

---

**XXI Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane 18-20 marca 2015**

---

**ULTRADŹWIEKOWE BADANIA NAPRĘŻEŃ OBWODOWYCH  
W WIEŃCACH KÓŁ MONOBLOKOWYCH KUTO-  
WALCOWANYCH I ODLEWANYCH – RÓŻNICE**

Jacek SZELAŹEK  
IPPT PAN, Warszawa  
*jszela@ippt.gov.pl*

### **1. Wprowadzenie**

Ultradźwiękowe pomiary naprężeń znalazły szerokie (i jedyne jak dotąd) zastosowanie w pomiarach naprężeń własnych w wieńcach monoblokowych kół kolejowych. W Europie, gdzie stosowane są koła powstające w wyniku kucia i walcowania, pomiary takie są rutynowo prowadzone w zakładach wytwarzających koła jak i w warsztatach prowadzących remonty zestawów kołowych.

Nowe monoblokowe koła kolejowe poddawane są obróbce cieplnej, w wyniku której powstają w ich wieńcach obwodowe, ściskające naprężenia własne. Podczas hamowania klockami hamulcowymi tarcie powoduje nagrzanie wieńca do temperatury wyższej niż temperatura tarczy czy piasty koła. Rozszerzalność cieplna powoduje, że w wieńcu pojawiają się ściskające naprężenia obwodowe. Jeśli naprężenia te przekroczą obniżoną wskutek podwyższonej temperatury granicę plastyczności materiału, wieńiec odkształca się plastycznie (skraca w kierunku obwodowym). Po hamowaniu, podczas stygnięcia koła, wieńiec kurczy się i powstają w nim rozciągające naprężenia obwodowe. Cyklicznie powtarzane hamowania i chłodzenia mogą być przyczyną wzrostu naprężeń rozciągających, które przyczyniają się do rozwoju pęknięć promieniowych koła. Koła z wysokimi naprężeniami rozciągającymi nazywa się czasami „kołami wybuchowymi” ponieważ mogą one pęknąć bez ostrzeżenia w czasie stygnięcia koła po hamowaniu. W latach 80-tych ubiegłego wieku rozwój naprężeń rozciągających w wieńcu koła był teoretycznie modelowany i badany metodami niszczącymi [1,2]. Prostą niszczącą metodą oceny wielkości naprężeń obwodowych jest promieniowe przecięcie koła. Zamykanie się szczeliny oznacza, że panowały w wieńcu obwodowe naprężenia ściskające. Otwieranie się – naprężenia rozciągające. W USA często obserwowano podczas przecinania odlewanych kół z tarczą w postaci stożka, że szczelina na wewnętrznym licu wieńca (przy kołnierzu) otwierała się a przy zewnętrznym licu zamykała się. Oznaczało to, że w wieńcu przed cięciem panował znaczący gradient naprężeń obwodowych [3].

Badano również możliwości wykorzystania różnych metod nieniszczących do oceny stany naprężeń w kołach. Metoda magnetoakustyczna była testowana w USA [4], metody magnetyczne w Australii [5], technika dyfrakcji promieni X w Japonii [6] a szumy Barkhausena w USA [7]. Po latach eksperymentów, jako najbardziej obiecującą wybrano metodę ultradźwiękową opartą o pomiar dwójłomności akustycznej materiału wieńca. Badania pokazały, że jest ona skuteczna, wiarygodna, możliwa do zastosowania w warunkach przemysłowych do kół wykonanych z różnych gatunków stali i o różnej geometrii. Zaletą tej metody jest to, że daje ona informacje o wartości naprężenia uśrednionego na szerokości wieńca.

Historia ultradźwiękowych pomiarów naprężeń w kołach monoblokowych liczy około 40 lat. Pierwsza praca opisująca takie pomiary wykonane w stalowych, odlewanych kołach amerykańskich została opublikowana w roku 1968 [8]. Autor uzyskał obiecujące wyniki jednak ówczesna aparatura pomiarowa nie pozwoliła na praktyczne wykorzystanie metody. W roku 1984 koła odlewane i kuto-walcowane były ponownie mierzone techniką opartą o pomiar dwójłomności akustycznej [9]. W roku 1986, dwójłomność akustyczną w wieńcu jednego koła po raz pierwszy mierzono stosując przetworniki elektromagneto-akustyczne (EMAT) [10]. Szersze badania stalowych kół odlewanych, również z wykorzystaniem przetworników EMAT, przedstawiono rok później [11].

W roku 1989 Międzynarodowy Związek Kolei (UIC) zaprezentował raport opisujący wyniki niszczących i nieniszczących badań naprężeń w monoblokowych kołach kuto-walcowanych hamowanych w hamowni oraz na torze [12, 13]. Naprężenia obwodowe w wieńcach kół oceniane były metodą ultradźwiękową oraz metodą dyfrakcji promieni X. W badaniach ultradźwiękowych stosowane były dwie techniki pomiarowe – jedna oparta o pomiary dwójłomności akustycznej i druga – na pomiarach czasu przejścia impulsów fal podpowierzchniowych rozchodzących się w kierunku obwodowym, po licach wieńca. Druga metoda dostarczała informacji o wartości naprężeń w cienkiej, powierzchniowej warstwie materiału wieńca.

W tym samym czasie w Niemczech tekstura i naprężenia w wieńcach kół były badane przy użyciu przetworników EMAT i w oparciu o pomiar dwójłomności akustycznej [14]. W roku 1995 przedstawione dane z pomiarów licznych kół badanych różnymi aparatami. Tego samego roku opublikowane zostały wyniki badań naprężeń w kołach odlewanych i kuto-walcowanych hamowanych w hamowni [15]. W pracy tej po raz pierwszy eksperymentalnie potwierdzono, że rozkłady rozciągających naprężeń obwodowych powstających w wyniku hamowania w kołach kuto-walcowanych i odlewanych różnią się. Różnica wywołana była głównie odmiennym kształtem tarczy kół odlewanych (było to potwierdzenie obserwacji sygnalizowanych wcześniej w pracy [3]). Zauważono również, że ultradźwiękowa metoda oceny naprężeń w oparciu o pomiar dwójłomności akustycznej, w kołach europejskich sprawdza się a w przypadku badania kół odlewanych dostarcza mniej dokładnych informacji o stanie naprężenia.

W roku 1998 opublikowano podsumowanie ultradźwiękowych pomiarów naprężeń w odlewanych kołach hamowanych w hamowni i nagrzewanych indukcyjnie. Obszerne badania prowadzone były przetwornikami EMAT i piezoelektrycznymi, które wykorzystano do pomiaru dwójłomności akustycznej i do pomiarów czasu przejścia fal podpowierzchniowych [16]. Te obszerne badania wykonane były przy użyciu przetworników EMAT i piezoelektrycznych, które wykorzystano do pomiaru dwójłomności akustycznej i pomiarów czasu przejścia fal podpowierzchniowych.

W tym samym czasie powstawały różne aparaty ultradźwiękowe przeznaczone do pomiarów naprężeń w kołach kolejowych. Były to aparaty Debro [17] i Debbie [18] wyposażone w przetworniki piezoelektryczne, szereg aparatów z przetwornikami EMAT jak niemiecki UER [19], aparat amerykański [20] i francuski [21]. Niemiecki aparat UER był wyposażony w zmechanizowaną głowicę umożliwiającą automatyczny pomiar promieniowego rozkładu dwójłomności akustycznej w wieńcu koła. Aparat Debro umożliwiał zarówno pomiary dwójłomności akustycznej jak i czasów przejścia fal podpowierzchniowych na obu licach wieńca koła.

Dzisiaj w Europie pomiary naprężeń w wieńcach kół monoblokowych są obowiązkowe i stały się codzienną rutyną zarówno w hutach produkujących koła jak i w wielu zakładach remontowych. Zaakceptowaną i opisana w normie [22] metodą oceny stanu naprężenia jest technika oparta o pomiar dwójłomności akustycznej materiału wieńca koła. W USA pomiary naprężeń w wieńcach nie są wymagane [23] ponieważ, jak jest to tłumaczone,

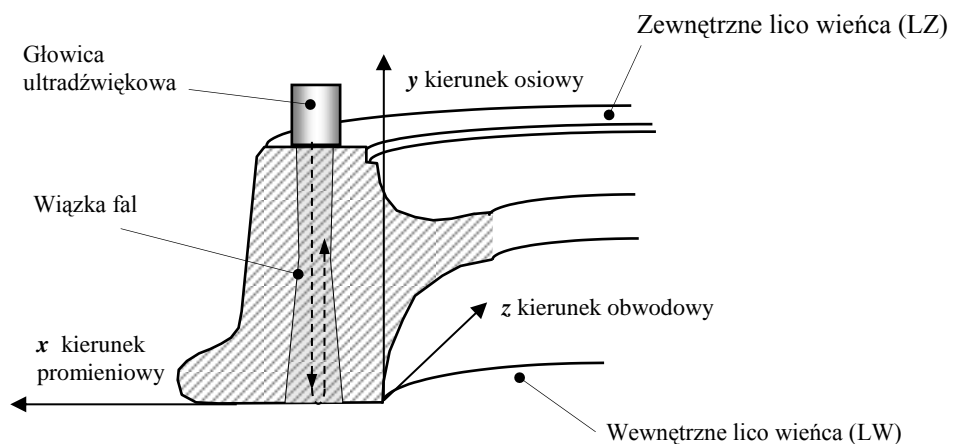
amerykańskie odlewane koła z odkształcającą się tarczą są odporne na obciążenia cieplne występujące podczas hamowań.

Staliwne koła odlewane wkraczają do Europy. Obecnie po europejskich torach jeżdżą już tysiące takich kół. Zgodnie z wymaganiami naprężenia w tych kołach będą zapewne mierzone przyjętą techniką oparta o pomiar dwójłomności akustycznej. Liczne eksperymenty pokazały jednak, że ze względu na inną strukturę materiału oraz inny kształt tarczy kół odlewanych, technika ta w ich przypadku może zawodzić. W pracy porównano wyniki ultradźwiękowych badań naprężeń w kołach kuto-walcowanych i standardowych kołach odlewanych.

## 2. Pomiar dwójłomności akustycznej

Zaakceptowany sposób oceny naprężeń w kołach monoblokowych polega na pomiarze dwójłomności akustycznej materiału wieńca. Fale poprzeczne stosowane w pomiarze mogą być wzbudzane przetwornikami piezoelektrycznymi i EMAT sprzęganymi do jednego z lic wieńca. Ważną praktyczną cechą metody jest praktyczna niezależność wyniku pomiaru od temperatury.

