

## Interdyscyplinarne techniki oceny stanu uszkodzenia stali stosowanych w energetyce

Problem zniszczenia i rozwoju uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych poddanych złożonym obciążeniom eksploatacyjnym stanowi zagadnienie, które mimo wieloletniej już analizy doświadczalnej i teoretycznej w dalszym ciągu nie jest zadowalająco poznane. Pomimo ogromnego postępu w zakresie modelowania teoretycznego, jak i dzięki znacznemu rozwojowi nowoczesnych badań doświadczalnych ciągle jeszcze występują zjawiska nierozpoznane lub poznane w stopniu, który nie daje gwarancji prawidłowej pracy urządzeń i elementów konstrukcji. Konsekwencjami takiej sytuacji są awarie, począwszy od drobnych uszkodzeń aż po wypadki o charakterze katastroficznym. Ponadto, na bieżąco pojawiają się nowe problemy, wynikające ze zmian właściwości mechanicznych materiałów przeznaczonych na konstrukcje funkcjonujące w bardzo długim okresie (od kilkunastu do kilkudziesięciu lat). Z takimi przypadkami można się głównie spotkać w konstrukcjach lub elementach urządzeń wykorzystywanych w energetyce, lotnictwie oraz przemyśle chemicznym. Jako obciążenia eksploatacyjne w tych gałęziach przemysłu należy głównie wymienić obciążenia wywołujące rozwój procesu pełzania oraz obciążenia o charakterze zmęczeniowym. Obu typom obciążeń towarzyszy zwykle podwyższona, stała lub zmienna w czasie, temperatura. Istnieje wiele metod oceny stanu uszkodzenia eksploatowanych materiałów, ale każda z nich, niszcząca lub nieniszcząca, ma swoje wady i zalety. W celu ograniczenia słabych stron obu grup metod badawczych uzasadnione wydaje się opracowanie procedury oceny stanu uszkodzenia na podstawie wzajemnej korelacji parametrów otrzymanych w wyniku ich użycia. Znając zatem parametry wyznaczone jedną metodą można by określać wynikające z korelacji parametry metody drugiej, dając tym samym szerszą wiedzę o stanie uszkodzenia przy jednocześnie obniżonych kosztach badań inspekcyjnych. Wykonując dodatkowo badania mikrostrukturalne możemy pokazać, jak wyznaczone parametry mechaniczne i parametry wybranych metod nieniszczących korelują z ewolucją struktury materiału.

### Zastosowana technika badawcza

W ramach programu badawczego przeprowadzono cykl testów dla materiałów z eksploatowanych i nieeksploatowanych odcinków rurociągów. Badania wykonano dla trzech gatunków stali: 13HMF, 40HNMA, P91. Po wycięciu odpowiednich próbek poddawano je następnie długoterminowym próbom pełzania lub zmęczenia dla z góry ustalonych warunków. W przypadku pełzania próby

zatrzymywano dla zaplanowanych wartości deformacji, natomiast dla zmęczenia testy przerywano dla zadanej liczby cykli. W celach porównawczych z tych samych materiałów wykonano próbki, które deformowano plastycznie do podobnych wartości odkształcenia, jak w próbach pełzania, ale w warunkach temperatury pokojowej i przy obciążeniu monotonicznie narastającym. Tak przygotowane próbki poddawano badaniom nieniszczącym z udziałem technik ultradźwiękowych i magnetycznych.

Dwójłomność akustyczna była parametrem, z którym wiązano największe nadzieje pod względem możliwości ultradźwiękowego diagnozowania stanu uszkodzenia materiału wskutek pełzania. Badania ultradźwiękowe wykonano za pomocą defektoskopu cyfrowego Panametrics Epoch 4 współpracującego z oprogramowaniem do dokładnych pomiarów czasów przejścia. W badaniach dwójłomności akustycznej wykorzystano głowicę normalną fal poprzecznych o częstotliwości 5 MHz i średnicy przetwornika 6 mm. Głowice sprzęgano z powierzchnią próbek za pomocą żywicy epoksydowej o dużej lepkości. W celu zapewnienia wymaganych warunków płasko-równoległości powierzchni próbki były szlifowane po zakończeniu testów wywołujących degradację. Wiązki ultradźwiękową wprowadzono w kierunku grubości próbki. Punkty pomiarowe rozmieszczone były równomiernie na próbce wzdłuż jej osi podłużnej. W każdym z nich dokonywano dwóch pomiarów czasu przejścia fali poprzecznej, odpowiednio o polaryzacjach równoległej i prostopadłej do kierunku długości próbki. Na tej podstawie ze wzoru (1)

