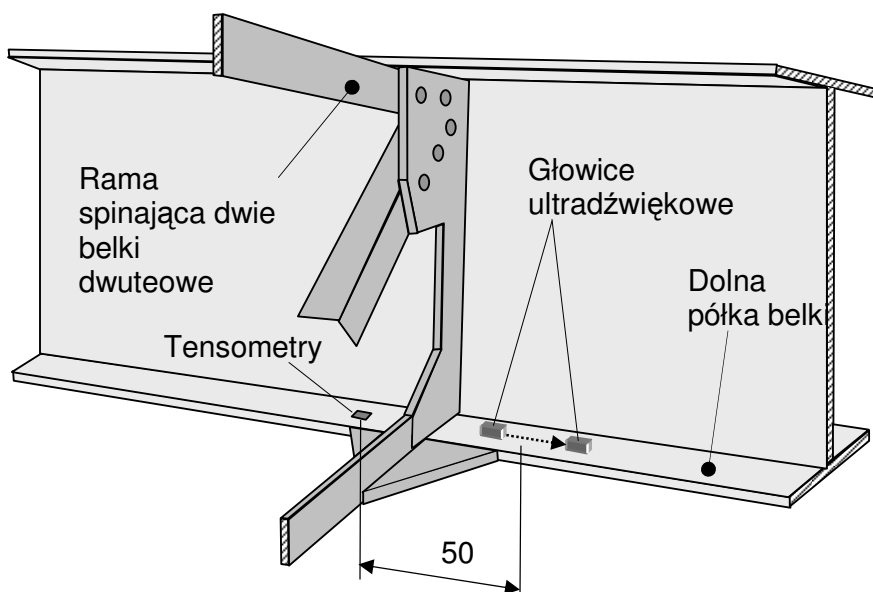
Fig. 4. Ultrasonic probes on the bridge elements:  
a – on lower girder plate (measuring spot B2), b – on diagonal truss member  
(measuring spot C1).

Jak okazało się w czasie pomiarów, elementy 50-cio letniego mostu noszą liczne ślady korozji ukryte częściowo pod grubymi, sięgającymi nawet do 1 mm grubości, powłokami malarskimi. Dlatego do uzyskania prawidłowego sprzężenia akustycznego głowic z badanym elementem konieczne okazało się usunięcie powłok malarskich i produktów korozji z powierzchni metalu. Powierzchnię metalu oczyszczano jedynie w miejscach styku głowic z konstrukcją (patrz zdjęcia na rysunku 4) ponieważ warstwa farby pomiędzy głowicami nie ma praktycznie wpływu na czas przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej ani fali odbitej. Dopuszczalna chropowatość powierzchni przy jakiej uzyskuje się prawidłowe sprzężenia akustyczne dla fali podłużnej o stosunkowo niskiej częstotliwości jest wielokrotnie wyższa niż w przypadku przygotowania powierzchni pod tensometr oporowy ponieważ fala ta pokonuje z łatwością warstwę oleju sprzęgającego o grubości ułamka milimetra.

Jak wynika ze wzorów (5,7) wynik pomiaru czasu zależny jest od długości bazy pomiarowej. Aby w sposób powtarzalny ustawiać głowice w stałej odległości korzystano z prostego szablonu pokazanego na rysunku 4a. Szablon ten pozwalał na ustawienie głowic wzdłuż jednej linii i uzyskanie powtarzalności ustawienia odległości między głowicami równej  $\pm 0,2$  mm co odpowiada  $\pm 0,07\%$  długości bazy pomiarowej. Innym możliwym teoretycznie sposobem ustalenia odległości między głowicami jest pomiar czasu przejścia fal między nimi. Korzystanie z tego sposobu ustawiania wymaga jednak precyzyjnego i niewygodnego przesuwania głowic, które są silnie przyciągane do badanego elementu przez magnesy stałe.

Celem pomiarów ultradźwiękowych zarówno w belkach dwuteowych jak i wykrzyżowaniu dźwigara było określenie zmian naprężeń podłużnych. Dlatego kierunki rozchodzenia się fal były równoległe do długości elementów (tj. równoległe do ocenianej składowej głównej naprężenia).

