Katarzyna Makowska
Zbigniew L. Kowalewski
Instytut Transportu Samochodowego

NOWE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA PARAMETRÓW ULTRADŹWIĘKOWYCH DO OCENY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MATERIAŁÓW

Celem pracy było sprawdzenie przydatności badań ultradźwiękowych do oceny stopnia wyeksploatowania materiału, mającego zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, również w motoryzacji. Próbki stali wysokowytrzymałej obciążono mechanicznie, a następnie przeprowadzono na nich pomiary ultradźwiękowe. Przeprowadzono badania metalograficzne oraz statyczną próbę rozciągania. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano wykresy przedstawiające związki pomiędzy parametrami wyznaczonymi na podstawie badań niszczących i nieniszczących.

NEW POSSIBILITIES OF ULTRASONIC PARAMETERS APPLICATION FOR MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION

The aim of the work is to check the possibility of using ultrasonic investigations for evaluation of mechanical properties of material applicable in many branches of the industry including motor transport usage. The specimens of high-strength steel were firstly subjected to mechanical loads followed by ultrasonic measurements. The metallographic and static tensile tests were carried out. The graphs showing the relationships between the parameters calculated on the basis of destructive and non-destructive investigations were elaborated.

1. Badania nieniszczące w przemyśle motoryzacyjnym

Konstrukcje samochodowe są złożonymi obiektami, które ze względu na charakter obciążeń wymagają zachowania bardzo wysokich standardów bezpieczeństwa większości swoich podzespołów. Z tego względu muszą podlegać częstym badaniom kontrolnym, głównie o charakterze nieniszczącym. W przemyśle motoryzacyjnym najczęściej stosowanymi badaniami nieniszczącymi są **badania wizualne**, w których mogą być wykorzystane endoskopy przemysłowe, szczególnie w trudnodostępnych miejscach. Oględziny obiektów odbywają się w świetle naturalnym, białym, sztucznym lub ultrafioletowym. Niektóre miejsca konstrukcji bada się dodatkowo za pomocą innych metod nieniszczących. Poniżej wymieniono techniki najczęściej stosowane i krótko scharakteryzowano każdą z nich.

Metoda magnetyczno-proszkowa polega na magnesowaniu badanego materiału z jednoczesnym naniesieniem proszku ferromagnetycznego. Proszek magnetyczny gromadzi się w miejscach występowania defektów w materiale [8]. Technika ta umożliwia wykrywanie wąskich i płytkich powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości obiektów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych takich, jak stopy żelaza, niklu i kobaltu. W przypadku magnesowania prądem zmiennym mogą być wykrywane nieciągłości położone do głębokości ok. 2mm, a w przypadku magnesowania prądem stałym do głębokości ok. 3mm. Metoda pozwala wykrywać pęknięcia o głębokości większej od 0,1mm, szerokości od 0,001mm (a czasem nawet 0,0005mm) i długości 0,3mm [8].

Metoda penetracyjna polega na nałożeniu penetranta na uprzednio przygotowaną powierzchnię elementu i pozostawieniu go na badanej powierzchni przez określony czas (tzw. czas penetracji). Następnie usuwa się nadmiar penetranta w taki sposób, aby pozostał on w każdej nieciągłości, a powierzchnię elementu osusza się, jeżeli następuje taka konieczność. Wymaganie dotyczące wprowadzenia procesu osuszania uzależnione jest od nakładanego wstępnie wywoływacza w postaci substancji silnie chłonącej penetrant, którą pozostawia się na czas trwania procesu wywoływania. Zadaniem procesu jest odessanie pozostałości penetranta na powierzchnię elementu. Suszenie stosuje się w przypadku użycia wywoływacza suchego, rozpuszczalnikowego oraz tworzącego zawiesinę w wodzie. Po kontroli badanego elementu w warunkach odpowiedniego oświetlenia następuje jego oczyszczanie, a w razie konieczności przeprowadza się zabiegi zabezpieczające przed korozją [1]. Metoda penetracyjna wykorzystywana jest w przypadku poszukiwania drobnych nieciągłości w obiektach wytworzonych z materiałów ferromagnetycznych, jak i nieferromagnetycznych, np. w stopach aluminium i w stalach austenitycznych, które nie mogą być badane metodą magnetyczną. Wymiary wykrywalnych pęknięć wynoszą: szerokość od ok. 1μm, długość od ok. 1mm i głębokość od ok. 10μm [8].

Metoda ultradźwiękowa należy do najważniejszych i najbardziej rozpowszechnionych technik badań nieniszczących. W badaniach tego typu wykorzystuje się zjawisko rozchodzenia fal ultradźwiękowych w ciałach stałych. Metoda służy do wykrywania i lokalizacji najbardziej niebezpiecznych nieciągłości płaskich, wąskoszczelinowych. Może być także stosowana do wyszukiwania nieciągłości o innym kształcie. Czułość metody zapewnia identyfikację wad o głębokości od około 0,1mm w przypadku nieciągłości powierzchniowych, natomiast dla nieciągłości typu objętościowego można wykrywać pęknięcia o szerokości od około 0,001mm i długości, względnie średnicy, od około 0,7mm [8]. Do oceny wymiarów nieciągłości wykorzystuje się głównie

informację w postaci wartości amplitudy sygnałów, a w przypadku rozległych nieciągłości płaskich oraz nieciągłości liniowych w formie obwiedni sygnałów ech dla nieciągłości, które uzyskiwane są przy przemieszczaniu głowic wzdłuż nieciągłości. Wykrywanie wad materiałowych techniką ultradźwiękową możliwe jest za pomocą jednej z trzech podstawowych metod:

a) **metoda echa**, która pozwala wnioskować o wielkości wady i głębokości jej zalegania na podstawie wielkości impulsu odbitego od wady i jego odległości od impulsu odbitego od przeciwległej zewnętrznej powierzchni. Jest to metoda umożliwiająca ustalenie rodzaju wady. W sytuacji, gdy wewnątrz badanej konstrukcji występuje defekt strukturalny, który nie przysłania całkowicie wiązki fal ultradźwiękowych, wtedy na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego można zauważyć dodatkowo echo wynikające z odbicia się fali od nieciągłości;

b) **metoda przenikania (cienia)**, która stosowana jest do wykrywania nieciągłości położonych blisko powierzchni badanych, gdy możliwy jest dwustronny dostęp do konstrukcji. W metodzie cienia sygnał, który obserwuje się na ekranie urządzenia badawczego, stanowi impuls fali przechodzącej przez obiekt zarejestrowany przez głowicę odbiorczą. Jeżeli na drodze fali ultradźwiękowej pojawi się nieciągłość, wówczas odebrany impuls ma mniejszą amplitudę i dobiega do głowicy nieco później niż w przypadku, gdy fala przebiega przez materiał bez wewnętrznych defektów. Osłabienie energii fali zależne jest od wymiarów i położenia wady względem głowic;

