

# Próbki szklane grawerowane laserowo jako wzorce dwójłomności akustycznej w badaniach ultradźwiękowych

## Glass samples laser subsurface engraved as a calibration blocks for ultrasonic determination of acoustic birefringence

### Streszczenie

W pracy opisano nowy sposób wykonania próbki o określonej anizotropii akustycznej, przydatnej do badania głowic ultradźwiękowych przeznaczonych do pomiarów dwójłomności akustycznej. Do wykonania próbek wykorzystano szklane bryły i podpowierzchniowe grawerowanie laserowe. Wymaganą w normach omawiających wzorce do ultradźwiękowych badań naprężeń w kołach kolejowych wartość dwójłomności uzyskano, stosując grawerowanie z podwojonymi, umieszczonymi w linii mikroszkodzeniami spowodowanymi działaniem lasera. Przedyskutowano również możliwości wykonania wzorca dwójłomności akustycznej ze stali, jak proponują to normy.

**Słowa kluczowe:** badania ultradźwiękowe, wady sztuczne, anizotropia

### Abstract

Paper describes a new method to produce a sample presenting determined acoustic birefringences, useful in ultrasonic nondestructive testing. To produce a given acoustic anisotropy glass block was used and subsurface laser engraving technique. Anisotropy required in standard dealing with ultrasonic stress evaluation in railroad wheels, was obtained using engraving double, aligned along one line, microcracks. Paper discusses also the feasibility of acoustic birefringence pattern manufacturing of steel, as described in standards.

**Keywords:** ultrasonic testing, artificial flaws, anisotropy

## Wstęp

Do skalowania aparatury w defektoskopowych badaniach ultradźwiękowych wykorzystywane są różnego rodzaju próbki. Najczęściej są to metalowe próbki zawierające wady sztuczne. Innego rodzaju próbkami, bez wad sztucznych, są próbki prezentujące określone właściwości akustyczne. Są to na przykład wzorce mikrosekundowe, czyli stalowe walce, w których czas przejścia fali ultradźwiękowej jest dokładnie określony. W ultrasonografii wykorzystywane są żelowe fantomy imitujące właściwości tkanki biologicznej, takie jak prędkości fal, tłumienie czy rozpraszanie.

Jednym z zastosowań badań ultradźwiękowych są pomiary naprężeń. Są one dziś powszechnie stosowane w ocenie obwodowych naprężeń własnych w wieńcach

monoblokowych kół kolejowych. Naprężenia w kołach obliczane są na podstawie mierzonej ultradźwiękowo dwójłomności akustycznej materiału wieńca.

*Dwójłomność akustyczna* to miara anizotropii materiału obliczana jako względna różnica prędkości fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku szerokości wieńca i spolaryzowanych odpowiednio w kierunku obwodowym i promieniowym. Jej wartość jest zależna od dwóch czynników: tekstury materiału wieńca (ukierunkowanego ułożenia ziaren materiału w wyniku walcowania koła) i obwodowej składowej naprężenia (w kołach nowych działającej w wyniku obróbki cieplnej, w kołach eksploatowanych powstającej w wyniku hamowania klockami hamulcowymi). Naprężenie oceniane tą metodą to naprężenie uśrednione na drodze fal, czyli na całej szerokości wieńca.

**Dr hab. inż. Jacek Szelażek** – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [jszela@ippt.gov.pl](mailto:jszela@ippt.gov.pl)

Norma EN13979 [1], opisująca ultradźwiękowe pomiary naprężeń w kołach kolejowych, zaleca do skalowania aparatury dwa wzorce w postaci bloków wyciętych z wieńca koła. Wzorzec A jest pozbawiony naprężeń, a obserwowana w nim dwójłomność akustyczna jest wynikiem jedynie anizotropii teksturalnej. Wzorzec B ma prezentować naprężenia obwodowe o wartości  $100 \pm 20$  MPa. O ile pierwszy wzorzec jest łatwy do wykonania (wycięcie fragmentu wieńca i poddanie go odprężaniu termicznemu), o tyle wykonanie drugiego wzorca wydaje się praktycznie niemożliwe. Typowy blok – fragment koła, z postawioną na nim głowicą ultradźwiękową, pokazano na rysunku 1.