Dla porównania w jednym punkcie pomiarowym (punkt B2) przeprowadzono pomiary zmian naprężeń opisana wyżej metodą tensometryczną. Tensometry naklejono na górnej powierzchni dolnej półki belki dwuteowej. Miejsca pomiarów tensometrycznych i ultradźwiękowych pokazano schematycznie na rysunku 5. Odległość między miejscami pomiarów dwiema metodami wynosiła 50 cm, czyli około 6% odległości między dolnymi węzłami kratownicy .



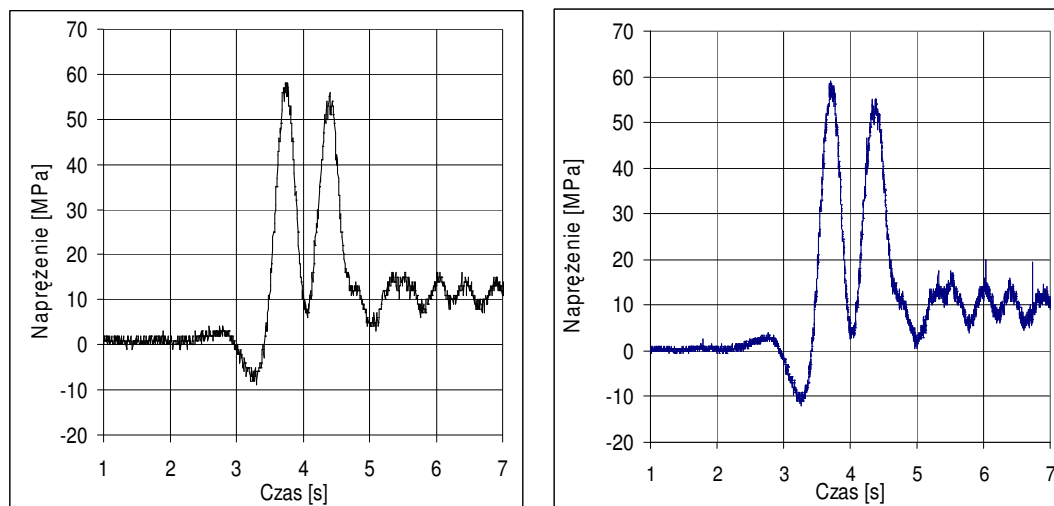
Rys. 5. Położenie układu głowic ultradźwiękowych i tensometrów oporowych na górnej powierzchni dolnej półki dźwigara (punkt pomiarowy B2).

Fig. 5. Localization of ultrasonic probeheads and resistance strain gauges on the upper surface of the girder lower plate (measuring spot B2).

#### 4. Wyniki pomiarów

Wykresy na kolejnych rysunkach przedstawiają przykładowe wyniki pomiarów zarejestrowanych podczas przejazdu ciężkiej lokomotywy elektrycznej, lekkiego autobusu szynowego i pociągu towarowego.

Na rysunku 6 pokazano zmiany podłużnej składowej naprężenia w dolnej płaszczyźnie (punkt pomiarowy B2 zgodnie z rysunkiem 3) zarejestrowane równocześnie techniką ultradźwiękową i tensometryczną w czasie przejazdu pociągu towarowego ciągniętego przez lokomotywę elektryczną o masie 120 ton, jadącego w kierunku Zegrza. Maksymalne wartości naprężeń ściskających, obserwowane w czasie gdy przedni wózek lokomotywy znajduje się między węzłami 2 i 3, wynoszą -8 i -10,5 MPa odpowiednio dla metody ultradźwiękowej i tensometrycznej. Maksymalne wartości naprężeń rozciągających, występujące podczas przejazdu pierwszego wózka ponad miejscem pomiaru, wynoszą 58 i 59 MPa odpowiednio dla metody ultradźwiękowej i tensometrycznej. Zaobserwowane różnice mogą być spowodowane różnym usytuowaniem miejsc pomiarowych względem pokazanej na rysunku 5 ramy lokalnie usztywniającej dolną płaszczyznę.



