

Analizując wyniki pracy wyciągnąć można następujące wnioski:

- do oceny trwałości zmęczeniowej elementów maszyn konieczne jest korzystanie z podstawowego prawa mechaniki pęknięcia, tj. równania prędkości propagacji pęknięcia oraz z systemu metody elementów skończonych lub brzegowych;
- przy ocenie trwałości zmęczeniowej konieczne jest uwzględnianie także zakresu nukleacji pęknięcia;
- stosowanie koncepcji oceny trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej pozwala nie tylko na symulację komputerową wykresu zmęczeniowego Woehlera, ale także m. in. kinetycznego wykresu zmęczeniowego, dzięki czemu analiza procesu zmęczeniowego może być znacznie pogłębiona.

Metoda ta została już wykorzystana w praktyce do analizy wytrzymałości i trwałości kół zębatych przekładni stosowanych w elektrowniach wiatrowych oraz w górnictwie. Przedstawioną koncepcję symulacji komputerowej należy w dalszym ciągu weryfikować i ulepszać, chociażby w celu uzyskania możliwości szacowania trwałości zmęczeniowej przy wieloosiowym, wieloosiowym (złożonym) lub losowym obciążeniu.

PIŚMIENNICTWO

[1] Wyrzykowski W.J., Pleszakow E., Sieniawski J., Odkształcenie i pęknięcie metali, WNT, Warszawa 1999.

[2] Zang W. L., Gudmunson P., Contact problems of kinked cracks modelled by a boundary integral method; *Int. J. Numer. Meths Engng.* 29, 847860, 1990.

[3] Kocańda S., Kocańda A., Niekocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali, PWN, Warszawa 1989.

[4] Knott J. F., Fundamentals of fracture mechanics, Butterworths, London 1975.

[5] Drewniak J., Probabilistyczny model obliczeniowy trwałości zmęczeniowej elementów i zespołów maszyn, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, 1992

[6] Tracey D. M., Finite elements for determination of crack tip elastic stress intensity factors, *Eng. Fract. Mech.* 1971, 3, s. 255-265.

[7] Neimitz A., Mechanika pęknięcia, PWN, Warszawa 1998.

[8] Kujawski D., Modelowanie trwałości zmęczeniowej i propagacji pęknięcia w metalach, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1991.

[9] Gołoś K., Trwałość zmęczeniowa stali w ujęciu energetycznym, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1989.

[10] Kujawski D., Trwałości zmęczeniowa metali, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1991.

[11] Wojciech S., Elementy metod numerycznych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 1998.

[12] Rysiński J., Ocena trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej na złamanie zęba prostego wałkowego koła zębatego: rozprawa doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 19 grudnia 2003.



Stawomir Mackiewicz, Jacek Szelażek, Piotr Gutkiewicz
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Badania ultradźwiękowe procesu degradacji stali eksploatowanych w energetyce¹⁾

Ultrasonic testing of degradation process of steels used in power engineering

Jednym z ważnych elementów elektrociepłowni są grubościennne rurociągi parowe i wodne, pracujące w wysokich temperaturach i pod ciśnieniem. Dlatego w przypadku elektrowni, które przepracowały zakładany w kontrakcie okres, bardzo ważne jest posiadanie wiarygodnych danych o stanie tych rurociągów, pozwalające na podjęcie prawidłowej decyzji o ich ewentualnej wymianie.

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

W konwencjonalnej energetyce główną przyczyną degradacji materiałów jest długotrwała praca pod obciążeniem w podwyższonych temperaturach, czyli zjawisko pełzania. Znane metody badań nieniszczących pozwalają na efektywne wykrywanie pęknięć pojawiających się ostatecznej fazie procesu pełzania. Możliwości nieniszczącej oceny degradacji materiału we wcześniejszych stadiach procesu pełzania są jednak dużo bardziej ograniczone. Najlepiej rozwinięte i dopracowane są techniki metalograficzne, takie jak przenośna mikroskopia optyczna czy metoda replik. Praktyczne wykorzystanie tych technik jest jed-

nsk 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 typowania 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.

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

Degradacja stali energetycznych

Analizując możliwości zastosowania metod ultradźwiękowych do oceny stopnia degradacji określonego materiału należy zidentyfikować zmiany zachodzące w jego mikrostrukturze. Dopiero na tej podstawie można prawidłowo określić mechanizmy oddziaływania fali ultradźwiękowej, które mogą być wykorzystane do wykrywania i oceny degradacji materiału. Opie zjawiska pełzania oraz zmian zachodzących w mikrostrukturze materiałów w trakcie tego procesu był przedmiotem licznych prac i monografii. Podstawowym wnioskiem z przeprowadzonych badań 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.

