

Włodzimierz A. SOKÓŁ
Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Kotłów
i Instalacji Energo-Ekologicznych,
„ECOPLANT-KATOWICE”, Tarnowskie Góry

OCENA UBYTKU TRWAŁOŚCI ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH KOTŁÓW NA PODSTAWIE KOMPLEKSOWEJ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ I WYNIKÓW DIAGNOSTYKI MATERIAŁOWEJ

Streszczenie. W referacie przedstawiono metodykę oceny ubytku trwałości elementów ciśnieniowych kotłów na podstawie kompleksowej symulacji komputerowej procesów zachodzących w węzłach konstrukcyjnych w warunkach minionego i prognozowanego okresu eksploatacji oraz na podstawie badań diagnostycznych materiałów.

LIFE ESTIMATION OF THE PRESSURE PARTS OF BOILERS BY MEANS OF THE COMPLEX COMPUTER SIMULATION AND DIAGNOSTICAL STUDY OF MATERIALS

Summary. In the paper methodical basis of life estimation of the pressure parts of boilers by means of the complex simulation of the processes in structure during the past and future exploitation and diagnostical study of materials are given.

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИМУЛЯЦИИ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Резюме. Представлено вопросы долговечности деталей давления котельных агрегатов при использовании комплексного анализа процессов в конструкционных узлах в условиях прошлой и будущей работы и на основе диагностических испытаний материалов.

1. WSTĘP

Większość kotłów pracujących w energetyce zawodowej oraz ciepłownictwie ma już za sobą znaczny, 20–30-letni okres eksploatacji. Ówczesne sposoby zapewnienia jakości podczas projektowania, produkcji i montażu urządzeń odbiegały od obecnych. W efekcie sumowania się błędów projektowych, produkcyjnych, montażowych i eksploatacyjnych następuje przyspieszony ubytek trwałości elementów ciśnieniowych walczaków, komór, korpusów zaworów, rurociągów itd. Obiektywnie następujący ubytek trwałości węzłów konstrukcyjnych w procesie eksploatacji często nie jest znany do momentu wystąpienia groźnych w skutkach i kosztownych do usunięcia awarii.

Jednocześnie obserwuje się silne dążenie użytkowników kotłów do znacznego wydłużenia czasu eksploatacji pracujących jednostek powyżej projektowanego okresu 20–30 lat, a nawet oczekiwanie osiągnięcia przez nie zdolności ruchowej znacznie wyższej od dotychczasowej, np. elastycznej pracy w ramach współpracy systemu energetycznego Polski z systemem krajów EWG.

Potrzeba przedłużenia okresu eksploatacji wynika z braku środków na pokrycie kosztów modernizacji elektrowni i ciepłowni poprzez wymianę starych kotłów na nowoczesne, oszczędne i mniej uciążliwe dla otoczenia. Częściową modernizację kotła z pominięciem wymiany elementów najdroższych, np. walczaków wielu użytkowników ocenia jako rozwiązanie słuszne.

Pojawiają się więc koncepcje i technologie zakładające możliwość tzw. rewitalizacji urządzeń, w szczególności dotyczące walczaków, wychodzące na przeciw oszczędnościowym oczekiwaniom użytkowników na tanie przywrócenie pierwotnych walorów technicznych i ruchowych wysłużonych elementów kotłów po 20–30 latach pracy. Realność realizacji wspomnianych koncepcji bywa kontrowersyjna i nie zawsze jest możliwa.

Udokumentowanie możliwości eksploatacji kotła, który przepracował 20–30 lat przez następnych kilkadziesiąt lat w warunkach cyklicznie zmieniających się obciążeń cieplnych i mechanicznych, powstających podczas planowych rozruchów i odstawiń, odstawiń awaryjnych, zmian obciążeń, prób ciśnieniowych, pełzania itp. nie jest zadaniem prostym i wymaga zastosowania wyspecjalizowanych metod symulacji komputerowej w powiązaniu z programami pogłębionych badań materiałowych.