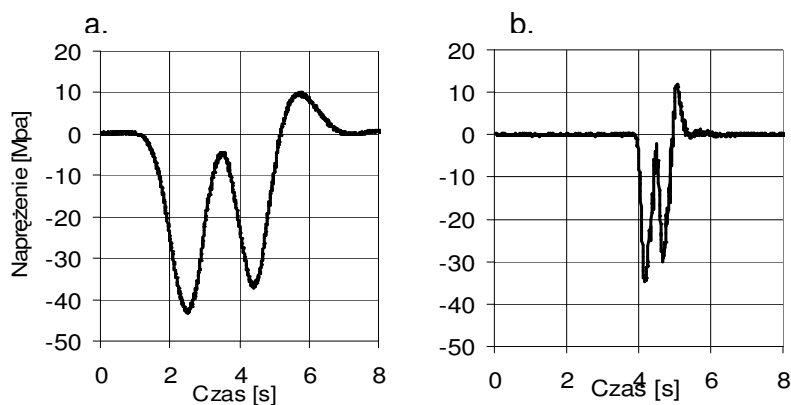
Rys. 6. Zmiany podłużnej składowej napężenia w dolnej półce prawej podłużnicy (punkt pomiarowy B2) w czasie przejazdu lokomotywy o masie 120 ton ciągnącej puste wagony w kierunku Zegrza. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych i tensometrycznych

Fig. 6. Changes of longitudinal stress component in a lower plate of the girder (measuring spot B2) during 120 ton locomotive and empty cars passage direction Zegrze. Results of ultrasonic and resistance strain gauges measurements.

Następne rysunki przedstawiają wyniki pomiarów ultradźwiękowych przeprowadzonych w innych punktach pomiarowych. Rysunek 7 pokazuje zmiany podłużnej składowej napężenia w górnej półce podłużnicy (punkt pomiarowy A1) zarejestrowane w czasie przejazdu lokomotywy elektrycznej o masie 120 ton z prędkościami 20 (rys. 6a) i 80 km/godz. (rys. 6b), w kierunku Tłuszcz. Widoczne są różnice zarówno w wartościach naprężeń maksymalnych jak i w przebiegach zmian naprężeń. Dla prędkości 20 km/godz. maksymalna wartość napężenia ściskającego, obserwowana w momencie gdy drugi wózek lokomotywy znajduje się ponad punktem pomiarowym, wynosi -44 MPa. Dla prędkości równej 80 km/godz. wartość napężenia ściskającego jest o 8 MPa niższa. Dla tej prędkości widoczne stają się też składowe zmiany o wyższej częstotliwości wywołane drganiami konstrukcji. Dla prędkości równej 80 km/godz. rozciągające naprężenia są wyższe i wynoszą 12 MPa.

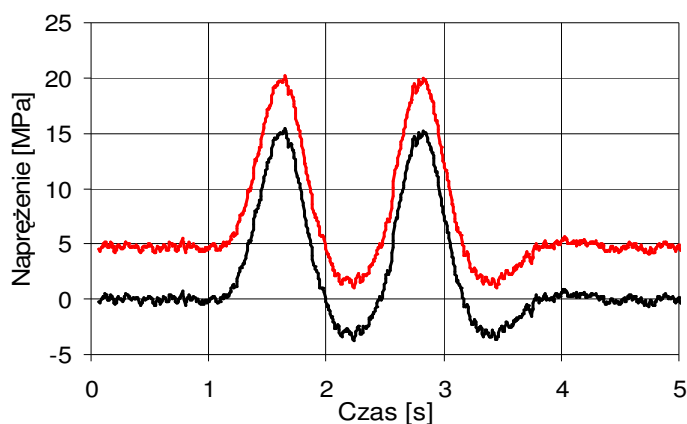
Rysunek 8 pokazuje zmiany naprężeń w dolnych półkach obu podłużnic (miejsca pomiarowe B1 i B2) zarejestrowane układem dwukanałowym podczas przejazdu lekkiego autobusu szynowego w kierunku Tłuszcz. Dla czytelności wykresu, do wyników z punktu pomiarowego B1 dodano 5 MPa. Maksymalna wartość napężenia rozciągającego w dolnych półkach wynosi 20 MPa. Przebiegi zmian naprężeń w obu podłużnicach są praktycznie identyczne.