W dalszych rozważaniach ograniczono 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 [4,5] zawierające, między innymi, szczegółowe obrazy metalograficzne kolejnych faz degradacji stali. Opisywane stale eksploatowane są w urządzeniach energetycznych przez długie okresy w temperaturach dochodzących do 560°C przy stosunkowo niskich poziomach naprężeń nieprzekraczających kilkudziesięciu MPa. Wskutek wieloletniej pracy w warunkach pełzania w mikrostrukturze tych stali występują dwa rodzaje zmian:

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

W uproszczeniu można powiedzieć, że w II okresie pełzania najbardziej charakterystycznym objawem degradacji 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, zorientowanych pod kątem 90° lub 45° w stosunku do maksymalnych naprężeń rozciągających. W kolejnym etapie procesu następuje zarówno pojawianie się nowych pustek jak też rozrost pustek istniejących związany z mechanizmem dyfuzyjnego transportu materiału po powierzchni pustek oraz wzdłuż granic ziaren materiału. W wyniku na granicach ziaren formują się łańcuchy pustek, po czym 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 rozwijają się prowadząc do ostatecznego zniszczenia materiału. Zgodnie z klasyfikacją stopnia uszkodzenia niskostopowych stali Cr-Mo podaną w pracy [4] 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.



Rys. 1. Uszkodzenia materiału powstałe w wyniku pełzania

Z punktu widzenia wpływu mikropustek na propagację fal ultradźwiękowych należy zauważyć, że są one wypełnione gazem mającym impedancję akustyczną o kilka rzędów wielkości mniejszą od otaczającej je metalowej matrycy. Oznacza to, że nawet przy stosunkowo niewielkich rozmiarach stanowią dla fali ultradźwiękowej znacznie większą przeszkodę niż wydzielenia węglików i faz międzymetalicznych. Istotnym czynnikiem jest także kształt i orientacja powstałych mikropustek. Przy tej samej całkowitej objętości, pustki w kształcie płaskich mikroszczelin prowadzą do znacznie większego obniżenia modułów sprężystości materiału niż pustki o kształcie kulistym. Ukierunkowana orientacja mikroszczelin prowadzi z kolei do wytworzenia się w materiale anizotropii akustycznej objawiającej się różnymi wartościami prędkości fal ultradźwiękowych w zależności od kierunku ich propagacji oraz polaryzacji. Obecny stan badań różnymi metodami nieniszczącymi procesu pełzania stali stopowanych w energetyce opisany jest w pracy [6].

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, co oznacza, że kres wykrywalności standardowych technik ultradźwiękowych w stalach wynosi ok. 0,5 mm. Badania degradacji mikrostruktury materiałów, w których charakterystyczne rozmiary nieciągłości są rzędu mikrometrów, muszą więc bazować na innych podstawach fizycznych wykorzystujących uśredniony wpływ dużej liczby mikrodefektów na mierzalne makroskopowo parametry ultradźwiękowe.

Pomiary współczynnika tłumienia

Jednym z efektów, jakie starano się wykorzystać do ultradźwiękowej oceny degradacji materiałów była zależność współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych od określonych cech mikrostruktury. 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. potęgi częstotliwości fali. Dokładny wzór na składową rozpraszeniową współczynnika tłumienia fal podłużnych w ośrodku polikrystalicznym ma postać:

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

gdzie:

- $A = c_{11} - c_{12} - c_{12}$ – 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 polikryształe,
- ρ – gęstość masy,
- f – częstotliwość fali ultradźwiękowej.

Podstawowymi parametrami mikrostruktury, jakie 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. Oznacza to również, że drobne centra rozpraszające (wydzielenia węglików, pojedyncze mikropustki) będą miały niewielki wpływ na wielkość rozpraszeniowej składowej współczynnika tłumienia.

Ważne znaczenie ma też współczynnik anizotropii ziaren A , który w przypadku stali 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 [7] wynika, że współczynnik tłumienia fali podłużnej o częstotliwości 20 MHz wynosił w próbkach o strukturze perlityczno-ferrytycznej ok. 2 dB/cm, podczas gdy w próbkach o strukturze martenzytycznej (surowej oraz odpuszczonej) spadał poniżej 0,1 dB/cm.

