

Wpływ zmęczenia niskocyklowego oraz interakcji zmęczenie - pełzanie na degradację stali 14 MoV6-3 pracującej w podwyższonych temperaturach

Mgr. inż. Magdalena Jakubowska

Streszczenie

Większość bloków energetycznych występujących w Polsce, w których elementy ciśnieniowe pracują w wysokich temperaturach została zaprojektowana z uwzględnieniem dominujących obciążeń stałych, co związane jest głównie z procesem pełzania. Zmieniające się warunki pracy tych bloków spowodowane rosnącym udziałem energii odnawialnej oraz koniecznością dostosowania do nowych norm emisyjnych wymagają jednak odrębnej analizy uwzględniającej również proces zmęczenia. Interakcja obu mechanizmów degradacyjnych znacząco wpływa na warunki pracy oraz trwałość materiałów stosowanych w elektrowniach. W związku z tym szczególną uwagę poświęcono badaniu wpływu zmęczenia niskocyklowego (LCF - Low Cycle Fatigue) oraz interakcji zmęczenia z pełzaniem (CF - Creep - Fatigue) na degradację stali 14MoV6-3 w różnych stanach eksploatacji, z naciskiem na stabilność mikrostruktury oraz właściwości mechaniczne. Celem badań było zrozumienie mechanizmów degradacji oraz opracowanie metod prognozowania żywotności elementów konstrukcyjnych, co stanowi jedno z ważniejszych zagadnień w kontekście zapewnienia długotrwałej i bezpiecznej eksploatacji urządzeń energetycznych.

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zrealizowano cztery etapy, których celem była analiza odporności niskostopowej stali 14MoV6-3 na procesy degradacyjne występujące w temperaturze podwyższonej oraz zmiennych warunkach obciążenia. W pierwszych dwóch etapach wyselekcjonowano materiały eksploatowane przez 164 000 oraz 302 000 godzin pracujących pod ciśnieniem 14,8 MPa w temperaturze 540 °C pochodzące z dwóch sekcji rurociągu: prostki oraz kolana. Badania wstępne miały na celu scharakteryzowanie materiału poeksploatacyjnego pod kątem procesu pełzania. Trzeci etap pracy obejmował modelowane badania zmęczeniowe wyselekcjonowanych materiałów mające na celu symulację zmiennych warunków pracy elementów rurociągu, a także analizę ich reakcji na krytyczne warunki eksploatacyjne. Przeprowadzono testy zmęczenia niskocyklowego (LCF) oraz pełzanie-zmęczenie (CF), stosując czas przetrzymywania $t = 5s$ w celu inicjacji mechanizmów uszkodzeń materiału. Ostatni etap badań obejmował analizę wyników oraz opracowanie metodologii prognozowania bezpiecznego czasu eksploatacji urządzeń ciśnieniowych pracujących w warunkach zmęczenia i pełzania.

Do badań zastosowano zaawansowane techniki analizy mikrostrukturalnej, takie jak skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych

(EBSD), transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM) oraz promieniowanie synchrotronowe, co umożliwiło dokładną charakterystykę zmian zachodzących w strukturze materiału w wyniku długotrwałej eksploatacji oraz obciążeń dynamicznych.

Uzyskane wyniki badań dla próbek stali 14MoV6-3 pobranych z elektrociepłowni po 164 000 oraz 302 000 godzinach eksploatacji wykazały istotne zmiany mikrostrukturalne będące wynikiem długotrwałego działania wysokich temperatur i ciśnienia. Zidentyfikowano aglomerację i wzrost węglików M₂₃C₆ na granicach ziaren oraz przemiany struktury bainitycznej w ferrytyczną. Procesy te prowadziły do zmniejszenia integralności mikrostrukturalnej stali, co bezpośrednio wpłynęło na jej właściwości mechaniczne. Dominującym mechanizmem degradacyjnym w warunkach pełzania okazał się intergranularny mechanizm kawitacyjny powodujący powstawanie i wzrost pustek na granicach ziaren wspomagany zarówno przez procesy dyfuzyjne jak i deformacyjne.

Kolejny etap pracy, obejmujący testy zmęczeniowe (LCF) oraz pełzanie-zmęczenie (CF), wykazał istotne różnice w charakterze zmian mikrostrukturalnych w porównaniu z wcześniejszą analizą pełzania. W warunkach LCF dyslokacje kumulowały się lokalnie, natomiast w próbach CF dyslokacje były generowane i anihilowane w sposób ciągły z równomiernym ich rozkładem w materiale. Stabilność mikrostruktury w warunkach CF była utrzymywana dzięki mniejszej tendencji do tworzenia nowych granic wysokokątowych. Zastosowanie procesu pełzania podczas wzrastającej liczby cykli testów interakcji pełzanie-zmęczenie przyczyniło się do zwiększenia gęstości dyslokacji prowadziła do intensyfikacji procesów deformacyjnych, aktywacji nowych źródeł dyslokacyjnych oraz nukleacji nowych ziaren. Odkształcenia plastyczne nasilały się szczególnie na etapie odpowiadającym 100% żywotności materiału. Badania synchrotronowe dostarczyły cennych informacji na temat mikroodkształcenia oraz gęstości dyslokacji, pozwalając na przeprowadzenie szczegółowej analizy mechanizmów degradacji materiału w warunkach pełzanie-zmęczenie w porównaniu z mechanizmami pełzania.