Dwójłomność akustyczna jest względną miarą różnicy prędkości fal poprzecznych o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji, rozchodzących się po tej samej drodze. Jej pomiar w wieńcu koła polega na pomiarach czasów przejścia poprzecznych o polaryzacji obwodowej i promieniowej rozchodzących się między płaskimi i równoległymi licami wieńca. Głowica ultradźwiękowa może być sprzęgnięta zarówno do zewnętrznego (LZ) jak i wewnętrznego (LW) lica. Schemat pomiaru pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej materiału wieńca koła monoblokowego.

Mierzone są czasy przejścia fali poprzecznej rozchodzącej się w kierunku  $y$  (kierunek osiowy) i spolaryzowanych w kierunkach  $z$  (kierunek obwodowy) i  $x$  (kierunek promieniowy). Przyjmuje się, że kierunki polaryzacji fali pokrywają się z kierunkami osi akustycznych materiału wynikających z jego tekstury i kierunkami naprężeń głównych. Dla kół kuto-walcowanych założenie to można przyjąć ponieważ zarówno osie tekstury (powstałej w wyniku walcowania) jak i naprężeń własnych pokrywają się z kierunkami obwodowym i promieniowym. W przypadku kół odlewanych obserwowane były pewne różnice między kierunkami tekstury i naprężeń w sąsiedztwie nadlewów.

Wartość dwójłomności akustycznej obliczana jest jako:

$$B = B^0 + B^\sigma = \frac{2(t_X - t_Z)}{t_Z} \quad (1)$$

gdzie:  $B^0$  – dwójłomność wywołana teksturą materiału,  
 $B^\sigma$  – dwójłomność wywołana naprężeniami obwodowym i radialnym,  
 $t_Z$  – czas przejścia fali o polaryzacji obwodowej,  
 $t_X$  – czas przejścia fali o polaryzacji promieniowej.

$B^0$ , której wartość musi być wyznaczona eksperymentalnie, jest wynikiem ukierunkowanego ułożenia ziaren materiału powstałego w procesie walcowania koła (anizotropia teksturalna). Wartość  $B^0$  zależy od gatunku stali oraz od technologii walcowania koła. Wartość tej składowej dwójłomności może być wyrażona w jednostkach bezwymiarowych lub, dla ułatwienia, w MPa. Doświadczalne wyznaczenie wartości  $B^0$  polega na pomiarze dwójłomności w odprężonym termicznie wycinku wieńca koła danego typu. Dwójłomność wywołana naprężeniami ( $B^\sigma$ ) w wieńcu koła jest równa:

$$B^\sigma = \beta_B (\sigma_Z - \sigma_X) - B^0 \approx \beta_B \sigma_Z - B^0 \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma_Z$  – obwodowa składowa naprężenia,  
 $\sigma_X$  – promieniowa składowa naprężenia,  
 $\beta_B$  – stała elastoakustyczna dla dwójłomności równa  $\beta_{122} - \beta_{132}$ .  
 $\beta_{i,j,k}$  – stała elastoakustyczna:  $i, j, k$  oznaczają kierunek propagacji, polaryzacji i naprężenia.

Składowa osiowa naprężenia  $\sigma_Y$  (składowa osiowa) nie wpływa na wartość dwójłomności akustycznej ponieważ obydwie fale rozchodzą się w tej samej objętości materiału i ewentualny wpływ tej składowej na czasy przejścia fal jest jednakowy. Wartość składowej promieniowej  $\sigma_X$  na powierzchni tocznej (swobodnej) jest równa zero. Można przyjąć, że wartość  $\sigma_X$  w pobliżu powierzchni tocznej jest mała w porównaniu ze składową obwodową  $\sigma_Z$  i można ją pominąć.

Stałe elastoakustyczne  $\beta_{122}$  i  $\beta_{132}$  wyznacza się doświadczalnie na próbce wyciętej z wieńca koła poddanej próbie rozciągania. Ich wartości obliczane są z zależności:

$$\beta_{ijk} = \frac{t_0 - t_\sigma}{t_\sigma \sigma} \quad (3)$$

gdzie:  $\beta_{ijk}$  – stała elastoakustyczna dla fali poprzecznej, indeksy  $i, j, k$  oznaczają odpowiednio kierunek propagacji fali, polaryzacji fali o kierunek naprężenia,  
 $t_0, t_\sigma$  – czasy przejścia fali w stanie bez naprężeń I w stanie naprężonym,  
 $\sigma$  – naprężenie.

W przedstawionych zależnościach wynika, że aby wyznaczyć wartość obwodowej składowej naprężenia w wieńcu koła konieczna jest znajomość doświadczalnie wyznaczonych wartości  $B^0$  i  $\beta_B$  oraz zmierzonych w wieńcu czasów przejścia fal  $t_Z$  i  $t_X$ .

Wynikiem oceny naprężeń w oparciu o pomiar dwójłomności akustycznej jest wartość naprężenia uśredniona w objętości materiału (cylindrze) wyznaczonej przez szerokość wieńca koła (około 140mm) i wymiar użytego w pomiarze przetwornika (zazwyczaj 10-15mm). Na rysunku 1 pokazano kształt wiązki fal generowanej w wieńcu przez przetwornik o boku 12 mm i częstotliwości 2 MHz. W przypadku oceny kół z równomiernie rozłożonymi naprężeniami obwodowymi na przekroju wieńca uśrednienie daje istotną informację o stanie naprężenia, proporcjonalną do siły obwodowej

rozciągającej wieniec koła. Ale w przypadku kół w wieniecach których występuje w kierunku  $y$  silny gradient naprężeń, uśrednienie wartości naprężenia jest wadą tej metody.

Stosując opisane wyżej pomiary dla różnych promieniowych położań głowicy na wieniec, możliwa jest ocena promieniowych rozkładów dwójłomności wywołanej teksturą  $B^0$  (w pomiarach na kole odprężonym) lub dwójłomności wywołanej łącznie teksturą i naprężeniami  $B^{\sigma}$ . Pomiary takie prowadzone są u producentów kół monoblokowych zgodnie z normą [22].

### 2.1. Współczynnik elastoakustyczny

Wartość współczynnika elastoakustycznego, niezbędna do obliczenia naprężenia, jest wyznaczana doświadczalnie podczas próby rozciągania próbki wyciętej z wienca koła w kierunku obwodowym. Zwykle wymiary próbek do badań są znacznie mniejsze niż przekrój wienca a mierzone podczas próby czasy przejścia fal są wielokrotnie mniejsze niż czasy przejścia fal przez cały wieniec. To oraz fakt, że zmiany czasu przejścia w wyniku działania naprężeń są nieznaczne powoduje, że zmierzone i podane w literaturze wartości współczynnika elastoakustycznego  $\beta_B$  wykazują znaczny rozrzut. Dla kół kuto-walcowanych ze stali R7 zmierzono stałe  $\beta_{122} = -0.57 \cdot 10^{-5}$  oraz  $\beta_{132} = 0.22 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  (patrz równanie 3) i obliczono wartość  $\beta_B = -0.79 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  [12]. Te same wartości stałych podano w [24]. W pracy [25] przedstawiono wartości stałych zmierzonych na próbkach wyciętych z kół kuto-walcowanych pochodzących od różnych producentów. Uzyskano wartości stałej  $\beta_B$  o wartościach od  $-0.93 \cdot 10^{-5}$  do  $-1.06 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ . Jako średnią autorzy przyjęli wartość  $\beta_B = -0.95 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ . W pracy [26] podano zmierzona stałą  $\beta_B = -0.73 \cdot 10^{-5}$  a w pracy [27] wartość  $\beta_B = -0.81 \cdot 10^{-5}$ . Ostatnie dane dotyczące stałych elastoakustycznych dla kół kuto-walcowanych opisane są w pracy [28]. Autorzy badali próbki wycięte w kierunkach obwodowym i promieniowym z kół wykonanych ze stali ER7 i gatunku 2. Uzyskali wartość  $\beta_B = -0.74 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ . Stwierdzili, że rozrzut wartości stałej, w zależności od kierunku wycinania próbki i od miejsca, z którego próbkę wycięto, nie przekracza 5%.

Większość autorów określających wartość stałej elastoakustycznej  $\beta_B$  dla kół kuto-walcowanych wykonanych z typowych stali stosowanych na koła monoblokowe zgadza się, że wartość ta mieści się między  $\beta_{B\text{MIN}} = -0.74 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  i  $\beta_{B\text{MAX}} = -0.9 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ . Znacznie mniej danych o stałych elastoakustycznych zebrano dla staliwnych kół odlewanych. Początkowo przyjmowano wartość  $\beta_B = -0.76 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  podaną w 1980 w pracy [29]. W roku 1989 ukazała się praca [30] podająca wartości stałych zmierzonych na próbkach wyciętych z kół pochodzących od dwóch różnych producentów. Wartości  $\beta_B$  wykazały znaczny rozrzut i wynosiły od  $-0.78 \cdot 10^{-5}$  do  $-0.95 \cdot 10^{-5}$ . W pomiarach opisanych w [31] do obliczania wartości naprężenia przyjęto  $\beta_B = -0.78 \cdot 10^{-5}$  a w pracy [24] podano zmierzone wartości  $\beta_B$  od  $-0.76 \cdot 10^{-5}$  do  $-0.91 \cdot 10^{-5}$ . Różnice w wartościach stałej zmierzonej na kołach odlewanych o różnej konstrukcji i pochodzących od różnych producentów wykazały rozrzut równy ponad 20%.

### 2.2. Anizotropia teksturalna

Po walcowaniu koła kuto-walcowanego, materiał wienca prezentuje słabą teksturę (ukierunkowanie ziaren) typową dla produktów walcowanych na gorąco. Osie tekstury (a więc i osie akustyczne anizotropowego materiału wienca) pokrywają się z kierunkami obwodowym i promieniowym.