c) **metoda rezonansu**, w której podobnie, jak w metodzie echa wykorzystuje się zjawisko odbicia fal ultradźwiękowych od wady. Różnica między tymi technikami polega na tym, że w metodzie echa odbicie fali od wady obserwuje się oddzielnie od obrazu fal wysyłanych, natomiast w metodzie rezonansu obserwujemy nałożenie się na siebie fal padających i odbitych. Rezonans występuje wówczas, gdy grubość materiału jest całkowitą wielokrotnością połowy długości fali ultradźwiękowej. Wystąpienie rezonansu rejestruje się na ekranie oscylografu, którego podstawa czasu jest wyskalowana w jednostkach częstości drgań fal ultradźwiękowych. Metoda ta znajduje zastosowanie szczególnie przy wykrywaniu nieciągłości płaskich, np. rozwarstwień blach po spawaniu na skutek powstania pęknięć lamelarnych.

Badania ultradźwiękowe są powszechnie wykorzystywane do oceny stanu technicznego urządzeń i konstrukcji [19], w motoryzacji na przykład do badania złączy zgrzewanych, połączeń klejonych [6], korbowodów, podstaw łożysk ślizgowych, itp.

Tradycyjne badania ultradźwiękowe w postaci pomiarów współczynnika tłumienia i prędkości fal ultradźwiękowych mają swoje ograniczenia. Należy do nich dokładność pomiarów tłumienia fal ultradźwiękowych w warunkach przemysłowych. Wynika to z trudności eliminacji wpływu stanu powierzchni badanego materiału na pomiary elementów, w których brak jest płaskości powierzchni i nie jest zachowana równoległość ścianek. [10]. Najskuteczniejszym sposobem wykorzystania współczynnika tłumienia w takich sytuacjach jest przeprowadzenie badań w tych samych miejscach pomiarowych i na ich podstawie określanie jego zmian [10]. Należy zaznaczyć, że na wartość współczynnika tłumienia może mieć wpływ niejednorodność struktury, np. zmienna wielkość ziaren [10].

W przypadku pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych utrudnione jest dokładne wyznaczenie grubości badanego materiału oraz czasu przejścia fali. Podobnie jak w przypadku pomiaru współczynnika tłumienia, trudność stanowi także eliminacja wpływu niejednorodności struktury i geometrii konstrukcji [10].

Bezpośrednim powodem podejmowania prób wykorzystania technik ultradźwiękowych do oceny właściwości mechanicznych materiału jest duża szybkość pomiarów, niska cena i łatwość zastosowania w warunkach przemysłowych [13].

W artykule do oceny degradacji materiałów użyto współczynnika dwójłomności akustycznej oraz współczynnika elastoakustycznego. Badania wykonano dla stali wysokowytrzymałej 40HNMA, która przydatna jest jako materiał na korbowody.

Dwójłomność akustyczna stanowi względną różnicę prędkości dwóch fal poprzecznych rozchodzących się w tym samym kierunku, ale o różnych wzajemnie prostopadłych polaryzacjach [10]. Parametr ten jest miarą anizotropii sprężystej materiału [7] i można go wyrazić następującym wzorem [18]:

$$B_{ak} = 2\frac{V_{Tp} - V_{Tr}}{V_{Tp} + V_{Tr}} = 2\frac{t_{Tr} - t_{Tp}}{t_{Tp} + t_{Tr}} \qquad (1)$$

gdzie:

V_{Tp} – prędkość fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadle do kierunku wartości maksymalnego naprężenia rozciągającego,

V_{Tr} – prędkość fali poprzecznej spolaryzowanej równolegle do kierunku wartości maksymalnego naprężenia rozciągającego,

t_{Tr} – czas przejścia przez grubość materiału fali poprzecznej spolaryzowanej równolegle do kierunku maksymalnego naprężenia rozciągającego,

t_{Tp} – czas przejścia przez grubość materiału fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadle do kierunku maksymalnego naprężenia rozciągającego.

Zmiany współczynnika dwójłomności akustycznej (anizotropii akustycznej) są spowodowane obrotem ziaren materiału, dążącym do ustawienia się kierunkami łatwego poślizgu równolegle do kierunku naprężenia wymuszającego odkształcenie [11]. Oprócz ustalonej orientacji ziaren, tworzącej teksturę krystalograficzną, która powstała na przykład podczas procesu produkcyjnego, przyczyną anizotropii akustycznej materiału może być obecność mikrodefektów o określonej geometrii i orientacji [12]. Metoda pomiaru współczynnika dwójłomności akustycznej do oceny stopnia uszkodzenia materiałów bazuje na założeniu kierunkowego charakteru postępującej degradacji [12].

Stosowanie współczynnika dwójłomności akustycznej do oceny degradacji materiału wynika z wielu jego zalet. Wśród nich można wymienić brak konieczności pomiaru grubości elementu – parametr ten określa się tylko na podstawie czasów przejścia fal ultradźwiękowych. Ponadto, wyniki pomiarów nie są obarczone błędami wynikającymi z nierównoległości powierzchni oraz niejednorodności materiału badanego obiektu, ponieważ pomiary czasów przejścia wykonuje się w tym samym punkcie pomiarowym, tą samą głowicą, obracaną o 90º w stosunku do jej pierwotnego położenia. W tej sytuacji wiązka ultradźwiękowa przechodzi przez tę samą objętość materiału oraz odbija się od tego samego obszaru przeciwległej powierzchni. Różnicę między warunkami pomiaru obu czasów przejścia fali stanowi jedynie kierunek jej polaryzacji [10].

Współczynnik elastoakustyczny stanowi wielkość charakteryzującą stopień proporcjonalności między naprężeniem i względną zmianą prędkości fal [2], [17], [9]. Można to ująć następującą zależnością:

$$\frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = \frac{t_0 - t_\sigma}{t_\sigma} = \beta \cdot \sigma \qquad (2)$$

gdzie:

V_σ – prędkość przejścia fali ultradźwiękowej w materiale poddanym obciążeniu,

V_0 – prędkość przejścia fali ultradźwiękowej w materiale bez obciążenia,
t_0 – czas przejścia przez ustalony odcinek drogi w materiale bez obciążenia,
t_σ – czas przejścia przez ustalony odcinek drogi w materiale poddanym obciążeniu,
β – współczynnik elastoakustyczny,
σ – naprężenie.
Przekształcając wzór (2) otrzymujemy:

$$\beta = \frac{V_\sigma - V_0}{V_0 \cdot \sigma} = \frac{t_0 - t_\sigma}{t_\sigma \cdot \sigma} \qquad (3)$$

W związku z faktem, że największe zmiany prędkości przy ustalonym przyroście naprężenia występują w przypadku fal podłużnych rozchodzących się w kierunku działania naprężenia [3], [4], parametry przejścia właśnie tych fal mogą być stosowane do oceny zmian właściwości mechanicznych stali po zadanych obciążeniach. Z drugiej strony, najmniej czułe na zmiany naprężenia są fale poprzeczne rozchodzące się w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia i spolaryzowane prostopadle do jego kierunku [3], [4].

