

Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki

Janusz Dobrzański

Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica,
ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska

Adres korespondencyjny: Adres e-mail: jdobrzanski@imz.pl

Streszczenie

***Cel:** Poznawczy cel niniejszej monografii jest związany z przedstawieniem opisu procesu degradacji materiału podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, zmian jego struktury i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń. Głównym naukowym celem jest materiałoznawcza interpretacja przyczyn tych zmian oraz ocena trwałości stali stosowanych na elementy energetyczne pracujące w warunkach pełzania. Cel praktyczny pracy polega na opracowaniu obiektywnej metody oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji w warunkach pełzania. Postawiono tezę niniejszej monografii, 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.*

***Projekt/metodologia/podejście:** Prace własne autora w obszarze trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych uwzględnione w niniejszej monografii, dotyczą aplikacji autorskiej metodyki diagnozowania uszkodzeń krytycznych elementów instalacji ciśnieniowych kotłów energetycznych, z wykorzystaniem badań materiałoznawczych, w ocenie przyczyn ich awarii. W celu prognozowania trwałości resztkowej elementów instalacji energetycznych autor podjął również własne prace z obszaru komputerowej nauki o materiałach, w zakresie wykorzystania metod sztucznej inteligencji, a zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych, w ramach autorskiej metodologii rozwiązania tego problemu.*

***Osiągnięcia:** Osiągnięcia pracy dotyczą opracowania autorskiej metodologii oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania opartej na ocenie zmian w strukturze, odniesionych do stopnia wyczerpania. Dokonując oceny podanych elementów składowych struktury, tzn. zmian w strukturze odpowiednio perlitu, bainitu lub martensytu, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz rozwoju uszkodzeń wewnętrznych i przypisując odpowiadające im klasy*

ujawnione na podstawie badań strukturalnych, wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania odrębnie dla stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej z ewentualnym udziałem perlitu oraz odrębnie dla stali wysokochromowej o strukturze odpuszczonego martenzytu, natomiast stopniowi wyczerpania przyporządkowuje się główną klasę struktury, ujmującą klasy procesów składowych zmian w strukturze. 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 przewidywanych warunków pracy.

Ograniczenia badań/zastosowań: Monografia została opracowana na podstawie wyników własnych prac naukowo-badawczych dotyczących wybranych stali niskostopowych 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz wysokochromowej stali X20CrMoV11-1, jako najczęściej lub niemal wyłącznie dotychczas stosowanych w Polsce na elementy instalacji energetycznych, pracujące w warunkach pełzania. Badania wykonano na elementach po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po rzeczywistym czasie eksploatacji znacznie dłuższym od obliczeniowego czasu pracy 100 000 godzin.

Praktyczne zastosowania: Osiągnięte cele pracy i wiedza uzyskana przez ich realizację pozwala na optymalne, z punktu widzenia czynników eksploatacyjnych, ekonomicznych i warunków bezpieczeństwa, wykorzystanie elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach podwyższonej temperatury, naprężenia oraz agresywnego środowiska, gdy obliczeniowy czas pracy przekroczył 100 000 godzin i z formalno-prawnego punktu widzenia elementy te nie powinny być już eksploatowane.

Oryginalność/wartość: Opracowana metodyka oceny stanu materiału, oceny stanu elementu, jego trwałości resztkowej i trwałości rozporządzalnej 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 błędów w zakresie ustalenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji tych elementów.

Słowa kluczowe: Materiałoznawstwo energetyczne; Pełzanie; Trwałość resztkowa; Wyczerpanie; Uszkodzenie

Cytowania tej monografii powinny być podane w następujący sposób:

J. Dobrzański, *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki* – Wydanie drugie, Open Access Library, Annal VI (2016) Issue 2, str. 1-228.