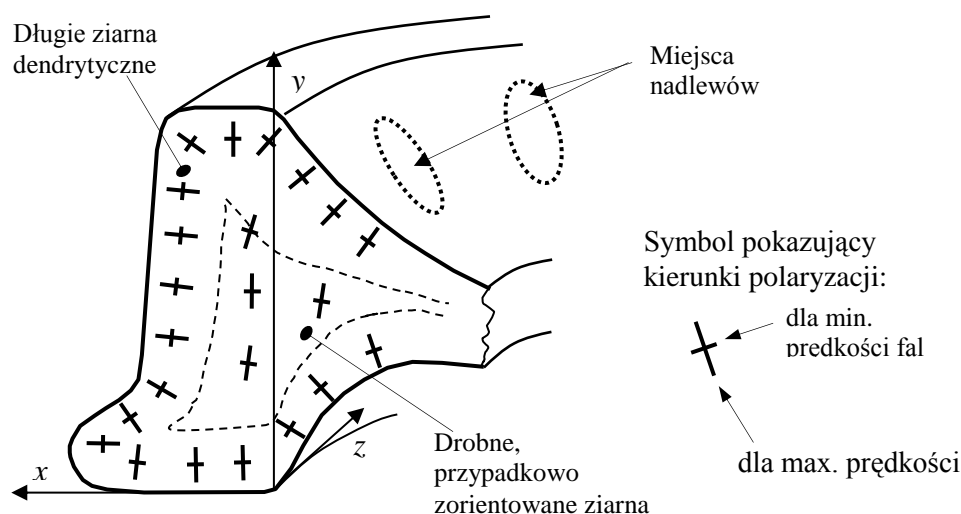
Wartość anizotropii teksturalnej może być zmierzona na fragmencie koła odprężonym termicznie. Badacze zgadzają się, że we współcześnie produkowanych kołach kuto-walcowanych, wykonywanych ze stali pochodzącej z ciągłego odlewania, wartość  $B^0$  jest

mała i anizotropia jest stała w przekroju wieńca i na jego obwodzie. W niektórych pracach twierdzi się, że wartość  $B^0$  jest na tyle mała, że w ultradźwiękowych pomiarach naprężeń można jej nie uwzględniać [32, 33]. Wyniki obszernych pomiarów wykonanych na ponad 100 współczesnych kuto-walcowanych kołach, poddanych hamowaniom na torze z różnymi mocami hamowania, opublikowano w 1998 [33]. Wyniki tych badań przeprowadzonych przetwornikami EMAT wykazały, że wpływ tekstury materiału na wyniki pomiaru naprężenia jest nie większy niż +/- 20 MPa.

Warto dodać, że wynik pomiaru dwójłomności akustycznej jest zależny nie tylko od tekstury materiału i naprężenia ale również, co dotyczy kół wyprodukowanych dawniej ze stali z wlewków, od nieznaczących nawet ilości zanieczyszczeń rozwałcowanych w czasie produkcji koła. Takie drobne zanieczyszczenia, niewykrywalne w czasie standardowych badań ultradźwiękowych, i rozciągnięte w kierunku obwodowym, mogą być przyczyną dramatycznej zmiany dwójłomności akustycznej (tak zwana anizotropia zanieczyszczeniowa). Obserwowano w czasie pomiarów kół zawierających zanieczyszczenia lokalne zmiany wartości  $B^0$  równoważne naprężeniu obwodowemu o wartości powyżej 500 MPa. Autor obserwował takie regiony o długości w kierunku obwodowym koło 50 mm otoczone materiałem bez zanieczyszczeń. W przypadku zlokalizowanych obszarów odbiegających wskazań należy je wykluczyć z badania.

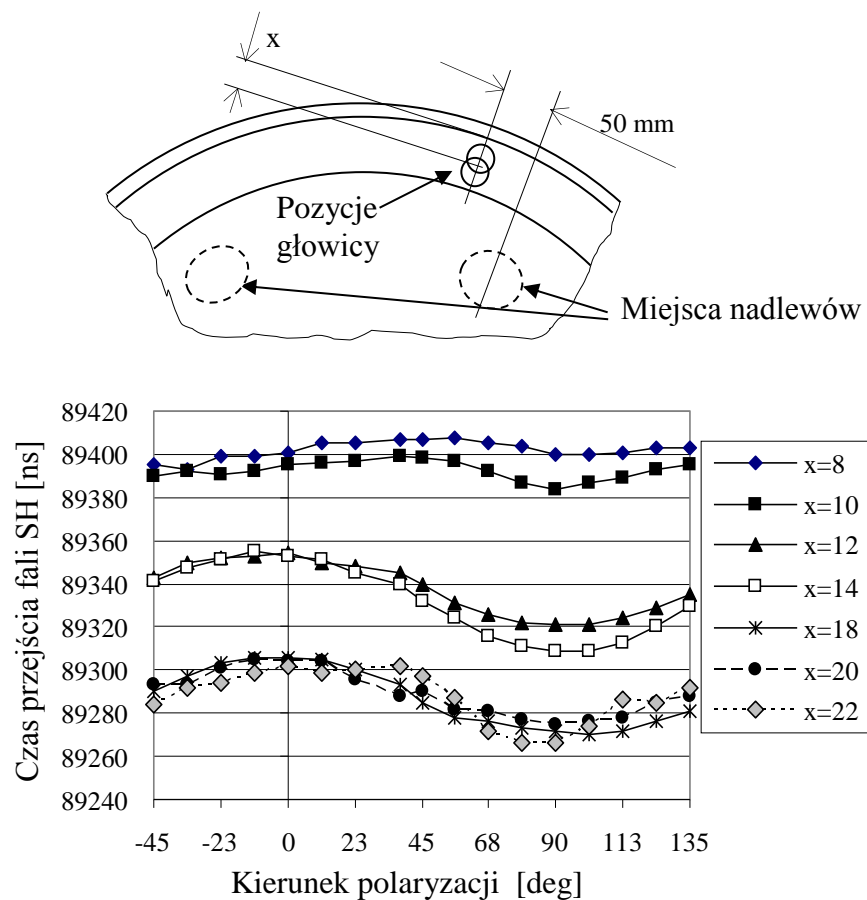
We współczesnych kołach kuto-walcowanych wartość  $B^0$  jest stała na obwodzie koła. Na przykład w [24] opisane są wyniki pomiarów  $B^0$  na obwodach trzech kół wykazujące rozrzuty  $B^0$  równoważne jedynie +/- 3 MPa. Badania wykonane na kilku nowych kołach wykonanych ze stali R7 i opisane w [12] pokazały rozrzut wartości  $B^0$  równoważny +/-10 MPa.

W przeciwieństwie do kół kuto-walcowanych, przekrój wieńca koła odlewane posiada niejednorodną, typową dla odlewu strukturę pokazaną na rysunku 2. Składa się ona z długich dendrytów w zewnętrznych warstwach i wewnętrznego obszaru (zaznaczonego przerwana linią) zbudowanego z drobnych, przypadkowo zorientowanych ziaren. Obszary zewnętrzne to długie, kilkumilimetrowe ziarna ustawione prostopadłe do powierzchni. Symbolami w postaci krzyżyków pokazano kierunki osi akustycznych wyznaczone falą poprzeczną rozchodzącą się w kierunku  $z$  (obwodowym). Dłuższe ramię krzyżyka pokazuje kierunek polaryzacji fali dla jej maksymalnej prędkości. Krótkie ramie – dla prędkości minimalnej. Można zauważyć, że fala poprzeczna rozchodząca się w kierunku  $y$  między licami koła propaguje się przez obszary, w których kierunki propagacji i polaryzacji nie pokrywają się z osiami akustycznymi materiału.



Rys. 2. Struktura wieńca koła odlewane.

Inną cechą struktury koła odlewane jest wpływ nadlewów na strukturę wieńca i wartość  $B^0$  na obwodzie koła (pozycje nadlewów pokazano na rysunku 3). Nadlewy (zazwyczaj 10) umieszczone na tarczy koła w pobliżu zewnętrznego lica są źródłem gradientów temperatury na obwodzie koła podczas jego stygnięcia a w rezultacie lokalnych zmian kierunków ułożenia długich ziaren dendrytycznych. Zaobserwowano, że w nowych kołach odlewanych kierunki osi akustycznych badane falą poprzeczną rozchodząca się w kierunku  $y$  (jak podczas pomiaru naprężenia), w pobliżu nadlewów nie pokrywają się dokładnie z kierunkami obwodowym i promieniowym. Rysunek 4 pokazuje wyniki badania głowicą na fale SH sprzęgniętą do zewnętrznego lica wieńca w odległości około 50 mm od nadlewu. Dla położenia głowicy blisko wewnętrznej krawędzi lica ( $x = 20$  i  $22$  mm), kierunki osi są zmienione. Wpływ nadlewów i wywołane nimi odchylenia od osiowo-symetrycznej struktury wieńca koła mogą mieć wpływ na błędy w ocenie wartości naprężenia sięgające 50 MPa.

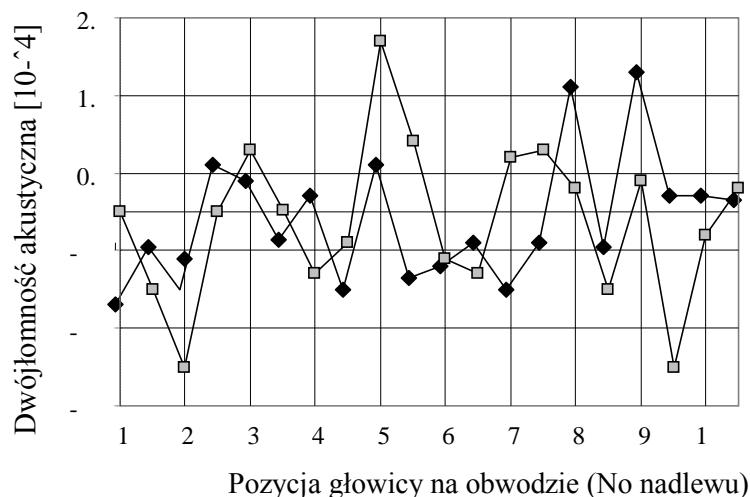


Rys. 3. Wpływ nadlewów na zmiany kierunków osi akustycznych w wieńcu koła odlewane.

Wpływu nadlewów na kierunki osi akustycznych nie obserwuje się dla obszarów między nadlewami.

Choć różnice czasów przejścia fal w pobliżu nadlewów i między nimi są małe to prowadzą do różnych wartości dwójłomności akustycznej. Jako przykład takich różnic spowodowanych lokalnym wpływem nadlewów na mierzoną wartość  $B^0$  pokazano na rysunku 4 obwodowy rozkład wartości  $B^0$  w dwóch nowych kołach. Można założyć, że wprowadzone podczas obróbki termicznej ścisające naprężenia obwodowe są stałe na obwodzie koła.