W rozpatrywanym przypadku degradacji nieostopowych stali Cr-Mo skala zmian mikrostruktury jest, z punktu widzenia rozpraszania ultradźwiękowego, stosunkowo niewielka przez większą część czasu pełzania. Drobne wydzielenia 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 próbowano wykorzystywać do oceny stopnia degradacji stali energetycznych [8]. Metody te nie zostały jednak upowszechnione na szerszą skalę ze względu na dwa fundamentalne ograniczenia:

- 1) naturalne niejednorodności w strukturze metalograficznej materiału, wzrost wielkości ziaren lub też obecność drobnych wad materiałowych powstałych jeszcze w fazie produkcyjnej wpływające na tłumienie fal,
- 2) niską dokładność pomiaru współczynnika tłumienia w warunkach przemysłowych wynikającą z szeregu trudnych do wyeliminowania czynników, takich jak stan powierzchni badanego materiału w miejscu pomiaru (zarówno zewnętrznej jak i wewnętrznej), nie płaską równoległość ścianek obiektu itp.

Z przedstawionych wyżej powodów najbardziej efektywnym sposobem wykorzystania pomiarów tłumienia fal ultradźwiękowych do oceny stopnia degradacji materiału jest sukcesywne powtarzanie badań w tych samych punktach pomiarowych

i obserwowanie zachodzących zmian. Taki sposób pomiaru eliminuje większość czynników zakłócających, takich jak niejednorodność własności materiału czy geometria obiektu. Jednak nawet wówczas należy się liczyć z możliwością błędów pomiarowych spowodowanych np. postępującą korozją wewnętrzną ścianki obiektu, która może powodować spadek ultradźwiękowego echa dna, niemający 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. W pracy [9] opisane są wyniki badania rozproszenia fal o częstotliwości 15 MHz 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. W warunkach przemysłowych badanie falami o takiej częstotliwości wymagałoby jednak bardzo starannego przygotowania powierzchni materiału w celu zapewnienia poprawnego sprzężenia akustycznego.

Pomiary prędkości fal ultradźwiękowych

Drugim mierzalnym parametrem ultradźwiękowym jest prędkość propagacji fal. Badania mające na celu poszukiwanie korelacji prędkość – degradacja pełzaniowa opisane są w licznych pracach, np. [10,11]. Podstawową zaletą takiego podejścia jest fakt, że pomiar czasu przejścia i obliczenie prędkości fal 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:

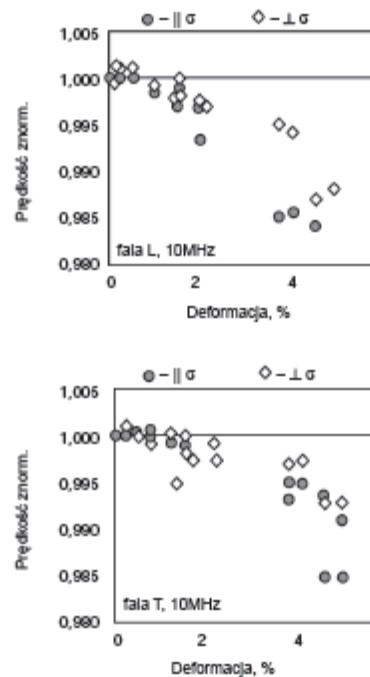
$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

gdzie:

- C_L, C_T – odpowiednio prędkości fali podłużnej i poprzecznej,
- E – moduł Younga,
- ν – stała Poissona,
- ρ – gęstość masy.

Obecność mikropękatek 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.

Obecnie badania mające na celu zweryfikowanie tego rodzaju zależności dla typowych stali energetycznych opisano w pracy [11]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące względne zmiany prędkości fal podłużnych i poprzecznych w stali 14MoV63 w funkcji odkształcenia pełzania. Próby pełzania prowadzone były przy jednoosiowych naprężeniach rozciągających 145 MPa oraz 160 MPa w temperaturze 550°C.