Materials science interpretation of the life of steels for power plants

Janusz Dobrzański

Institute for Ferrous Metallurgy,

12-14 Karola Miarki Street, 44-100 Gliwice, Poland

Corresponding author: E-mail address: jdobrzanski@imz.pl

Abstract

Purpose: The research purpose of this monograph is related to presenting a description of the material degradation process during long-term operation in creep conditions, changes to material structure and the formation of internal damages. The primary scientific purpose is the materials science interpretation of causes of such changes and the assessment of the life of steels used as power installations components working in creep conditions. The practical purpose of the work is to develop an objective method of evaluation of the material state and the suitability of material for further operation in creep conditions. A thesis that the life of material operating in creep conditions can be evaluated objectively only based on a group of materials science methods and research techniques, encompassing the results of metallographic research, tests of mechanical properties and calculation methods has been presented in this monograph.

Project/methodology/approach: The author's own works in the area of life of structural components of power installations included in this monograph concern the application of the own methodology of diagnosing the critical damages of components of pressure power boilers installations, using materials science research, to evaluate the causes of failure. In order to predict the residual life of power installations components, the author has also undertaken his own research in the area of computer materials science related to the application of artificial intelligence methods, especially artificial neural networks, in the framework of the own methodology for solving such an issue.

Findings: The findings of the this monograph concern the development of an own methodology of evaluating the state of the investigated steels after operation in creep conditions based on the evaluation of changes to the structure, referred to the degree of depletion. When evaluating

the constituent parts of structure, so-called changes to the structure of, respectively, perlite, bainite or martensite, the development of precipitation processes and development of internal damages and when ascribing their corresponding classes identified in structural investigations, the main class of structure is determined and its corresponding degree of depletion, separately for low-alloy steels with the ferritic-perlitic structure or ferritic-bainitic structure with a possible portion of perlite and separately for high-chromium steel with the structure of tempered martensite, and the degree of depletion is ascribed to the main class of structure including the classes of component processes of changes in the structure. Residual life, i.e. the time remaining to material destruction, part of which is available residual life being the safe time for further operation for the predicted work conditions, can be estimated by knowing the degree of depletion for steel and the existing service life.

Research limitations/implications: *The monograph was prepared on the basis on the results of own scientific and research work concerning selected low-alloy steels 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 and high-chromium steels X20CrMoV11-1, as the ones used more often or almost exclusively in Poland for power installations components working in creep conditions. The research was performed at components after long-term operation in creep conditions after the actual service time much longer than the calculated service life of 100,000 hours.*

Practical implications: *The objectives of the work accomplished and the knowledge acquired through accomplishment thereof allows for the optimum use, in terms of operation and economic factors and safety conditions, of structural components of power installations subjected to long-term operation in the conditions of increased temperature, stress and aggressive environment, when the calculated service life has exceeded 100,000 hours and when such components should not be operated anymore from a formal and legal point of view.*

Originality/value: *The established methodology of material state evaluation, component state evaluation, its residual life and available life and evaluation of its suitability for further operation and a prediction of further safe operation, has been verified experimentally by the author in approx. 1000 cases in industrial practice, bringing economic effects equivalent to billions, and no error was ever identified in the determination of time of further safe operation of such components.*

Keywords: *Materials science in power plants; Creep; Residual life; Depletion; Damage*

Reference to this paper should be given in the following way:

J. Dobrzański, Materials science interpretation of the life of steels for power plants – Second edition, Open Access Library, Annal VI (2016) Issue 2, pp. 1-228.

