

---

**XIX Seminarium**  
**NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW**  
**Zakopane, 12-15marca 2013**

---

**ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA DEGRADACJI PEŁZANIOWEJ**  
**STALI STOSOWANYCH W ENERGETYCE**

Sławomir MACKIEWICZ

Jacek SZELAŻEK

Piotr GUTKIEWICZ

wszyscy IPPT PAN, Warszawa

[pgutkie@ippt.gov.pl](mailto:pgutkie@ippt.gov.pl), [smackiew@ippt.gov.pl](mailto:smackiew@ippt.gov.pl), [jszela@ippt.gov.pl](mailto:jszela@ippt.gov.pl)

## **1. WSTĘP**

Jednym z najbardziej kosztownych elementów elektrociepłowni są grubościennie, pracujące w wysokich temperaturach i pod ciśnieniem rurociągi parowe i wodne. Dlatego w przypadku starych elektrowni, które przepracowały zakładany przez kontraktora okres, bardzo ważne jest, z ekonomicznego punktu widzenia, posiadanie wiarygodnych danych o stanie tych rurociągów pozwalające na podjęcie prawidłowej decyzji o ich ewentualnej wymianie. W konwencjonalnej energetyce główną przyczyną degradacji materiałów jest długotrwała praca pod obciążeniem w podwyższonych temperaturach czyli zjawisko pełzania. Stopień narażenia poszczególnych elementów na uszkodzenia w wyniku pełzania jest silnie uzależniony od temperatury pracy oraz przenoszonych naprężeń i odporności materiału na pełzanie. Konwencjonalne techniki badań pozwalają na efektywne i stosunkowo pewne wykrywanie pęknięć, pojawiających się ostatniej fazie procesu pełzania. Możliwości nieniszczącej oceny degradacji materiału eksploatowanych urządzeń we wcześniejszych stadiach procesu pełzania są dużo bardziej ograniczone. Najlepiej rozwinięte i dopracowane są tutaj techniki metalograficzne takie jak przenośna mikroskopia optyczna czy metoda replik. Praktyczne wykorzystanie tych technik jest jednak ograniczone z uwagi na ich wysoką pracochłonność oraz możliwość oceny materiału jedynie na jego powierzchni. Aby w pełni wykorzystać potencjał diagnostyczny badań metalograficznych należałoby wspomóc je innymi technikami badań nieniszczących, pozwalającymi na szybsze przebadanie większych objętości materiału i wytypowanie do badań metalograficznych miejsc, w których materiał wykazuje określone symptomy degradacji.

Problem prawidłowego wytypowania miejsc do badań metalograficznych ma o tyle istotne znaczenie, że proces uszkodzenia materiału wskutek pełzania ma charakter lokalny. Nawet niewielkie różnice w stanie naprężeń i/lub temperatury różnych miejsc tej samej konstrukcji mogą prowadzić do dużego zróżnicowania stopnia zdegradowania mikrostruktury materiału. Przykładowo, materiał rurociągu parowego może ulegać przyspieszonej degradacji jedynie w okolicach łuków, trójkątów, niesprawnych zamocowań itp. miejsc, w których wystąpiły niekontrolowane przyrosty naprężeń związane z geometrią i rozkładem sił na rurociągu.

Spośród metod badań nieniszczących, które próbowano wykorzystać do oceny stopnia degradacji materiału wskutek pełzania największe perspektywy wydają się mieć metody magnetyczne [1,2] oraz ultradźwiękowe [3,4]. Analizując podstawy fizyczne obu grup technik można zauważyć, że techniki magnetyczne są bardziej nastawione na wykrywanie zmian związanych z przemianami fazowymi i strukturalnymi zachodzącymi w stali, zaś techniki ultradźwiękowe na wykrywanie uszkodzenia materiału rozumianego jako powstawanie w nim mikropustek, mikroszczelin i mikropęknięć stanowiących nieciągłości materiału w skali mikroskopowej.

W pracy skoncentrowano się na możliwościach oceny stopnia degradacji typowych stali energetycznych pracujących w warunkach pełzania za pomocą metod ultradźwiękowych.

## **2. DEGRADACJA STALI ENERGETYCZNYCH**

Analizując możliwości zastosowania metod ultradźwiękowych do oceny stopnia degradacji określonego materiału należy w pierwszym rzędzie zidentyfikować zmiany zachodzące w jego mikrostrukturze w procesie degradacji. Dopiero na tej podstawie można prawidłowo określić mechanizmy oddziaływania fali ultradźwiękowej, które mogą być wykorzystane do wykrywania i oceny degradacji materiału.

Opis zjawiska pełzania oraz zmian zachodzących w mikrostrukturze materiałów w trakcie tego procesu był przedmiotem licznych prac i monografii. Obszerny opis mechanizmów uszkodzenia występujących w materiałach metalowych w różnych warunkach obciążenia i temperatury przedstawiono np. w pracy [5]. Praca ta daje jednocześnie ogólne spojrzenie na całokształt zagadnień związanych z teoretycznym opisem i modelowaniem zjawisk związanych z mikrozniszczeniem materiałów. Podstawowym wnioskiem z przeprowadzonego przeglądu jest fakt znacznego zróżnicowania mechanizmów uszkodzenia materiału w zależności od temperatury, stanu naprężeń oraz szybkości odkształcenia. Ogólną prawidłowością charakterystyczną dla niemal wszystkich mechanizmów uszkodzenia materiałów jest jednak zjawisko tworzenia się mikropustek lub mikroszczelin stanowiących nieciągłości materiału w skali

mikroskopowej. Ich morfologia, umiejscowienie i sposób powstawania są jednak różne dla różnych warunków i mechanizmów uszkodzeń.

W dalszych rozważaniach ograniczymy się do scharakteryzowania procesów degradacji w niskostopowych stalach chromowo molibdenowych stosowanych w krajowej energetyce do budowy wysokoprężnych elementów kotłów oraz rurociągów parowych. Podstawą przedstawionego poniżej opisu są prace [6,7] zawierające, między innymi, szczegółowe obrazy metalograficzne kolejnych faz degradacji stali. Opisywane stale eksploatowane są w urządzeniach energetycznych przez długie okresy czasu w temperaturach dochodzących do 560<sup>0</sup>C przy stosunkowo niskich poziomach naprężeń nie przekraczających kilkudziesięciu MPa. Wskutek wieloletniej pracy w warunkach pełzania w mikrostrukturze tych stali występują dwa rodzaje zmian:

- zmiany o charakterze strukturalnym polegające na wydzielaniu i koagulacji węglików oraz faz międzymetalicznych na granicach ziaren
- zmiany o charakterze mikrouszkodzeń polegające na powstawaniu i rozroście mikropustek i mikroszczelin

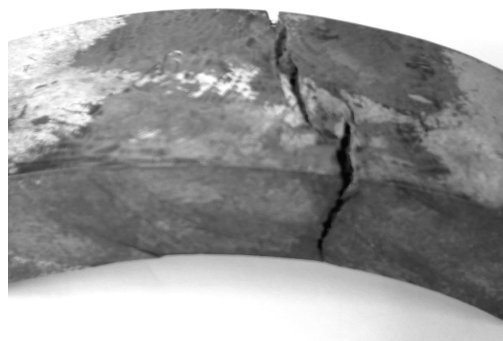
Oba rodzaje zmian zachodzą w materiale jednocześnie i mogą być ze sobą powiązane jednak w pewnym uproszczeniu można powiedzieć, że w II okresie pełzania najbardziej charakterystycznym objawem degradacji materiału są zmiany strukturalne, natomiast w III okresie dominującym czynnikiem stają się zmiany o charakterze mikrouszkodzeń prowadzące do rozwoju pęknięć i ostatecznego zniszczenia materiału.

Analizując wspomniane zmiany mikrostruktury materiału z punktu widzenia możliwości zastosowania do ich wykrywania technik ultradźwiękowych należy zauważyć, że wydzielenia węglików i faz międzymetalicznych stanowią mało znaczące zaburzenia jednorodności ośrodka dla fal ultradźwiękowych. Wynika to z faktu, że impedancja akustyczna węglików w niewielkim stopniu różni się od impedancji akustycznej otaczającego metalu. Również rozmiary wydzieleni są relatywnie małe w stosunku do rozmiarów podstawowej struktury niejednorodności ośrodka tj. rozmiarów ziaren. Parametry propagacji fal ultradźwiękowych będą więc, z zasady, mało czułe na występowanie w mikrostrukturze materiału tego rodzaju niejednorodności.