2. Metodyka badań

Przed przystąpieniem do realizacji zaplanowanego programu testów wykonano kontrolne badania składu chemicznego, mikrostruktury i właściwości mechanicznych materiału, stali 40HNMA.

Badania w zakresie mikroskopii świetlnej przeprowadzono na zgładach metalograficznych przygotowanych na automatycznej szlifierko-polerce ROTOPOL 21 produkcji duńskiej firmy STRUERS. Urządzenie to wyposażone jest w automatyczny dozownik MULTIDOSER z zestawem zawiesin polerskich. Zapewnia on optymalną i ekonomiczną ilość zawiesiny polerskiej zużywanej w procesie przygotowania próbek. Głowica dociskowa ROTOFORCE 4 (ze standardowym uchwytem na sześć próbek), umożliwia utrzymywanie w czasie obróbki stałego docisku próbek do tarczy polerskiej. Początkowo próbki szlifowano, a następnie polerowano stosując zawiesiny diamentowe o kolejno malejącej granulacji: 9, 6, 3, 1 μm. Do ostatniego etapu polerowania używano tlenku krzemu (OPS) - również w postaci zawiesiny. Badania mikrostruktury próbek przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym firmy OLYMPUS typ PMG 3. W celu zobrazowania mikrostruktury stali zgłady wytrawiono nitalem (2% roztwór kwasu azotowego w alkoholu etylowym).

W ramach zasadniczego programu badań próbki stali poddawano procesowi plastycznego płynięcia w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, oraz alternatywnie pełzaniu przy naprężeniu nominalnym 250MPa w temperaturze 500ºC. Dla obu rodzajów testów wykonano po kilka prób z narastającą wartością wstępnego odkształcenia w celu uzyskania zróżnicowanych właściwości mechanicznych. Oba rodzaje deformacji różnią się wywołującymi je mechanizmami. Głównymi mechanizmami odkształcenia podczas pełzania był poślizg oraz wspinanie dyslokacji, natomiast podczas plastycznego płynięcia był tylko poślizg dyslokacji [5]. Wybór dwóch sposobów obciążania materiałów miał na celu wskazanie możliwości rozróżnienia historii deformacji stali za pomocą parametrów wyznaczanych na podstawie badań nieniszczących i niszczących [13]. Badania przeprowadzono na próbkach płaskich o długości pomiarowej 40mm i przekroju poprzecznym w części pomiarowej 5mm×7mm.

Na wstępnie odkształconych próbkach wykonano ultradźwiękowe pomiary współczynnika dwójłomności akustycznej i współczynnika elastoakustycznego, korzystając z zależności (1) i (3).

Do badań dwójłomności akustycznej wykorzystano głowicę normalną na fale poprzeczne, wyposażoną w przetwornik o średnicy 8mm i częstotliwości f = 5MHz. Ośrodek sprzęgający, umożliwiający przeniesienie drgań poprzecznych z głowicy do materiału próbki, stanowiła żywica epoksydowa o wysokim współczynniku lepkości (bez utwardzacza). Pomiary ultradźwiękowe wykonywano metodą różnicową. Różnicę czasów mierzono między trzecim a pierwszym odbiciem fal od przeciwległej powierzchni próbki. W ten sposób wyeliminowano wpływ czasu przejścia fali przez warstwę żywicy epoksydowej. Wiązkę ultradźwiękową wprowadzano każdorazowo w kierunku grubości próbki, tzn. równolegle do jej najkrótszego wymiaru, w pięciu punktach ulokowanych na jej bazie pomiarowej oraz częściach uchwytowych.

Warto zwrócić uwagę na stosunkowo dużą czułość przeprowadzonych badań dwójłomności i ich stosunkowo niewielkie błędy pomiarowe. Błąd pomiaru dwójłomności akustycznej uzależniony jest od dokładności pomiaru czasu przejścia fal. Dla baz pomiarowych o długości ok. 8 mm i dokładności pomiaru tego czasu (±1 ns) błąd pomiaru dwójłomności ΔB_{ak} wynosi ±0,08% [13].

W pracy podjęto się również wyznaczenia współczynnika elastoakustycznego jako parametru czułego na rozwój uszkodzenia. Wyznaczano go na podstawie pomiarów ultradźwiękowych wykonywanych podczas prób jednoosiowego rozciągania próbek. Głowica nadawcza generowała w materiale próbki podłużne fale podpowierzchniowe, które po przejściu odcinka pomiarowego były rejestrowane przez głowicę odbiorczą. Głowice mocowano do próbki za pomocą silnych magnesów utrzymujących ją w ustalonym położeniu podczas całego eksperymentu. Częstotliwość rezonansowa głowic wynosiła f = 3MHz, zaś długość boku przetwornika 10mm. Głowice sprzęgano akustycznie z powierzchnią materiału za pomocą warstwy oleju maszynowego.

Próbki z głowicami mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i poddawano rozciąganiu. Z uwagi na występujące różnice w stopniu deformacji badanych próbek, ich przekroje poprzeczne nie były jednakowe na długości beleczki pomiarowej jednej próbki. W celu uwzględnienia zmian przekroju próbki na długości pomiarowej przeprowadzono pomiary jej szerokości w kilku punktach i do obliczeń naprężenia przyjmowano wartość średnią.

W trakcie eksperymentu z udziałem badań ultradźwiękowych zwiększano wartość naprężenia rozciągającego w zakresie sprężystym, od 0 do około 200MPa, mierząc jednocześnie czas przejścia fali podłużnej między głowicami - t_L. Z nachylenia uzyskanej zależności t_L wyznaczano współczynnik elastoakustyczny β_{111}. Przy wyznaczaniu współczynnika elastoakustycznego uwzględniano (odejmowano) zmianę czasu przejścia fali wynikającą ze wzrostu odległości między głowicami wskutek rozciągania próbki. Zmianę tę obliczono wykorzystując następujące dane: moduł Younga, średnie naprężenie oraz odległość między głowicami.

