

7. Podsumowanie i uwagi końcowe

Rozwój gospodarczy kraju i wzrost produkcji przemysłowej w Polsce zależą od zaspokojenia zapotrzebowania na energię elektryczną. W okresie do 2020 roku zwiększy się ono prawie dwukrotnie w porównaniu z rokiem 1997 [436]. Węgiel kamienny w tym okresie nadal będzie stanowił ok. 30% ogólnego bilansu surowców energetycznych. Rozwój technologii energetycznych w dużej mierze zależy od czynników materiałowo-technologicznych [437-443]. Wytrzymałość materiałów w podwyższonej temperaturze zależy głównie od kombinacji temperatury, naprężenia i czasu eksploatacji, a także od agresywności środowiska, decydując o przebiegu procesów niszczenia, w tym głównie wskutek pełzania, które jest podstawowym procesem determinującym mechaniczne zachowanie się metali i stopów w podwyższonej temperaturze, jako procesu degradującego własności, a także od czynników technologicznych i konstrukcyjnych. W praktyce czas bezpiecznej i wydajnej pracy jest jedynym interesującym wskaźnikiem ilościowym, związanym bezpośrednio z trwałością, jako miarą ogólnie pojętego wyężnienia materiału lub elementu konstrukcyjnego urządzeń i instalacji energetycznych, ciepłowniczych i petrochemicznych. Materiały stosowane do budowy urządzeń energetycznych i petrochemicznych powinny się cechować małą podatnością na pękanie, w tym szczególnie na tworzenie kruchego złomu w warunkach współdziałania czynników mechanicznych, korozyjnych i aktywowanych cieplnie, a nade wszystko wymaganą odpornością na odkształcenie plastyczne w podwyższonej temperaturze, a powyżej temperatury granicznej T_g – wymaganą wytrzymałością na pełzanie.

Ponieważ ok. 90% eksploatowanych w Polsce bloków energetycznych przekroczyło obliczeniowy czas pracy 100 000, a większość nawet 200 000 godzin, a ich okres użytkowania nierzadko osiągnął 40 a nawet 50 lat, zapewnienie dyspozycyjności pracujących jednostek i ich dalszej bezpiecznej eksploatacji, jest determinantą zapewnienia obecnego poziomu produkcji energii elektrycznej w Polsce, zważywszy że obserwuje się nadal niewielkie zaangażowanie inwestycyjne w sektorze energetycznym. Decyzje o przedłużeniu eksploatacji elementów instalacji energetycznych poza czas obliczeniowy stały się więc koniecznością, zważywszy że ich rzeczywiste zużycie eksploatacyjne jest zwykle znacznie mniejsze od całkowitego, na co wpływa m.in. liczba i wielkość współczynników bezpieczeństwa stosowanych w projektowaniu, a wynikających z uproszczeń przyjmowanych w tym procesie i niewiedzy projektantów, średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie charakterystyczna dla każdego z gatunków

stali będących przedmiotem badań, której wartość rzeczywista zwykle jest większa od wartości przyjętej do obliczeń, rzeczywista grubość ścianki rur większa od przyjmowanej do obliczeń i powiększona o wymagane naddatki, rzeczywiste warunki temperaturowo-naprężeniowe pracy najczęściej niższe od przyjętych w obliczeniach, a podejmowanie decyzji w tym zakresie wymaga racjonalnej diagnostyki, przeglądów i napraw.

Złożoność wymienionych zagadnień stała u podstaw opracowania niniejszej monografii powstałej w oparciu o wyniki własnych długoletnich badań autora w tym zakresie [1-435] i w celu ich podsumowania, której teza stanowi, że obiektywna ocena trwałości materiału pracującego w warunkach pełzania możliwa jest jedynie w oparciu o zespół materiałoznawczych metod i technik badawczych, obejmujących wyniki badań metalograficznych, badań własności mechanicznych i metod obliczeniowych. Poznawcze i praktyczne cele niniejszej pracy dotyczą przedstawienia opisu procesu degradacji materiału podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, zmian jego struktury i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń i związanych z tym zmian własności mechanicznych, jako podstawy opracowania obiektywnej metody oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji w warunkach pełzania, z uwzględnieniem materiałoznawczej interpretacji przyczyn zmian struktury i własności oraz oceny trwałości stali stosowanych na elementy energetyczne pracujące w warunkach pełzania. Dokonywana ocena każdorazowo wymaga wykonania komplementarnych badań i pomiarów, których dobór jest zależny m.in. od rodzaju i warunków pracy analizowanego elementu konstrukcyjnego, a także od możliwości dostępu do tego elementu. Oszacowanie stanu materiału wymaga wyznaczenia stopnia wyczerpania (t_e/t_r) będącego stosunkiem czasu dotychczasowej eksploatacji t_e do czasu do zerwania t_r , odniesionego do warunków temperaturowo-naprężeniowych. Znajomość czasu dotychczasowej eksploatacji odniesiona do oszacowanego lub wyznaczonego stopnia wyczerpania pozwala wyznaczyć trwałość resztkową t_{re} będącą czasem pozostającym do zniszczenia materiału dla zdefiniowanych warunków dotychczasowej pracy. Czasem dalszej bezpiecznej eksploatacji jest część tego czasu, nazywana resztkową trwałością rozporządzalną t_{be} , definiowana jako czas do osiągnięcia końca drugiego okresu pełzania. Wymienione badania i pomiary wykonano na elementach po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przy rzeczywistym czasie znacznie dłuższym od obliczeniowego czasu pracy 100 000 godzin (tabl. 2) z wybranych stali niskostopowych 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz wysokochromowej X20CrMoV11-1 (tabl. 1), w szczególności dotyczących wyczerpania i związanych z tym procesów wydzieleniowych