Pomiary wykonano między nadlewami i tuż przy nich. Widoczne są znaczące różnice przy czym w pobliżu niektórych nadlewów zmierzona wyższe wartości dwójłomności a w pobliżu innych – niższe. Pokazane na tym rysunku różnice w wartości  $B^0$  odpowiadają różnicom naprężeń  $\pm 60$  MPa [31]. Na niektórych kołach odlewanych miejsca nadlewów są na tarczy widoczne. W takim przypadku pomiary można wykonywać między nadlewami. Na innych kołach, w celu podniesienia wytrzymałości zmęczeniowej tarczy, chropowate ślady po nadlewach są usuwane i ich pozycje nie jest znana. W takiej sytuacji konieczne jest wykonanie kilku pomiarów na obwodzie koła i obliczenia wartości średniej.



Rys. 4. Obwodowy rozkład dwójłomności akustycznej w dwóch nowych kołach odlewanych.

Zarówno złożona struktura wieńca koła odlewane go jak i wpływ nadlewów są przyczynami większych wahań wartości  $B^0$  w porównaniu do kół kuto-walcowanych. Na przykład w pracy [34] przedstawione są wyniki badania wartości  $B^0$  w odprężonych wycinkach kół odlewanych pochodzących z czterech odlewni. Dla tej samej promieniowej pozycji głowicy na licu wieńca uzyskano  $B^0 = -7.5 \pm 6.5 \cdot 10^{-4}$  [-] co oznacza, że zgodnie ze wzorem (2) naprężenie może być w nich wyznaczone z dokładnością  $\pm 80$  MPa. Podobnie wysoki rozrzut wartości  $B^0$  w kołach odlewanych zaprezentowano w pracy [24]. Wartości uzyskane na odprężonych fragmentach wieńców kół mieściły się w zakresie od  $B^0 = -6.8 \cdot 10^{-4}$  do  $B^0 = +16.7 \cdot 10^{-4}$  co jest równoważne na prężeniom o wartościach od +4 do -190MPa.

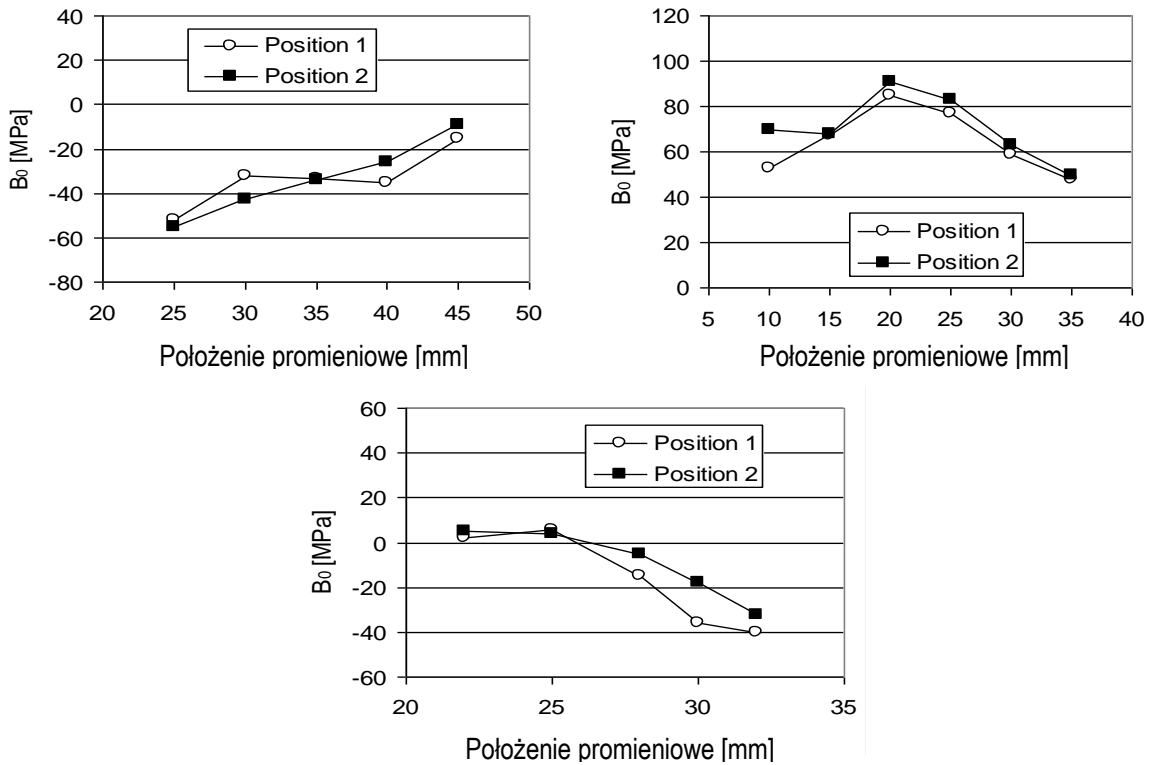
Zarówno dla kół kuto-walcowanych jak i odlewanych mierzona wartość anizotropii teksturalnej  $B^0$  zależy od promieniowego położenia głowicy. Promieniowe rozkłady  $B^0$  w kołach kuto-walcowanych zmierzone głowicą sprzęganą do zewnętrznego lica wieńca pokazano na rysunku 5. Położenie głowicy było mierzone od wewnętrznej krawędzi lica a pomiary wykonano w dwóch miejscach na obwodzie koła. Można zauważyć, że rozkłady różnią się dla różnych kół ale dla każdego z nich są powtarzalne, niezależne od miejsca pomiaru na obwodzie koła. Różnice wartości  $B^0$  pokazane na wykresie są równoważne zmianom naprężeń o  $\pm 20$  MPa dla każdego z dwóch kół.

W kołach odlewanych zaobserwowano większe różnice w promieniowych rozkładach  $B^0$ . Jak pokazano na rysunku 6, w zależności od grubości wieńca (i tym samym szerokości obszaru z drobnymi ziarnami – patrz rysunek 2) i od położenia głowicy, fale poprzeczne rozchodzą się częściowo w strukturze dendrytycznej a częściowo drobnoziarnistej. Gruboziarnista struktura odlewu w pobliżu lica zewnętrznego i wewnętrznego nie ma wpływu na wartość  $B^0$  (ziarna ustawione są płaszczyznami najgęstszej upakowania prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali i przypadkowo wokół tego kierunku

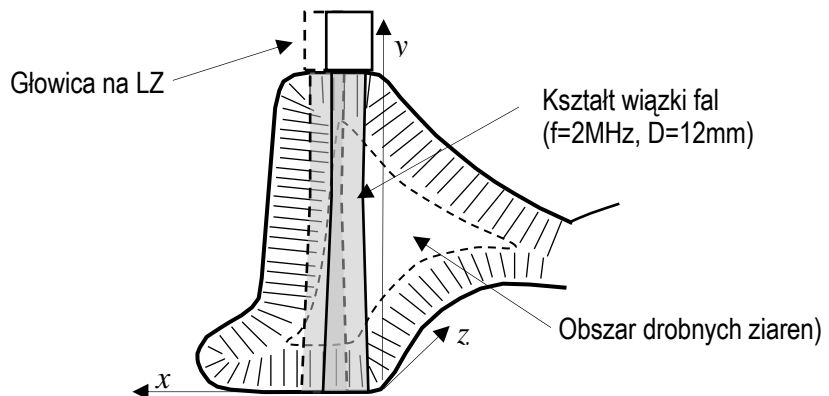


obrócone). Potwierdziły to pomiary prędkości fal w małej próbce wyciętej z wieńca koła odlewanego [35]. W środkowej części koła fale rozchodzą się częściowo w warstwie dendrytycznej w kierunku prawie prostopadłym do osi dendrytów a część wiązki rozchodzi się w obszarze drobnokrystalicznym.

W obszarze dendrytów, różnica prędkości fali spolaryzowanej w kierunku  $x$  i  $z$  jest równa około 10 m/s [35]. Zgodnie ze wzorem (1) taka różnica czasów jest równoważna naprężeniu około 40 MPa.



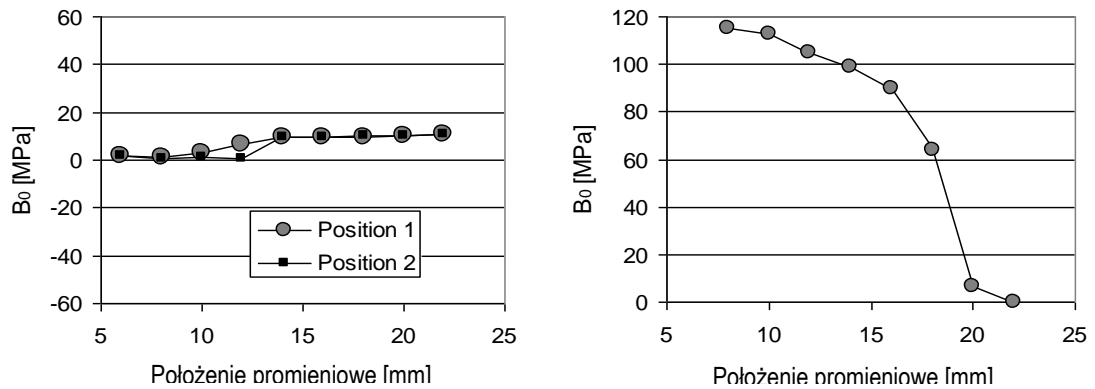
Rys. 5. Promieniowe rozkłady  $B^0$  w kołach kuto-walcowanych zmierzone głowicą sprzęganą do zewnętrznego lica wieńca