Następny rysunek pokazuje wyniki pomiarów naprężeń zarejestrowane w tych samych miejscach podczas przejazdu pociągu towarowego w kierunku Zegrza. Poza blisko 3-krotnie wyższymi wartościami naprężeń w porównaniu do autobusu szynowego, widoczne są różnice w wartościach naprężeń w prawej i lewej podłużnicy. Różnice te sięgają 12 MPa czyli około 20% wartości naprężeń maksymalnych.



Rys. 7. Zmiany podłużnej składowej naprężenia w górnej półce prawej podłużnicy (punkt pomiarowy A1) w czasie przejazdu lokomotywy o masie 120 ton w kierunku Tłuszcz z prędkościami a – 20 km/godz, b – 80 km/godz.

Fig. 7. Changes of longitudinal stress component in a upper plate of the girder (measuring spot A1) during 120 ton locomotive passage direction Tłuszcz with velocities: a – 20 km/h, b – 80 km/h.



Rys. 8. Zmiany podłużnej składowej naprężenia w dolnych półkach obu podłużnic (punkty pomiarowe B1, B2) w czasie przejazdu autobusu szynowego w kierunku Tłuszcz.

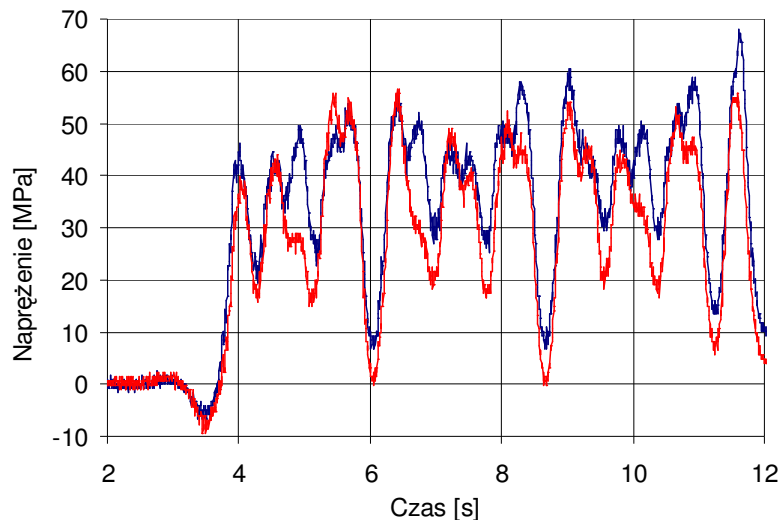
Fig. 8. Changes of longitudinal stress component in a lower plates of both girders (measuring spots B1, B2) during passage of rail bus direction Tłuszcz.

Na rysunku 10 pokazano zmiany naprężeń w wykrzyżowaniach (punkty pomiarowe C1 i C2) zarejestrowane jednocześnie układem dwukanałowym podczas przejazdu lokomotywy o masie 120 ton z prędkościami 80 km/godz w kierunku Zegrza i 20 km/godz w kierunku Tłuszcz. W odróżnieniu od wyników uzyskanych na podłużnicach, w wykrzyżowaniach maksymalne wartości naprężenia rozciągającego są wyższe przy większej prędkości przejazdu lokomotywy. Podobnie jak półki podłużnicy pręty wykrzyżowań pracują zarówno na rozciąganie jak i ściskanie.

## 5. Wnioski

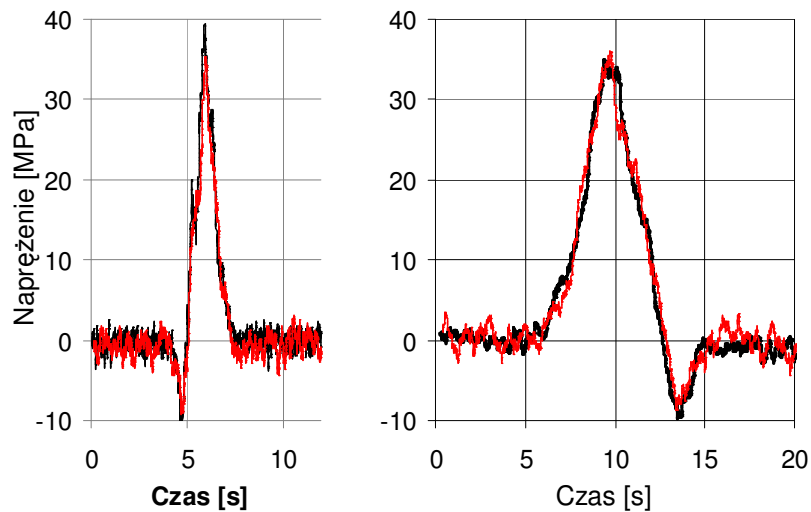
Przeprowadzone badania wykazały, że układy ultradźwiękowe pozwalają uzyskać wyniki pomiarów naprężeń dynamicznych porównywalne pod względem dokładności z