oraz uszkodzenia tych stali, jak również oryginalnej autorskiej metodologii oceny trwałości resztkowej, włącznie z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do modelowania wybranych procesów oraz predykcji bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji.

Zmiany w strukturze badanych materiałów w czasie pracy w warunkach pełzania zachodzą w jej podstawowych składnikach fazowych oraz występujących wydzieleniach, powodując w końcu powstawanie i rozwój wewnętrznych uszkodzeń. Udział poszczególnych procesów i ich intensywność zależą od typu struktury stanu wyjściowego i stopnia wyczerpania. W pierwszym okresie największe zmiany są związane z rozpadem perlitu i/lub bainitu w stalach niskostopowych oraz odpuszczonego martenzytu w stali wysokochromowej. Ze wzrostem stopnia wyczerpania intensywność tych zmian maleje, natomiast rośnie intensywność procesów wydzieleniowych. Zaawansowany stan rozwoju procesów wydzieleniowych wiąże się z zapoczątkowaniem i rozwojem wewnętrznych uszkodzeń, powodując inicjację nieciągłości najczęściej pod koniec drugiego lub z początkiem trzeciego okresu pełzania. Zależy to od rodzaju struktury i parametrów eksploatacji. Dla opracowywania systemu oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania konieczna jest znajomość poziomu własności użytkowych odpowiadających określonemu stanowi struktury i odpowiadającemu mu stopniowi wyczerpania, natomiast nie jest wymagana znajomość struktury i własności stanu wyjściowego, jak również historii eksploatacji danego elementu, jako głównych czynników o istotnym wpływie na stan struktury materiału po eksploatacji, które są zakodowane w ocenianym materiale. Znajomość warunków eksploatacji może być jednak pomocna w definiowaniu warunków i prognozowaniu czasu dalszej eksploatacji.

Stopień wyczerpania materiałów pracujących w warunkach pełzania jest skutkiem nakładania się zmian w strukturze, związanych ze składnikami fazowymi, procesami wydzieleniowymi oraz uszkodzeniami wewnętrznymi. Zmianom struktury wszystkich badanych stali przypisano odpowiadający im stopień wyczerpania, a jemu z kolei przyporządkowano główne klasy struktury, ujmujące klasy procesów składowych zmian w strukturze badanych stali i na tej podstawie opracowano klasyfikację stanu badanych stali pracujących w warunkach pełzania. Opracowana klasyfikacja dla każdej z badanych stali składa się dwóch części, pierwszej – obejmującej badane stale po eksploatacji bez wewnętrznych uszkodzeń i drugiej – uwzględniającej uszkodzenia wewnętrzne. Dla zmian struktury i jej stanów zdefiniowanych dla kolejnych etapów sporządzonych klasyfikacji, na podstawie wyników badań opracowano wzorce struktury ilustrujące etapy tych zmian w badanych stalach.

Schematy zmian struktury badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania obejmujące klasy rozpadu perlitu/bainitu lub martenzytu, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania odniesione do głównej klasy struktury przedstawiono na tle krzywej pełzania odrębnie dla stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej z ewentualnym udziałem perlitu oraz odrębnie dla stali wysokochromowej o strukturze odpuszczonego martenzytu. Zmianom struktury przypisano zatem odpowiadający im stopień wyczerpania, natomiast stopniowi wyczerpania przyporządkowano główną klasę struktury, ujmującą klasy procesów składowych zmian w strukturze. Metodologia oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania oparta jest na ocenie zmian w strukturze procesów składowych tzn.: zmian w strukturze odpowiednio perlitu, bainitu lub martenzytu, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz rozwoju uszkodzeń wewnętrznych, odniesionych do stopnia wyczerpania. Dokonując oceny podanych elementów składowych struktury i przypisując odpowiadające im klasy ujawnione na podstawie badań strukturalnych, wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania.