1. Wprowadzenie, cele i zakres pracy

Utrzymanie dotychczasowego poziomu produkcji energii elektrycznej w Polsce przy braku lub niewielkim udziale nowych inwestycji w sektorze energetycznym wymaga zapewnienia dyspozycyjności pracujących jednostek i zapewnienia ich bezpiecznej eksploatacji, szczególnie tych które przekroczyły obliczeniowy czas pracy 100 000 godzin. Sytuacja jest szczególnie dramatyczna gdyż około 90% eksploatowanych w Polsce bloków energetycznych przekroczyło już ten obliczeniowy czas pracy. **Długotrwała eksploatacja urządzeń i instalacji energetycznych wywołuje w materiale procesy pełzania. Czas do zerwania materiału poddanego pełzaniu określany jest jako trwałość.** Obliczeniowy czas pracy wynika z zastosowanej do obliczeń czasowej wytrzymałości na pełzanie. Większość z bloków przekroczyła nawet czas eksploatacji 200 000 godzin. Decyzje o przedłużeniu eksploatacji poza czas obliczeniowy zostały podjęte z zastosowaniem metody oceny opartej o dane średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 200 000 godzin oraz o pozytywne wyniki kompleksowych badań diagnostycznych, szczególnie elementów krytycznych części ciśnieniowej kotłów i turbin. Wśród elementów krytycznych istotne znaczenie mają elementy pracujące powyżej temperatury granicznej, to znaczy w warunkach pełzania. Względy ekonomiczne i wymagania w zakresie ochrony środowiska, wymuszają ponadto dokonanie modernizacji pracujących jednostek, mającej na celu podwyższenie ich sprawności netto. Niebagatelne znaczenie mają wymagania stawiane przez dyrektywę Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska, dotyczące ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery, takich jak związku siarki, azotu oraz dwutlenek węgla. Sposoby osiągnięcia tak zdefiniowanych celów są realizowane poprzez racjonalną diagnostykę, przeglądy i naprawy.

Biorąc pod uwagę współczesny stan wiedzy na temat żarowytrzymałości stali stopowych i trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych, jak również uwzględniając wyniki własnych badań autora w tym zakresie [1-100], postawiono następującą tezę niniejszej monografii:

„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”.

Dla potwierdzenia przyjętej tezy sformułowano poznawczy cel niniejszej monografii jako:

„Przedstawienie opisu procesu degradacji materiału podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, zmian jego struktury i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń”

oraz cel praktyczny jako:

„Opracowanie obiektywnej metody oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji w warunkach pełzania”.

Głównym naukowym celem niniejszej pracy jest zatem:

„Materiałoznawcza interpretacja przyczyn zmian oraz ocena trwałości stali stosowanych na elementy energetyczne pracujące w warunkach pełzania”.

Postawione cele są integralnie ze sobą związane, a wiedza uzyskana przez ich realizację pozwala na optymalne, z punktu widzenia czynników eksploatacyjnych, ekonomicznych i warunków bezpieczeństwa, wykorzystanie elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznej poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach podwyższonej temperatury, naprężenia oraz agresywnego środowiska. Dotyczy to szczególnie obiektów, które przekroczyły obliczeniowy czas pracy 100 000 godzin i z formalno-prawnego punktu widzenia nie powinny być dalej eksploatowane.

Cykl prac własnych wykonanych przez autora w obszarze trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych [56-60], uwzględnionych w niniejszej monografii, dotyczy aplikacji autorskiej metodyki diagnozowania uszkodzeń krytycznych elementów instalacji ciśnieniowych kotłów energetycznych, z wykorzystaniem badań materiałoznawczych, w ocenie przyczyn ich awarii. W celu prognozowania trwałości resztkowej elementów instalacji energetycznych autor podjął również własne prace z obszaru komputerowej nauki o materiałach, w zakresie wykorzystania metod sztucznej inteligencji, a zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych, w ramach autorskiej metodologii rozwiązania tego problemu [61-77].

Oddzielnym i równie istotnym problemem dotyczącym trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych jest trwałość eksploatacyjna złączy spawanych, jak i wykonywanie naprawczych złączy spawanych materiałów po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym lub z materiałami po eksploatacji, elementów wymagających naprawy lub dokonania zmian konstrukcyjnych w modernizacji instalacji po długotrwałej pracy. Wymaga to wiedzy w zakresie zachowania się materiałów badanych złączy w warunkach odpowiadających warunkom eksploatacji oraz wiedzy w zakresie technologii wykonywania naprawczych złączy spawanych. Zagadnienia te szczegółowo omówiono także w publikacjach autora [78-100]. Stanowią one niezwykle istotny element w praktycznej aplikacji stali i innych materiałów inżynierskich w energetyce, chociaż nie zostały one szczegółowo omówione w niniejszej monografii.