Proces mikrouszkodzenia stali w trakcie pełzania rozpoczyna się od powstawania pojedynczych mikropustek na granicach ziaren. Pustki te lokują się najczęściej na granicach ziaren zorientowanych pod kątem 90<sup>0</sup> lub 45<sup>0</sup> w stosunku do maksymalnych naprężeń rozciągających. W kolejnym etapie następuje zarówno pojawianie się nowych pustek jak też rozrost pustek istniejących. W rozważanym tutaj wariantcie długookresowego pełzania przy niskich poziomach naprężeń rozrost pustek wiąże się zazwyczaj z mechanizmem dyfuzyjnego transportu materiału po

powierzchni pustek oraz wzdłuż granic ziaren materiału [8,9]. W wyniku tego procesu na granicach ziaren formują się łańcuchy pustek. W następnym etapie następuje łączenie się pustek w ciągłe szczeliny obejmujące początkowo pojedyncze granice ziaren a następnie całe grupy przylegających granic. Powstałe w ten sposób mikropęknięcia stanowią zarodki pęknięć makroskopowych, które rozwijając się prowadzą do ostatecznego zniszczenia materiału. Zgodnie z klasyfikacją stopnia uszkodzenia niskostopowych stali Cr-Mo podaną w pracy [6] decydujący etap powstawania mikropęknięć rozpoczyna się przy ok. 80% wyczerpaniu czasu eksploatacji materiału do zniszczenia. Na rysunku 1 pokazano stan materiału w końcowym stadium uszkodzenia. Widoczne są liczne, łączące się częściowo ze sobą mikropęknięcia przechodzące przez całą grubość ścianki rury.

Rozpatrując opisane wyżej zmiany z punktu widzenia ich wpływu na propagację fal ultradźwiękowych należy zauważyć, że mikropustki i mikroszczeliny wypełnione są gazem mającym impedancję akustyczną o kilka rzędów wielkości mniejszą od otaczającej je metalowej matrycy. Oznacza to, że nawet przy stosunkowo niewielkich rozmiarach, będą one stanowić dla fali ultradźwiękowej znacznie większą przeszkodę niż wydzielenia węglików i faz międzymetalicznych. Bardzo istotnym czynnikiem jest także kształt i orientacja powstałych mikropustek. Przy tej samej całkowitej objętości, pustki w kształcie płaskich mikroszczelin będą prowadziły do znacznie większego obniżenia modułów sprężystości materiału niż pustki o kształcie kulistym. Ukierunkowana orientacja mikroszczelin będzie z kolei prowadzić do wytworzenia się w materiale anizotropii akustycznej objawiającej się różnymi wartościami prędkości fal ultradźwiękowych w zależności od kierunku ich propagacji oraz polaryzacji.



Rys. 1. Uszkodzenia materiału powstałe w wyniku pełzania.

Opisane powyżej objawy degradacji materiału dotyczą zmian obserwowanych na poziomie mikroskopowym w skali rzędu mikrometrów. W trakcie procesu pełzania w materiale zachodzą również zmiany w skali atomowej. Są one związane z generacją defektów punktowych sieci

krystalicznej, zwiększaniem gęstości dyslokacji, zmianami w strukturze domen magnetycznych itp. Zmiany na poziomie atomowym nie mogą być jednak efektywnie wykrywane i oceniane rozpatrywanymi tutaj metodami ultradźwiękowymi. Podstawową tego przyczyną jest niejednorodność struktury i składu chemicznego badanych materiałów na poziomie mikroskopowym. Powoduje ona, że statystyczny rozrzut mierzonych parametrów ultradźwiękowych jest znacznie większy niż ewentualny wpływ zmian na poziomie atomowym. Efekty zmian w ilości defektów punktowych czy gęstości dyslokacji mogą być mierzalne technikami ultradźwiękowymi jedynie w wyjątkowych przypadkach na specjalnie przygotowanych próbkach laboratoryjnych wykonanych z czystych metali. Do oceny defektów struktury metali na poziomie atomowym znacznie lepiej nadają się techniki magnetyczne lub specjalne metody fizyczne polegające np. na pomiarach czasu życia wprowadzanych do materiału pozytronów [10]. Aktualny stan badań różnymi metodami nieniszczącymi procesu pełzania stali stosowanych w energetyce opisany jest w pracy [11].

### **3. PODSTAWOWE TECHNIKI BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH**

Techniki znane z defektoskopii ultradźwiękowej wykorzystują najczęściej zjawisko odbicia fal ultradźwiękowych od nieciągłości materiału. Aby były one skuteczne rozmiary wykrywanych nieciągłości muszą być przynajmniej porównywalne z długością stosowanych fal ultradźwiękowych. W praktyce oznacza to, że kres wykrywalności standardowych technik ultradźwiękowych w typowych materiałach metalowych wynosi ok. 0,5 mm. Badania skutków pełzania polegające na wykrywaniu małych nieciągłości powstających w wyniku pełzania są opisane w literaturze. Na przykład w [12] opisano układ do wykrywania nieciągłości powstających w wyniku pełzania w strefie wpływu ciepła spoiny grubościennnej przy wykorzystaniu ultradźwiękowej głowicy wieloelementowej i zogniskowanej wiązki fal. Układ pomiarowy pozwalał na podstawie ilości wskazań i ich nasilenie na monitorowanie zmian w stanie materiału a wyniki zweryfikowano porównując je z rezultatami badań metalograficznych.

Badania degradacji mikrostruktury materiałów, w których charakterystyczne rozmiary nieciągłości są rzędu mikrometrów, muszą jednak bazować na innych podstawach fizycznych wykorzystujących uśredniony wpływ dużej liczby mikrodefektów na mierzalne makroskopowo parametry ultradźwiękowe.

#### **3.1. Pomiary współczynnika tłumienia**

Jednym z pierwszych efektów jakie starano się wykorzystać do ultradźwiękowej oceny degradacji materiałów była zależność współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych od określonych cech mikrostruktury. Podstawą do wykorzystania tego typu zależności jest znajomość

mechanizmów tłumienia fal ultradźwiękowych, które mają znaczenie w danym materiale.

W przypadku stali, która jest niejednorodnym materiałem polikrystalicznym, podstawowym źródłem tłumienia fal ultradźwiękowych jest rozpraszanie na granicach ziaren oraz innych niejednorodności. Ponieważ długość stosowanych fal ultradźwiękowych jest z reguły dużo większa od średnich rozmiarów ziaren rozpraszanie ma charakter długofalowego rozpraszania Rayleigha, dla którego współczynnik tłumienia jest proporcjonalny do 4-tej potęgi częstotliwości. Dokładny wzór na składową rozproszeniową współczynnika tłumienia fal podłużnych w ośrodku polikrystalicznym ma postać:

$$\alpha_L = \frac{8\pi^3 A^2 T}{375 \rho^2 V_L^3} \left( \frac{2}{V_L^5} + \frac{2}{V_T^5} \right) f^4 \quad (1)$$

gdzie:  $A = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$  - współczynnik anizotropii pojedynczego ziarna,  
 $c_{11}, c_{12}, c_{44}$  - stałe sprężystości dla pojedynczego ziarna  
 $T$  - średnia objętość ziaren w strukturze polikryształu,  
 $V_L, V_T$  - prędkość fali podłużnej i poprzecznej w polikryształach,  
 $\rho$  - gęstość masy  
 $f$  - częstotliwość fali ultradźwiękowej.

Podany wzór pokazuje szereg ogólnych zależności między mikrostrukturą materiału a rozproszeniową składową współczynnika tłumienia. Podstawowymi parametrami mikrostruktury, które wpływają na wartość tłumienia są: średnia objętość ziaren -  $T$  oraz współczynnik anizotropii sprężystej ziaren -  $A$ . Ponieważ objętość ziarna jest proporcjonalna do 3 potęgi jego średnicy współczynnik tłumienia jest parametrem bardzo czułym na wielkość ziaren. Oznacza to, że nawet niewielkie lokalne różnice w średniej wielkości ziaren mogą prowadzić do znacznych fluktuacji wartości współczynnika tłumienia w danym materiale. Z drugiej strony oznacza to, że drobne centra rozpraszające (wydzielenia węglików, pojedyncze mikropustki) będą miały niewielki wpływ na wielkość rozproszeniowej składowej współczynnika tłumienia.

Ważne znaczenie ma też współczynnik anizotropii ziaren -  $A$ . W przypadku stali współczynnik anizotropii silnie zależy od rodzaju mikrostruktury. Największą anizotropią i największym tłumieniem odznaczają się struktury ferrytyczno-perlityczne, pośrednią bainityczne, zaś najmniejszą martenzytyczne. Różnice w wartościach współczynnika tłumienia dla podstawowych struktur stali mogą być bardzo duże nawet w przypadku gdy skład chemiczny oraz wyjściowy rozmiar ziarna w temperaturze przemiany austenitycznej jest jednakowy. Z danych

przedstawionych w pracy [13] wynika, że współczynnik tłumienia fali podłużnej o częstotliwości 20 MHz wynosił w próbce o strukturze perlityczno-ferrytycznej ok. 2 dB/cm, podczas gdy w próbkach o strukturze martenzytycznej (surowej oraz odpuszczanej) spadał poniżej 0,1 dB/cm.