Błąd wyznaczenia współczynnika elastoakustycznego β_{111} stanowi suma błędów wynikających z dokładności pomiarów czasu przejścia fal ultradźwiękowych (±1 ns), dokładności określania średniego naprężenia rozciągającego w części pomiarowej próbki (2-3%), dokładności określonego modułu Younga dla materiału próbki (2-3%), oraz błędów w pomiarze odległości między głowicami (2-3%). Dla badanych próbek i stosowanej techniki badań błąd ten oszacowano na $\Delta\beta_{111} \approx 0{,}1*10^{-5}$ MPa^{-1} [13].

Po przeprowadzeniu badań ultradźwiękowych wykonano statyczne próby rozciągania wstępnie odkształconych próbek. Do pomiaru przemieszczenia zastosowano ekstensometr model MTS 634.12F24 z bazą pomiarową 28,5mm.

Otrzymane wyniki wykorzystano do opracowania wzajemnych związków między parametrami wyznaczonymi z badań ultradźwiękowych i statycznych prób rozciągania.

3. Wyniki badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali 40HNMA.

3.1. Kontrolne badania stali 40HNMA

Wyniki kontrolnej analizy składu chemicznego przedstawiono w tabeli 1. Skład chemiczny badanej stali mieści się w przybliżeniu w zakresach przewidzianych w normach [PN-89/H-84030/03].

Tabela 1

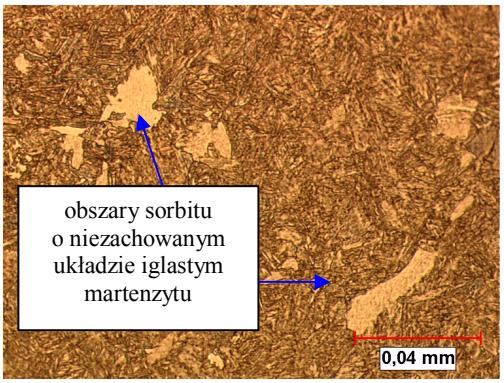
Skład chemiczny badanej stali [13]

Table 1

Chemical composition of the tested steel [13]

analizowany pierwiastek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
40HNMA	0,44	0,31	0,64	0,015	0,010	0,74	0,02	reszta
analizowany pierwiastek	Ni	Al	Cu	Ti	Nb	W	V	
40HNMA	1,40	0,015	0,16	0,050	0	0,03	<0,01	

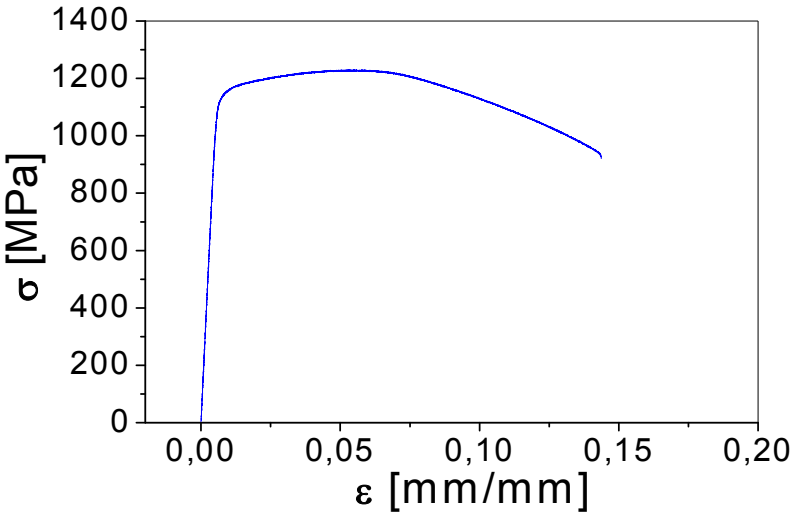
Wyniki wstępnych obserwacji przeprowadzonych w zakresie mikroskopii świetlnej udokumentowano na fotografii zamieszczonej na rys. 1. Badany materiał charakteryzował się strukturą sorbityczną z zachowanym układem iglastym martenzytu, przy czym zaobserwowano szereg równomiernie rozmieszczonych obszarów sorbitu o niezachowanym układzie iglastym martenzytu, widocznych na zdjęciu jako jaśniejsze pola. Sumaryczny udział objętościowy tych obszarów w badanym materiale wynosił około 2%.



Rys. 1. Mikrostruktura badanej stali, stan trawiony, światło zwykłe, pow. 500× [13]

Fig. 1. The microstructure of tested steel, etched state, conventional light, magn.500× [13]

Ostatnim etapem wstępnej charakteryzacji badanego materiału była statyczna próba rozciągania. Na jej podstawie określono najważniejsze naprężeniowe i odkształceniowe parametry mechaniczne. Wyniki statycznej próby rozciągania stali zilustrowano na rys. 2 w postaci krzywej rozciągania, natomiast w tabeli 2 zamieszczono określone na jej podstawie parametry mechaniczne [13].



Rys. 2. Krzywa rozciągania badanego materiału [13]
Fig. 2. The tensile curve of the tested material [13]

Tabela 2

Wyniki statycznej próby rozciągania [13]

Table 2

The results of the static tensile test [13]

$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A [%]
1153	1246	207033	15

3.2. Wstępna deformacja

Stal 40HNMA poddano wstępnej deformacji prowadzonej do chwili uzyskania różnych wartości odkształcenia (dla każdej testowanej próbki) w celu otrzymania próbek o odmiennych właściwościach mechanicznych. Jedną część próbek poddano procesowi plastycznego płynięcia w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, a drugą pełzaniu przy naprężeniu nominalnym 250MPa w temperaturze 500ºC.

Tabela 3.

Wartości odkształcenia wprowadzonego do materiału wskutek plastycznego płynięcia w temperaturze pokojowej [13]

Table 3.