Rys. 2. Względne zmiany prędkości fal ultradźwiękowych w stali 14MoV63 w funkcji odkształcenia pełzania (z pracy [11])

Zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano spadki prędkości fal podłużnych i poprzecznych wraz ze wzrostem odkształcenia pełzania. 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 śrubą 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 równolegle oraz prostopadle do tego kierunku. Prowadzi to do wniosku, że w materiale odkształconym wskutek pełzania mogą zaczynać tworzyć się ukierunkowane mikroszczeliny prowadzące zarówno do obniżenia modułów sprężystości materiału jak też do powstawania mierzalnej 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 naciek kładziony był na analizę zmian prędkości określonego rodzaju fal ultradźwiękowych. Z opublikowanych danych 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 łatwo określone podczas badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach. W przypadku badań przemysłowych, przy pomiarach

przez grubość metodą echa, poważnym problemem staje się 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” [12] przeprowadzono wazechstronne 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 metody badawcze, a głównym ich celem było określenie przydatności poszczególnych technik badań nieniszczących do diagnozowania stopnia degradacji materiałów. W odniesieniu do metod ultradźwiękowych autorzy przedstawili następujące wnioski:

- 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.

Nowe techniki ultradźwiękowe

Pomimo krytycznej oceny dotychczasowych możliwości metody ultradźwiękowej w badaniach stopnia degradacji materiałów wskutek pełzania nadal podejmowane są próby znalezienia bardziej skutecznych technik pomiarowych. 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:

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

Nieliniowość sprężysta materiału objawia się, jako odchyłka od prawa Hooke’a, mówiącego, 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:

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

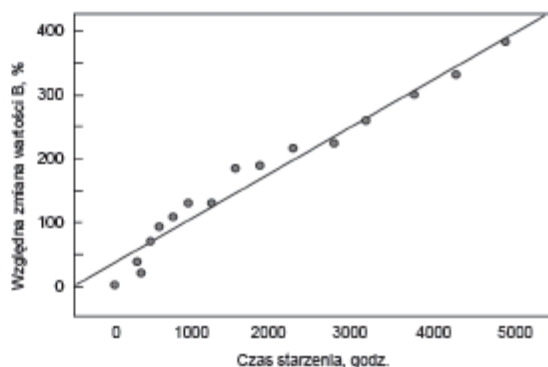
gdzie:

A_1, A_2 – amplitudy podstawowa i drugiej harmonicznej,

λ – długość fali ultradźwiękowej,

x – długość drogi przebytej przez falę.

W pracy [13] opisano badania zmian wartości parametru B w próbkach ze stali chromowo-molibdenowej poddanych sztuczemu starzeniu termicznemu wywołującemu zmiany mikrostruktury podobne do zmian zachodzących w procesie pełzania. Rysunek 3 pokazuje zależność parametru B od czasu starzenia. Widoczny jest wyraźny wzrost wartości parametru B świadczący o możliwości wykorzystania zmian własności nieliniowych do oceny stopnia degradacji materiału. Pomiary parametru B wymagają jednak specjalnej, czułej aparatury i na razie nie są jeszcze znane podobne badania prowadzone w warunkach przemysłowych.



Rys. 3. Względne zmiany parametru B od czasu starzenia (z pracy [13])

Inną konsekwencją nieliniowości materiału jest zjawisko elastoakustyczne, czyli zależność prędkości fal ultradźwiękowych od naprężenia [14]. 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_{σ} – prędkość fali po przyłożeniu naprężenia,

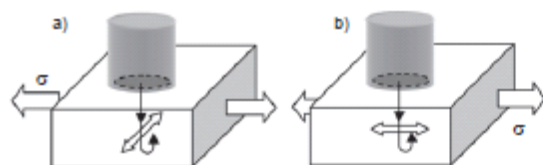
β – współczynnik proporcjonalności zwany stałą elastoakustyczną,

σ – naprężenie.

Wartość stałej elastoakustycznej materiału zależy od stanu jego mikrostruktury, a więc może reagować również na zmiany spowodowane pełzaniem. Wstępne wyniki badań [15], przeprowadzonych z konieczności na małych próbkach o krótkiej bazie pomiarowej, nie potwierdziły jednak jednoznacznie, że jest to parametr bardziej czuły na degradację materiału niż np. prędkość fal ultradźwiękowych.