W rozpatrywanym przypadku degradacji niskostopowych stali Cr-Mo skala zmian mikrostruktury jest, z punktu widzenia rozpraszania ultradźwiękowego, stosunkowo niewielka przez większą część czasu pełzania. Drobne wydzielения węglików oraz pojedyncze pustki na granicach ziaren nie mogą w istotny sposób wpłynąć na wielkość współczynnika tłumienia. Dopiero powstanie i rozwój większej liczby mikropęknięć obejmujących obszary porównywalne z rozmiarami ziaren może prowadzić do wyraźnych zmian współczynnika tłumienia. Oznacza to, że pomiar tłumienia fal ultradźwiękowych może być wykorzystany do wykrywania degradacji materiału dopiero w ostatniej fazie procesu pełzania.

Pomiary współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych lub wielkości pochodnych próbowano wykorzystywać do diagnozowania stopnia degradacji stali energetycznych zarówno w Polsce [14] jak i zagranicą [15,16]. Metody oparte na pomiarach tłumienia fal ultradźwiękowych nie zostały jednak upowszechnione na szerszą skalę z uwagi na dwa fundamentalne ograniczenia.

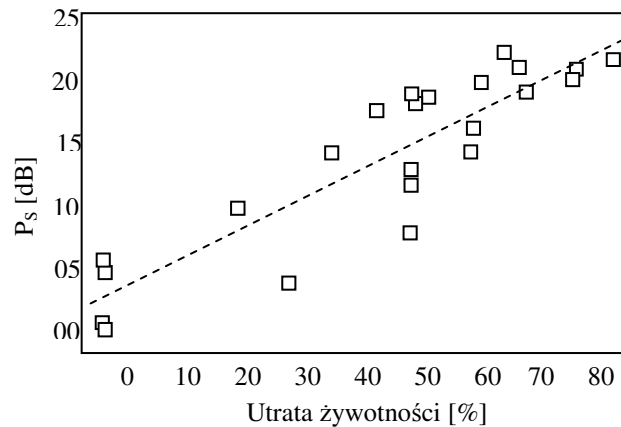
1) Pomimo tego, że współczynnik tłumienia wzrasta w ostatniej fazie procesu pełzania to jednak istnieje kilka innych, niezwiązanych z degradacją materiału, czynników mogących prowadzić do porównywalnego wzrostu mierzonych wartości tłumienia. Przyczyną tego mogą być naturalne niejednorodności w strukturze metalograficznej materiału, rozrost wielkości ziaren lub też obecność drobnych wad materiałowych powstałych jeszcze w fazie produkcyjnej.

2) Dokładność pomiarów współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w warunkach przemysłowych jest bardzo niska. Wynika to z szeregu trudnych do wyeliminowania czynników takich jak stan powierzchni badanego materiału w miejscu pomiaru (zarówno zewnętrznej jak i wewnętrznej), niepłaskorównoległość ścianek obiektu, zakrzywiona geometria itp. Szczegółową analizę czynników wpływających na dokładność technicznych pomiarów współczynnika tłumienia przeprowadzono w pracy [4].

Z przedstawionych wyżej powodów najbardziej efektywnym sposobem wykorzystania pomiarów tłumienia fal ultradźwiękowych do oceny stopnia degradacji materiału eksploatowanych urządzeń jest sukcesywne powtarzanie badań w tych samych punktach pomiarowych i obserwowanie zachodzących zmian. W ten sposób możliwe jest wyeliminowanie większości czynników zakłócających takich jak niejednorodność własności materiału czy geometria obiektu. Jednak nawet wówczas należy się liczyć z możliwością błędów pomiarowych np. spowodowanych postępującą korozją wewnętrzną ścianki obiektu, która

może powodować spadek ultradźwiękowego echa dna nie mający żadnego związku z degradacją mikrostruktury materiału.

Innym podejściem do oceny stanu materiału na podstawie oceny rozpraszania fal jest pomiar rozproszenia wstecznego. W pomiarach rozproszenia prowadzonych głowicami kątowymi można wyeliminować odbicie fal od przeciwległej powierzchni rury ograniczając tym samym wpływ zmian chropowatości tej powierzchni na wyniki. Badanie prowadzone falami o wysokich częstotliwościach wymaga jednak starannego przygotowania powierzchni materiału w celu zapewnienia poprawnego sprzężenia akustycznego. Paca [17] opisuje wyniki badania rozproszenia fal o częstotliwości 15MHz na próbkach ze stali 9Cr-1Mo poddanych przyspieszonemu pełzaniu. Sygnały rozproszone były poddane analizie spektralnej a dla wybranych częstotliwości otrzymano korelację poziomu szumów z czasem pełzania. Wyniki pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność poziomu szumów strukturalnych  $P_s$  od stopnia uszkodzenia stali 9Cr-1Mo w wyniku pełzania (z pracy [17]).

Autorzy pracy sygnalizują, że opracowana przez nich metoda może być wykorzystana jedynie do monitorowania materiałów, które wykazują niski stopień rozproszenia w stanie wyjściowym. Podobnie jak pomiary tłumienia fal metoda polegająca na pomiarze amplitudy szumów akustycznych jest również czuła na zmiany sprzężenia akustycznego czy nierówności powierzchni.

### 3.2. Pomiary prędkości fal ultradźwiękowych

Drugim, poza tłumieniem, mierzalnym parametrem ultradźwiękowym jest prędkość propagacji fal. Badania mające na celu poszukiwanie korelacji prędkość – degradacja pełzaniowa opisane są w licznych pracach [18,10,15,19]. Podstawową zaletą takiego podejścia jest fakt, że pomiar czasu



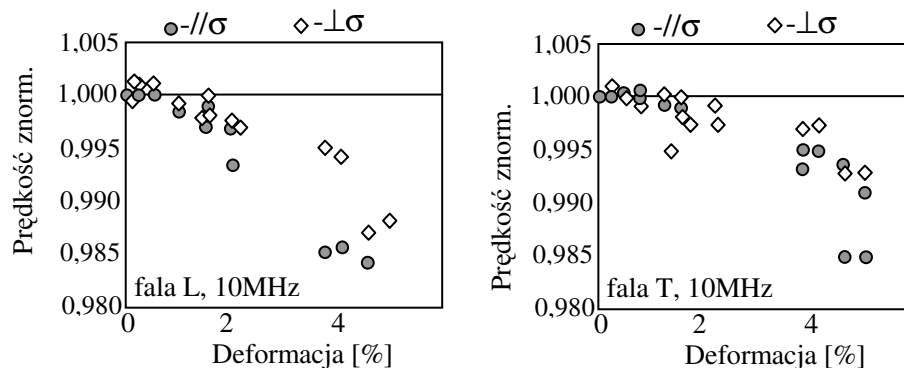
przejścia (a w konsekwencji także prędkości) fal ultradźwiękowych może być przeprowadzony, ze znacznie wyższą dokładnością niż pomiar współczynnika tłumienia. Prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w ośrodku sprężystym uzależniona jest od jego modułów sprężystości oraz gęstości masy. W przypadku materiałów izotropowych prędkość fal podłużnych i poprzecznych dana jest wzorami:

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

gdzie:  $C_L$ ,  $C_T$  – odpowiednio prędkości fali podłużnej i poprzecznej,  
 $E$  - moduł Younga,  
 $\nu$  - stała Poissona,  
 $\rho$  - gęstość masy.

Obecność mikropustek i mikroszczelin związanych z procesem degradacji materiału podczas pełzania wpływa w oczywisty sposób zarówno na gęstość masy jak też na wartość stałych sprężystości materiału. Również zmiany strukturalne zachodzące w procesie pełzania mogą, choć w mniejszym stopniu, wpływać na stałe sprężystości i gęstość materiału. Oznacza to, że prędkość fali ultradźwiękowej może być parametrem czułym na zmiany zachodzące w mikrostrukturze materiału podczas pełzania.

Obszerne badania mające na celu zweryfikowanie tego rodzaju zależności dla typowych stali energetycznych opisano w pracy [18]. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące względne zmiany prędkości fal podłużnych i poprzecznych w stali 14MoV63 w funkcji odkształcenia pełzania.



Rys. 3. Względne zmiany prędkości fal ultradźwiękowych w stali 14MoV63 w funkcji odkształcenia pełzania. Próby pełzania prowadzono w temp. 550<sup>0</sup>C (z pracy [18]).