Rys. 6. Wiązka fala ultradźwiękowych rozchodząca się w wieńcu koła odlewanego

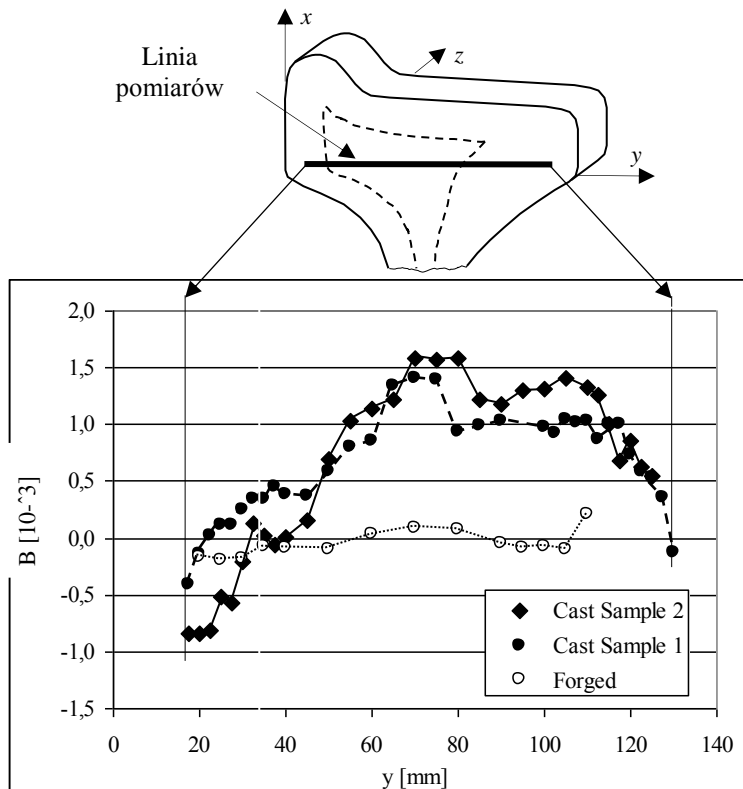
Właśnie to, że w kołach odlewanych fale rozchodzą się w materiale o różnej strukturze i tłumieniu fal jest powodem wyższych wartości  $B^0$  w porównaniu z kołami kuto-walcowanymi. Na rysunku 7 pokazano ekstremalne przykłady promieniowego rozkładu anizotropii teksturalnej w kołach odlewanych. Pomiary wykonano falami SH o częstotliwości 2 MHz [31]. Pierwszy z nich pokazuje praktycznie stałą wartość  $B^0$  na promieniu wieńca a drugi bardzo silna zależność promieniową. Fakt, że anizotropia

materiału nie jest stała w kierunku promieniowym powoduje, że metodą ultradźwiękową naprężenia oceniane mogą być w kołach kuto-walcowanych z błędami do  $\pm 20$  MPa a w kołach odlewanych z dokładnością  $\pm 60$  MPa. Błędy te można zmniejszyć stosując pomiary dla jednej promieniowej pozycji głowicy na wieńcu, dla której dokładnie znana jest wartość  $B^0$  lub wyznaczając dla każdego z kół promieniowy rozkład  $B^0$  (co nie wydaje się możliwe w praktyce przemysłowej).



Rys. 7. Przykłady promieniowych rozkładów  $B^0$  w odprężonych fragmentach wieńców dwóch kół odlewanych.

Dla porównani wpływu struktury koła na prędkości fal poprzecznych przeprowadzono pomiary na plastrach wyciętych z wieńców tych kół. Mierzono czasu przejścia fal rozchodzących się w kierunku  $z$  (kierunek obwodowy) i spolaryzowanych w kierunkach  $x$  i  $y$ . Dwójłomność akustyczna materiału obliczono jako względną różnicę czasów przejścia  $t_y$  i  $t_z$ . Rysunek 8 pokazuje rozkład dwójłomności wzdłuż linii pomiędzy zewnętrznym i wewnętrznym licem wieńca. Dla koła kuto-walcowanego anizotropia materiału na całej szerokości wieńca zmienia się jedynie nieznacznie. Rozkład anizotropii w kole odlewanych odzwierciedla niejednorodną strukturę w przekroju wieńca.

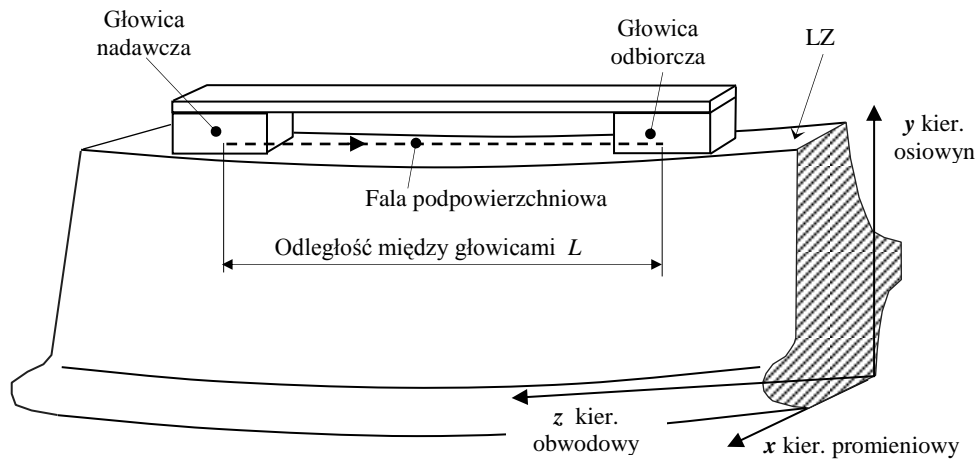


Rys. 8. Dwójłomność akustyczna  $B$  zmierzona w kole kuto-walcowanym i odlewanych w plastrach wyciętych z kół falami spolaryzowanymi w kierunkach  $x$  i  $y$

### 3. Fale podpowierzchniowe

Metoda pomiaru naprężeń falami podpowierzchniowymi została opracowana do badania naprężeń własnych w kolejowych szynach poddawanych prostowaniu w prostownicy rolkowej [36, 37]. Fale podłużne użyte w badaniach są falami o najwyższej "czułości" na naprężenia. Dla fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku naprężenia w stali współczynnik elastoakustyczny jest równy  $\beta_{111} = -1.25 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$  (dla porównania wartość współczynnika elastoakustycznego w pomiarach z wykorzystaniem dwójłomności akustycznej wynosi  $\beta_B = -0.79 \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ ).

W badaniach kół kolejowych czas przejścia fali podpowierzchniowej rozchodzącej się w kierunku obwodowym (po cięciwie) może być mierzony na obu licach wieńca jak to pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat pomiaru czasu przejścia fali podpowierzchniowej na zewnętrznym licu wieńca koła monoblokowego.

Czas przejścia fali mierzony między głowicami w wieńcu odprężonym zależy od odległości między głowicami, prędkości fali i temperatury. W kołach kuto-walcowanych, ze względu na zmiany tekstury w kierunku promieniowym, zależy on również od położenia układu głowic na promieniu. Zmiany czasu przejścia w wyniku naprężeń w materiale wieńca wynoszą:

$$t_L^\sigma - t_L^0 = t_L (\sigma_z \beta_{zzz} + \sigma_x \beta_{zzx} + \sigma_y \beta_{zzy}) \quad (4)$$

gdzie:  $t_L^\sigma$  – czas przejścia w stanie naprężonym,

$t_L^0$  – czas przejścia w stanie bez naprężeń (czas odniesienia),

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – składowe naprężenia,,

$\beta_{ijk}$  - stała elastoakustyczna, indeksy oznaczają odpowiednio  $i$ - kierunek propagacji fali,  $j$ -kierunek polaryzacji (drgań) fali,  $k$  – kierunek składowej naprężenia.

Na powierzchni lica składowa  $\sigma_y$  wynosi zero. Współczynnik elastoakustyczny  $\beta_{zzx}$  opisujący czułość fali podłużnej na składową naprężenia prostopadłą do kierunku propagacji fali jest mały w porównaniu do  $\beta_{zzz}$ . Również składowa naprężenia  $\sigma_x$  jest mała w porównaniu ze składową  $\sigma_z$ , a wpływ składowej radialnej naprężenia na mierzony czas przejścia może być pominięty. Wartość naprężenia obwodowego można więc obliczyć jako:

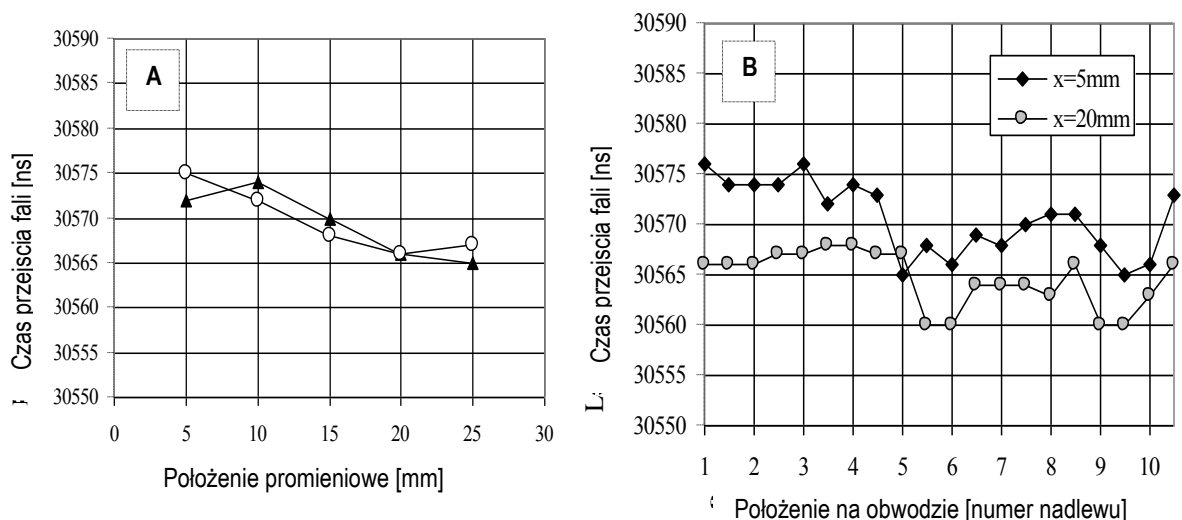
$$\sigma_z = \frac{t_L^0 - t_L^\sigma}{t_L^\sigma \beta_{zzz}} \quad (5)$$

Wartość współczynnika  $\beta_{ZZZ}$  była zmierzona podczas próby rozciągania na próbkach wyciętych z wieńców stalowych kół odlewanych i kół kuto-walcowanych. Ich wartości wyniosły  $\beta_{ZZZ} = -1.47 \cdot 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$  dla koła odlewane [30] i  $\beta_{ZZZ} = -1.25 \cdot 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$  dla koła kuto-walcowane ze stali R7 [12].