Znacznie bliższe są perspektywy praktycznego wykorzystania wyników badań zmian anizotropii akustycznej materiału w trakcie rozwoju uszkodzeń mikrostruktury spowodowanych pełzaniem. Jak wspomniano, wyniki badań zmian prędkości fal ultradźwiękowych w funkcji odkształcenia pełzania wskazują, że spadek prędkości fal poprzecznych propagujących się prostopadłe do kierunku naprężenia pełzania 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. 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 dostępnej literatury efekt zmian anizotropii akustycznej materiału w trakcie procesu pełzania nie był dotychczas wykorzystywany do oceny stopnia uszkodzenia materiału. Podjęto więc prace w celu 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, w przypadku fal poprzecznych, o różnych polaryzacjach. Najlepszym z praktycznego punktu widzenia parametrem pomiarowym jest dwójłomność akustyczna, czyli wglądna różnica prędkości dwóch fal poprzecznych propagujących się w tym samym kierunku, ale mających różne, wzajemnie prostopadłe polaryzacje. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat pomiaru dwójłomności akustycznej materiału poddanego w eksploatacji obciążeniem rozciągającym w kierunku σ , a) pomiar czasu przejścia fali poprzecznej spolaryzowanej prostopadłe do kierunku naprężenia, b) spolaryzowanej równoległe do kierunku naprężenia

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 (5) można przekształcić do postaci:

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

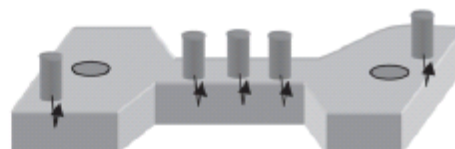
gdzie:

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

Dzięki powyższemu przekształceniu dwójłomność akustyczna może być wyznaczana wyłącznie na podstawie zmierzonych 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°) wiązka ultradźwiękowa za każdym razem penetruje tę samą objętość materiału i odbija się od tego samego obszaru powierzchni przeciwległej. Dzięki temu wynik pomiaru nie jest obciążony 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 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 [16]. Wykonano pomiary dwójłomności akustycznej w częściach pomiarowych oraz uchwytych próbek łopatkowych zaprezentowane na rysunku 5. Pomiary w części uchwytywonej próbek wykonywano jako pomiary odniesienia dla uwiidocznienia naturalnego rozrzutu początkowych wartości dwójłomności akustycznej w różnych próbkach wykonanych z tego samego materiału.



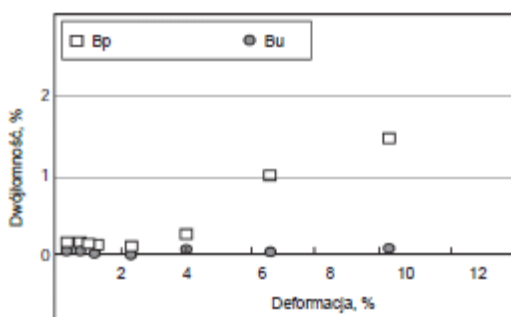
Rys. 5. Schemat pomiarów dwójłomności akustycznej w różnych punktach próbki łopatkowej po próbie pełzania

Wyniki pomiarów serii próbek ze stali A336 GR5 [17] wykazały istotny wzrost wartości dwójtłomności akustycznej materiału w zaawansowanych stadiach procesu pełzania. Dla próbki o deformacji pełzania 7% maksymalna dwójtłomność w części pomiarowej wyniosła 0,77%. Dla porównania wartości dwójtłomności mierzone w częściach uchwytowych próbek leżały znacznie poniżej 0,1%.

Pomiary dwójtłomności 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 (500°C). W porównaniu z poprzednią serią prób naprężenia były niższe, a czasy pełzania dłuższe, dochodzące do 1000 godzin. Warunki pełzania w drugiej serii prób były więc nieco bliższe rzeczywistym warunkom pracy materiału w urządzeniach energetycznych.

Na rysunku 6 pokazano zależność dwójtłomności akustycznej D od deformacji pełzania dla próbek ze stali 40HNMA. Pomiary wykonano głowicą normalną fal poprzecznych o częstotliwości 5 MHz. Począwszy od deformacji wynoszącej ok. 4% dwójtłomność wyraźnie narasta w funkcji odkształcenia.

Porównując wartości dwójtłomności mierzone w częściach pomiarowych i uchwytowych próbek widać, że ich zmiany są ściśle z determinowane procesem pełzania. Wartości dwójtłomności akustycznej mierzone w uchwytowych częściach próbek były bliskie zera (brak anizotropii akustycznej), a ich naturalny rozrzut nie przekraczał 0,1%. Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że mierzony parametr ultradźwiękowy reaguje na zmiany wywołane procesem pełzania dopiero przy znacznych wartościach odkształceń, wynoszących odpowiednio 4% i 6,5%.