**Rys. 1.** Blok do kontroli aparatury, wykonany jako wycinek wieńca koła monoblokowego

**Fig. 1.** Control block made as a monoblock wheel rim section

Powierzchnia przekroju koła w takim bloku to ok.  $100 \text{ cm}^2$ . Siła potrzebna do wytworzenia naprężenia 100 MPa choć w połowie przekroju takiego bloku to siła rzędu 50 ton! Trudno więc sobie wyobrazić sposób wykonania takiego bloku, w którym naprężenia własne rozkładają się tak, że średnie naprężenie na szerokości wieńca wynosi ok. 100 MPa. Wytworzenie takich naprężeń w bloku możliwe jest jedynie po umieszczeniu go w prasie i ściśnięciu go siłą 100 ton. Wydaje się, że jedynym sposobem spełnienia wymagań normy jest stosowanie jako wzorca B całego koła, w którym składowa obwodowa naprężenia własnych wynosi ok. 100 MPa. Rozwiązanie to ma jednak dwa mankamenty. Po pierwsze, taki wzorzec zajmuje stosunkowo dużo miejsca i jest raczej mało poręczny. Po drugie, rozkład naprężeń na przekroju koła jest nieznaną, a jedyną metodą, którą naprężenie uśrednione na szerokości wieńca może być wyznaczone, jest metoda ultradźwiękowa (czyli metoda, do której skalowania wzorzec ma służyć). Inną metodą umożliwiającą wyznaczenie wartości i rozkładów naprężeń w kole jest metoda niszcząca (niestety w wyniku jej stosowania badany wzorzec przestaje istnieć). Jeszcze jednym mankamentem wzorca B w postaci koła jest to, że mierzona w nim dwójłomność akustyczna jest wynikiem sumujących się wkładów tekstury materiału i naprężenia. Nie są do dziś znane metody niszczące mogące określić udziały tych dwóch czynników w mierzonej sumarycznej dwójłomności.

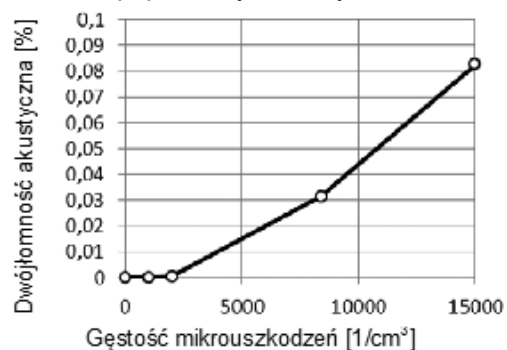
Celem opisanych niżej badań było wykonanie bloku o określonej, jednorodnie rozłożonej w objętości, znanej dwójłomności akustycznej wywołanej jedynie strukturą materiału.

## Podpowierzchniowe grawerowanie laserowe

Działanie skupionej, impulsowo działającej wiązki lasera w szkłe wywołuje powstanie lokalnego uszkodzenia szkła. Wynikiem działania impulsu jest wydłużone mikropęknięcie mające postać „krzaczka” o długości  $0,07 \pm 0,1$  mm i średnicy  $0,03 \pm 0,05$  mm w zależności od mocy lasera. Kierunek długości mikrouszkodzenia pokrywa się z kierunkiem wiązki światła lasera. Laserowo wytworzone pęknięcia są wynikiem nie tylko lokalnego nagrzania szkła, ale głównie spontanicznej emisji elektronów wywołanej okresowym działaniem fali elektromagnetycznej [2]. Dzisiaj zjawisko to wykorzystywane jest do trwałego znakowania opakowań szklanych i do produkcji pamiętek. Wyspecjalizowana aparatura umożliwia wytworzenie w bloku szklanym praktycznie nieograniczonej ilości dowolnie rozłożonych mikropęknięć. Ciekawą z punktu widzenia badań UT cechą szkła stosowanego w produkcji „laserowych obrazów” jest to, że prędkości propagacji fal ultradźwiękowych są zbliżone do prędkości fal w stali ( $c_L = 5590$  m/s,  $c_T = 3360$  m/s).