$$B = \frac{2(V_{Tt} - V_{Tl})}{(V_{Tt} + V_{Tl})} = \frac{2(t_{Tl} - t_{Tt})}{(t_{Tt} + t_{Tl})} \quad (1)$$

gdzie:

- $V_{Tt}$  – prędkość fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku grubości próbki i spolaryzowanych w kierunku odkształcenia (kierunek działającego naprężenia),
  - $V_{Tl}$  – prędkość fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku grubości próbki i spolaryzowanych w kierunku prostopadłym do kierunku odkształcenia,
  - $t_{Tt}$  – czas przejścia fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku grubości próbki i spolaryzowanych w kierunku odkształcenia (kierunek działającego naprężenia),
  - $t_{Tl}$  – czas przejścia fal poprzecznych rozchodzących się w kierunku grubości próbki i spolaryzowanych w kierunku prostopadłym do kierunku odkształcenia,
- wyliczono wartość dwójłomności akustycznej w punkcie pomiaru.

Badania nieniszczące prowadzono również technikami magnetycznymi. Właściwości magnetoakustyczne ferromagnetyka dotyczą zmian w strukturze domen magnetycznych wymuszonych zmiennym w czasie polem magnetycznym. Badane były trzy wielkości: 1) pętla histerezy indukcji magnetycznej, 2) natężenie efektu Barkhausena (EB) i 3) natężenie emisji magnetoakustycznej (EMA). Podczas badań wykorzystywano kilka wariantów układów pomiarowych. Różnice dotyczyły sposobu magnesowania próbek i metody analizy sygnałów napięciowych. Magnesowanie próbek „długich” odbywało się za pomocą solenoidu z użyciem zwory strumienia magnetycznego w formie rdzenia w kształcie litery C.

W kolejnym etapie programu badawczego przeprowadzono na wcześniej zdeformowanych próbkach statyczne próby rozciągania w temperaturze pokojowej aż do ich rozerwania. Celem tych badań była ocena zmian podstawowych parametrów mechanicznych (moduł Younga, granica plastyczności, granica wytrzymałości doraźnej) zdegradowanych wstępnie materiałów. Ostatnią częścią programu badań były testy metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej.

### Wyniki badań

Przyjęta technika oceny stanu uszkodzenia materiałów po pełzaniu przez wykonywanie statycznych prób rozciągania dała zadowalające wyniki dla wszystkich rozpatrywanych stali. Najbardziej wrażliwe parametry wytrzymałościowe na wprowadzaną wstępną deformację to granica plastyczności, a zwłaszcza granica wytrzymałości doraźnej. Parametry te dla badanych materiałów identyfikowały nie tylko zmiany wartości odkształcenia, ale również były czułe na rodzaj wstępnie prowadzonego procesu deformacji. Zupełnie niewrażliwym parametrem, z punktu widzenia oceny stanu uszkodzenia, okazał się moduł Younga, który niezależnie o sposobu prowadzonego obciążenia wykazywał praktycznie niezmienną wartość dla każdego z ocenianych materiałów.