2. METODYKA OCENY UBYTKU TRWAŁOŚCI ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH

Ocena ubytku trwałości dotyczy takich elementów ciśnieniowych kotłów, jak: walczaki, wybrane komory, rurociągi, korpusy zasuw i ma na celu określenie:

- a) rzeczywistego stanu technicznego elementów konstrukcji kotłów po wieloletniej eksploatacji w warunkach zmiennych obciążeń cieplnych i mechanicznych, drgań oraz pełzania,
- b) możliwego jeszcze okresu dalszej bezpiecznej eksploatacji kotłów,
- c) programów eksploatacji kotłów ograniczających zmniejszanie się zapasu trwałości elementów konstrukcyjnych poniżej dopuszczalnego poziomu dla zapewnienia osiągnięcia prognozowanego okresu dalszej pracy,
- d) częstotliwości i zakresu następnych badań diagnostycznych materiałów,
- e) terminów i zakresu remontów, zakresu niezbędnej modernizacji lub terminów wymiany elementów na nowe,
- f) założeń systemu stałego nadzoru diagnostycznego nad pracą kryterialnych przekrojów, zabezpieczającego wymagany poziom trwałości elementów konstrukcyjnych kotła podczas dalszej eksploatacji.

Omawiana metodyka wykorzystuje wyniki diagnostyki materiałowej i obejmuje:

- wstępną analizę ubytku trwałości na podstawie zmodyfikowanego algorytmu TRD 301 [1] oraz algorytmu TRD 508 [2] (dla elementów pracujących w warunkach pełzania materiału),
- analizę szczegółową na podstawie rozwiniętych dla potrzeb diagnostyki kotłowej metod i programów kompleksowej analizy procesów w urządzeniach energetycznych [5, 6, 7] oraz badań diagnostycznych materiałów.

2.1. Analiza wstępna

Analiza wstępna jest wykorzystywana dla zgrubnego oszacowania warunków minionej i przyszłej pracy określonych elementów kotła dla ustalenia szczegółowego zakresu symulacji komputerowej i zakresu badań materiałowych. Wstępne oszacowanie przebiega na podstawie zmodyfikowanego algorytmu TRD 301 [1], gdyż oryginalny posiada szereg założeń upraszczających, dających wyniki obliczeń albo skrajnie optymistyczne lub przesadnie konserwatywne.

Modyfikacja algorytmu TRD-301 dla potrzeb analizy wstępnej dotyczy sposobu obliczania ilości dopuszczalnych cykli obciążenia metodyki ustalania sekwencji obciążeń oraz zawiera uzupełnienie analizy naprężeniowej analizą stanu odkształceń. Do obliczeń wstępnych przyjmuje się najczęściej dane materiałowe z atestów oraz wymiary geometryczne z dokumentacji konstrukcyjnej. Dla elementów pracujących w warunkach pełzania materiału obliczenia bazują dodatkowo na algorytmie TRD-508 [2].

2.2. Analiza szczegółowa

Metodyka szczegółowa realizuje zakres analiz (a)–(f) podany w punkcie 2 w oparciu o badania diagnostyczne materiałów i złożony proces symulacji komputerowej, który obejmuje:

- analizę procesów ciepłno–przepływowo zachodzących w czynnikach roboczych w minionych (przy prognozie – w przewidywanych) stanach eksploatacji,
- obliczenia nieustalonych pól temperatur w węzłach konstrukcyjnych w stanach eksploatacyjnych i awaryjnych,
- symulację stanu naprężeń i wytrzymałości niskocyklicznej w węzłach konstrukcyjnych w rozpatrywanych warunkach obciążeń cieplnych i mechanicznych w rozbiu na kategorie wg zaleceń przepisów [3] i [4], pełzania, drgań oraz analizę propagacji pęknięć w elementach z wadami niemożliwymi do naprawy,
- analizę wytrzymałościową kryterialnych przekrojów w poszczególnych kategoriach wg [3] lub [4],
- określenie procentowego ubytku trwałości badanych elementów i możliwego jeszcze okresu i warunków dalszej eksploatacji, terminów remontów i zakresu następnych badań diagnostycznych,
- wskazanie węzłów konstrukcyjnych do opomiarowania diagnostycznego i opracowania założeń do zabudowy systemu stałego systemu nadzoru diagnostycznego kotła,
- udokumentowanie propozycji ewentualnych zmian konstrukcyjnych.