rezultatami uzyskanymi tensometrami oporowymi. Nie ustępują im ani czułością ani częstotliwością próbkowania, natomiast czas potrzebny na przygotowanie pomiarów



Rys. 9. Zmiany podłużnej składowej napężenia w dolnych belkach obu podłużnic (punkty pomiarowe B1 i B2) w czasie przejazdu pociągu towarowego w kierunku Zegrza.

Fig. 9. Changes of longitudinal stress component in a lower plates of both girders (measuring spot B1 and B2) during cargo train passage direction Zegrze.



Rys. 10. Zmiany podłużnej składowej napężenia w obydwu wykrzyżowaniach (punkty pomiarowe C1 i C2) podczas przejazdu lokomotywy o masie 120 ton z prędkościami: a – 80 km/godz. w kierunku Zegrza, b – 20 km/godz. w kierunku Tłuszcz.

Fig. 10. Changes of longitudinal stress component in two diagonal truss members (measuring spots C1 and C2) during 120 ton locomotive passages with velocities: a - 80 km/h, direction Zegrze, b - 20 km/h, direction Tłuszcz

jest w przypadku techniki ultradźwiękowej zdecydowanie krótszy. Inną ważną zaletą układów ultradźwiękowych jest także to, że pomiary można wielokrotnie powtarzać w tych samych punktach pomiarowych, w dowolnie wybranym czasie, bez konieczności pozostawiania czujników na konstrukcji (doświadczenie zebrane podczas pomiarów na moście pokazały, że czujniki lub elementy pomiarowe pozostawione na konstrukcji bez opieki padają ofiarą wandalii).

Te same głowice ultradźwiękowe mogą być wykorzystane wielokrotnie do pomiarów prowadzonych w różnych miejscach konstrukcji. Dwoma parami głowic ultradźwiękowych, połączonych z aparaturą przewodami o długości 25 m, wykonano pomiary w 6 punktach pomiarowych, powtarzając wielokrotnie badania w tych samych miejscach, z taką samą czułością.

Pomiary prowadzono na moście wyposażonym w trakcję elektryczną, w czasie ruchu lokomotyw elektrycznych. Nie zaobserwowano wpływu prądów elektrycznych wywołanych ruchem i przyspieszaniem lokomotywy na wyniki badań ultradźwiękowych.

Układ pomiarowy wykorzystujący podłużną falę podpowierzchniową lub odbitą wykazał małą zależność wyników pomiarów od szybkich i krótkotrwałych zmian temperatury powierzchniowej warstwy materiału badanych elementów. Równolegle prowadzone pomiary z wykorzystaniem fal powierzchniowych (nie opisane w tej pracy) wykazały, że w słoneczne dni, kiedy konstrukcja mostu jest nagrzana do temperatury przekraczającej temperaturę powietrza, podmuchy wiatru wywołane przejazdami pociągów z dużymi prędkościami, prowadzą do szybkiego, krótkotrwałego ochłodzenia powierzchniowej warstwy materiału i w konsekwencji wpływają na wyniki tych pomiarów. Czasy przejścia fali podłużnej uśredniające wyniki z warstwy materiału o grubości kilku milimetrów oraz fali odbitej penetrującej całą grubość elementu nie są tak czułe na zmiany temperatury warstwy powierzchniowej.

Zgodnie z oczekiwaniami, w półkach pracujących na zginanie podłużnic, wyniki uzyskane falą podpowierzchniową uśredniającą wartości naprężenia w warstwie o grubości około 3 mm i wyniki uzyskane falą odbitą uśredniającą na grubości półki równej 25 mm różniły się mniej niż o ułamek MPa.