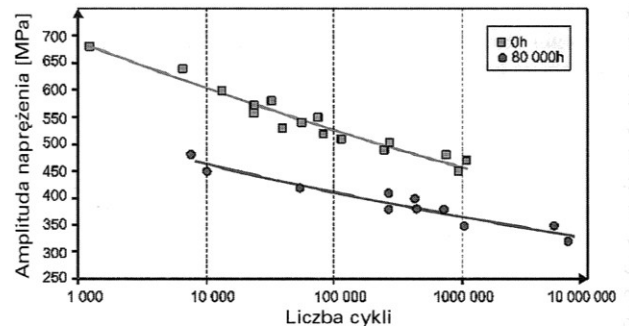
W przypadku badań zmęczeniowych testy niszczące nie dawały tak wyraźnych oszacowań degradacji materiału, ponieważ podstawowe parametry mechaniczne w postaci granicy plastyczności i granicy wytrzymałości doraźnej ulegały zwiększeniu. W związku z tym w celu oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego zaproponowano techniki alternatywne. We wstępnej fazie badań zmęczeniowych stali energetycznych P91 i 13HMF wyznaczono krzywą Wöhlera, która reprezentuje liczbę cykli koniecznych do zniszczenia przy zadanych wartościach amplitudy naprężenia. W przypadku stali 13HMF krzywą tę wyznaczono dla materiału w stanie dostawy i po eksploatacji (80 000 h) – rysunek 1.

Krzywe te wyraźnie się różnią, dając jednocześnie możliwość oceny spadku wytrzymałości zmęczeniowej wskutek zastosowanej historii obciążenia. Ponadto przeprowadzono badania, w których rejestrowano zmiany szerokości pętli histerezy otrzymywanej przy cyklowaniu dla ustalonej stałej wartości amplitudy naprężenia, zgodnie z procedurą zaproponowaną w [1, 2]. Badania te pokazały, że tego typu procedura daje możliwości oceny zapasu czasu bezpiecznej eksploatacji rozważanego materiału i nie ma potrzeby wykonywania tak wielu eksperymentów, jak wymagane jest to przy wyznaczeniu krzywej Wöhlera. Obliczanie wartości współczynnika bezpieczeństwa dla określonych przedziałów czasowych oraz zdefiniowanie jego wartości krytycznej umożliwia określenie zapasu bezpiecznej eksploatacji materiałów rurociągów. Ponadto przeprowadzono identyfikację miar uszkodzenia badanych stali energetycznych. Zachowanie metali w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, a więc przy amplitu-

dzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału, można podzielić na dwa zasadnicze typy pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń. Zachowanie pierwszej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane przez ratcheting, generowany lokalnymi odkształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych defektów mikrostruktury. Zachowanie drugiej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane cykliczną plastycznością, generowaną ruchem dyslokacji na poziomie lokalnych ziaren i lokalnymi pasmami poślizgów [3]. W obu przypadkach zmiany odkształceń mierzonych dla całej objętości pomiarowej próbki są sumą lokalnych odkształceń rozwijających się wokół defektów w postaci wtrąceń niemetalicznych i pustek (pierwsza grupa) lub rozwijających się poślizgów w poszczególnych ziarnach (druga grupa). Przeprowadzone badania zmęczeniowe wykazały obecność obu typów uszkodzenia (rys. 2), a zatem dla wszystkich badanych stali zapas bezpiecznej eksploatacji materiałów określano stosując mieszane prawo uszkodzenia w następującej postaci:

$$D = \frac{\varepsilon_c - (\varepsilon_c)_{min}}{(\varepsilon_c)_{max} - (\varepsilon_c)_{min}} \quad (2)$$

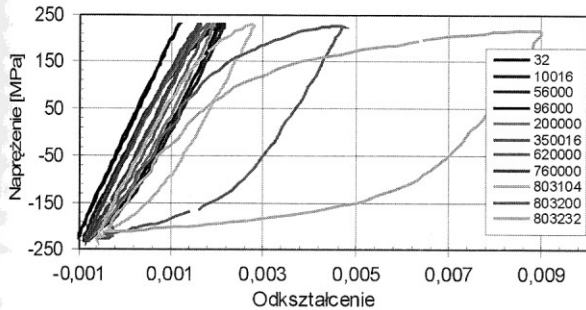
gdzie  $\varepsilon_c$  – całkowita wartość odkształcenia w rozpatrywanym cyklu obciążenia,  $(\varepsilon_c)_{min}$  – całkowita wartość odkształcenia w pierwszym cyklu na początku procesu rozwoju uszkodzenia,  $(\varepsilon_c)_{max}$  – wartość odkształcenia w ostatnim cyklu na końcu procesu rozwoju uszkodzenia. Wartość parametru uszkodzenia na początku procesu z definicji równa jest zeru, a na końcu przyjmuje wartość równą jedności, odpowiadającą stanowi zniszczenia.