Uzyskane wyniki pozwoliły na dokładne zobrazowanie różnic w zachowaniu materiałów po długotrwałej eksploatacji oraz po testach zmęczeniowych i pełzanie-zmęczenie (CF). Zastosowanie zaawansowanych technik analitycznych, takich jak EBSD i promieniowanie synchrotronowe umożliwiło szczegółową analizę mikrostruktury oraz mechanizmów deformacji stali 14MoV6-3. Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano wytyczne dotyczące bezpiecznego czasu eksploatacji elementów pracujących w warunkach interakcji pełzania i zmęczenia dla stali 14MoV6-3, co odgrywa istotne znaczenie w prognozowaniu trwałości materiałów wykorzystywanych w energetycznych urządzeniach ciśnieniowych.

Abstract

The majority of power units in Poland, where pressure components operate at elevated temperatures, were originally designed with a focus on steady-state loads, predominantly

accounting for the creep process. However, changing operational conditions, driven by the increasing share of renewable energy and the need to comply with new emission standards, necessitate a separate analysis that also considers fatigue processes. The interaction between creep and fatigue significantly affects the operating conditions and longevity of materials used in power plants. Therefore, this study focuses on investigating the effects of low cycle fatigue (LCF) and creep-fatigue (CF) interaction on the degradation of 14MoV6-3 steel in various operational states, emphasizing microstructural stability and mechanical properties. The objective of this research is to enhance the understanding of degradation mechanisms and to develop predictive methods for the lifespan of structural components, which is crucial for ensuring the long-term and safe operation of power generation systems.

The experimental program consisted of four stages aimed at analyzing the resistance of 14MoV6-3 low-alloy steel to degradation processes occurring under high temperature and cyclic loading conditions. In the first two stages, materials that had been in service for 164,000 and 302,000 hours were selected from two sections of the pipeline-straight and elbow segments-operating under 14.8 MPa pressure at 540 °C. These preliminary investigations were designed to characterize the material's behavior under creep conditions. The third stage of the research involved fatigue testing of the selected materials to simulate the variable operational conditions of the pipeline and assess the material's response to critical service conditions. Low cycle fatigue (LCF) and creep-fatigue (CF) tests were conducted, with the CF tests incorporating a hold time of $t = 5$ s to initiate damage mechanisms. The final stage of the study included the analysis of results and the development of methodologies for predicting the safe operational life of pressure systems under conditions of fatigue and creep.

Advanced microstructural analysis techniques were employed, including scanning electron microscopy (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), transmission electron microscopy (TEM), and synchrotron radiation, to provide detailed insights into the material's structural changes following prolonged service and dynamic loading conditions.

The results of the initial stage, which focused on the analysis of 14MoV6-3 steel samples taken from the power plant after 164,000 and 302,000 hours of service, revealed significant microstructural changes due to the prolonged exposure to high temperatures and pressure. Key findings included the agglomeration and growth of M₂₃C₆ carbides at grain boundaries, as well as the transformation of bainitic structures into ferritic ones. These processes contributed to a decrease in the material's microstructural integrity, directly impacting its mechanical properties. The predominant degradation mechanism under creep conditions was found to be intergranular cavitation, which led to the formation and growth of voids along grain boundaries, facilitated by both diffusion and deformation processes.

In the subsequent stage, which included LCF and CF tests with hold time, significant differences were observed in the material's microstructural changes compared to the previous creep analysis. During LCF, dislocations accumulated locally, stabilizing the microstructure, while in CF tests, dislocations were continuously generated and annihilated, leading to a more uniform distribution within the material. The microstructural stability in CF conditions was maintained due to the reduced tendency for the formation of new high-angle grain boundaries.

The CF tests also revealed that as the number of cycles increased, dislocation accumulation and plastic deformation intensified, particularly at 30% and 60% of the material's service life. The increased dislocation density resulted in enhanced deformation processes, activation of new dislocation sources, and the nucleation of new grains. Synchrotron radiation studies provided valuable data on microstrains and dislocation density, allowing for a more detailed

analysis of degradation mechanisms under CF conditions compared to those observed during pure creep.

Overall, the conducted research enabled a detailed visualization of the differences in material behavior following prolonged service and after fatigue and creep-fatigue (CF) tests. The use of advanced analytical techniques, such as EBSD and synchrotron radiation, facilitated a comprehensive examination of the microstructure and deformation mechanisms in 14MoV6-3 steel. These findings contributed to the development of guidelines for predicting the safe operational life of components subjected to the interaction of creep and fatigue, which is crucial for forecasting the durability of materials used in power plant pressure systems.

[Recenzja dr hab. inż. Agnieszka Kochmańska](#)

[Recenzja prof. dr hab. inż. Michał Kulka](#)

[Recenzja dr hab. inż. Agnieszka Radziszewska](#)