Próby pełzania prowadzone były, w tym przypadku, przy jednoosiowych naprężeniach rozciągających 145 MPa oraz 160 MPa w temperaturze 550<sup>0</sup>C. Zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano spadki prędkości fal podłużnych i poprzecznych wraz ze wzrostem odkształcenia pełzania.

Analizując przedstawione powyżej dane należy zauważyć, że spadki prędkości fal zaczynają być wyraźnie widoczne dopiero przy odkształceniach pełzania przewyższających 2% (czyli w przypadku rur przy deformacjach mierzalnych prostymi pomiarami śruba mikrometryczną). Dodatkowo, przy tej wartości odkształcenia, zaczynają różnicować się prędkości fal podłużnych rozchodzących się w kierunku równoległym oraz prostopadłym do kierunku odkształcenia pełzania a także prędkości fal poprzecznych spolaryzowanych równoległe oraz prostopadle do tego kierunku. Prowadzi to do wniosku, że przy odkształceniach pełzania wynoszących (w tym przypadku) ok. 2% mogą zaczynać tworzyć się w materiale ukierunkowane mikroszczeliny prowadzące zarówno do obniżenia modułów sprężystości materiału jak też pojawienia się w nim wyraźnej anizotropii akustycznej. Analiza kierunków, w których prędkości fal ulegają większemu obniżeniu wskazuje, że powstające w materiale szczeliny muszą być ukierunkowane prostopadle do kierunku działającego naprężenia. Jest to zgodne z wnioskami wynikającymi z analizy obrazów metalograficznych poddanych pełzaniu próbek.

W dotychczasowych badaniach główny nacisk kładziony był na analizę zmian prędkości określonego rodzaju fal ultradźwiękowych w funkcji odkształcenia pełzania. Z publikowanych wyników badań wynika, że obserwowane zmiany prędkości są stosunkowo niewielkie i w końcowej fazie procesu pełzania nie przekraczają 2% - 3%. Takie różnice prędkości fal ultradźwiękowych mogą być bez większych problemów określane podczas badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach materiałów. W przypadku badań na eksploatowanych urządzeniach przemysłowych, przy pomiarach przez grubość metodą echa, która wydaje się najprostszą i uśrednia na grubości, poważnym problemem staje się jednak pomiar rzeczywistej grubości badanego materiału (np. grubości ścianki rurociągu), który, obok pomiaru czasu przejścia, niezbędny jest do wyznaczenia prędkości fali ultradźwiękowej. Należy podkreślić, że w tym przypadku musi to być dokładny pomiar mechaniczny nie zaś ultradźwiękowy.

Drugim problemem związanym z praktycznym wykorzystaniem zależności prędkości fali ultradźwiękowej od stopnia degradacji materiału może być, podobnie jak w przypadku tłumienia, naturalny rozrzut wartości prędkości związany z niejednorodnością produkcyjną badanego materiału. W przypadku prędkości fali statystyczny rozrzut wartości tego parametru jest jednak relatywnie mniejszy niż w przypadku współczynnika tłumienia. Wynika to z faktu, że moduły sprężystości materiału są znacznie mniej czułe na zmiany mikrostruktury materiału niż współczynnik tłumienia.

W roku 1999 w ramach europejskiego programu Euroatom Research Framework Programme „Aging Material Evaluation and Studies by Non-destructive Techniques AMES\_NDT” [20] przeprowadzono wszechstronne badania zestawu próbek stalowych poddanych obróbce cieplnej imitującej utratę wytrzymałości w wyniku różnych procesów degradacji zachodzących podczas pracy reaktora energetycznego (napromieniowanie, zmęczenie oraz pełzanie). W badaniach brało udział 11 laboratoriów europejskich stosujących różne techniki badawcze a głównym ich celem było określenie przydatności poszczególnych technik badań nieniszczących do diagnozowania stopnia degradacji materiałów. W odniesieniu do ultradźwiękowych technik oceny stopnia degradacji stali wskutek pełzania autorzy przedstawili następujące wnioski:

- potwierdzono silną zależność współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych od wielkości ziarna materiału (znaną i stosowaną do oceny wielkości ziarna)
- potwierdzono wysoką czułość współczynnika tłumienia na degradację stali w wyniku pełzania, wskazując jednocześnie na poważne trudności w praktycznym wykorzystaniu tej zależności
- stwierdzono, że zmiany prędkości fal ultradźwiękowych w wyniku pełzania są małe (< 1%) i trudne do praktycznego wykorzystania z uwagi na trudności pomiarowe.

Generalnie metody ultradźwiękowe oceniono krytycznie stwierdzając, że nie ma techniki pozwalającej na jednoznaczną ocenę stopnia uszkodzenia materiału, szczególnie w początkowych stadiach tego procesu i przy częstym braku danych początkowych.

#### **4. NOWE TECHNIKI ULTRADŹWIĘKOWE**

Pomimo stosunkowo krytycznej oceny dotychczasowych możliwości ultradźwiękowych technik badania stopnia degradacji materiałów wskutek pełzania nadal podejmowane są próby znalezienia bardziej skutecznych technik ultradźwiękowych. Istotną motywacją jest tutaj fakt, że metody ultradźwiękowe są stosunkowo szybkie, tanie i łatwe do zastosowania w warunkach przemysłowych. Dotychczasowe doświadczenia wskazują również, że parametry ultradźwiękowe są czułe na uszkodzenie materiału w ostatnich fazach procesu pełzania, problemem jest jednak ich dokładny pomiar w warunkach przemysłowych oraz trudności z odseparowaniem wpływu czynników ubocznych.

Poszukiwane są parametry, które będą bardziej czułe na zmiany wywołane degradacją i jednocześnie mniej wrażliwe na czynniki uboczne związane z naturalną niejednorodnością materiału, drobnymi wadami

produkcyjnymi itp. Prace badawcze prowadzone są głównie w dwóch kierunkach:

- a) wykorzystania nieliniowości sprężystej materiału poprzez pomiary jego parametrów nieliniowych lub współczynników elastoakustycznych,
- b) wykorzystania anizotropii akustycznej materiału powstającej w procesie jego degradacji.

Nieliniowość sprężysta materiału objawia się jako odchyłka od prawa Hooke'a, które mówi, że odkształcenie materiału jest wprost proporcjonalne do przyłożonego naprężenia. W rzeczywistych materiałach zależność ta nie jest idealnie liniowa a konsekwencją tego faktu w badaniach ultradźwiękowych jest to, że w czasie propagacji fali ultradźwiękowej powstają składowe drgań o wyższych częstotliwościach – wyższe harmoniczne. Pomiar ich amplitud pozwala na wyznaczenie parametru nieliniowości  $B$  opisanego równaniem:

$$B = \frac{8 A_2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \times A_1^2} \quad (3)$$

gdzie:  $A_1, A_2$  – amplitudy podstawowa i drugiej harmonicznej odpowiednio,  
 $\lambda$  – długość fali ultradźwiękowej,  
 $x$  – długość drogi przebytej przez falę.

W pracy [23] opisano badania zmian wartości parametru  $B$  w próbkach ze stali chromowo-molibdenowej poddanych sztucznemu starzeniu termicznemu wywołującemu zmiany mikrostruktury podobne do zmian zachodzących w procesie pełzania. Rysunek 4 pokazuje zależność parametru  $B$  i, dla porównania, amplitudy sygnału o podstawowej częstotliwości, od czasu starzenia. Widoczny jest wyraźny wzrost wartości parametru  $B$  świadczący o potencjalnej możliwości wykorzystania zmian własności nieliniowych do oceny stopnia degradacji materiału.

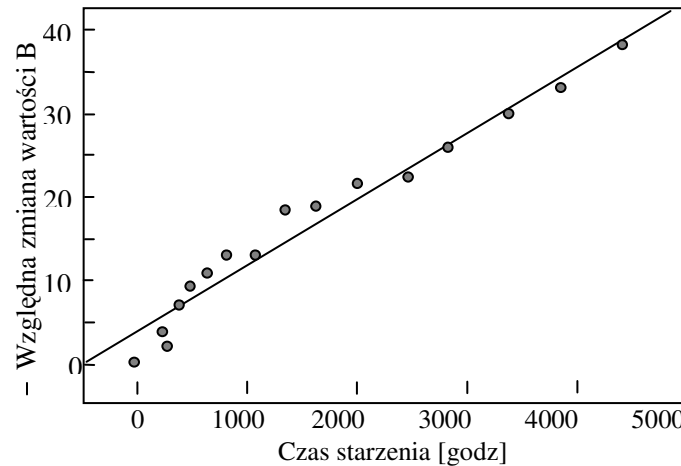
Pomiary parametru  $B$  wymagają jednak specjalnej, czulej aparatury i na razie nie są jeszcze znane podobne badania prowadzone w warunkach przemysłowych, na rzeczywistych elementach w elektrowniach.