The values of strain introduced to the material due to plastic flow at room temperature [13]

deformacja plastyczna: T = 25ºC, V = 1mm/min										
nr próby	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε [%]	0,22	0,79	1,39	1,78	3,04	4,23	6,85	6,88	13,20	13,22

Tabela 4.
Wartości odkształcenia wprowadzonego do materiału wskutek pełzania w temperaturze 500ºC [13]
Table 4.
The values of strain introduced to the material due to creep at 500 ºC [13]

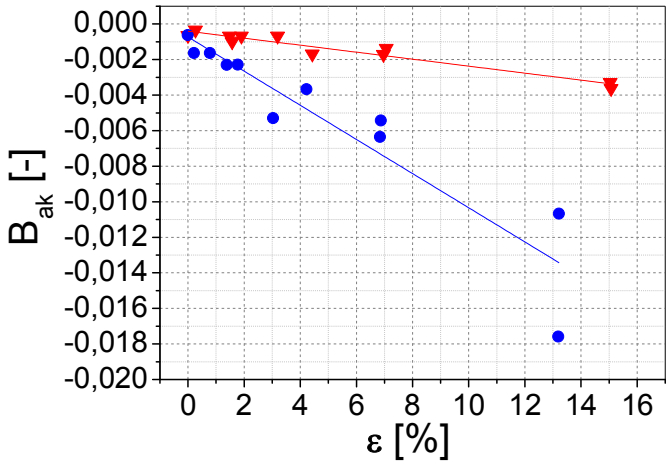
pełzanie: T = 500ºC, σ = 250MPa								
nr próby	1	2	3	4	5	6	7	8
ε [%]	0,27	1,48	1,57	1,90	3,19	4,43	7,06	6,96
t [h]	5	97	117	261	308	364	454	440

Wartości odkształcenia trwałego zadanego wskutek zastosowania obu procesów deformacyjnych zestawiono odpowiednio w tab. 3 i 4.

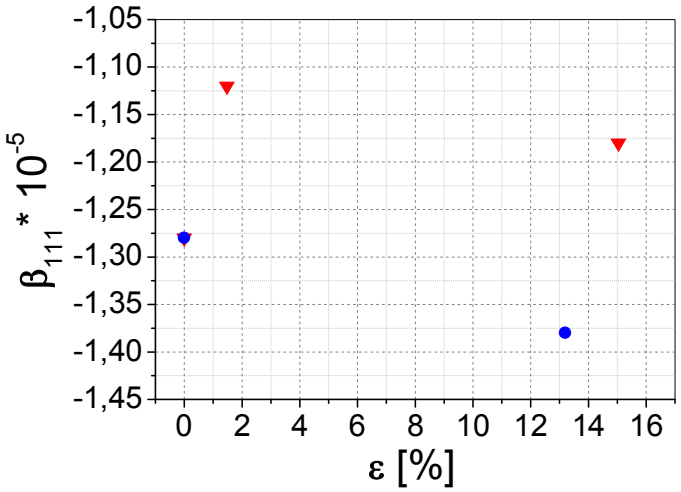
3.3. Wyniki badań ultradźwiękowych

Przebieg zmian dwójłomności akustycznej w funkcji trwałego odkształcenia wprowadzonego przez oba procesy deformacyjne [10], [12], [14] zilustrowano na rys. 3. Przyczyną zmian współczynnika dwójłomności akustycznej była anizotropowa mikrostruktura materiału, która wykształciła się głównie na skutek rotacji ziaren, doprowadzając do powstania konfiguracji zgodnej z kierunkami najłatwiejszego poślizgu [11], a także generacja nowych defektów punktowych i dyslokacji. Wraz ze wzrostem odkształcenia w trakcie jednoosiowych prób rozciągania/pełzania następuje sukcesywnie uporządkowywanie ziaren materiału zgodnie z kierunkiem działania maksymalnego naprężenia. Wyniki badań próbek ze stali ferrytycznej, zamieszczone w raporcie [16] dowodzą, że wraz z rozciąganiem materiału w zakresie sprężystym prędkość fali poprzecznej spolaryzowanej równolegle do kierunku działania obciążenia maleje, natomiast spolaryzowanej prostopadle do działania obciążenia praktycznie nie ulega zmianie. Po wprowadzeniu do materiału odkształcenia trwałego prędkości fal poprzecznych o polaryzacji równoległej i prostopadłej ulegają podobnej zmianie. Przy odciążaniu, prędkość fali spolaryzowanej równolegle do kierunku działania obciążenia wzrasta, a spolaryzowanej prostopadle jest praktycznie stała [16], [13].

Dla stali odkształcanej w temperaturze pokojowej zauważono większe zmiany dwójłomności akustycznej niż w przypadku odkształcenia w temperaturze podwyższonej (rys. 3). Zarówno płynięcie plastyczne w temperaturze pokojowej, jak i pełzanie w temperaturze podwyższonej powodują reorientację ziaren oraz produkują nowe dyslokacje i nowe defekty punktowe podczas przecinania się dyslokacji. Jednak w przypadku procesu wysokotemperaturowego (T = 500ºC), powstające na skutek monotonicznego naprężenia pełzania nowe dyslokacje wzajemnie się anihilują (następuje proces zdrowienia), przez co nie zaobserwowano umocnienia materiału tak jak w przypadku deformacji plastycznej na zimno. W podwyższonej temperaturze następuje reorientacja ziaren, co powoduje, że zmniejszeniu ulega stopień anizotropii mikrostrukturalnej w porównaniu do stopnia uzyskanego dla stali po deformacji plastycznej [13].



Rys. 3. Dwójłomność akustyczna stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie w temperaturze podwyższonej, kółka – deformacja plastyczna w temperaturze pokojowej) [15], [13]
Fig. 3. Acoustic birefringence of the tested steel as a function of strain (triangles – creep at elevated temperature, circles – plastic deformation at room temperature) [15], [13]



Rys. 4. Współczynnik elastoakustyczny badanej stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie w temp. podwyższonej, kółka – deformacja plastyczna w temperaturze pokojowej) [13]
Fig. 4. Elastoacoustic coefficient of tested steel as a function of strain (triangles – creep at elevated temperature, circles – plastic deformation at room temperature) [13]

Wyniki prób pomiarów współczynnika elastoakustycznego zamieszczono na rys. 4. Testy wykonane na 4 próbkach stali wskazują, że deformacja plastyczna na zimno prowadzi do niewielkiego zmniejszenia jego wartości, natomiast proces pełzania w podwyższonej temperaturze do zwiększenia. Fakt, że wzrost wartości współczynnika β_{111} słabo zależy od wartości odkształcenia pełzania może świadczyć o tym, że decydujący wpływ na jego zmianę miała sama temperatura próby pełzania. Należy jednak zwrócić uwagę, że różnice w wartości współczynnika elastoakustycznego badanego materiału dla danego typu deformacji mieszczą się w granicach błędu, który wynosi $\Delta\beta_{111} \approx 0{,}1*10^{-5}$ MPa^{-1}. Ze względu na małą liczbę zbadanych próbek przedstawione wnioski mają jedynie charakter orientacyjny.