Znając stopień wyczerpania stali i dotychczasowy czas eksploatacji, można oszacować trwałość resztkową, czyli czas pozostający do zniszczenia materiału, którego częścią jest rozporządzalna trwałość resztkowa, będąca bezpiecznym czasem dalszej eksploatacji dla dotychczasowych warunków pracy lub dla warunków roboczych dalszej pracy podanych przez eksploatatora. Sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy badanych stali pracujących w warunkach pełzania w dwóch wariantach bez uszkodzeń wewnętrznych i z nimi przedstawiono graficznie na rysunku składającym się każdorazowo z dwóch elementów. Pierwszym elementem jest schematyczna krzywa pełzania będąca zależnością trwałego odkształcenia ϵ od stopnia wyczerpania materiału t_e/t_r , na której zaznaczono występowanie poszczególnych klas struktury. Drugim elementem jest tabela, na podstawie której, w oparciu o wcześniej dokonaną ocenę stanu materiału i określenie klasy jego struktury, można tej klasie przypisać stopień wyczerpania. Każdej klasie przyporządkowany jest maksymalny dopuszczalny okres eksploatacji do następnego przeglądu. Okres ten podany jest w godzinach i w latach. Ważnym staje się ten rodzaj dopuszczalnego okresu eksploatacji do następnego przeglądu, który pierwszy zostanie osiągnięty. Istotny wpływ na upływanie wyznaczonego okresu ma nie tylko rzeczywisty czas eksploatacji, ale również liczba odstawień i uruchomień oraz łączny czas postojów kotła. Wyznaczone okresy eksploatacji do następnego przeglądu są zróżnicowane w zależności od czasu dotychczasowej eksploatacji, tzn. z przedziału pomiędzy 100 000 a 200 000 godzin lub

powyżej 200 000 godzin oraz gatunku stali należącej do grupy niskostopowych stali ferrytyczno-perlitycznych oraz niskostopowych dwuskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych lub niskostopowych trójskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych oraz wysokochromowej stali o strukturze odpuszczonego martenzytu. Ponadto w oparciu o odpowiadający klasie struktury wskaźnik n , podany w tablicy będącej częścią rysunku, można z podanego wzoru wyznaczyć prognozowany czas dalszej eksploatacji t_{ep} . Wartość wskaźnika n dla danej klasy struktury jest zróżnicowana podobnie jak dla wyznaczonych okresów eksploatacji, tzn. dla dwóch grup gatunków stali.

Opracowana i opisana w niniejszej monografii metodyka oceny stanu materiału, oceny stanu elementu, jego trwałości resztkowej i trwałości rozporządzałnej oraz oceny jego przydatności do dalszej eksploatacji i prognozy czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji została poddana weryfikacji doświadczalnej przez autora w ok. 1000 przypadków w praktyce przemysłowej, przynosząc miliardowe efekty ekonomiczne, przy czym w żadnym przypadku nie stwierdzono popełnienia błędu w zakresie ustalenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów instalacji energetycznych.

Zakres problematyki trwałości resztkowej i rozporządzałnej elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych jest znacznie szerszy niż zdołano to opisać w niniejszej pracy i dotyczy między innymi metodyki diagnozowania uszkodzeń krytycznych elementów instalacji ciśnieniowych kotłów energetycznych, z wykorzystaniem badań materiałoznawczych, w ocenie przyczyn ich awarii oraz trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych, jak i wykonywania naprawczych złączy spawanych materiałów po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym lub z materiałami po eksploatacji, elementów wymagających naprawy lub dokonania zmian konstrukcyjnych w wykonywanej modernizacji instalacji po długotrwałej pracy, a także zachowania się materiałów badanych złączy w warunkach odpowiadających warunkom eksploatacji oraz technologii wykonywania naprawczych złączy spawanych. Zagadnienia te omawiane są w innych pracach własnych autora, lecz nie zostały one szczegółowo omówione w niniejszej monografii. Zagadnienia te, wraz z objętymi problematyką niniejszej monografii, są przedmiotem dalszych badań autora, jak również wymagają szerszego zainteresowania. W szczególności dążenie do rozwoju kotłów i instalacji pracujących w warunkach nadkrytycznych, wymaga opracowywania, badania i wdrażania nowych materiałów i adaptacji opracowanej metodyki prognozowania czasu bezpiecznej eksploatacji elementów instalacji energetycznych do nowych warunków eksploatacyjnych oraz nowych materiałów.