Fakt, że mikrouszkodzenie jest wydłużone, powoduje, że fala poprzeczna rozchodząca się w szkłe z licznymi mikropęknięciami, ułożonymi w jednym kierunku i w całej jego objętości, w zależności od tego, czy kierunek polaryzacji jest równoległy czy prostopadły do osi mikropęknięć, będzie miała różną prędkość. Liczne mikropęknięcia, choć znacznie krótsze niż długość fali ultradźwiękowej, czynią szkło anizotropowym, wykazującym dwójłomność akustyczną.

Wykonano szereg próbek z różnymi gęstościami mikrouszkodzeń i wykonano na nich pomiary wywołanej działaniem lasera dwójłomności akustycznej. Okazało się, że dwójłomność akustyczna spowodowana pojedynczymi uszkodzeniami nawet o dużej gęstości jest stosunkowo niska. Na rysunku 2 pokazano zależność dwójłomności od gęstości mikrouszkodzeń. Badania prowadzono falami poprzecznymi o częstotliwości 2 MHz.



**Rys. 2.** Zależność dwójłomności akustycznej wywołanej pojedynczymi mikrouszkodzeniami od ich gęstości

**Fig. 2.** Dependence of acoustic birefringence on laser microcrack density

Dwójłomność uzyskana dla gęstości uszkodzeń  $1500/\text{cm}^3$ , wynosząca 0,082%, jest równoważna dla stali naprężeniu równemu ok. 50 MPa. Grawerowanie bloków szkła z wyższą gęstością uszkodzeń może prowadzić do pęknięcia szkła w czasie obróbki i staje

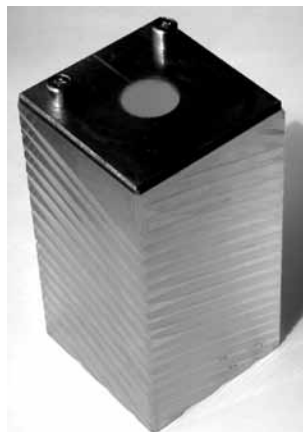
się zbyt czasochłonne. Wykonano więc próbkę grawerowaną nie pojedynczymi, lecz podwójnymi, ustawionymi w jednej linii, blisko siebie, mikrouszkodzeniami. Próbka o gęstości uszkodzeń  $2 \times 8400/\text{cm}^3$  wykazała przy badaniach falami o częstotliwości 2 MHz dwójłomność odpowiadającą naprężeniu równemu ok. 120 MPa, a więc spełniającemu zalecenia przytaczanej normy. Jednocześnie, dzięki małym wymiarom uszkodzeń w stosunku do długości fali, tak zmodyfikowane szkło nie jest źródłem szumów akustycznych mogących utrudniać pomiar.

Na przekroju typowego bloku wykonanego z wycinka koła bloku (rys. 1) obserwuje się rozkład anizotropii teksturalnej. Powoduje to, że wynik pomiaru dwójłomności akustycznej zależy od miejsca przyłożenia głowicy do powierzchni bloku. Waga bloku to ok. 5 kg, co w pewnym stopniu utrudnia jego przenoszenie. Natomiast blok szklany o tej samej wysokości co szerokość wieńca koła (130 mm) waży kilkakrotnie mniej, a anizotropia akustyczna w całej objętości bloku jest jednakowa, zależna od gęstości mikrouszkodzeń.