Inną konsekwencją nieliniowości materiału jest zjawisko elastoakustycznej czyli zależność prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia [21].

Względna zmiana prędkości fali jest proporcjonalna do przyłożonego naprężenia i zależna od wartości współczynnika elastoakustycznego:

$$\frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = \beta \sigma \quad (4)$$

gdzie:  $V_0$  – prędkość fali w stanie początkowym,  
 $V_\sigma$  – prędkość fali po przyłożeniu naprężenia,  
 $\beta$  - współczynnik proporcjonalności zwany stałą elastoakustyczną,  
 $\sigma$  - naprężenie.



Rys. 4. Względne zmiany parametru  $B$  pokazuje zależność parametru  $i$ , dla porównania, amplitudy sygnału o podstawowej częstotliwości, od czasu starzenia (z pracy [23]).

Wartość stałej elastoakustycznej danego materiału zależy od stanu jego mikrostruktury a więc może reagować również na zmiany spowodowane pęczaniem. Wstępne wyniki badań [22], przeprowadzonych z konieczności na małych próbkach o krótkiej bazie pomiarowej, nie potwierdziły jednoznacznie, że jest to parametr bardziej czuły na degradację materiału niż np. prędkość fal ultradźwiękowych. Również same pomiary stałych elastoakustycznych, w warunkach przemysłowych, są trudne do wykonania i w praktyce możliwe jedynie podczas prób ciśnieniowych diagnozowanych urządzeń. W chwili obecnej ten kierunek badań ma znaczenie bardziej poznawcze a ewentualne wdrożenie wyników badań do praktyki jest sprawą dalszej przyszłości. W pracy [24] podany jest przegląd różnych technik ultradźwiękowych stosowanych w badaniach nieliniowych własności materiałów konstrukcyjnych.

Znacznie bliższe są perspektywy praktycznego wykorzystania wyników badań dotyczących zmian anizotropii akustycznej materiału w trakcie rozwoju uszkodzeń mikrostruktury spowodowanych pęczaniem. Jak już wspomniano wyniki badań zmian prędkości fal ultradźwiękowych w funkcji odkształcenia pęczania (patrz np. rys.3) wskazują, że spadek prędkości fal poprzecznych propagujących się prostopadłe do kierunku naprężenia pęczania zależy od kierunku ich polaryzacji (czyli kierunku drgań cząstek ośrodka). Prędkość fal o polaryzacji równoległej do kierunku

naprężenia pełzania maleje szybciej niż prędkość fal o polaryzacji prostopadłej. Oznacza to, że degradacja mikrostruktury materiału w trakcie pełzania musi mieć charakter ukierunkowany co faktycznie ma miejsce zgodnie z opisem zmian mikrostruktury podanym w punkcie 2. W uproszczeniu można powiedzieć, że fala ultradźwiękowa, w której kierunek drgań cząstek ośrodka jest prostopadły do powierzchni mikropęknięć „odczuwa” ich obecność bardziej niż fala, w której cząstki ośrodka drgają równoległe do powierzchni mikropęknięć.

Jak wynika z analizy literatury efekt zmian anizotropii akustycznej materiału w trakcie procesu pełzania nie był dotychczas wykorzystywany do oceny stopnia uszkodzenia materiału. Stąd też podjęto prace w celu dokładniejszego przebadania tego zagadnienia i określenia możliwości wykorzystania tego efektu do diagnozowania stopnia uszkodzenia mikrostruktury materiałów.

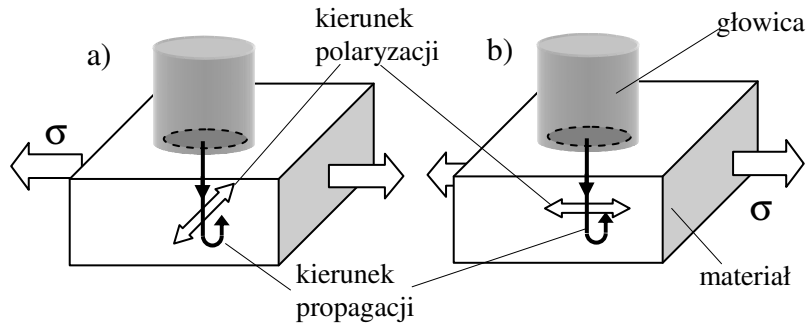
Anizotropia akustyczna materiału przejawia się w różnicach prędkości fal ultradźwiękowych propagujących się w różnych kierunkach bądź też o różnych polaryzacjach. Parametrami charakteryzującymi anizotropię materiału mogą być różnego typu stosunki prędkości fal. Przykładowo parametrem pomiarowym może być np. względna różnica prędkości fal podłużnych propagujących się równoległe oraz prostopadłe do kierunku naprężeń. Pomiar taki jest możliwy do realizacji np. za pomocą przeciwsobnego układu głowic fal podpowierzchniowych przykładanych do powierzchni obiektu w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Jednak w wielu przypadkach nierówna, często zakrzywiona powierzchnia obiektów prowadziłyby do trudności w uzyskaniu odpowiednio wysokiej dokładności pomiarów dokonywanych w różnych kierunkach. Znacznie lepszym parametrem pomiarowym jest tzw. dwójłomność akustyczna, czyli względna różnica prędkości dwóch fal poprzecznych propagujących się w tym samym kierunku ale mających różne, wzajemnie prostopadłe polaryzacje. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej przedstawiono na rys. 5.

Dwójłomność akustyczna  $D$  jest w tym przypadku zdefiniowana wzorem:

$$D = 2 \frac{V_{Tp} - V_{Tr}}{V_{Tp} + V_{Tr}} \quad (5)$$

gdzie:  $V_{Tp}$ ,  $V_{Tr}$  - prędkości fali poprzecznej spolaryzowanej odpowiednio prostopadłe i równoległe do kierunku maksymalnych naprężeń rozciągających.

Wykorzystując fakt, że w obu przypadkach pomiar prędkości odbywa się na tej samej bazie pomiarowej (tj. na tej samej grubości materiału) wzór ten można przekształcić do postaci:



Rys. 5. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej materiału poddanego w eksploatacji obciążeniom rozciągającym w kierunku  $\sigma$ ,  
 a) pomiar czasu przejścia fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadle do kierunku naprężenia,  
 b) spolaryzowanej równoległe do kierunku naprężenia.

$$D = 2 \frac{t_{Tr} - t_p}{t_{Tp} + t_{Tr}} \quad (6)$$

gdzie:  $t_{Tp}$ ,  $t_{Tr}$  – odpowiednio czasy przejścia przez grubość materiału fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadle oraz równoległe do kierunku maksymalnych naprężeń.

Dzięki powyższemu przekształceniu dwójłomność akustyczna może być wyznaczana wyłącznie na podstawie mierzonych ultradźwiękowo czasów przejścia, bez konieczności wyznaczania grubości materiału. Jest to bardzo istotna korzyść w przypadku badań prowadzonych na obiektach przemysłowych gdzie wykonanie dokładnego (mechanicznego) pomiaru grubości materiału jest zazwyczaj niemożliwe. Jest to jednocześnie zasadnicza przewaga tej techniki nad technikami opartymi na pomiarach prędkości fal ultradźwiękowych, przy których znajomość dokładnej grubości materiału jest niezbędna.

Ponieważ obu pomiarów czasu przejścia fal poprzecznych dokonuje się w tym samym miejscu i tą samą głowicą (jedynie obróconą wokół osi o  $90^0$ ) wiązka ultradźwiękowa za każdym razem penetruje tą samą objętość materiału i odbija się od tego samego obszaru powierzchni przeciwległej. Dzięki temu wynik pomiaru nie jest obarczony błędami wynikającymi z niejednorodności materiału czy też braku równoległości jego powierzchni. Jedyną istotną różnicą między warunkami pomiaru obu czasów przejścia jest kierunek polaryzacji fali. Fakt ten ma kluczowe znaczenie w przypadku pomiarów dokonywanych na rzeczywistych obiektach gdzie zarówno

niejednorodność materiału jak też niedoskonałości powierzchni (chropowatość, falistość, nierównoległość) są rzeczą naturalną i praktycznie niemożliwą do wyeliminowania. Jest to istotna przewaga techniki pomiarów dwójłomności akustycznej w stosunku do klasycznych pomiarów zarówno prędkości jak i tłumienia fal ultradźwiękowych, które są bardzo czułe na wspomniane czynniki uboczne.