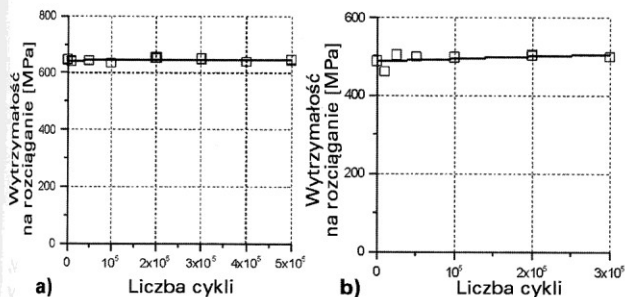
Rys. 1. Krzywe Wöhlera dla stali 13HMF przed (0 h) i po eksploatacji (80 000 h) [3]

Drugim istotnym punktem programu testów zmęczeniowych było zbadanie, jak wpływa liczebność cykli w ustalonych warunkach obciążenia na podstawową charakterystykę materiałową i parametry określone na jej podstawie. Dwuetapowy program badawczy zawierał w pierwszej części obciążenie zmęczeniowe, które było zadawane w celu wprowadzenia stanu uszkodzenia, w drugiej z kolei przeprowadzono próby rozciągania. Badanie materiału w warunkach obciążenia monotoniczno-rozciągającego miało wykazać wpływ wstępnych cykli zmęczeniowych na takie właściwości mechaniczne materiału, jak: granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie. Stale 13HMF i P91 poddawano badaniom zmęczeniowym stosując próbki płaskie. Obciążenie realizowano przy sterowaniu sygnałem naprężenia o amplitudzie 350 MPa (stal P91) i 230 MPa (stal 13HMF) dla liczby cykli od 10 000 do 500 000. Zestawienie przebiegów naprężenie-odkształcenie dla rozciągania wskazuje na niewielkie różnice

między charakterystykami. W efekcie zmiany właściwości mechanicznych stali w postaci umownej granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie są małe. Na rysunku 3 przedstawiono te zmiany w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 2. Rozwój odkształcenia dla wybranych cykli przy amplitudzie 230 MPa, stal 13HMF



Rys. 3. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie stali P91 (a) i 13HMF (b) z historią obciążenia zmęczeniowego o amplitudzie odpowiednio 350 MPa i 230 MPa w zakresie liczby cykli od 10 000 do 500 000 (P91), 300 000 (13HMF)

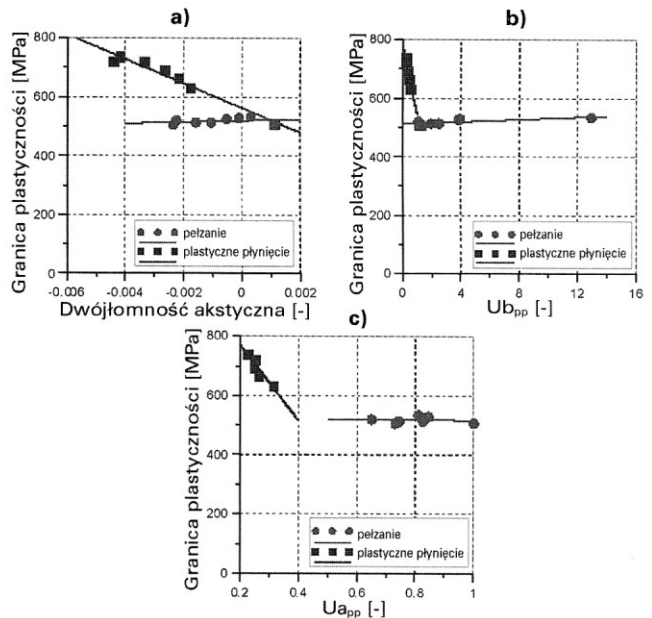
### Korelacja wybranych parametrów identyfikujących uszkodzenie

W ramach zrealizowanego programu badań opracowano procedury badawcze, które mogą poprawić ocenę zdolności eksploatacyjnej i prognozowania zapasu bezpiecznego użytkowania rurociągów energetycznych. Opierają się one na korelacji wybranych parametrów metod niszczących, takich jak granica plastyczności oraz granica wytrzymałości do różnej z parametrami metod ultradźwiękowych (prędkość fali, współczynnik dwójłomności akustycznej) oraz magnetycznych (napięcia będące miarą efektu Barkhausena oraz emisji magnetoakustycznej, pole koercji) przy uwzględnieniu zmian mikrostrukturalnych.

W wyniku przeprowadzonych badań ultradźwiękowych i mechanicznych stwierdzono mierzalne zmiany wartości dwójłomności akustycznej w zestawieniu ze zmianami parametrów mechanicznych. Na rysunku 4a przedstawiono przykładowo, w jaki sposób związane są ze sobą granica plastyczności i współczynnik dwójłomności dla stali P91.

Z analizy wyników badań magnetycznych i mechanicznych wynika, że również i wybrane parametry tych metod, np.  $C_{HBN}$  (całka z obwiedni napięcia skutecznego efektu Barkhausena) i  $H_{c, norm}$  (znormalizowane pole koercji stanowiące stosunek pola koercji danej próbki do pola koercji próbki nieodkształconej) oraz dodatkowo parametr  $MAE_{pp}$  (różnica napięcia między wysokością najwyższego pików  $U_a$

(wartością maksimum  $U_a$ ) a poziomem tła  $U_r$  [V]) wykazują wzajemną korelację. Przykładowo na rysunku 4b i c przedstawiono odpowiednio zależność granicy plastyczności od napięć charakteryzujących efekt Barkhausena ( $U_{b, pp}$ ) i emisję magnetoakustyczną ( $U_{a, pp}$ ) dla stali P91. Podobne wykresy opracowano dla stali 13HMF i 40HNMMA.



Rys. 4. Zależności pomiędzy granicą plastyczności a: a) – współczynnikiem dwójłomności akustycznej, b) – napięciem charakteryzującym efekt Barkhausena, c) – napięciem określającym poziom emisji magnetoakustycznej; w przypadku stali P91 poddawanej procesowi pełzania zatrzymanego przy różnym stanie zaawansowania zjawiska

Ważnym spostrzeżeniem wynikającym z opracowanych procedur jest kwalifikacja zastosowanych technik nieniszczących z punktu widzenia ich wrażliwości na uszkodzenie. Wyniki wskazują, że techniki magnetyczne są bardzo czułe na rozwój procesu degradacji w zakresie małych wartości odkształcenia (do 2%), natomiast stosunkowo słabo pokazują stan uszkodzenia powyżej tej wartości. Z kolei techniki ultradźwiękowe dają zupełnie odwrotne oszacowania: bardzo słabą czułość w zakresie małych deformacji, dobrą zaś przy deformacjach powyżej 2%. Wynika stąd wniosek, aby stosować je łącznie: w pierwszym okresie eksploatacji – badania magnetyczne, w drugim natomiast – ultradźwiękowe.

### Podsumowanie

Wyniki prób przy obciążeniach cyklicznych dla stali pochodzących z elektrowni pokazały, że ich zachowanie w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, a więc przy amplitudzie naprężenia poniżej granicy plastyczności materiału, wiąże się nie tylko z rozwojem odkształceń niesprężystych (plastycznych), ale również odkształceń średnich, które w uproszczeniu można kojarzyć z narastaniem odkształceń sprężystych w kolejnych cyklach.

Analiza procesu uszkodzenia zmęczeniowego stali 13HMF i P91 wskazuje, że największy jego rozwój przypada na początkowy etap eksploatacji. Stąd też wynika zalecenie dla elektrowni, aby ograniczać liczbę zatrzymań instalacji,

ponieważ jej żywotność będzie największa przy ciągłej stabilnej pracy w warunkach obciążeń o stałej (i możliwie niskiej) amplitudzie.