Ocena naprężenia falami podpowierzchniowymi dostarcza informacji o wartości naprężenia w cienkiej, powierzchniowej warstwie materiału, uśrednionego na drodze fal między głowicami. Powinna więc dostarczać wartości naprężeń zbliżonych do uzyskiwanych tensometrami oporowymi w badaniach niszczących czy metodą dyfrakcji promieni X. Badania naprężeń w kołach monoblokowych wykonane falami podpowierzchniowymi i opisane w pracach [12,13,15,24,31], były prowadzone specjalnymi, wieloprzetwornikowymi układami głowic minimalizującymi wpływ chropowatości powierzchni na wyniki pomiarów czasów przejścia i wyposażonymi w układy korekcji temperatury [38]. Dla tych układów głowic odległość na której mierzony był czas przejścia fal wynosiła  $L=180$  mm. Jest to odległość bliska maksymalnemu rozstawieniu głowic mieszczących się na wąskim licu zewnętrznym wieńca koła. Wykorzystanie fal podpowierzchniowych pozwala na uzyskanie informacji o dwóch wartościach naprężenia obwodowego, na dwóch licach wieńca. Pozwala to na ocenę gradient naprężenia na szerokości wieńca.

Zgodnie ze wzorem (5) do obliczenia wartości naprężenia konieczna jest znajomość czasu przejścia odniesienia  $t_L^0$ . Ogólnie, w badaniach prowadzonych na obu licach, dla różnych położenia promieniowych układu głowic, na kołach z różnych gatunków stali, konieczna jest znajomość wielu wartości czasów odniesienia. Ta konieczność pomiarów wielu czasów odniesienia na odprężonych kołach i konieczność indywidualnego skalowania aparatury jest słabą stroną wykorzystania fal podpowierzchniowych w badaniach kół kuto-walcowanych.

Złożona struktura wieńca koła odlewane może być z pożytkiem wykorzystana w pomiarach falami podpowierzchniowymi. W tych kołach tekstura materiału na obu licach jest identyczna – długie, dendrytyczne ziarna ustawione płaszczyznami najgęstszego upakowania równoległe do powierzchni, przypadkowo obrócone wokół swojej długiej osi. Stąd czas przejścia fali podpowierzchniowej powinien być taki same, niezależnie na którym licu i w jakiej pozycji promieniowej wykonywany jest pomiar. Rysunek 10 pokazuje promieniowy i obwodowy rozkład czasów przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej zmierzone w nowych kołach odlewanych.



Rys. 10. Promieniowy (A) i obwodowy (B) rozkład czasów przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej w nowych kołach odlewanych.

Dane pokazane na rysunku 10 potwierdzają wyniki pomiarów prędkości fali podłużnej przeprowadzonych na małej, prostopadłościenną próbce wyciętej z wieńca koła odlewanego. Prędkość fali podłużnej rozchodzącej się w kierunku  $z$  (obwodowym), w dendrytycznej strukturze wynosi  $c_L = 5918$  m/s.

Rozrzut czasów przejścia zmierzonych dla różnych położań promieniowych układu głowic wyniósł  $\pm 5$  ns. Dla określonej pozycji promieniowej  $x$ , rozrzut zmierzonych na obwodzie czasów przejścia w nowych kołach odlewanych mieścił się w granicach  $\pm 8$  ns. Dla zestawu głowic wykorzystanego w pomiarach ( $L = 181$  mm), takie rozrzuty czasów przejścia są równoważne rozrzutom naprężeń około  $\pm 20$  MPa. Pozwala to stwierdzić, że obwodowa składowa naprężenia w kołach odlewanych może być oceniana przy użyciu podłużnej fali podpowierzchniowej, z zadowalającą dokładnością, przy wykorzystaniu jedynie jednego czasu wzorcowego do kalibracji aparatury. Dodatkową zaletą stosowania fali podłużnej rozchodzącej się na długiej drodze jest to, że uśrednia ona własności materiału na znacznym fragmencie obwodu koła. Tym samym minimalizuje ewentualne zmiany wywołane lokalnymi wpływami nadlewów na strukturę materiału.

#### 4. Porównanie rozwoju naprężeń obwodowych mierzonych metoda ultradźwiękową w kołach kuto-walcowanych i odlewanych

W rozdziale opisano różnice między rozwojem naprężeń w wyniku obciążeń cieplnych powstających w kołach kuto-walcowanych i odlewanych. Wyniki pochodzą z pomiarów wykonanych w różnych hamowniach i w urządzeniu indukcyjnie nagrzewającym wieńiec. Zmiany naprężeń mierzone były zarówno techniką opartą o pomiar dwójłomności jak i falami podpowierzchniowymi.

##### 4.1. Koła kuto-walcowane

Rysunek 11 pokazuje wyniki pomiarów naprężeń prowadzone podczas hamowania koła kuto-walcowanego w hamowni. Koło było poddane cyklom hamowań o mocach od 20 do 50 kW, każdy cykl trwał 1 godzinę, z klockiem hamulcowym ustawionym na środku powierzchni tocznej. Pomiary wykonano w trzech miejscach na obwodzie koła mierząc dwójłomność akustyczną i czasy przejścia fal podpowierzchniowych na zewnętrznym licu wieńca [12]. Białe symbole pokazują wyniki pomiarów dwójłomności akustycznej a czarne wyniki uzyskane falami podpowierzchniowymi. Można zauważyć, że hamowania powodują jednakowe przyrosty naprężeń uśrednionych na szerokości wieńca (pomiar dwójłomności) jak i na powierzchni zewnętrznego lica.

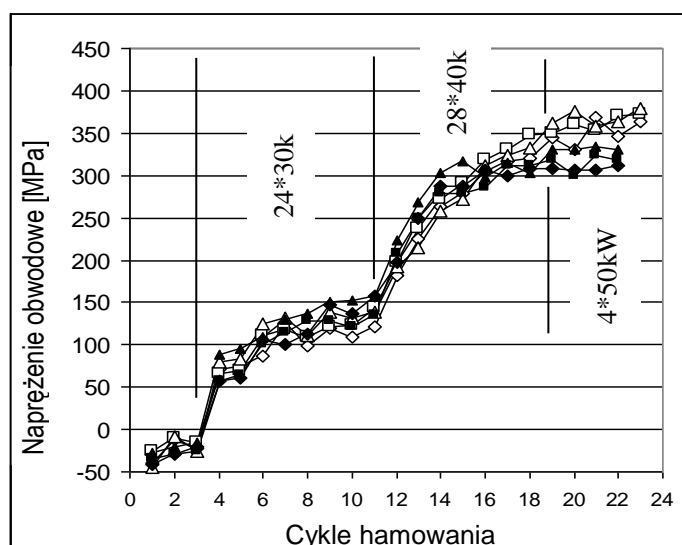
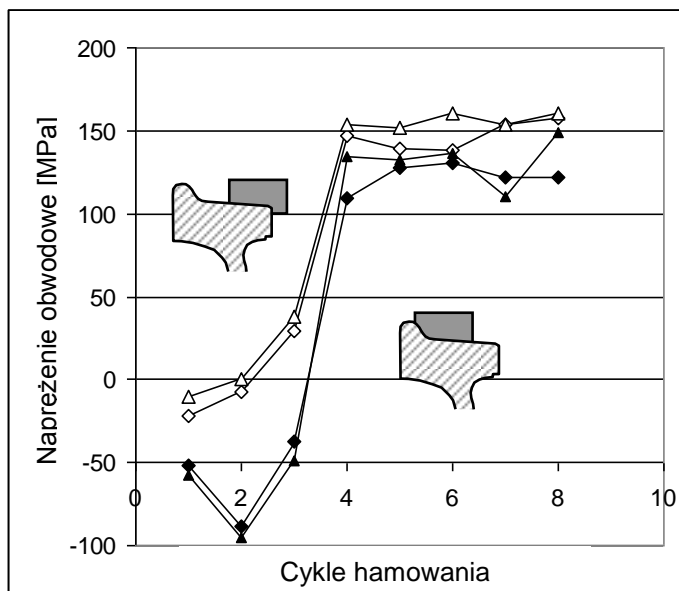


Fig. 11. Rozwój naprężeń obwodowych w kole kuto-walcowanym poddanym hamowaniu w hamowni. Pomiary wykonane falami SH (pomiar dwójłomności akustycznej) i falami podpowierzchniowymi na zewnętrznym licu wieńca

Dopiero przy większych mocach hamowania (cykle 17-22) różnice naprężeń ocenianych dwiema metodami różnią się o więcej niż 50 MPa.

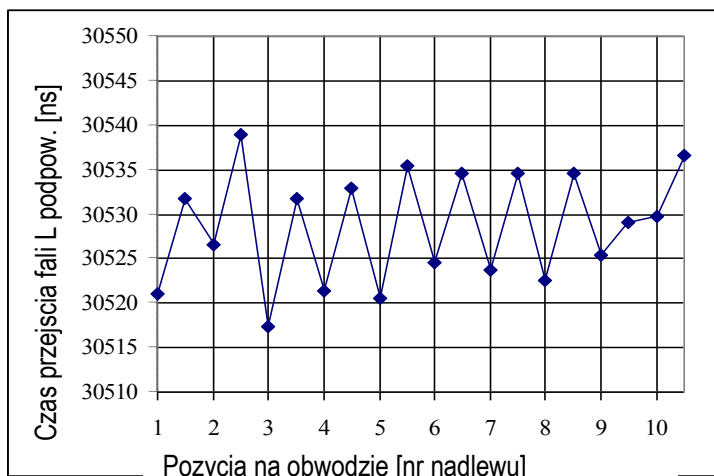
Rysunek 12 pokazuje wyniki podobnego eksperymentu ale przeprowadzonego na kole hamowanych w wagonie, na torze [12]. Podczas hamowania pozycja klocka hamulcowego zmieniała się. W czasie cykli hamowania 1-4 klocek przylegał do koła blisko zewnętrznego lica a podczas cykli 5-8 opierał się o kołnierz koła. Powodowało to nierównomierne nagrzewanie wieńca na jego szerokości. Pomiary naprężeń wykonano mierząc dwójłomność (białe symbole) i falami podpowierzchniowymi (czarne punkty na wykresie) na zewnętrznym licu wieńca. Interesujące na wykresie są wyniki po pierwszym hamowaniu z mocą 20 kW, z klockiem blisko zewnętrznego lica. Takie doprowadzenie ciepła do wieńca spowodowało wzrost naprężeń ściskających na tym licu. Po następnych cyklach naprężenia uśrednione na szerokości i na powierzchni lica wyrównały się. O ile wiadomo autorowi przedstawione na rysunku 12 wyniki są jedynymi pokazującymi silny rozkład naprężenia obwodowego na szerokości wieńca koła kuto-walcowanego. Wszystkie inne doświadczenia pokazywały, że naprężenia powstające w wyniku hamowania są rozłożone równomiernie na szerokości wieńca koła.