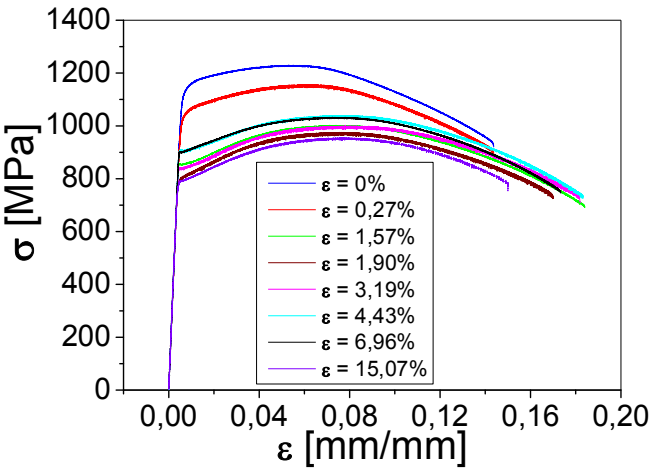
Dodatkowym czynnikiem utrudniającym właściwą interpretację wyników był sposób mocowania głowic ultradźwiękowych za pomocą żywicy epoksydowej, spełniającej jednocześnie rolę klina załamującego fale ultradźwiękowe tak, aby rozchodziły się one równolegle do powierzchni próbki. Pomimo, że przypuszczalnie poprawnie odwzorowano kierunek zmian współczynnika elastoakustycznego, to jednak pozostają wątpliwości dotyczące otrzymanych jego wartości przy stosunkowej niskiej czułości tego parametru na zmiany stopnia odkształcenia wprowadzonego rozpatrywanymi w pracy procesami deformacyjnymi [13].

3.4. Statyczna próba rozciągania

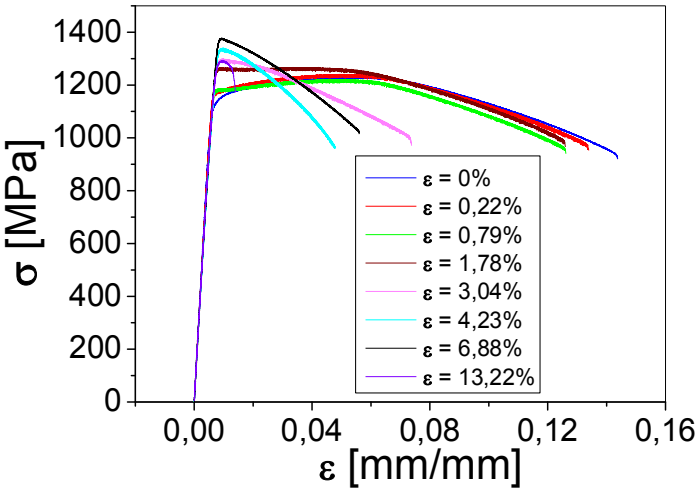
Sprawdzonym sposobem oceny właściwości mechanicznych materiałów są metody niszczące, jak na przykład statyczna próba rozciągania. Należy jednak podkreślić, że jest to metodyka bardzo kosztowna zarówno od strony realizowanych badań, jak i z punktu widzenia pozyskania materiału badawczego, wymagającego wycięcia niewielkich fragmentów z danej części podzespołu aktualnie eksploatowanego.

Próbki z wprowadzoną historią deformacji wskutek plastycznego płynięcia i pełzania przyspieszonego poddano testom rozciągania. Wyniki standardowych prób materiału badawczego przedstawiono na rys. 5a,b. Porównanie krzywych rozciągania zamieszczonych na obu rysunkach identyfikuje istotne różnice w ich przebiegu w zależności od wprowadzonej historii deformacji. Wstępna deformacja wywołana procesem pełzania powoduje efekt osłabienia materiału, wyrażający się obniżeniem naprężenia dla jednakowych wartości odkształcenia. Łatwo zauważyć jednak, że nie otrzymano tutaj zależności wprost proporcjonalnej między osłabieniem a wartością wstępnej deformacji wywołanej drogą pełzania, rys. 5a [13].

Całkowicie odmienny charakter reprezentują krzywe rozciągania materiału wstępnie odkształconego w próbie rozciągania. W tym przypadku uzyskano efekt wzmocnienia, tj. kolejne krzywe rozciągania układają się powyżej krzywej rozciągania dla materiału bez historii deformacji, rys. 5b. Także i dla tego rodzaju wstępnej deformacji nie zaobserwowano, aby efekt wzmocnienia był wprost proporcjonalny do wartości wstępnego odkształcenia [13].



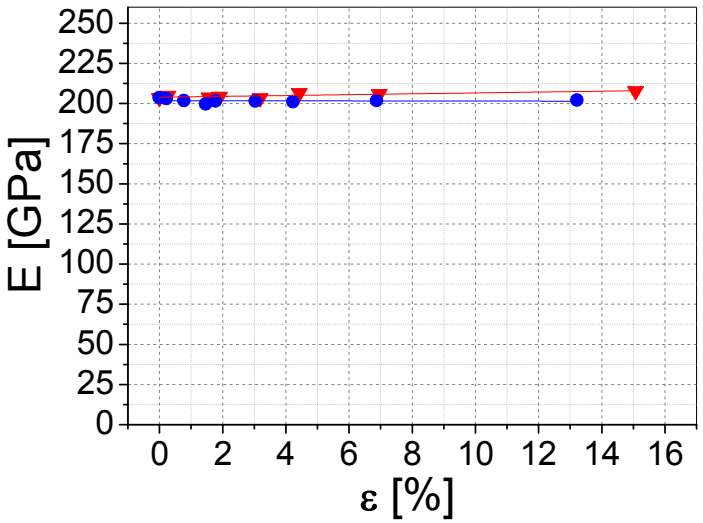
Rys. 5a. Krzywe rozciągania badanej stali po wstępnym pełzaniu [13]
Fig. 5a. The tensile curve of the tested steel after creep [13]



Rys. 5b. Krzywe rozciągania badanej stali po wstępnej deformacji plastycznej [13]
Fig. 5b. The tensile curve of the tested steel after prior plastic deformation [13]