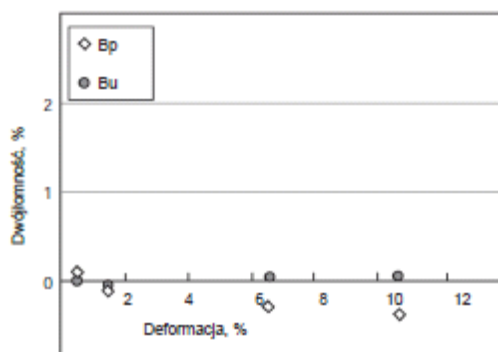


Rys. 6. Dwójtłomność akustyczna w funkcji odkształcenia pełzania dla stali 40HNMA

Bp – dwójtłomność w części pomiarowej, Bu – dwójtłomność w części uchwytowej

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 dwójtłomności akustycznej pojawiły 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 dwójtłomności akustycznej na dodatkowej serii próbek wykonanych z tej samej stali 40HNMA, ale poddawanych zwyktemu odkształceniu plastycznemu w temperaturze pokojowej. Uzyskaną zależność dwójtłomności akustycznej w funkcji odkształcenia plastycznego zobrazowano na rysunku 7. Pokazuje ona, że odkształcenie plastyczne zmienia wartość dwójtłomności akustycznej w kierunku odwrotnym niż odkształcenie w wyniku pełzania. Jednocześnie wartości bezwzględne tych zmian, przy tych samych wartościach odkształceń, są kilkakrotnie mniejsze. Wynik ten wskazywałby na to, że za zmiany dwójtłomności 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) powodowałby, co najwyżej, pewne osłabienie nasilenia obserwowanych zmian.



Rys. 7. Dwójtłomność akustyczna w funkcji odkształcenia plastycznego na zimno dla stali 40HNMA

Bu – dwójtłomność w części uchwytowej, Bp – dwójtłomność w części pomiarowej

Oznaczałoby to, że w warunkach rzeczywistego, długookresowego pełzania dwójtłomność akustyczna może być nawet czulszym parametrem diagnostycznym niż ma to miejsce w przypadku przyspieszonych prób pełzania.

Technika pomiarów dwójtłomności 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.

Ważnym 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 dwójtomności 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 dwójtomności 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 rysunku 8 pokazano wyniki pomiarów dwójtomności akustycznej wykonanych wzdłuż linii obwodowej na próbce pokazanej na rysunku 1. Jest to fragment kolanka ze stali 13HMF uszkodzony po około 160 000 godzin pracy w temperaturze 520-540 °C, przy ciśnieniu roboczym równym 13 MPa. Współrzędna $x = 0$ na szkicu próbki odpowiada pomiarom w pobliżu uszkodzeń. Widoczne jest mierzalny wzrost wartości dwójtomności w obszarze bliskim uszkodzeniu materiału.

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 w wzajemnie prostopadłych kierunkach korzystając z uprzednio przyspawanych do zewnętrznej powierzchni rury bolców pomiarowych.

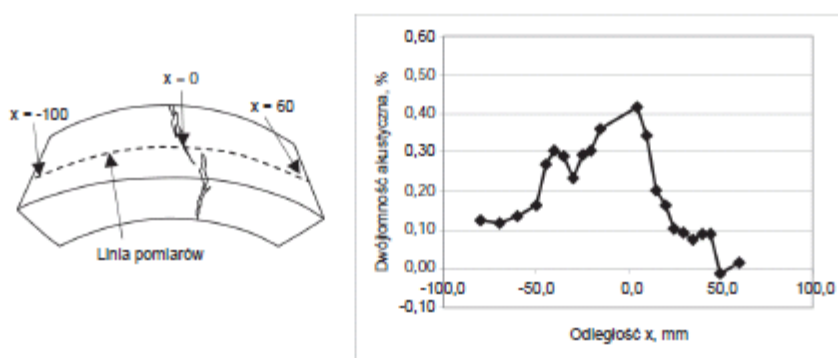
W pracy [17] opisano układ pomiarowy umożliwiający precyzyjny pomiar czasu przejścia fali poprzecznej rozchodzącej się po obwodzie rury, po wieloboku. Fala rozchodzi się po linii łamanej, odbijając się jedynie od zewnętrznej powierzchni rury, a czas przejścia fali jest proporcjonalny do przebytej drogi, czyli obwodu

rury. Można przyjąć, że wywołane pęcznieniem zmiany prędkości wykorzystanej w pomiarze echa fali poprzecznej są na tyle małe, że w pomiarze zmian obwodu rury mogą być zaniebane. W zamyśle autorów powtarzane okresowo pomiary obwodu, do których wykonania, poza lokalnym wyczyszczeniem powierzchni rury, nie są potrzebne specjalne przygotowania, pozwolić mają na monitorowanie zmian obwodu grubościenną rurę w wielu miejscach na jej długości. 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%.