Ocena stanu degradacji elementów instalacji energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania oraz określenie ich przydatności do dalszej eksploatacji, każdorazowo wymagają 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. Wymienione badania i pomiary stanowią istotne elementy autorskiej metodyki oceny stanu degradacji elementów instalacji energetycznych prezentowanej w niniejszej pracy oraz wielokrotnie zastosowanej i zweryfikowanej w praktyce przemysłowej, a także zaprezentowanej i wykorzystanej w licznych spośród opracowań własnych, publikacji i wystąpieniach konferencyjnych autora [1-435]. Do tych badań i pomiarów należą m.in. metody penetracyjne, magnetyczne proszkowe i ultradźwiękowe badań nieniszczących, umożliwiające ujawnienie nieciągłości materiałowych, pomiar wartości trwałego odkształcenia, strzałki ugięcia, grubości ścianki i naprężeń własnych, których opis nie jest objęty niniejszą pracą, a nade wszystko badania materiałoznawcze, służące ustaleniu zaawansowania procesów strukturalnych wyczerpania i uszkodzenia materiału podczas eksploatacji w warunkach pełzania, do których ograniczono zakres niniejszej monografii.

Niniejsza monografia została opracowana w całości na podstawie wyników własnych prac naukowo-badawczych autora i stanowi syntetyczne ujęcie wyników zawartych w stu wybranych pracach własnych wybranych spośród prac badawczych i wdrożeniowych opublikowanych w kraju i za granicą głównie w ostatnim 5-leciu, a niemal w całości po roku 2000 [1-100], oraz niepublikowanych: rozprawy doktorskiej [101], czterech projektów badawczych (COST, rozwojowy i celowy) [102-105] i ok. trzystu trzydziestu prac wykonanych na zlecenie

przemysłu [106-435], dotyczących zagadnień pełzania, w tym głównie wybranych stali niskostopowych 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 (tabl. 1), jako najczęściej lub niemal wyłącznie dotychczas stosowanych w Polsce na elementy instalacji energetycznych, pracujące w warunkach pełzania, 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.

Tablica 1. Orientacyjny skład chemiczny badanych stali do pracy w podwyższonej temperaturze

Znak stali	Stężenie pierwiastków ¹⁾ , %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	inne
16Mo3 ²⁾	0,16	0,65	≤0,35	–	–	0,3	–	–
14MoV6-3 ²⁾	0,14	0,55	≤0,4	0,45	–	0,6	0,25	Sn ≤0,025 Al ≤0,02
13CrMo4-5 ²⁾	0,13	0,7	≤0,35	0,95	–	0,5	–	–
10CrMo9-10 ²⁾	0,11	0,5	≤0,5	2,25	–	1	–	–
X20CrMoV11-1 ^{3), 4)}	0,21	0,65	≤0,5	11,8	0,45	1	0,3	–

¹⁾ P ≤0,015-0,035, S ≤0,005-0,035; wartości bez znaku ≤ oznaczają stężenie średnie.
²⁾ Stale przeznaczone na urządzenia ciśnieniowe; Cr ≤0,3, Cu ≤0,3, Ni ≤0,3, Mo ≤0,08, Al ≤0,02-0,06, V ≤0,02, Nb ≤0,01; skład chemiczny stali o określonych własnościach w podwyższonej temperaturze, dostarczanych w postaci rur (PN-EN 10216-2+A2:2009, PN-EN 10217-2:2004 i PN-EN 10217-5:2004) i przeznaczonych na urządzenia ciśnieniowe.
Stal według: ³⁾ PN-EN 10302:2009, ⁴⁾ PN-EN 10269:2004.