Rys. 12.  
Rozwój naprężeń obwodowych w nowym kole monoblokowym poddanym hamowaniom na torze, ze zmienną pozycją klocka hamulcowego na powierzchni tocznej koła

#### 4.2. Koła odlewane

Dla niektórych kół odlewanych hamowanych w hamowni zauważono, że wyniki pomiarów prowadzonych w oparciu o dwójłomność akustyczną i falami podpowierzchniowymi różnią się w zależności od miejsca pomiarów na obwodzie koła. Jako przykład na rysunku 13 pokazano wyniki pomiarów czasu przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej na obwodzie koła poddanego hamowaniom z mocą 59 kW przez 1 godzinę. Pomiary wykonano na zewnętrznym licu wieńca [39]. Porównując pokazany rozkład czasów przejścia z rysunkiem 10B (obwodowy rozkład czasów przejścia w kole przed hamowaniami) widoczny jest wyraźny wpływ nadlewów na wyniki. W kole po hamowaniu czas przejścia fal w pobliżu nadlewów jest średnio o 12 ns niższy niż między nadlewami. Odpowiada to różnicy naprężeń ponad 30 MPa. Co ważne, średnie czas przejścia fal w kole po hamowaniu jest wyższy o około 40 ns niż w kole nowym. Oznacza to, że w wyniku hamowania na zewnętrznym wieńcu koła wzrosły naprężenia ściskające.



Rys. 13.

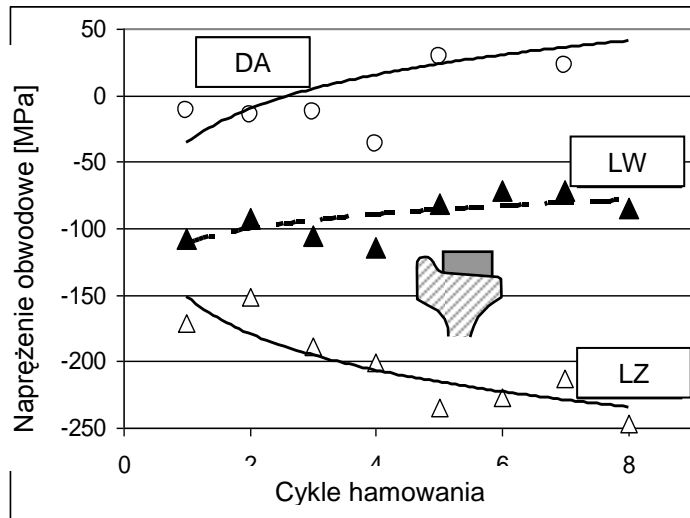
Czasy przejścia podłużnej fali podpowierzchniowej zmierzone na obwodzie koła poddanego hamowaniu z mocą 59 kW w hamowni. Pomiar na zewnętrznym licu wieńca.

Jak wspomniano wyżej odlewane koła, których badania opisano w [31,39] to standardowe koła odlewane klasy C o zakrzywionej, stożkowej tarczy. W kole tego typu wieńiec koła i jego piasta są przesunięte względem siebie w kierunku osiowym. Taki kształt koła z jednej strony powodują, że koło jest bardziej odporne na obciążenia cieplne (powolniejszy wzrost naprężeń rozciągających) ale jednocześnie powstające naprężenia wykazują silny gradient w kierunku osiowym.

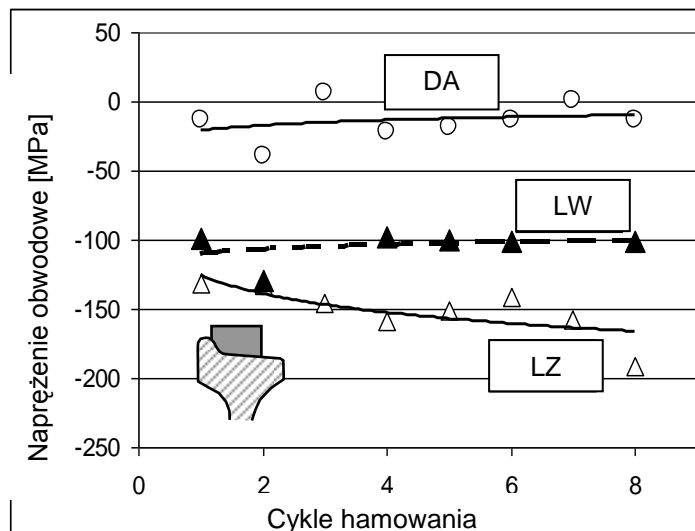
Na zbiorze kół o takiej konstrukcji przeprowadzono pomiary rozwoju naprężeń w wyniku obciążeń cieplnych wykorzystując pomiary dwójłomności i fale podpowierzchniowe na obydwu licach wieńców [31] [39]. Zarówno koła hamowane w hamowni jak i nagrzewane indukcyjnie wykazały znaczące różnice w wartościach naprężeń uzyskanych pomiarem dwójłomności (naprężenie uśrednione na szerokości wieńca) i uzyskanych falami podpowierzchniowymi (naprężenie na zewnętrznym licu wieńca). Rysunek 14 pokazuje rozwój naprężeń zmierzonych w kole hamowanym w hamowni z klockiem w środku powierzchni tocznej (klocek wycentrowany) a rysunek 15 – dla klocka opierającego się o kołnierz wieńca. Moce hamowania dla klocka blisko kołnierza wynosiły 56, 60, 63 i 67 kW a dla klocka wycentrowanego wynosiły 60, 63, 67 i 75 kW. Można zauważyć, że niezależnie od pozycji klocka na wieńcu hamowania doprowadziły do powstania obwodowych naprężeń rozciągających na wewnętrznym licu i ściskających na licu zewnętrznym. Naprężenia uśrednione na szerokości wieńca również wykazały przyrost naprężeń rozciągających. Ale ich zmiana wywołana hamowaniami z wysokimi mocami jest relatywnie mała (porównaj ze zmianą naprężeń uśrednionych w kołach kuto-walcowanych, rys. 11). Ta mała zmiana mierzonych naprężeń uśrednionych wynika częściowo stąd, że w części wieńca blisko lica zewnętrznego panują obwodowe naprężenia ściskające a w pobliżu lica wewnętrznego – rozciągające. Dla klocka wycentrowanego uśredniona wartość naprężenia wzrosła po wszystkich cyklach hamowania o około 60 MPa. Dla klocka opierającego się o kołnierz przyrost naprężenia uśrednionego wyniósł jedynie 20 MPa!

Jak wspomniano wcześniej w kołach odlewanych zaobserwowano znaczny rozrzut anizotropii teksturalnej  $B^o$ . Rozrzut ten odpowiada rozrzutowi wartości naprężeń ocenianych na podstawie dwójłomności akustycznej równemu +/-80 MPa według pracy [34] i równemu +/- 40 MPa według [31]. Oznacza to, że zmiany naprężenia uśrednionego w standardowych kołach odlewanych, wywołanego hamowaniami o znacznych mocach, są tego samego rzędu co rozrzuty wskazań wywołane zmianami tekstury tych kół. Dlatego też, bez znaczącego postępu w ocenie wpływu tekstury na wyniki pomiarów, ocena naprężeń

obwodowych w tych kołach oparta o pomiar dwójłomności (metoda zaakceptowane w Europie) nie będzie w stanie dostarczyć wiarygodnych danych o stanie naprężenia w eksploatowanych kołach.



Rys. 14. Rozwój naprężeń obwodowych w standardowym kole odlewanym podczas hamowania z wycelowanym klockiem hamulcowym. Pomiary dwójłomności akustycznej (DA) i falami podpowierzchniowymi na wewnętrznym (LW) i zewnętrznym (LZ) licu wieńca.



Rys. 15. Rozwój naprężeń obwodowych w standardowym kole odlewanym podczas hamowania z klockiem hamulcowym przy kołnierzu wieńca. Pomiary dwójłomności akustycznej (DA) i falami podpowierzchniowymi na wewnętrznym (LW) i zewnętrznym (LZ) licu wieńca.

Łatwiejszą do oceny miarą stanu naprężenia standardowego koła odlewanego jest różnica naprężeń na jego licach – po hamowaniach ściskającego na licu wewnętrznym i rozciągającego na licu wewnętrznym. Rysunki 14 i 15 pokazują, że naprężenia na licu zewnętrznym zmieniają się o -80 MPa i o -40 MPa odpowiednio dla klocka hamulcowego wycelowanego i ustawionego blisko kołnierza. Odpowiednie zmiany naprężeń dla lica wewnętrznego wynoszą około 30 i 15 MPa.

Dla koła nowego różnica naprężeń między licami wynosi jedynie około 30 MPa. Po hamowaniach różnica ta osiąga około 120 MPa dla klocka przy kołnierzu i około 150 MPa dla klocka wycelowanego. Zmiany te są wielokrotnie większe (i tym samym łatwiejsze do zmierzenia) niż zmiany naprężeń uśrednionych, mierzonych w oparciu o dwójłomność akustyczną.

Pomiar dwójłomności akustycznej uśrednia informacje z małego obszaru materiału w kierunku obwodowym i tym samym jest czuły na obwodowe wahania tekstury materiału



koła. Fale podpowierzchniowe uśredniają informacje z odcinka równego 150-200 mm i rozchodzą się w materiale o stałej na całym obwodzie teksturze.

## 5. Wnioski

Pomimo identycznego mechanizmu rozwoju naprężeń obwodowych w wieńcach monoblokowych kół kuto-walcowanych i odlewanych, z punktu widzenia ultradźwiękowych pomiarów naprężeń koła te przedstawiają różne problem. Współczesne koła kuto-walcowane wykazują nieznaczną teksturę, równo rozłożoną na przekroju koła i na jego obwodzie. Obciążenia termiczne występujące podczas hamowań skutkują rozwojem naprężeń rozciągających rozłożonych równomiernie na obwodzie i na szerokości wieńca, z gradientem w kierunku promieniowym (kierunek  $x$ ). Wartości naprężeń obwodowych uśrednionych na szerokości wieńca i na licach są podobne. Ocena naprężeń w oparciu o pomiar dwójłomności akustycznej dostarcza dla tych kół wiarygodnych danych o stanie naprężenia. Dzięki jednorodnej teksturze i prężeniom na obwodzie pomiary wystarczy wykonać w kilku (2 – 3) miejscach na obwodzie koła.

Niejednorodna struktura koła odlewane powoduje, że ultradźwiękowe pomiary naprężeń w takich kołach są bardziej skomplikowane. Anizotropia strukturalna kół odlewanych jest wyższa niż w kołach kuto-walcowanych i wykazuje większe rozrzuty. Dane dotyczące wartości współczynnika elastoakustycznego są ograniczone i również wykazują znaczny rozrzut. Doświadczenia wykonane na odlewanych kołach hamowanych w hamowni i nagrzewanych indukcyjnie wykazały, że naprężenia rosną na obwodzie koła nieregularnie, najprawdopodobniej z powodu wpływu zmian struktury na obwodzie koła wywołanych istnieniem nadlewów. Dodatkowo, na niektórych kołach niemożliwe jest stwierdzenie, w których miejscach znajdowały się nadlewy.

Z tych powodów ocena naprężenia obwodowego oparta o pomiar dwójłomności akustycznej jest słabą miarą wyężenia materiału koła odlewane. Szczególnie dotyczy to standardowych kół z wykrzywioną (stożkową) tarczą, w których naprężenia obwodowe w wyniku hamowań wykazują silny gradient w kierunku  $y$  (osiowym).

Wydaje się, że obiecującym (i praktycznym) sposobem oceny naprężeń w takich kołach jest pomiar czasów przejścia podpowierzchniowych fal podłużnych na obydwu licach koła. Pomiaram takim sprzyja jednakowa struktura materiału na obydwu licach. W wyniku obciążeń cieplnych na licu zewnętrznym rosną naprężenia ściskające a na licu zewnętrznym pojawiają się naprężenia rozciągające. Różnica naprężeń między licami, mierzonych w oparciu o czasy przejścia fal podpowierzchniowych, może więc być prostą, choć przybliżoną, miarą stanu naprężenia takiego koła.

Tekst jest skrótem pracy wysłanej w 2014 roku do redakcji Journal of Nondestructive Evaluation.

## Literatura

- 1 Johnson MR, Robinson RR, Opinsky AJ, Detone DH (1983) Railroad Wheel Back Rim Face Failures: III - Residual Stress Calculations on 33" D One-Wear Freight Car Wheels. Association of American Railroads, Technical Center Report No. R-560, Chicago
- 2 Kuhlman C, Gallagher M (1988) The significance of material properties on stress developed during quenching of railroad wheels. Proc. 1988 Joint ASME/IEEE Railroad Conference, Eds. V.T. Hawthorne, T. Kneschke, Book No. 100265, pp.55-63
- 3 Barton JR, Perry WD, Swanson RK, Hsu GC, Ditmeyer SR (1985) Heat-discolored wheels: safe to refuse?. Progressive Railroading March:41-8

- 
- 4 Utrata D, Namkung M (1993) Assessment of the magnetoacoustic method for residual stress detection in railroad wheels. *Rev Prog Q* 12B:1807-14
  - 5 Langman RA, Muton PJ (1993) Estimation of residual stresses in railway wheels by means of stress-induced magnetic anisotropy. *NDT&E Int* 26:195-205
  - 6 Nishimura S, Tokimasa K (1976) Study on the residual stresses in railroad solid wheels and their effect on wheel fracture. *B JSME* 18:459-68
  - 7 Iwand HC (1988) A comparative analysis using Barkhausen noise analysis, ultrasonic birefringence and saw cutting techniques in determination of residual stress in railroad Wheel. Thesis, University of Nebraska
  - 8 Benson RW (1968) Development of nondestructive methods for determining residual stress and fatigue damage in metals, NASA Marshall Space Flight Report, Contract No. NAS8-20208
  - 9 Fukuoka H, Toda H, Hirakawa K, Sakamoto H, Yoya Y (1984) Acoustoelastic Measurements of Residual Stresses in the Rim of Railroad Wheels, *Wave Propagation In Inhomogeneous Media and Ultrasonic Nondestructive Evaluation* 6:185-93
  - 10 Clark Jr AV, Fukuoka H, Mitrovic DV, Moulder JC (1986) Characterization of residual stress and texture in cast steel railroad wheels. *Ultrasonic* 24:281-8
  - 11 Clark AV, Fukuoka H, Mitrovic DV, Moulder JC (1987) Ultrasonic characterization of residual stress and texture in cast steel railroad wheels. *Rev Prog Q* 6B:1567-75.
  - 12 Draft Control Committee Office for research and Experiments of the International Union of Railways, Question B169: Thermal limits of wheels and shoes. Report No 2. Effect of frequent braking on the residual stress field in the wheel rim. Utrecht, The Netherlands, April 1989
  - 13 Deputat J, Osuch K, Kunes W (1991) Untersuchung der Eigenspannungsänderungen in Eisenbahn-Vollrad nach Bremsungen. *Glaser's Annalen (Journal for Railways and Transport)* 115:231-5.
  - 14 Schneider E (1995) Ultrasonic birefringence effect — Its application for materials characterizations. *Opt Laser Eng* 22:305-23.
  - 15 Osuch K, Stone DH, Orringer O (1995) European and American wheels and their resistance to thermal damage. Proc. 11th International Wheelsets Congress, Paris 1:77-86.
  - 16 Stone D, Garcia G, Burnett S (1998) An evaluation of residual stress in cast steel railroad wheels using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Research and Development Washington, D.C. 20590 Final Report, December 1998
  - 17 DEBRO Ultrasonic Stress Meter, Institute of Fundamental technological research, Polish Academy of Science, Warsaw, Poland, 1990.
  - 18 Bartosiewicz A, Mizerski K, Deputat J, Szelażek J (1995) Miniature ultrasonic stress gauge for in-service detection of thermally damaged wheels, Proc. 11th International Wheelsets Congress, Paris 1995:241-43.
  - 19 Schneider E, Herzer R, Bruche D, Frotscher H (1994) Ultrasonic characterization of stress states in rims of railroad wheels. *Nondestructive Characterization of Materials VI*, Rds. R.E. Green Jr. et al, Plenum Press, New York .383-90
  - 20 Schramm RE (1999) Ultrasonic measurement of stress In railroad Wheel. *Rev Sci Instrum* 70:1468-73
  - 21 Limal JL, Del Fabro V (1995) Prevention of thermal damage in railroad wheels thanks to the monitoring of residual stresses by ultrasonic examination. Proc. 11th International Symposium Assessment of Materials Aging and Damage Evolution by

- 
- Non Destructive Evaluation methods, Cercle d'Etudes Des Metaux, St. Etienne, TOME XVI Chapter 17
- 22 European Committee for Standardization, Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels – Product requirements. European Standard CEN 13262, 2004.
  - 23 Lonsdale C, Bogacz R, Norton M (2011) Application of pressure poured cast wheel technology for European freight service , Proc. 9th World Congress on Railway research, May 22-26, Lille, France, Challenge C: Increasing freight capacity and services
  - 24 Final Report, Joint Research project MT/DOT-92-115, Investigation of wheels thermal damage mechanism and elaboration of method for wheel failure prevention, CNTK Warsaw, March 1996
  - 25 Cookson JM, Mutton PJ, Lynch MR (2007) Validation, Calibration and application of ultrasonic residual stress measurement systems to railway wheels. Proc. 15th International Wheelset Congress, Prague, September 23-27
  - 26 Del Fabro V, Catot B (1995) Ultrasonic measurement of stresses in new wheels. Proc. 11th International Wheelset Congress, Paris, 251-9.
  - 27 Kamyshev AV, Nikitina NE, Smirnov VA (2010) Measurement of the Residual Stresses in the Treads of Railway Wheels by the Acoustoelasticity Method. Russ J Nondestruct+ 46:189–193
  - 28 Dymkin, GYa, Krasnobryzhii SA, Shevelev AV (2013) An ultrasonic method for measuring residual mechanical stresses in the rims of solid-rolled railroad wheels that considers the intrinsic anisotropy of the material, Russ J Nondestruct+ 49:8-14
  - 29 Okada K (1980) Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. J Acoust Soc Jap 1:193-200
  - 30 Deputat J (1989) . Effect of braking application on residual stress in the rim of railroad wheels. Proc. Conference on Rolling Noise Generation, Technische Universitaet, Berlin, Germany 159-68
  - 31 Schramm RE, Szelażek J, Clark AV (1995) Residual stress in induction-heated railroad wheels: ultrasonic and saw cut measurements, NISTIR 5038, Report No. 28. National Institute of Standards and technology, Boulder, CO
  - 32 Ultrasonic method for determining the residual stress in the rim (nondestructive method), Standard EN 13262:2004, Annex D
  - 33 Schneider E, Herzer R (1998) Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels. Proc. 7th ECNDT Copenhagen , May 26-29. 2: 1972-9
  - 34 Schramm RE, Clark AV, Mitrakowic DV, Schaps SR, McGuire TJ (1991) Residual stress detection in railroad wheels: an ultrasonic system using EMATs. NISTIR 3968, Report No. 23, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO
  - 35 Szelażek J (2006) Ultrasonic stress evaluation in cast railroad wheels. Archives of Foundry 6:509-24 (in Polish)
  - 36 Egle DM, Bray DE (1976) Measurement of acoustielasticity and third order elastic constants for rail steel. J Acoust Soc Am 60:741-4
  - 37 Brokowski A, Deputat J (1985) Ultrasonic measurements of residual stress in rails. Proc. 11th World Conference on Nondestructive testing, Vol. 1, Columbus, OH, 592-8
  - 38 Szelażek J (2013) Sets of Piezoelectric Probeheads for Stress Evaluation with subsurface Waves, J Nondestruct Eval 3; 32:188–199
  - 39 Schramm RE, Szelażek J, Clark J. AV (1995) Dynamometer-induced Residual Stress in Railroad Wheels: Ultrasonic and Saw Cut Measurements. NISTIR 5043, Report No. 30, National Institute of Standards and Technology, Boulder CO