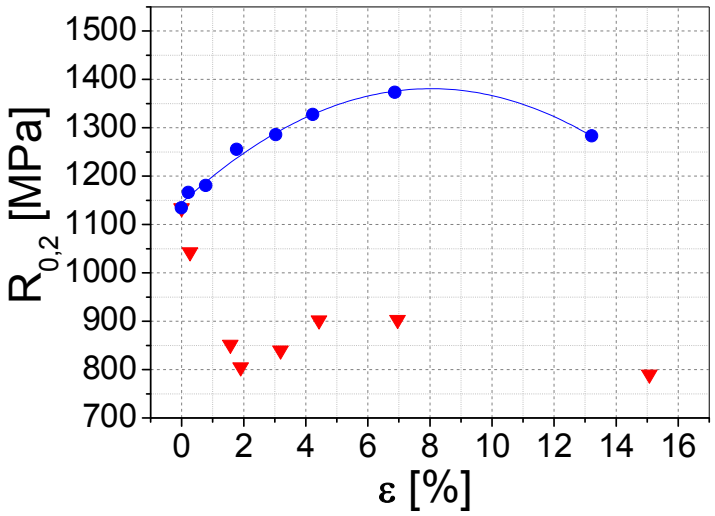
Na podstawie otrzymanych krzywych rozciągania określono wybrane parametry naprężeniowe oraz odkształceniowe, które miały identyfikować stopień wrażliwości materiału na wprowadzoną deformację zarówno pod względem jej wartości, jak i rodzaju. Spośród parametrów naprężeniowych próby rozciągania rozpatrywano zmiany modułu Younga (E), granicy plastyczności ($R_{0,2}$) oraz doraźnej wytrzymałości na rozciąganie (R_m), natomiast ze zbioru parametrów odkształceniowych wybrano wydłużenie względne (A). Moduł Younga praktycznie nie uległ zmianie po wprowadzeniu odkształcenia wywołanego pełzaniem lub płynięciem plastycznym (rys. 6a).

Kolejne dwa parametry naprężeniowe $R_{0,2}$ oraz R_m wykazywały jednak istotną wrażliwość na wprowadzoną historię deformacji i to zarówno pod względem wartości wstępnej deformacji, jak i jej rodzaju, rys. 6b,c. Przebieg zmian tych parametrów potwierdza wnioski wynikające z porównania krzywych rozciągania na rys. 5a,b. Także jedyny rozpatrywany parametr odkształceniowy – wydłużenie (A) próby rozciągania okazał się czuły na wprowadzoną historię deformacji. Jak pokazano na rys. 6d wydłużenie względne stali po deformacji plastycznej obniża się wraz z odkształceniem, natomiast nie wykazuje takiej tendencji dla materiału po pełzaniu [13].



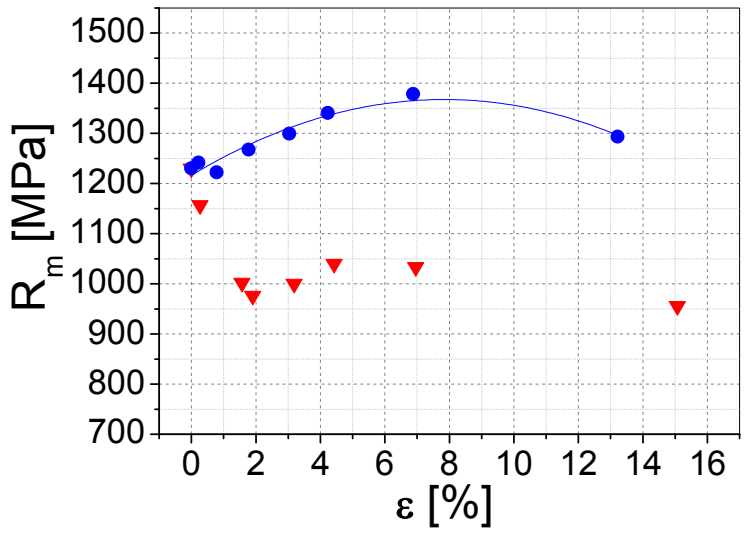
Rys. 6a. Moduł Younga badanej stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]

Fig. 6a. Young modulus of the tested steel as a function of strain (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]



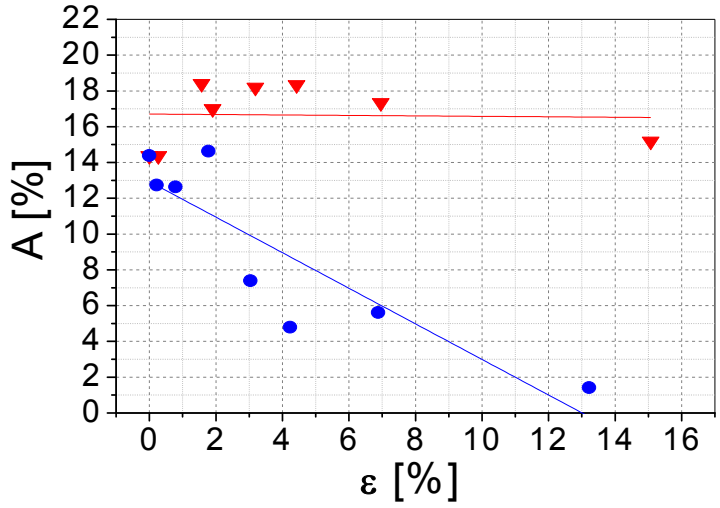
Rys. 6b. Umowna granica plastyczności badanej stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]

Fig. 6b. Yield point of the tested steel as a function of strain (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]



Rys. 6c. Wytrzymałość doraźna badanej stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]

Fig. 6c. Ultimate tensile stress of the tested steel as a function of strain (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]



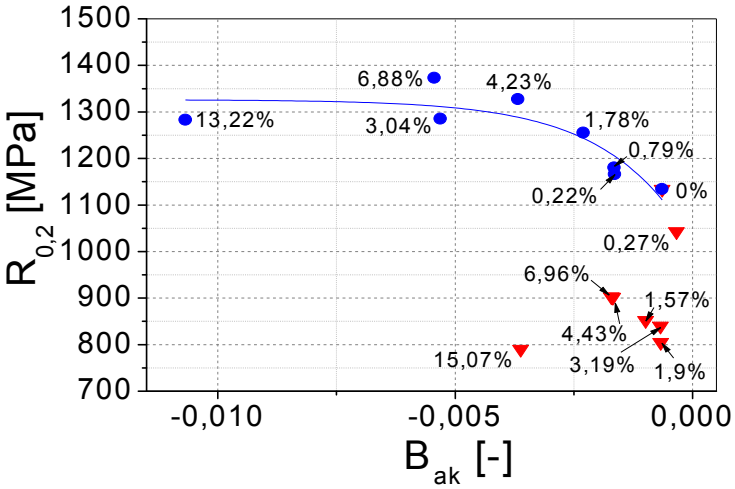
Rys. 6d. Wydłużenie względne badanej stali w funkcji odkształcenia trwałego (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]

Fig. 6d. Elongation of the tested steel as a function of strain (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]