W ramach badań przeprowadzonych w IPPT PAN pomiary dwójłomności akustycznej wykonano na dwóch zestawach próbek wykonanych ze stali ASTM A336 GR5 oraz 40HNMA poddanych próbom pełzania w warunkach jednoosiowego rozciągania. Szczegółowe warunki i parametry prób pełzania opisano w pracy [25]. Jednym z etapów badań były pomiary dwójłomności akustycznej w częściach pomiarowych (poddanych pełzaniu) oraz uchwytowych (poddanych jedynie działaniu temperatury) próbek łopatkowych. Pomiary w części uchwytovej próbek wykonywane były jako pomiary odniesienia dla uwidocznienia naturalnego rozrzutu początkowych wartości dwójłomności akustycznej w różnych próbkach wykonanych z tego samego materiału.

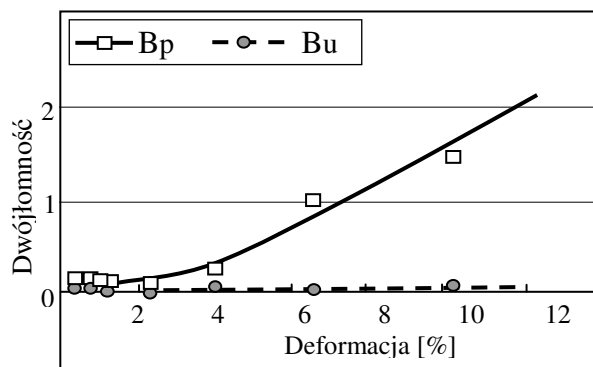
Wyniki pomiarów serii próbek ze stali A336 GR5 [22] wykazały istotny wzrost wartości dwójłomności akustycznej materiału w zaawansowanych stadiach procesu pełzania. Dla próbki o deformacji pełzania 7% maksymalna dwójłomność w części pomiarowej wyniosła 0,77%. Dla porównania wartości dwójłomności mierzone w częściach uchwytowych próbek leżały znacznie poniżej 0,1%.

Pomiary dwójłomności powtórzono na większej serii próbek wykonanych ze stali 40HNMA. W tym przypadku próby pełzania prowadzono przy jednoosiowych naprężeniach rozciągających  $\sigma = 250$  MPa w temperaturze  $T = 773$  K (5000C). W porównaniu do poprzedniej serii prób naprężenia były niższe a czasy pełzania dłuższe, dochodzące do 1000 godzin. Warunki pełzania w drugiej serii prób były więc nieco bliższe rzeczywistych warunków pracy materiału w urządzeniach energetycznych.

Na rys. 7 pokazano zależność dwójłomności akustycznej  $D$  od deformacji pełzania dla próbek wykonanych ze stali 40HNMA. Pomiary wykonane były głowicą normalną fal poprzecznych o częstotliwości 5 MHz. Począwszy od deformacji wynoszącej ok. 4% dwójłomność wyraźnie narasta w funkcji odkształcenia. Porównując wartości dwójłomności mierzone w częściach pomiarowych i uchwytowych próbek widać, że zmiana wartości dwójłomności jest ściśle zdeterminowana procesem pełzania.

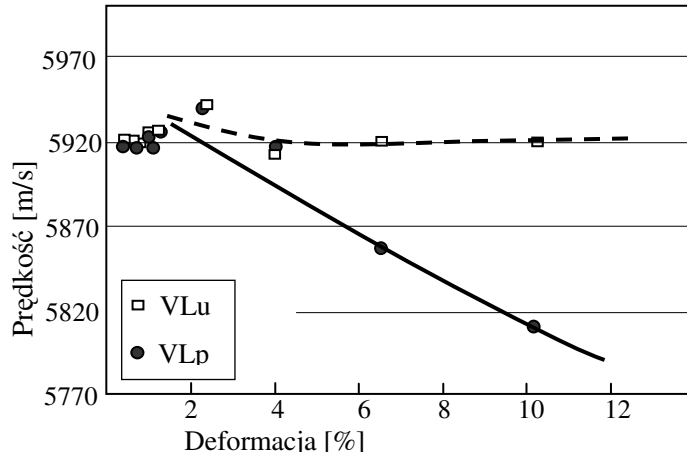
Wartości dwójłomności akustycznej mierzone w uchwytowych częściach próbek były bliskie zera (brak anizotropii akustycznej) a ich naturalny rozrzut nie przekraczał 0,1%.





Rys. 7. Dwójtomność akustyczna w funkcji odkształcenia pełzania dla stali 40HNMA. Bp – dwójtomność w części pomiarowej, Bu – dwójtomność w części uchwytovej

Dla porównania na rys. 8 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości fal podłużnych przeprowadzone na tych samych próbkach, w tych samych punktach pomiarowych. Pomiary wykonano za pomocą głowicy normalnej fal podłużnych o częstotliwości 10 MHz. Również prędkość fal podłużnych zmienia się w funkcji deformacji pełzania jednak efekt ten staje się widoczny dopiero począwszy od próbki zdeformowanej do 6,5%. Ponadto wyraźnie większy jest rozrzut wyników pomiarów spowodowany naturalną niejednorodnością materiału.

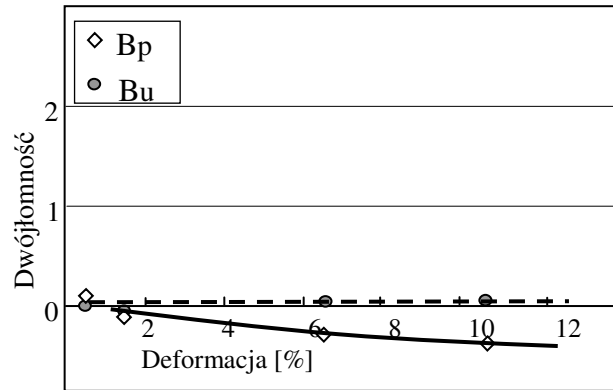


Rys.8. Prędkość fal podłużnych w funkcji odkształcenia pełzania dla stali 40HNMA. VLp – prędkość w części pomiarowej, VLu – prędkość w części uchwytovej

Z porównania obu wykresów wynika jednoznacznie, że nawet w przypadku pomiarów laboratoryjnych, wykonywanych na próbkach o idealnej geometrii, pomiar dwójłomności akustycznej jest czulszym i bardziej jednoznacznym wskaźnikiem zaawansowania procesu pełzania niż pomiar prędkości fal podłużnych. W przypadku pomiarów dokonywanych na rzeczywistych obiektach przemysłowych pomiar prędkości charakteryzowałby się jeszcze większymi rozrzutami wynikającymi z niedokładności w określaniu rzeczywistej grubości materiału.

Analizując uzyskane wyniki, należy zauważyć, że oba mierzone parametry ultradźwiękowe reagują na zmiany wywołane procesem pełzania dopiero przy znacznych wartościach odkształceń, wynoszących odpowiednio: 4% i 6,5%. Odpowiada to zaawansowanemu etapowi pełzania i potwierdza opisaną wcześniej koncepcję oddziaływania zmian mikrostruktury na parametry akustyczne materiału na etapie tworzenia się mikropęknięć o rozmiarach porównywalnych z wielkością ziaren. Jest to etap bezpośrednio poprzedzający powstawanie pęknięć makroskopowych prowadzących do ostatecznego zniszczenia materiału. Na podstawie analizy zależności odkształcenie – czas pełzania dla przebadanej serii próbek można oszacować, że dla stosowanych w doświadczeniu parametrów prób pełzania wyraźne zmiany dwójłomności akustycznej pojawiały się przy ok. 90% wyczerpaniu żywotności materiału.

Pewnym problemem przy interpretacji uzyskanych danych doświadczalnych jest fakt, że laboratoryjne próby pełzania prowadzone są, z konieczności, przy znacznie wyższych poziomach naprężeń i w konsekwencji w znacznie krótszych czasach pełzania niż ma to miejsce w rzeczywistych urządzeniach energetycznych. Skutkiem tego może być np. relatywnie większy udział typowych mechanizmów płynięcia plastycznego w stosunku do mechanizmów dyfuzyjnych charakterystycznych dla długookresowego pełzania przy niskich poziomach naprężeń. Dla lepszego wyjaśnienia ewentualnego wpływu tego efektu na uzyskiwane zależności ultradźwiękowe przeprowadzono pomiary dwójłomności akustycznej na dodatkowej serii próbek wykonanych z tej samej stali 40HNMA ale poddawanych zwykłemu odkształceniu plastycznemu w temperaturze pokojowej. Uzyskaną zależność dwójłomności akustycznej w funkcji odkształcenia plastycznego zobrazowano na rys. 9. Pokazuje ona, że odkształcenie plastyczne zmienia wartość dwójłomności akustycznej w kierunku odwrotnym niż odkształcenie w wyniku pełzania. Jednocześnie wartości bezwzględne tych zmian, przy tych samych wartościach odkształceń, są kilkakrotnie mniejsze.