Głowice ultradźwiękowe stosowane w pomiarach naprężeń w kołach kolejowych są wyposażone w magnesy stałe przyciągające je do powierzchni koła. Celem stosowania takich magnesów jest z jednej strony ułatwienie uzyskania prawidłowego, powtarzalnego sprzężenia akustycznego (jako ośrodek sprzęgający wykorzystywane są lepkie, gęste żywice epoksydowe), a z drugiej – stabilizacja głowicy na powierzchni lica wieńca koła (ważne w pomiarach zestawów kołowych, gdy koła ustawione są w płaszczyźnie pionowej). Aby ułatwić wykorzystanie szklanego bloku kontrolnego do badania głowic z magnesami, na powierzchni, do której sprzęgana jest głowica, naklejono stalową płytkę, w której otworze wklejono krążek z płaskiego szkła. Fale ultradźwiękowe generowane przez głowice przechodzą przez szklaną płytkę i wnikają do wygrawerowanego bloku, odbijają się od jego dna i powracają do głowicy. Czas przejścia fal w bloku jest zbliżony do czasu przejścia fal przez szerokość wieńca typowego koła monoblokowego. Obudowa głowicy z magnesami przyciągana jest do stalowej płytki, a centralną pozycję głowicy na powierzchni bloku zapewniają dwa stalowe bolce.

Badania pierwszych prostopadłościennych bloków wykazały, że przy wymiarach poprzecznych bloku zredukowanych do 70x70 mm obserwowane są sygnały pochodzące z odbić fal od bocznych powierzchni. Odbicia te mogą nieznacznie wpłynąć na wynik pomiaru dwójłomności. Aby ten wpływ wyeliminować, na bocznych powierzchniach szklanej bryły zostały wyszlifowane liczne rowki. Szklany blok kontrolny, z przyklejoną płytką stalową z dwoma bolcami i z rowkami (przed umieszczeniem go w obudowie) pokazano na rysunku 3. Należy pamiętać, że dwójłomność akustyczna szklanych, laserowo grawerowanych bloków, jest zależna od częstotliwości fal poprzecznych (podobnie jak dwójłomność teksturalna wywołana ukierunkowanym ułożeniem ziaren stali w wyrobach walcowanych). Oznacza to, że opisany blok kontrolny może być stosowany jedynie w badaniach głowic o określonej częstotliwości. W przypadku badania

naprężeń w kołach kolejowych jest to częstotliwość 2 MHz. Opisany blok nadaje się do badania jedynie głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi. Stosowane w pomiarach naprężeń w kołach przetworniki EMAT generują fale jedynie w materiałach przewodzących.



**Rys. 3.** Szklany, podpowierzchniowo grawerowany blok kontrolny o określonej dwójłomności akustycznej

**Fig. 3.** Control block of given acoustic birefringence made as SSLE glass block

## Wnioski

Opisane wyżej wyniki pokazują, że szklane bloki grawerowane laserowo w objętości mogą stanowić wzorce określonej dwójłomności akustycznej. Dobierając odpowiednio gęstość mikrouszkodzeń i ich wzajemne położenia, można stworzyć bloki o wartościach anizotropii akustycznej odpowiadających różnym wartościom naprężeń w stali. Technika umożliwia wykonanie bloku prezentującego anizotropię stałą w całej jego objętości (lub z dowolnym jej gradientem, o ile to potrzebne). Dzięki temu, że prędkości fal ultradźwiękowych w szkłe optycznym są zbliżone do prędkości fal w stali (dla fal poprzecznych prędkość w szkłe jest o 4% wyższa niż w stali), rozbieżności wiązek fal w szkłe i stali są praktycznie jednakowe.

Wykonanie stalowego bloku kontrolnego proponowanego w przytaczanej normie (i określanego w niej jako „wzorzec”), o akceptowanych wymiarach i masie oraz zaplanowanych właściwościach akustycznych jest dziś mało realne.

*Przedstawione w pracy próbki wykonano dzięki uprzejmości i pomocy Pani Anny Andrzejewskiej z firmy LASER 3D, Zielona Góra.*

## Literatura

- [1] EN 13979+A1, Railway applications-Wheelsets and bogies-Monoblock wheels-technical approval procedure, Part 1: Forged and rolled wheels.
- [2] Krüger J, Kautek W, Lenzner M, Sartania S, Spielmann C, Krausz F.: Laser micromachining of barium aluminium borosilicate glass with pulse durations between 20 fs and 3 ps. Applied surface science. 1998; 127(29): 892-898.