Praca została częściowo wykonana w ramach Projektu Badawczego Nr N N504 4665 33 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Pomiary tensometryczne przeprowadzone w celach porównawczych, wykonane zostały przez Z. Ranachowskiego i T. Dębowskiego, pracowników Zakładu Akustyki Fizycznej IPPT PAN.

## 7. Literatura

- 
- [1]. *Nowak A.S., Tharmabala T., Bridge Reliability Evaluation Using Load Tests, J. Struct. Engrg., 114, 1988, 2268-2279*
  - [2]. *Lee W., Lee J., Henderson C., Taylor H.F., James R., Lee Ch.E., Swenson V., Atkins R.A., Gemeiner W.G., Railroad Bridge Instrumentation with Fiber-Optic Sensors, Applied Optics, 38, 1999, 1110-1114*
  - [3]. *Tennyson R.C., Mufti A.A., Rizkalla S., Tadros G., Benmokrane B., Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors, Smart Materials and Structures, 10, 2001, 560-573*
  - [4]. *Chan T.H.T., Yu L., Tam H.Y., Ni Y.Q., Liu S.Y., Chung W.H., Cheng L., Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge:*



- 
- Background and experimental observation, *Engineering Structures*, **28**, 2006, 648-659
- [5]. *Todd M.D., Chang C.C., Johnson G.A., Vohra S.T., Pate J.W., Bridge L.R.*, Monitoring using a 64-channel fiber bragg grating system, SPIE proceedings series, Proc. 17th Int. Modal Analysis Conf., Kissimmee FL, 8-11 February 1999, vol. 3727 (2), 1719-1725
- [6]. *Olaszek P.*, Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method, *Measurement*, **25**, 1999, 227-236
- [7]. *Kolakowski P., Sekula K., Swiercz A.*, A concept of long-term monitoring of a railway truss bridge excited by trains, Proc. of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, Krakow, Poland, 2-4 July 2008
- [8]. *Soh C.K., Tseng K. K., Bhalla S., Gupta A.*, Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge, *Smart Materials and Structures*, **9**, 2000, 533-543
- [9]. *Casas J.R., Cruz P.J.S.*, Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring, *J. Bridge Engineering*, **8**, 2003, 362-373
- [10]. *Roliński A*, Zarys elektrycznej tensometrii oporowej, WNT Warszawa, 1966 wydanie II
- [11]. *Deputat J.*, Własności i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnych, *Prace IPPT*, Nr 28/1987
- [12]. *Szelązek J.*, Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń, *Prace IPPT*, Nr 4/2001
- [13]. *Rendler N.J., Vigness I.*, Hole-drilling train-gauge method for measuring residual stresses, *Experimental Mechanics*, **6**, 1966, 577-586
- [14]. *Deroche R.Y.*, Stress releasing and straightening of rail by stretching, Proc. Int. Heavy Haul Conf., Colorado Springs, CO, September 1988, paper 88-HH-17.
- [15]. *Hughes D.A., Kelly G.S.*, Second-Order Elastic Deformation of Solids, *Physical Review*, Vol. 92, 1953, p. 1145-1149
- [16]. *Brokowski A., Deputat J.*, Ultrasonic measurement of residual stress in rail, Proc. 11<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive testing, Las Vegas, NV, Taylor Publishing Co., Dallas, TX, 1985, p.592
- [17]. *Deputat J.*, Ultradźwiękowe pomiary naprężeń w śrubach, *Mat. VII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących*, Uniejów 1977, Wyd. SIMP
- [18]. *Kyung-Young J., Hai-Hua Q., Job H., Noh-Yu K.*, Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement, *Ultrasonics*, **44**, 2006, 1339-1342
- [19]. *Abdelhay A. M.*, Biaxial stress state evaluation using nondestructive ultrasonic technique, *NDT.net*, Vol. 9, April 2004, No.04
- [20]. *Clark A. V., Fuchs P., Schaps S. R.*, Fatigue load monitoring in steel bridges with Rayleigh waves, *J. Nondestructive Evaluation*, **14**, 1995, 83-98
- [21]. *Fuchs P.A.; Clark A.V.; Lozev M.G.; Halabe U.; Klinkhachorn P.; Petro S.; GangaRao H.*, Ultrasonic Instrumentation for Measuring Applied Stress on Bridges, *J. Nondestructive Evaluation*, **17**, 3, 1998, 141-152