Rys. 9. Dwójtomność akustyczna w funkcji odkształcenia plastycznego na zimno dla stali 40HNMA. Bu – dwójtomność w części uchwytowej, Bp – dwójtomność w części pomiarowej

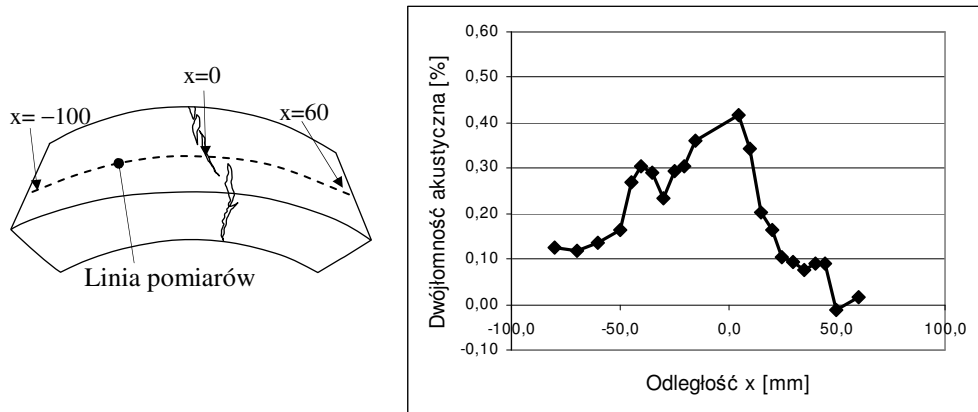
Wynik ten wskazywałby na to, że za zmiany dwójtomności akustycznej obserwowane podczas przyspieszonych prób pełzania odpowiadają, w głównej mierze, mechanizmy typowe dla ostatniego etapu pełzania (tworzenie się ukierunkowanych mikropęknięć) a ewentualny udział mechanizmów typowych dla odkształcenia plastycznego (reorientacja ziaren) powodowałyby co najwyżej pewne osłabienie nasilenia obserwowanych zmian. Oznaczałoby to, że w warunkach rzeczywistego, długookresowego pełzania dwójtomność akustyczna może być nawet czulszym parametrem diagnostycznym niż ma to miejsce w przypadku przyspieszonych prób pełzania. Potwierdzenie tej tezy wymaga jednak dalszych badań laboratoryjnych na próbkach poddawanych mniejszym obciążeniom w dłuższych okresach czasu a także weryfikacji tych zależności na elementach urządzeń energetycznych będących lub wycofywanych z eksploatacji.

Technika pomiarów dwójtomności akustycznej, podobnie jak inne techniki badań nieniszczących, posiada również swoje ograniczenia i niedoskonałości. Podstawowym warunkiem stosowalności tej metody jest wymaganie aby stan naprężeń eksploatacyjnych w materiale ocenianej konstrukcji był wyraźnie ukierunkowany. Powinien istnieć wyróżniony kierunek maksymalnych naprężeń rozciągających. Tylko w takim przypadku powstające mikropęknięcia będą układać się w sposób ukierunkowany prowadząc do powstania anizotropii materiału.

Bardzo istotnym zagadnieniem jest początkowy stan anizotropii w badanym materiale. Materiały stosowane w dotychczasowych eksperymentach nie wykazywały istotnej anizotropii w stanie początkowym. Mierzona dwójtomność akustyczna próbek dziewiczych charakteryzowała się bardzo niewielkimi rozrzutami wokół wartości zerowej ( $B < 0,1\%$ ). Dzięki temu mierzona dwójtomność akustyczna mogła być jednoznacznie

wiązana z procesem degradacji materiału. Warunkiem skuteczności metody jest więc możliwie mała i ustabilizowana wartość dwójłomności akustycznej badanego materiału w stanie początkowym. To na ile warunek ten jest spełniony w poszczególnych materiałach i wyrobach wymaga sprawdzenia i weryfikacji.

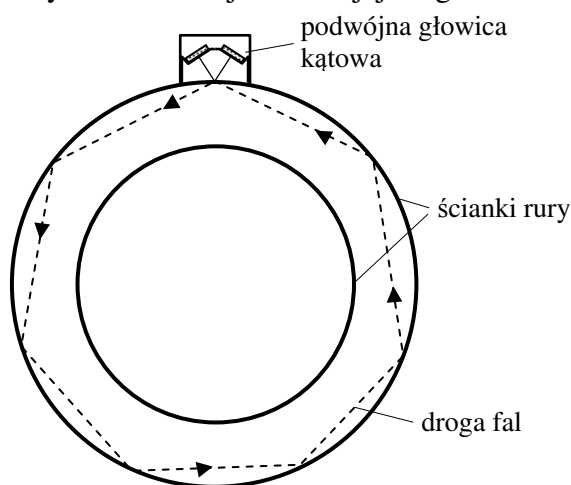
Należy również podkreślić, że technika pomiarów dwójłomności akustycznej, podobnie jak inne techniki ultradźwiękowe, pozwala na skuteczne wykrywanie uszkodzenia materiału dopiero w zaawansowanej fazie procesu pęcznienia, którą można orientacyjnie oceniać na 80% - 90% wyczerpania żywotności materiału. Na rys. 10 pokazano wyniki pomiarów dwójłomności akustycznej wykonanych wzdłuż linii obwodowej na próbce pokazanej na rys. 1. Jest to fragment kolanka ze stali 13HMF uszkodzony po około 160 000 godzin pracy w temperaturze 520 -540 °C, przy ciśnieniu roboczym równym 13MPa. Współrzędna  $x=-100$  i 60 mm na szkicu odpowiada pomiarom przy krawędzi próbki, wartość  $x=0$  mm odpowiada pomiarom w pobliżu uszkodzeń. Widoczne jest mierzalny wzrost wartości dwójłomności w obszarze bliskim uszkodzeniu materiału.



Rys. 10. Zmiany wartości dwójłomności akustycznej wzdłuż linii prostopadłej do kierunku dominującego pęcznienia, wykonane na próbce uszkodzonej w wyniku pęcznienia.

Wadą wszystkich opisanych wyżej ultradźwiękowych technik pomiarowych jest to, że są to pomiary praktycznie punktowe co pociąga za sobą konieczność wykonania ich w wielu miejscach. Jednym ze skutków pęcznienia jest stała deformacja materiału. W przypadku rur jest to powolny wzrost zewnętrznej średnicy rury. Powszechnie stosowanym sposobem oceny stopnia pęcznienia jest monitorowanie zmian średnicy rury poprzez okresowe jej pomiary śrubą mikrometryczną. Pomiary wykonuje się zazwyczaj w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach korzystając z uprzednio przyspawanych do zewnętrznej powierzchni rury bolców

pomiarowych. konieczność wykorzystania w pomiarze wcześniej przygotowanych bolców ogranicza ilość miejsc, w których pomiar taki może być wykonywany. W pracy [26] opisano układ pomiarowy umożliwiający precyzyjny pomiar czasu przejścia fali poprzecznej rozchodzącej się po obwodzie rury, po wieloboku. Fala rozchodzi się po linii łamanej, odbijając się jedynie od zewnętrznej powierzchni rury a czas przejścia fali jest proporcjonalny do przebytej drogi czyli obwodu rury. Schemat pomiaru pokazano na rys. 11. Można przyjąć, że wywołane pełzaniem zmiany prędkości wykorzystanej w pomiarach fali poprzecznej są na tyle małe, że w pomiarze zmian obwodu rury mogą być zaniedbane. W zamyśle autorów powtarzane okresowo pomiary obwodu, do których wykonania, poza lokalnym wyczyszczeniem powierzchni rury, nie są potrzebne specjalne przygotowania, pozwolić mogą na monitorowanie zmian obwodu grubościenniej rury w wielu miejscach na jej długości.



Rys. 11. Schemat pomiaru obwodu rury falą poprzeczną odbijającą się wielokrotnie od zewnętrznej powierzchni rury.

Zaletą techniki jest również to, że z przyłożenia głowicy w jednym miejscu uzyskuje się informację uśrednioną na całym obwodzie rury. Powtarzalności wyniku pomiarów obwodu wykonanych na wycinku rury o średnicy 273 mm, w ustalonych warunkach termicznych, wyniosła  $\pm 0,01$  mm. Oznacza to, że w przypadku rury o takiej średnicy metoda powinna umożliwiać wykrywanie wzrostu obwodu o mniej niż 0,01%. Pokazany na rys. 1 fragment takiej rury, w ostatnim stadium pełzania wykazuje przyrost obwodu równy około 3 mm. Można więc przypuszczać, że przybliżony nawet sposób ultradźwiękowego monitorowania zmian obwodu rury będzie dostatecznie czuły aby sygnalizować deformację materiału przed stanem krytycznym.