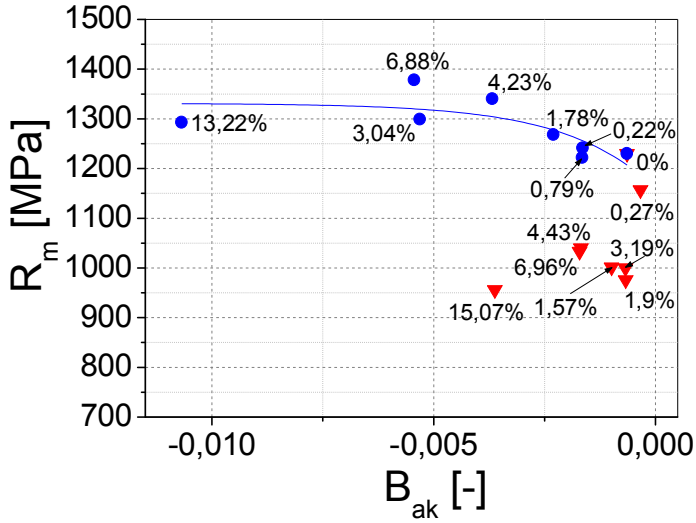
3.5. Związki między parametrami z technik niszczących i nieniszczących

Przeprowadzone badania pozwoliły zidentyfikować wzajemne związki między współczynnikiem dwójłomności akustycznej a umowną granicą plastyczności $R_{0,2}$ oraz granicą wytrzymałości doraźnej R_m (rys. 7a,b). Stwierdzono występowanie związków funkcyjnych pomiędzy współczynnikiem dwójłomności akustycznej a właściwościami mechanicznymi stali po deformacji plastycznej w temperaturze pokojowej. Niestety

takiego jednoznacznego związku nie daje się opracować dysponując wynikami dla stali po deformacji wskutek pełzania.



Rys. 7a. Związek między umowną granicą plastyczności a współczynnikiem dwójłomności akustycznej dla badanej stali (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]
Fig. 7a. The relationship between yield point and acoustic birefringence coefficient for the tested steel (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]



Rys. 7b. Związek między wytrzymałością doraźną a współczynnikiem dwójłomności akustycznej dla badanej stali (trójkąty – pełzanie, kółka – deformacja plastyczna na zimno) [13]
Fig. 7b. The relationship between ultimate tensile stress and acoustic birefringence coefficient for the tested steel (triangles – creep, circles – plastic deformation at room temperature) [13]

4. Wnioski

W artykule przedstawiono zmiany parametrów mechanicznych oraz ultradźwiękowych stali wysokowytrzymałej 40HNMA po wprowadzeniu deformacji w temperaturze pokojowej i podwyższonej.

Zaobserwowano, że zastosowane metody badawcze umożliwiają rozróżnienie rodzaju procesu odkształceniowego. Stwierdzono występowanie monotonicznej relacji między umowną granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie a współczynnikiem dwójłomności akustycznej. Zaobserwowano ponadto, że dwójłomność akustyczna jest bardziej wrażliwa na zmiany umownej granicy plastyczności niż wytrzymałości na rozciąganie przy niższych wartościach odkształcenia.

Analiza związków między parametrami z technik niszczących i nieniszczących dla innych stali może przyczynić się do opracowania nowej metody badawczej umożliwiającej w sposób bezinwazyjny szacowanie właściwości mechanicznych materiałów wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym.

LITERATURA

[1] Borowiecka-Wilczyńska A.: Badania penetracyjne. Repetytorium. Biuro Gamma, Warszawa, 2007

[2] Deputat J.: Własności i wykorzystanie zjawiska elastoakustycznego do pomiarów naprężeń własnych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa, 1987

[3] Egle D.M., Bray D.E.: Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, vol. 60, iss. 3, pp. 741-744

[4] Egle D.M., Bray D.E.: Application of acoustoelastic effect to rail stress measurement. Materials Evaluation, March 1979, vol. 37, no. 4, pp. 41-46

[5] Frost H.J., Ashby M.F.: Deformation-mechanism maps. The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics. Pergamon Press, Oxford, New York, Sydney, 1982

[6] Kowalczyk J., Jósko M.: Ocena rozrzutu jakości połączeń klejonych. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2011, t. 56, nr 2, 98-100

[7] Kowalewski Z.L., Szelążek J., Mackiewicz S., Augustyniak B.: Znaczenie interdyscyplinarności w badaniach stopnia zużycia stali energetycznych, XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13.03.2009

[8] Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszwa, 2001

[9] Mackiewicz S.: Pomiary parametrów akustycznych materiałów w badaniach stopnia degradacji struktury. Seminarium szkoleniowe „Rozwój zniszczenia materiałów i laserowe modyfikowanie materiałów". Zakopane, 10-13.12.2003, Materiały Konferencyjne „Badania Mechanicznych Właściwości Materiałów i Konstrukcji, tom I, str. 75-89, Lapromat, Warszawa, 2003

[10] Mackiewicz S.: Możliwości ultradźwiękowej oceny degradacji stali energetycznych w wyniku długotrwałej eksploatacji. Materiały Konferencyjne VII Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe „Diagnostyka i remonty długoeksploatowanych urządzeń energetycznych. Nowe problemy diagnostyczne na starych blokach energetycznych", Ustroń, 05-07.10.2005

[11] Mackiewicz S., Kowalewski Z.L., Szelążek J., Deputat J.: Badania mechaniczne i ultradźwiękowe stanu uszkodzenia materiałów wskutek procesu pełzania. Przegląd Mechaniczny, 2005, Zeszyt 7-8, str. 15-24

[12] Mackiewicz S.: Wykorzystanie zjawiska anizotropii akustycznej do oceny mikrouszkodzenia materiałów. Materiały Konferencyjne, 35-ta Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk, 2006

[13] Makowska K.: Metodyka oceny stanu uszkodzenia materiałów poddawanych laboratoryjnie symulowanym obciążeniom eksploatacyjnym. Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa, 2014

[14] Makowska K., Kowalewski Z.L.: Damage analysis of P91 steel subjected to different types of loading – advantages of non-destructive techniques. 5th International Symposium on Defect and Material Mechanics ISDMM11, Sevilla, 27.06-1.07.2011, pp. 18-19

[15] Makowska K., Kowalewski Z.L., Szelążek J., Mackiewicz S., Gutkiewicz P.: Assessment of material degradation by means of acoustic birefringence and elastoacoustic coefficient. 30th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Primosten, Croatia, 2013, September 25-28, no. 1, pp. 95-96

[16] Panetta P.D.: Characterization of plastic strain in pipelines. Report to the National Energy Technology Laboratory, 05 FE-63576.000, Project 42623, October 1, 2000 through October 2004

[17] Szelążek J.: Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń. Praca habilitacyjna. Prace IPPT PAN, nr 4, Warszawa, 2001

[18] Szelążek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z.L.: New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep. NDT & E International, 2009, vol. 42, iss. 2, pp. 150–156

[19] Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993