Badania wykonano na elementach po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po rzeczywistym czasie eksploatacji znacznie dłuższym od obliczeniowego czasu pracy 100 000 godzin (tabl. 2). Dla każdego z badanych materiałów poddanych badaniom niszczącym wykonano kontrolną analizę składu chemicznego, wykazując jego zgodność z wymaganiami norm. Wyboru miejsc do badań dokonywano na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych, pomiarów i badań diagnostycznych, obliczeń sprawdzających oraz po wyznaczeniu rozkładu temperatury, odkształceń i naprężeń metodą elementów skończonych, dla najbardziej wyęźzonych miejsc i po dokonaniu ich analizy w oparciu o możliwą dostępność, celem ich wycięcia oraz możliwości dokonania naprawy lub wymiany. Wybrane do badań niszczących wycinki charakteryzowały się największym wyęźzeniem, gdyż pracowały w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych.

Tablica 2. Wybór materiału do badań

Gatunek stali	Badane elementy kotła		Parametry eksploatacji		
	Rodzaj	Liczba ¹⁾	Czas, godziny	Temperatura, °C	Ciśnienie, MPa
16Mo3	wycinki rur węzownic oraz komór przegrzewaczy pary po pracy w warunkach pełzania w kotłach energetycznych o wydajności od 430 do 650 ton pary/godz.	ponad 100	105 000 do 230 000	490 do 510	12 do 16,5
14MoV6-3	wycinki rur z elementów głównych rurociągów pary świeżej po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotłów energetycznych o wydajności od 430 do 1650 ton pary/godz.	ponad 500	100 000 do 230 000	530 do 575	12 do 19,5
13CrMo4-5	wycinki węzownic ogrzewane spalinami od zewnątrz, ogrzewane czynnikiem od wewnątrz kolektory, komory i regulatory temperatury oraz główne i komunikacyjne rurociągi parowe części ciśnieniowej kotłów energetycznych o wydajności od 430 do 1650 ton pary/godz.	ponad 800	50 000 do 230 000	510 do 550	12 do 21
10CrMo9-10	wycinki rur pobranych z elementów komór wylotowych, regulatorów temperatury, rurociągów pary wtórnie przegrzanej i węzownic przegrzewaczy pary pierwotnej i wtórnie przegrzanej po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotłów energetycznych o wydajności od 430 do 1650 ton pary/godz.	ponad 800	50 000 do 230 000	520 do 560	12 do 21
X20CrMoV11-1	wycinki rur pobrane z komór wylotowych oraz materiał węzownic przegrzewaczy pary po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotłów energetycznych o wydajności od 1150 do 1650 ton pary/godz.	ponad 500	60 000 do 185 000	540 do 590	18 do 21
¹⁾ Łączna liczba elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych pracujących w warunkach pełzania poddanych nieniszczącym lub niszczącym badaniom materiałowym.					

Przeładowy charakter opracowania uniemożliwia zaprezentowanie wszystkich pojęć podstawowych, które ujęto we wcześniej opublikowanych współautorskich opracowaniach podręcznikowych autora [49-51]. Ponieważ monografia w całości dotyczy prezentacji

własnych osiągnięć naukowo-badawczych autora, świadomie zrezygnowano z klasycznego przeglądu aktualnego stanu wiedzy, która w dużej mierze jest ukształtowana, zwłaszcza w Polsce, przy udziale autora, a skupiono się na wynikach badań własnych autora, które niemal w całości stanowią treść niniejszej monografii.

Autor w tym miejscu ma honor oddać swój hołd Wielkim Metaloznawcom, którzy ukształtowali Jego sylwetkę naukową i swym oddziaływaniem przesądziли o wyborze przez Niego życiowej drogi naukowej w zakresie materiałoznawstwa energetycznego, w tym nieżyjącym już: Prof. Adolfowi Maciejnemu Dr. hc., Prof. Janowi Adamczykowi Prof. Hon. i Mgr. inż. Zbigniewowi Borysowskiemu, oraz nadal najbliższym współpracującym z Autorem przez wiele lat: Prof. Tadeuszowi Bołdowi, Prof. Adamowi Hernasowi i Dr. inż. Piotrowi Milińskiemu, jak również złożyć podziękowania za współpracę Dr. inż. Adamowi Schwedlerowi Dyrektorowi Instytutu Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach.