

OCENA STOPNIA USZKODZENIA EKSPLOATACYJNEGO MATERIAŁU RUROCIĄGU PAROWEGO NA PODSTAWIE ANALIZY ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI ZMĘCZENIOWYCH I MIKROSTRUKTURY.

Dominik KUKLA, Lech DIETRICH*, Marcin CIESIELSKI**

* Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa

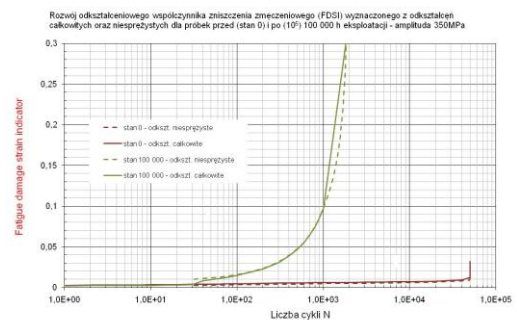
** Wydział Inżynierii Materiałowej PW, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

Bezpieczeństwo pracy elementów instalacji energetycznych pracujących w warunkach wysokiej temperatury oraz ciśnienia wymaga monitorowania rozwoju procesów degradacji mikrostruktury i właściwości. W tym celu opracowywanych jest szereg procedur i metod ilościowego opisu stopnia zniszczenia na podstawie zmian twardości, wytrzymałości (zmęczeniowej i na pełzanie), właściwości elektrycznych, magnetycznych, wsp. tłumienia fal ultradźwiękowych itd. [1-2]. Inne techniki opierają się o badania mikrostrukturalne, połączone z analizą składu chemicznego i fazowego [3].

W pracy dokonano oceny stopnia zniszczenia eksploatacyjnego materiału próbek z elementów rurociągów pary wtórnie przegrzanej po 100 000 godzin pracy na podstawie zmian właściwości zmęczeniowych oraz zmian mikrostruktury. Dokonano testów wytrzymałościowych oraz zmęczenia wysokocyklowego dla zmiennej amplitudy naprężenia, z uwzględnieniem dynamiki rozwoju odkształceń średnich i niesprężystych. Wykonano też badania metalograficzne z wykorzystaniem Elektronowej Mikroskopii Skaningowej, na podstawie których scharakteryzowano mikrostrukturalne zmiany wynikające z długotrwałej pracy w warunkach eksploatacji rurociągów energetycznych

W większości przebadanych próbek rozwój uszkodzeń zmęczeniowych prowadzi do wzrostu odkształceń średnich jak i plastycznych, jednak dynamika rozwoju zniszczenia jest znacznie większa w przypadku próbek po eksploatacji. Efekt ten jest uwidoczony na zestawieniu rozwoju odkształceń, zarówno plastycznych jak i średnich, dla próbek przed i po eksploatacji. Przykłady dynamiki rozwoju tych zmian obrazuje rys. 1 gdzie przedstawiono je jako rozwój odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego w funkcji liczby cykli dla amplitudy naprężenia 350 MPa.

Wysoki poziom odkształceń już w pierwszych cyklach obciążenia wskazuje na znaczące „zmęczenie eksploatacyjne” tego materiału. Doświadczalne wykresy zmian średniego odkształcenia w cyklu amplitudy odkształcenia kolejnych cykli (plastyczne) dają podstawę oceny rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych oraz zdefiniowania parametru uszkodzeń zmęczeniowych.

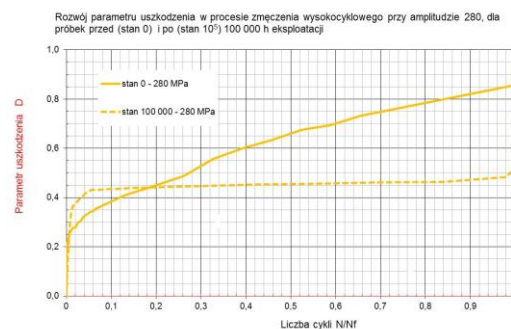


Rys. 1. Rozwój odkształceń zmęczeniowych w stali 13HMF przed i po eksploatacji

W przypadku badanych próbek ze stali 13 HMF za miarę uszkodzeń zmęczeniowych można przyjąć rozwój odkształceń niesprężystych a parametr uszkodzeń zmęczeniowych [4] zdefiniować zgodnie z zależnością:

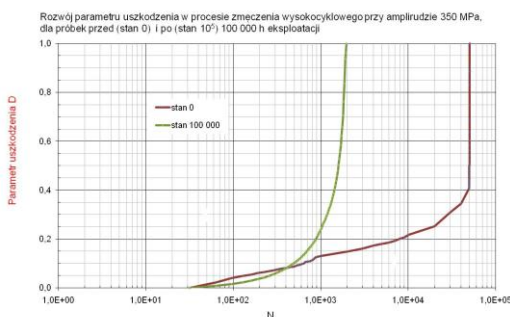
$$D = \frac{\varepsilon_c - (\varepsilon_c)_{\min}}{(\varepsilon_c)_{\max} - (\varepsilon_c)_{\min}}, \quad (1)$$

gdzie ε_c oznacza całkowitą wartość odkształceń w rozpatrywanym cyklu obciążenia, $(\varepsilon_c)_{\min}$ oznacza wartość całkowitą odkształcenia w pierwszym cyklu na początku procesu rozwoju uszkodzeń, $(\varepsilon_c)_{\max}$ oznacza wartość odkształcenia w ostatnim cyklu na końcu procesu rozwoju uszkodzeń. Zmiany parametru uszkodzenia wyliczonego wg przedstawionych powyżej założeń został przedstawiony w funkcji czasu na rys. 2,



Rys. 2. Rozwój parametru uszkodzenia dla dwóch wartości amplitudy w funkcji liczby cykli do zniszczenia.

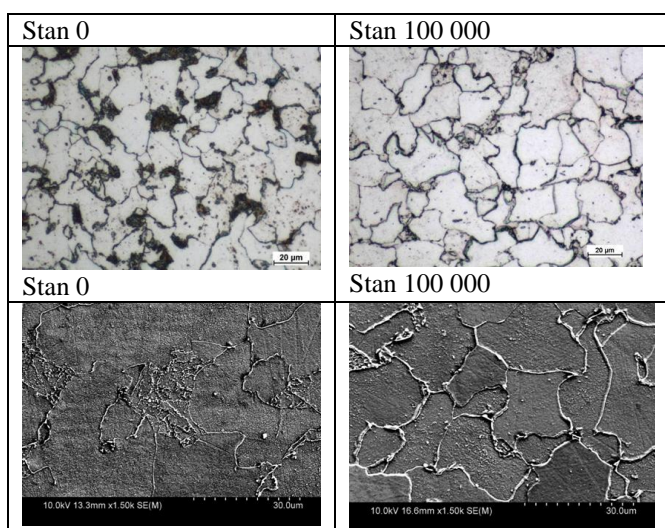
gdzie widoczny jest bardzo szybki rozwój uszkodzenia dla próbki eksploatowanej już w pierwszych cyklach obciążenia zmęczeniowego, który osiąga wartość 40%. Dlatego też istotne jest ograniczenie liczby zatrzymań w pracy instalacji energetycznych ponieważ jej żywotność będzie największa przy ciągłej stabilnej pracy w warunkach obciążeń o stałej (i możliwie niskiej) amplitudzie. Przedstawienie zmian parametru D na wykresie logarytmicznym (rys. 3) pozwala zauważyć dla próbek z materiału eksploatowanego znacznie krótszy czas uzyskania krytycznej wartości uszkodzenia określającej powstanie i propagację pęknięcia dominującego. W pewnych warunkach obciążenia, dla których szybkość rozwoju odkształceń jest podobna w pierwszym etapie zmęczenia, można próbować oszacować trwałość resztkową [5] na podstawie zmian w czasie osiągnięcia krytycznej wartości parametru zniszczenia związanego z propagacją pęknięcia i dekohezją próbki.



Rys. 3. Zmiany rozwoju parametru zniszczenia dla próbek ze stali 13 HMF przed i po eksploatacji

Zmiany wyznaczonego parametru zniszczenia wykazują większą dynamikę rozwoju (współczynnik kierunkowy krzywej) w porównaniu do próbek w stanie 0.

Wybrane wyniki badań mikrostrukturalnych w formie obrazów z mikroskopu świetlnego (pow. 500 razy) oraz SEM pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Mikrostruktura stali 13 HMF przed (a) i po 100 000 godzinach eksploatacji

Na zdjęciach próbek ze stali w stanie 0 wykonanych na mikroskopie świetlnym widać strukturę ferrytyczno

perlityczną z licznymi, drobnymi wydzieleniami węglowymi wewnątrz ziaren ferrytu. Po eksploatacji nastąpił całkowity rozpad perlitu i skutkiem tego zwiększył się udział węglików zlokalizowanych głównie na granicach ziaren. Nie stwierdzono obecności pustek na granicach, jakie z reguły są generowane pod wpływem eksploatacji w warunkach wysokiej temperatury o obciążeniach mechanicznych.

Obserwacje SEM wycinków rur uzyskanych po eksploatacji potwierdziły wcześniejsze obserwacje o występowaniu istotnych zmian mikrostrukturalnych w stosunku do materiałów wyjściowych. W przypadku rur po eksploatacji nastąpiła transformacja perlitu poprzez sferoidyzację i koalescencję płytek cementytu. Zaobserwowano również wyraźne wydzielenia węglików na granicach ziaren. Te twarde wtrącenia niemetaliczne, obok innych defektów mikrostruktury, jak pustki, są istotnym czynnikiem procesu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych prowadzących do degradacji właściwości eksploatacyjnych.

Proces uszkodzenia próbek zarówno w stanie 0, ale przede wszystkim po eksploatacji, przebiega według dwóch mechanizmów. Pierwszym z nich jest mechanizm lokalnych deformacji wokół defektów mikrostruktury prowadzący do ratchetingu, typowego procesu aktywowanego obciążeniami cyklicznymi zachodzącego w metalach i stopach o dostatecznej gęstości wad strukturalnych powstałych w procesie wytwórczym, niezbędnej do uruchomienia lokalnych mechanizmów odkształceń wokół defektów w postaci pustek i wtrąceń niemetalicznych. Drugi mechanizm opisuje cykliczna plastyczność generowana mikropoślizgami poszczególnych ziaren i lokalnymi pasmami poślizgów. Zwiększanie się odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach jest związane ze zwiększaniem się amplitudy odkształceń i zmniejszaniem się granicy plastyczności w kolejnych cyklach.

LITERATURA

1. **J. Dobrzański, H. Krztoń, A. Zieliński**, „Development of the precipitation processes in low-alloy Cr-Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 23, Issue 2, 2007
2. **K.Paradowski, W.Manaj, W.L.Spychalski, A.Zagórski, K.Lublińska, D.Kukła, J.Płowiec, K.J.Kurzydłowski**, Research on possibilities of application of non-destructive testing in degradation evaluation of materials used in infrastructure working under the influence of aggressive hydrogen environment, 3rd INT. CONFERENCE on ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF ENGINEERING MATERIALS, 21-24 May 2007, Gdańsk-Jastrzębia Góra,
3. **Dobrzański J.** „Procesy uszkodzeń wewnętrznych w niskostopowych stalach chromowo-molibdenowych pracujących pow. temp. granicznej” *Mat. X Sem N-T Badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego*, Zakopane 2003
4. **Socha G.**, “Prediction of the fatigue life on the basis of damage progress rate curves”, *International Journal of fatigue* vol. 26 no 4, 339-347, 2004.
5. **Hernas A. Dobrzański J.** „Trwałość i nieszczelnie elementów kotłów i turbin parowych” *Wyd. Pol. Śląskiej* 2003