## **6. PODSUMOWANIE**

W artykule przedstawiono możliwości oceny stopnia degradacji mikrostruktury stali energetycznych za pomocą różnego typu technik ultradźwiękowych. Obok znanych technik bazujących na pomiarach prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych omówiono również nowe techniki wykorzystujące efekty nieliniowe oraz efekt anizotropii akustycznej materiałów. Szczególną uwagę poświęcono technice opartej na pomiarach dwójłomności akustycznej, która posiada szereg zalet w stosunku do standardowych technik ultradźwiękowych opartych na pomiarach prędkości i współczynnika tłumienia.

Technika pomiarów dwójłomności akustycznej jest stosunkowo łatwa do zastosowania w warunkach przemysłowych i jednocześnie mało wrażliwa na niedokładności i ograniczenia związane z prowadzeniem badań na rzeczywistych obiektach przemysłowych. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że parametr ten jest, co najmniej, równie czuły na zmiany spowodowane degradacją materiału jak prędkość czy tłumienie a jednocześnie znacznie mniej wrażliwy na typowe czynniki uboczne takie jak naturalny rozrzut parametrów materiału, obecność drobnych wad produkcyjnych czy też stan powierzchni. Oznacza to, że interpretacja wyników badań w kategoriach oceny stopnia uszkodzenia materiału może być bardziej jednoznaczna, obciążona mniejszym poziomem niepewności.

Obiecujące wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że nowa technika może w niedalekiej przyszłości znaleźć praktyczne zastosowanie w diagnostyce urządzeń energetycznych pracujących w warunkach pełzania. Jej prawidłowe wykorzystanie w procesie diagnostycznym musi jednak uwzględniać zarówno potencjalne możliwości jak też ograniczenia. Biorąc pod uwagę fakt, że umożliwia ona stosunkowo szybkie i tanie zbadanie dużej liczby punktów pomiarowych może ona być stosowana jako technika „screeningowa” umożliwiająca wstępne określenie miejsc wykazujących objawy zaawansowanej degradacji materiału. Miejsca takie mogłyby być następnie zbadane bardziej precyzyjnymi technikami metalograficznymi w celu zweryfikowania oceny ultradźwiękowej oraz dokładniejszego scharakteryzowania rodzaju i nasilenia uszkodzeń mikrostruktury.

## **PODZIĘKOWANIE**

Próbka pokazana na rysunku 1 została dostarczona do badań przez mgr inż. Dariusz Mężyka z Instytutu Energetyki.

## LITERATURA

- [1] Hsu A., Clapham L.C., and Atherton D. L., Magnetic Barkhausen noise measurements on magnetised pipeline steel, *Insight* Vol.45, No 5, May 2003
- [2] Augustyniak B., Wykorzystanie efektów magnetostrykcyjnych dla diagnozowania procesu degradacji stali., *Materiały Konferencyjne. Badania Mechanicznych Własności Materiałów i Konstrukcji*, LAPROMAT & CDSC, Warszawa 2003
- [3] Deputat J., Postępy nieniszczących badań stopnia degradacji materiałów, *Dozór Techniczny* Nr 2(194) 2001
- [4] Mackiewicz S., Pomiar parametrów akustycznych materiałów w badaniach stopnia degradacji struktury, *Materiały Konferencyjne. Badania Mechanicznych Własności Materiałów i Konstrukcji*, LAPROMAT & CDSC, Warszawa 2003
- [5] Lin J., Damage Mechanisms, Models and Calibration Techniques., *Materiały Konferencyjne. Badania Mechanicznych Własności Materiałów i Konstrukcji*, LAPROMAT & CDSC, Warszawa 2003
- [6] Dobrzański J., Internal damage processes in low alloy chromium-molybdenum steels during high-temperature creep service, *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004) 297-303
- [7] Dobrzański J., The classification method and the technical condition evaluation of the critical elements material of power boilers in creep service made from the 12Cr-1Mo-V, *Journal of Materials Processing Technology* 164-165 (2005) 785-794
- [8] Gaffard V., Besson J., Gourgues-Lorenzon A.F., Creep failure model of a tempered martensitic stainless steel integrating multiple deformation and damage mechanisms, *International Journal of Fracture* 133 (2005), 139-166
- [9] Westwood C., Pan J., Crocombe A.D., Nucleation, growth and coalescence of multiple cavities at grain-boundary., *European Journal of Mechanics A/Solids* 23 (2004) 579-597
- [10] Dobmann G., Meyendorf N., Shneider E., Nondestructive characterization of materials. A growing demand for describing damage and service-life-relevant aging processes in plant components., *Nuclear Engineering and Design* 171 (1997) 95-112
- [11] Sposito G., Ward C., Cawley P., Nagy P.B., Scruby C., A review of nondestructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels, *NDT&E International* 2010, doi:10.1016/j.ndteint.2010.05.012

- [12] Bisbee L., Asset Management of Critical Fossil Power Plants Components, Proc. Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 13-15 Ottobre 2005, Milano
- [13] Papadakis E.P., Ultrasonic Attenuation and Velocity In Three Transformation Products., Journal of Applied Physics Vol. 35, No 5 May 1964.
- [14] Stefanowicz J., Metodyka diagnostyczna WIT, WIT-Biuletyn, Poznań, styczeń 1995, Nr 1(3), rok II, ZBM WITEX S.A.
- [15] Ohtani T., Ogi H, Hirao M., Change of ultrasonic attenuation and microstructure evolution during creep of a stainless steel, Ebara Research Co. LTD.,Fujisawa, Japan, [www.ndtnet/article/wcndt2004/pdf/materials-characterisation/101-ohtani.pdf](http://www.ndtnet/article/wcndt2004/pdf/materials-characterisation/101-ohtani.pdf)
- [16] Raj B., Choudhary B.K., Singh Raman R.K., Mechanical properties and non-destructive evaluation of chromium-molybdenum ferritic steels for steam generator application, Jin. J. Pres. Ves. & Piping, 81 (2004), 521-534.
- [17] Hatanaka H., Ido N., Takuya I., Uemichi R., Tagami M., Nakagawa H.. Journal of Pressure Vessel Technology 2007;129:713–8.
- [18] Dobmann G., Kroning M., Theiner W., Willems H., Fiedler U., Nondestructive characterization of materials (ultrasonic and micromagnetic techniques) for strength and toughness prediction and the detection of early creep damage, Nuclear Engineering and Design 157 (1992) 137-158
- [19] Sun-Guk L., Sun-Ki L., Jun Shin L., Assesment of Creep Damage of Power Plant Pipeline Steel by Ultrasonic, Korea Electric Power Research Institute, [www.scientific.net/0-87849-948-2/959.htm](http://www.scientific.net/0-87849-948-2/959.htm).
- [20] AMES-NDT WORKSHOP, Ageing Materials Evaluation and Studies by Nondestructive Techniques, L.Debarberis, B.Acosta, G. Weimann (Eds.), SALZBURG, 22-24 Sept. 1999.
- [22] Hyghes D.S., Kelly J.L.; Second-Order Elastic Deformation of Solids., Phys. Rev., 92, 1953, p.1145
- [23] Mackiewicz S., Kowalewski Z.L., Szelażek J., Deputat J., Badania mechaniczne i ultradźwiękowe stanu uszkodzenia materiałów wskutek procesu pełzania, Przegląd Mechaniczny Nr 7-8/05, p. 15-24
- [21] Choi, Y. H., Kim, H. M., Jhang, K. Y. and Park, I. K., “Application of Nonlinear Acoustic Effect for Evaluation of Degradation of 2.25Cr-1Mo Steel,” Journal of KSNT, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176, 2002.



- [24] Kyung-Young J., Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135 JANUARY 2009 / 123, 10.1007/s12541-009-0019-y
- [25] Kowalewski Z.L., Szelażek J., Mackiewicz S., Deputat J., Eksperymentalne sposoby oceny uszkodzenia stali energetycznych wskutek pełzania, *Materiały VII Sympozjum „Diagnostyka i Remonty Długoeksploatowanych Urządzeń Energetycznych”*, Ustroń 2005.
- [26] Gutkiewicz P., Grzywna P., Szelażek J., Ultradźwiękowa metoda pomiaru zmian średnicy rury grubościennej, *Mat. XVII Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW*, Zakopane, 8 - 11 marca 2011, str. 113-124