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 dwójtomności akustycznej, która posiada szereg zalet w stosunku do standardowych technik ultradźwiękowych opartych na pomiarach prędkości i współczynnika tłumienia.

Technika pomiarów dwójtomności 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 parametrem 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, obarczona mniejszym poziomem niepewności.



Rys. 8. Zmiany wartości dwójtomności akustycznej wzdłuż linii prostopadłej do kierunku dominującego pęcznienia, wykonane na próbce uszkodzonej w wyniku pęcznienia

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 możliwości jak też ograniczenia. Biorąc pod uwagę fakt, że umożliwiała 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.

PIŚMIENNICTWO

- [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 mechaniczne własności materiałów i konstrukcji”, LAPROMAT & CDSC, Warszawa 2003.
- [3] Deputat J., Postępy nieniszczących badań stopnia degradacji materiałów, *Dozór Techniczny* 2001, nr 2(194).
- [4] Dobrzański J., Internal damage processes in low alloy chromium-molybdenum steels during high-temperature creep service, *Journal of Materials Processing Technology* 2004, 157-158, 297-303.
- [5] 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* 2005, 164-165, 785-794.
- [6] 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.
- [7] Papadakis E.P., Ultrasonic Attenuation and Velocity In Three Transformation Products., *Journal of Applied Physics* 1964, Vol. 35, No 5.
- [8] Stefanowicz J., Metodyka diagnostyczna WIT, *WIT-Biuletyn*, Poznań, styczeń 1995, nr 1(3), rok II, ZBM WITEX S.A.
- [9] Hatanaka H., Ido N., Takuya I., Uemichi R., Tagami M., Nakagawa H., *Journal of Pressure Vessel Technology* 2007, 129, 713-8.
- [10] 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* 1992, 157, 137-158.
- [11] Dobmann G., Meyendorf N., Schneider E., Nondestructive characterization of materials. A growing demand for describing damage and service-life-relevant aging processes in plant components., *Nuclear Engineering and Design* 1997, 171, 95-112.
- [12] AMES-NDT WORKSHOP, Ageing Materials Evaluation and Studies by Nondestructive Techniques, L.Debarberis, B.Acosta, G. Weimann (Eds.), Salzburg, 22-24 Septembre 1999.
- [13] 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* 2002, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176.
- [14] Hyghee D.S., Kelly J.L.; Second-Order Elastic Deformation of Solids., *Phys. Rev.* 1953, 92, p.1145.
- [15] Mackiewicz S., Kowalewski Z.L., Szalązek J., Deputat J., Badania mechaniczne i ultradźwiękowe stanu uszkodzenia materiałów w skutek procesu pełzania, *Przegląd Mechaniczny* 2005, nr 7-8, s. 15-24.
- [16] Kowalewski Z.L., Szalązek J., Mackiewicz S., Deputat J., Eksperymentalne sposoby oceny uszkodzenia stali energetycznych w skutek pełzania, Materiały VII Sympozjum „Diagnostyka i remonty długo eksploatowanych urządzeń energetycznych”, Ustroń 2005.
- [17] Gutkiewicz P., Grzywna P., Szalązek J., Ultradźwiękowa metoda pomiaru zmian średnicy rury grubościennej, Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane, 8 - 11 marca 2011, s. 113-124.



Polska Akademia Nauk
Komitet Zrównoważonej Gospodarki Surowcami Mineralnymi oraz
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
organizują

Patronat medialny

Energetyka

XXVII KONFERENCJĘ

z cyklu

Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej

pod tytułem

Ceny na rynku paliw i energii

w dniach 13-16 października 2013 r., w WDW Kościelisko - Zakopane

Kontakt: dr inż. Urszula Czuga-Blaschke - sekretarz konferencji, e-mail: uobla@min-pan.krakow.pl
dr inż. Zbigniew Grudziński, e-mail: zg@min-pan.krakow.pl

Więcej informacji na stronie internetowej

<http://www.min-pan.krakow.pl/se/>