Dokumentacja opracowanych procedur w odniesieniu do pełzania zawiera wykresy ilustrujące korelację parametrów wytrzymałościowych z prób niszczących z wybranymi parametrami metod nieniszczących. Umożliwiają one pewniejsze oszacowania zakresu bezpiecznej eksploatacji materiałów przeznaczonych na rurociągi elektrowni na podstawie pomiarów dokonywanych metodami nieniszczącymi.

#### Literatura

[1] Socha G.: Nowa metoda pomiaru zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych, *Dozór Techniczny* 2002, nr 6, 121 – 124

[2] Socha G.: Experimental Investigations of Fatigue Cracks Nucleation, Growth and Coalescence in Structural Steel, *International Journal of Fatigue*, 2003, Vol. 25/2, 139 – 147

[3] Kukla D., Dietrich L., Kowalewski Z. L., Grzywina P.: Ocena rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w stalach eksploatowanych w energetyce, *Mat. Konf. II Kongresu Mechaniki Polskiej*, Poznań, 2011

Bohumil Krška  
*Ekol, spol. s r.o.* Brno

## Modernizacja głównych części turbin parowych w celu zwiększenia sprawności termodynamicznej

Firma *Ekol* nawiązuje do tradycji produkcji turbin parowych i gazowych w Republice Czeskiej, przede wszystkim *PBS*. W roku 2011 firma *Ekol* świętuje 20. rocznicę swojej działalności na rynku energetycznych bloków i urządzeń. Początkowo firma koncentrowała się przede wszystkim na działalności usługowej, modyfikacji i rekonstrukcji tych urządzeń. Od 1998 roku *Ekol* znajduje się wśród producentów nowych turbin parowych wg koncepcji własnych. Do chwili obecnej firma *Ekol* wyprodukowała i uruchomiła pomyślnie ponad 35 turbin parowych w zakresie mocy 1 – 60 MW.

### Podział turbin parowych

Podstawowy podział turbin parowych do zastosowania przy produkcji energii elektrycznej i ciepła to podział na turbiny kondensacyjne i przeciwprężne. Turbiny przeciwprężne są skonstruowane tak, że wszelka para z ciśnienia przeciwprężnego jest użyta do wyprowadzenia ciepła. W turbinach kondensacyjnych cała para kondensuje w konsensatorze. Oba typy mogą być z upustami regulowanymi lub nieregulowanymi.

#### Oznaczenie typów turbin parowych wg ČSN 080010

K – kondensacyjne bez upustu regulowanego pary,  
 P – kondensacyjne z upustem regulowanym (RO) pary – przemysłowym,  
 T – kondensacyjne z upustem regulowanym pary – ciepłowniczym,  
 PT – kondensacyjne z dwoma upustami regulowanymi pary – przemysłowym i ciepłowniczym,  
 PP – kondensacyjne z dwoma upustami regulowanymi pary – przemysłowymi,

R – turbina przeciwprężna bez upustu regulowanego pary,  
 PR – turbina przeciwprężna z upustem regulowanym pary – przemysłowym,  
 TR – turbina przeciwprężna z upustem regulowanym pary – ciepłowniczym,  
 PTR – turbina przeciwprężna z dwoma upustami regulowanymi pary – przemysłowym i ciepłowniczym.

Zakres ciśnień przeciwprężnych i upustów regulowanych pary:

do 1,2 barów abs – strefa komunalna – ogrzewanie wody grzewczej,  
 1,2; 5,0; 10,0; 13,0;  
 18,0; 35,0 barów abs – strefa przemysłowa – para technologiczna

#### Zakres parametrów technicznych z punktu widzenia zastosowania

Typy turbin: przeciwprężne – R  
 kondensacyjne – K  
 upustowe – P, T, PP, PT, PR

Typszereg mocy : 1; 3,5; 8; 14; 20; 35; 70 MW

Obroty : 3 000 – 20 000 min<sup>-1</sup>

Orientacyjne parametry pary wejściowej:

4,5 MPa	– 450°C
6,0 MPa	– 470°C
9 MPa	– 535°C
13,5 MPa	– 535°C

#### Porównanie skojarzonego i rozdzielnego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła

Skojarzone wytwarzanie energii w cyklu parowym wykonujemy za pośrednictwem pary wyprodukowanej w kotle