W procesie symulacji komputerowej stosowane są rozwinięte metody modelowania powyższych procesów w czynnikach roboczych za pomocą metod opisanych w [6] oraz stanu wytrzymałościowego elementów konstrukcyjnych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych MES i teorię powłok [7].

Wnioski o skutkach minionej i prognozowanej eksploatacji kotła można wyciągnąć na podstawie analizy wyników obliczeń wytrzymałościowych elementów ciśnieniowych, określających następujące składowe naprężeń:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| $(S)_m$ – ogólne membranowe, | $(S)_{mM}$ – miejscowe membranowe, |
| $(S)_b$ – ogólne zginające, | $(S)_{bM}$ – miejscowe zginające, |
| $(S)_t$ – ogólne temperaturowe, | $(S)_{tM}$ – miejscowe temperaturowe, |
| $(S)_{KM}$ – przyrost naprężeń w strefach koncentracji | |

oraz kontroli spełnienia kryteriów wytrzymałościowych w następujących czterech kategoriach naprężeń:

- | | |
|---|-----|
| $(S)_m$ | (a) |
| $(S)_2 = (S)_m$ lub $(S)_{mM} + (S)_b$ | (b) |
| $(S)_R = (S)_m$ lub $(S)_{mM} + (S)_b + (S)_{bM} + (S)_t$ | (c) |
| $(S) = (S)_m$ lub $(S)_{mM} + (S)_b + (S)_{bM} + (S)_t + (S)_{tM} + (S)_{KM}$ | (d) |

Obliczenia dotyczą przy tym następujących przypadków:

- obciążeń mechanicznych; wówczas maksymalne wartości naprężeń zredukowanych wg teorii maksymalnych naprężeń statycznych [3, 4] określa kategoria $(S)_2$,

- obciążeń cieplnych i mechanicznych bez obciążeń miejscowych temperaturowych i koncentracji naprężeń, wyznaczanych dla rozpiętości naprężeń zredukowanych $(S)_R$,
- obciążeń cyklicznych określonych kategorią (S) , dotyczących amplitudy naprężeń zredukowanych.

W powyższym:

$$(S)_2 = \max \{ (S_i - S_j), (S_i - S_k), (S_j - S_k) \}, \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

$$(S)_R = \max \begin{cases} (S)_{R1} = (S_i - S_j)_{\max} - (S_i - S_j)_{\min} \\ (S)_{R2} = (S_i - S_k)_{\max} - (S_i - S_k)_{\min} \\ (S)_{R3} = (S_j - S_k)_{\max} - (S_j - S_k)_{\min} \end{cases}$$

$$(S)_a = \max \begin{cases} (S)_{a1} = 0,5 | (S_i - S_j)_{\max} - (S_i - S_j)_{\min} | \\ (S)_{a2} = 0,5 | (S_i - S_k)_{\max} - (S_i - S_k)_{\min} | \\ (S)_{a3} = 0,5 | (S_j - S_k)_{\max} - (S_j - S_k)_{\min} | \end{cases},$$

gdzie indeksy 1, 2, 3 oznaczają naprężenia główne.

Rozpiętość naprężeń zredukowanych $(S)_R$ i amplitudę naprężeń zredukowanych (S) określa się na podstawie analizy charakterystyk pracy elementów konstrukcyjnych w cyklicznie zmiennych warunkach obciążeń cieplnych i mechanicznych z uwzględnieniem ich rzeczywistej sekwencji występowania w całym okresie minionej i prognozowanej pracy. Analizowane są przy tym zarówno cykle globalne obciążeń, jak również cykle lokalne oraz rzeczywista asymetria obciążeń w każdym cyklu.

W przypadku rurociągów poszczególne kryteria uzupełniają naprężenia pochodzące od sił i momentów wywołanych samokompensacją rurociągów. W tym przypadku w zależności (b) uwzględnia się naprężenia wstępne, oznaczone przez $(S)_3$, a w formułach (c) i (d) oddziaływania ruchowe.

Prawidłowo zaprojektowane i eksploatowane urządzenie powinno spełniać warunki:

$$(S)_m \leq [S] \quad (e)$$

$$(S)_2 \leq 1,5[S] \text{ wg [3] lub } 1,3[S] \text{ wg [4];} \quad (f)$$

dla próby wodnej wg [4] $1,5[S]$

$$(S)_R \leq 3[S] \text{ wg [3] lub } 2,5[S] \text{ wg [4]} \quad (g)$$

$$(S)_a \leq [S]_a \text{ oraz } e_w = [N_i]/[N_i] \leq 1 \quad (h)$$

$[S]$ – naprężenie dopuszczalne,

$[N_i]$ – dopuszczalna liczba cykli

$[S]$ – dopuszczalna amplituda naprężeń.

Wymaga się, aby elementy pracujące w warunkach pełzania spełniały warunki podane w [2]; wskaźnik ubytku trwałości od pełzania sumuje się odpowiednio w kategorii (h). Naprężenia dopuszczalne [S] ustala się w zapas oceny na podstawie przepisów UDT [8].

Analiza wyników symulacji komputerowej minionego oraz prognozowanego okresu eksploatacji w podanych kategoriach naprężeń pozwala na pełną ocenę ubytku trwałości badanych elementów ciśnieniowych kotła w zakresie (a)–(f) wg pktu 2.

2.3. Badania diagnostyczne

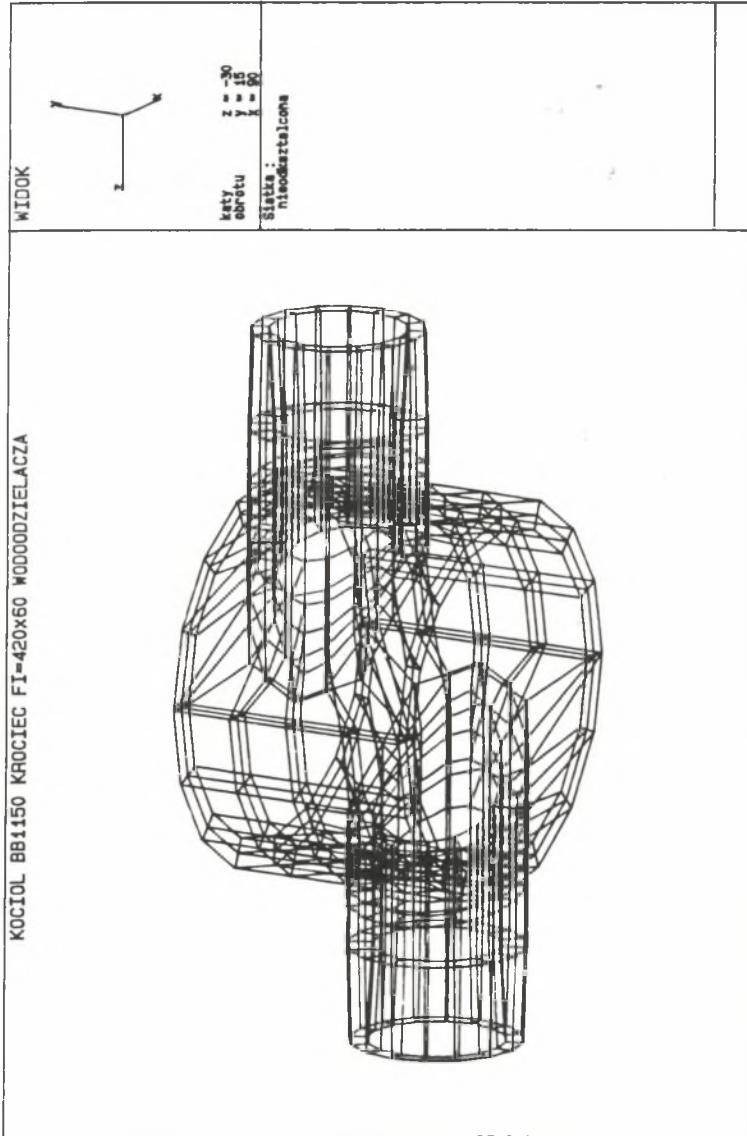
W przypadku oceny ubytku trwałości elementów ciśnieniowych po kilkunastu czy kilkudziesięciu latach eksploatacji niezbędne jest operowanie aktualnymi danymi opisującymi geometrię i własności materiałów oraz wykrycie i naprawa ewentualnych wad i uszkodzeń węzłów konstrukcyjnych. W tym celu wykonuje się badania diagnostyczne materiałów. Podczas badań sprawdza się, w jakim stopniu dotychczasowa eksploatacja spowodowała obniżenie własności mechanicznych i zmianę wymiarów geometrycznych w stosunku do stanu wyjściowego, podanego w atestach materiałowych oraz dokumentacji konstrukcyjnej i czy zmiany te nie pogłębiają się w czasie, dyskwalifikując elementy z dalszej bezpiecznej eksploatacji. Zakres wykonywanych badań diagnostycznych ustala się w zależności od kompletności dokumentacji technicznej i materiałowej (atestów), okresu eksploatacji kotła, wiarygodności danych eksploatacyjnych, zakresu i częstotliwości dotychczas stwierdzonych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych. Badania diagnostyczne mogą obejmować tylko badania nieniszczące lub również badania niszczące wycinków z powierzchni ogrzewalnych i wyciętych korków. Programy badań materiałowych każdorazowo uzgadnia się z właściwym inspektorem UDT.

3. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE OCENY UBYTKU TRWAŁOŚCI W DIAGNOSTYCE ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH KOTŁÓW

Omawianą metodykę rozwinięto w ramach wykonanych badań diagnostycznych kotłów energetycznych: BB–1150, OP–650b (11 kotłów), OP–380b i OP–380k, kotłów ciepłowniczych i przemysłowych: CKTI–75 i KE–25 (3 kotły), WR–5 oraz kotła odzysknicowego BABCOCK, w tym 31 walczaków. Ograniczona objętość referatu pozwala przedstawić jedynie fragmentarycznie wybrany przykład zastosowania omawianej metodyki do oceny ubytku trwałości komory P3 i wodooddzielacza kotła BB–1150 [9]. Dla wszystkich badanych elementów kotła opracowano zestaw modeli węzłów konstrukcyjnych do symulacji:

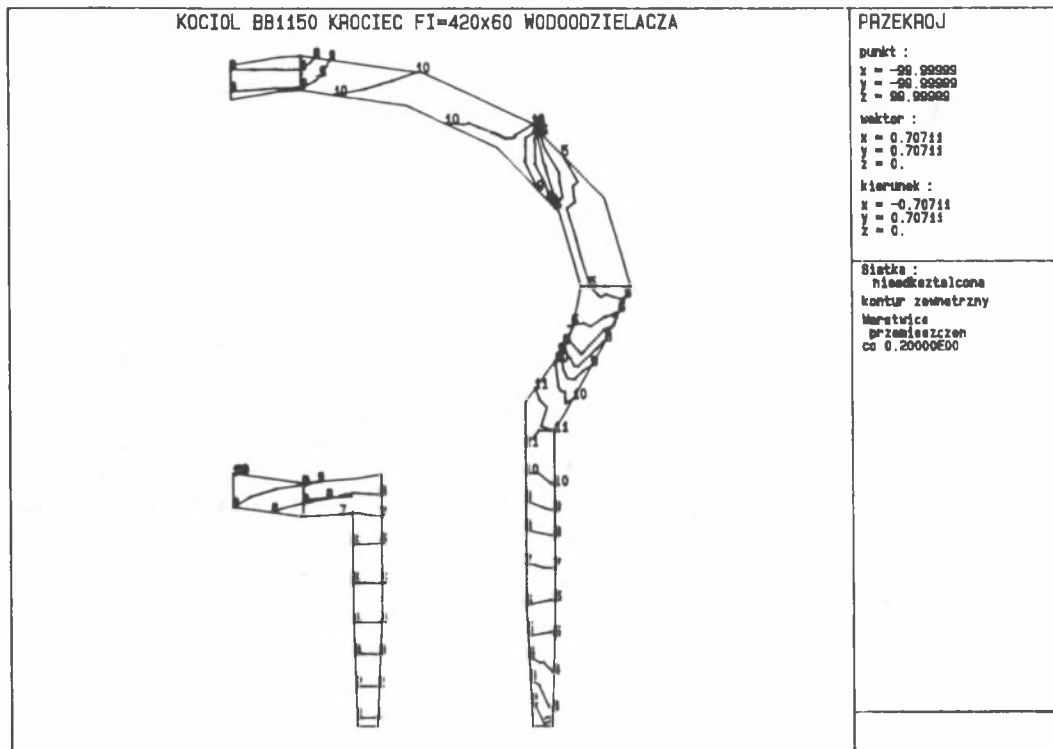
- nieustalonych pól temperatur,
- stanu naprężeń na bazie MES,
- ubytku obliczeniowego trwałości.

Wybrane modele przestrzenne węzłów wodooddzielacza i komory P3 i wyniki obliczeń wytrzymałościowych za pomocą MES pokazano na rys. 1–4.



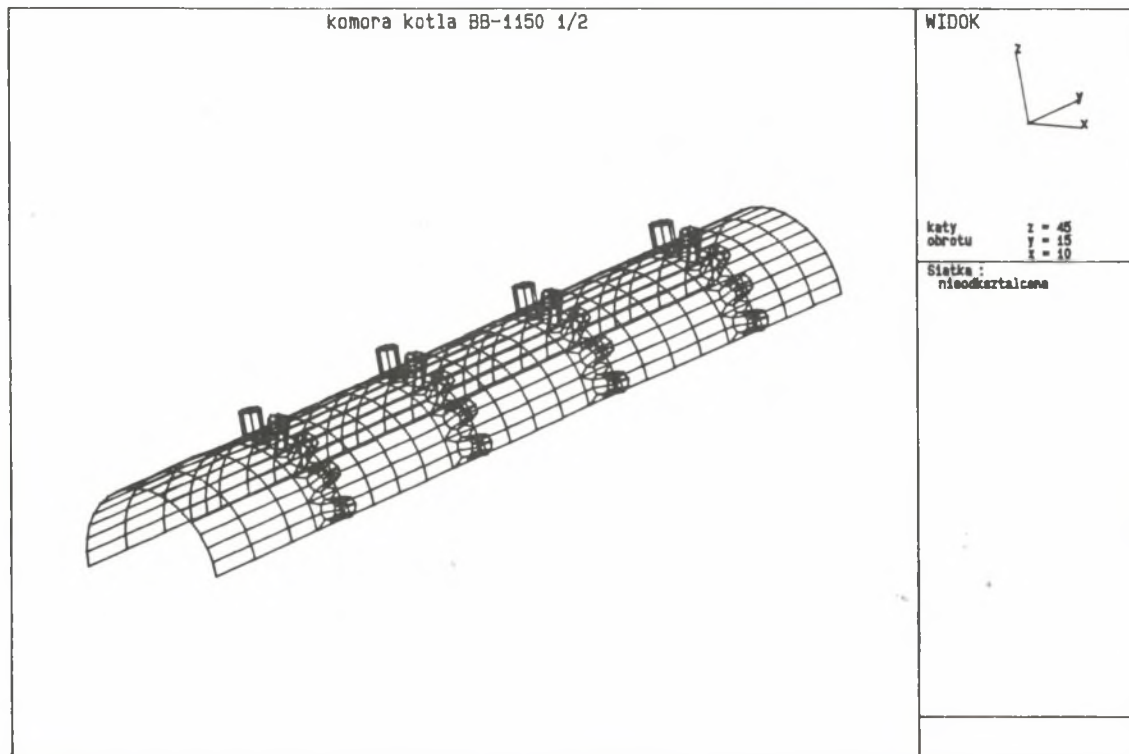
Rys. 1. Model MES wodooddzielacza w strefie króćców wlotu wody

Fig. 1. Finite element model of water inlet junctions of steam separator



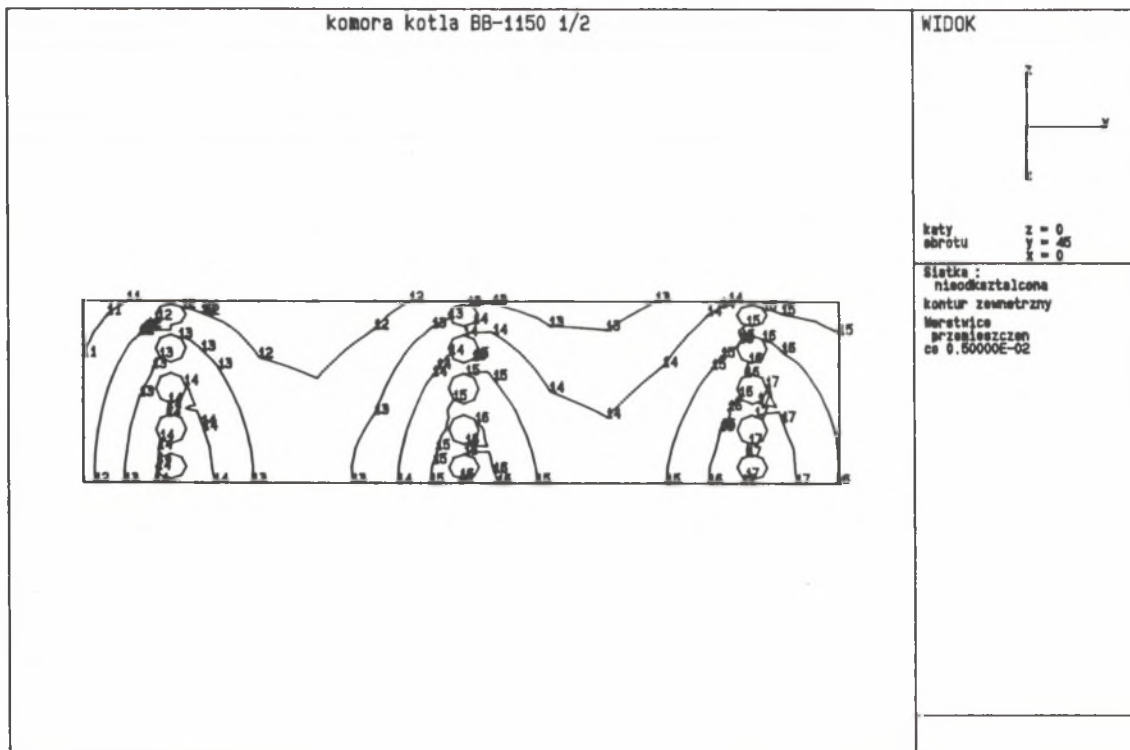
Rys. 2. Warstwice przemieszczeń co 0,2 mm z MES w wybranym przekroju wodooddzielacza

Fig. 2. Displacement contour with step 0,2 mm in the selected cross-section of steam separator



Rys. 3. Model MES komory parowej P3

Fig. 3. Finite element model of steam chamber P3



Rys. 4. Warstwice przemieszczeń co 0,005 mm w wybranym przekroju komory parowej P3

Fig. 4. Displacement contour with step 0,005 mm in the selected cross-section of steam chamber P3

Geometrię i własności materiałowe ustalono na podstawie wyników badań diagnostycznych materiałów, wykonanych przez RAFAKO. Korzystając z danych dotyczących łącznej ilości rozruchów i odstawięń kotła w ilości 384 oraz ilości prób ciśnieniowych zbudowano modele obciążenia cyklicznego, obejmujące następujące warianty (cykle) pracy:

- | | | | |
|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
| 1) O – P1 – O | NC=3, | 2) O – P2 – O, | NC=6, |
| 3) O – P3 – O | NC=16, | 4) O – R – N – S – O, | NC=109, |
| 5) N – S – G – R – N, | NC=275, | 6) N – A – R – N, | NC=600, |

gdzie:

- O – stan zimny, P1 – próba ciśnieniowa na ciśnienie: 26,25 MPa w komorze P3 i 28,75 MPa w wodooddzielaczu,
- P2 – próba ciśnieniowa na ciśnienie: 18,6 MPa w komorze P3 i 21,0 MPa w wodooddzielaczu,
- P3 – próba ciśnieniowa na ciśnienie: 18,6 MPa w komorze P3 i 21,0 MPa w wodooddzielaczu,
- R – rozruch ze stanu zimnego do nominalnego z szybkością podnoszenia temperatury 1,7 K/min; stan zimny określała temperatura 20°C,
- G – rozruch ze stanu gorącej rezerwy z szybkością wzrostu temperatury 1,7 K/min; stan gorący określa w obliczeniach temperatura 200°C,
- S – studzenie z jednakową szybkością –1,6 K/min zarówno w stanie planowego odstawiania, jak również podczas odstawiania awaryjnego do stanów: zimnego i gorącego,
- A – stan zakłócenia normalnych warunków eksploatacji polegający na przekroczeniu temperatury $t = 510^{\circ}\text{C}$ o 60°C w komorze P3 i spadek temperatury w króćcu wodooddzielacza o 60°C do 310°C .

Wykonane symulacje komputerowe i badania diagnostyczne pozwoliły odtworzyć dotychczasową historię obciążenia elementów kotła, ocenić przyczynę stwierdzonych podczas badań diagnostycznych uszkodzeń, oszacować czas i warunki dalszej eksploatacji oraz ustalić terminy następnych badań diagnostycznych.

4. WNIOSKI

Przedstawiona w referacie metodyka oceny ubytku trwałości elementów ciśnieniowych, opierająca się na symulacji komputerowej procesów zachodzących w elementach konstrukcyjnych kotłów oraz wynikach diagnostyki materiałowej, pozwala na:

- ocenę stanu technicznego elementów ciśnieniowych kotłów po wieloletniej eksploatacji i możliwość ich tzw. „rewitalizacji”,
- prognozowanie czasu i warunków przyszłej eksploatacji kotłów oraz planowanie terminów i zakresu niezbędnych remontów,

- wykrywanie przyczyn uszkodzeń elementów ciśnieniowych i opracowanie technologii naprawy,
- modernizację kotłów, z uwzględnieniem konieczności zabezpieczenia odpowiedniego poziomu trwałości elementów konstrukcyjnych,
- ustalenie częstotliwości i zakresu następných badań diagnostycznych materiałów,
- kontrolowanie ubytku trwałości podczas eksploatacji kotłów poprzez zabudowę systemów stałego nadzoru diagnostycznego nad pracą elementów ciśnieniowych.

LITERATURA

- [1] TRD 301 Anlage 1, April 1980.
- [2] TRD 508 Anlage 1, October 1978.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section III, section VII, IX, 1974 Edition.
- [4] Normy rascziota na procznost eliemientow rieaktorow, parogienieratorow, sosudow i truboprowodow atomnych elektrostancij opytnych i issledowatielskich jadiernych rieaktorow i ustanowok. Mielallurgija, Moskwa 1973.
- [5] Sokół W. A.: Możliwości wykorzystania kompleksowej identyfikacji procesów dla potrzeb projektowania, kontroli eksploatacji i diagnostyki urządzeń cieplnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Energetyka z. 113, Gliwice 1990, ss. 457–474.
- [6] Sokół W. A., Ober J.: Kompleksowa analiza procesów w urządzeniach energetycznych za pomocą mikrokomputerowego systemu modelowania matematycznego. Część I. Archiwum Energetyki. Tom XX, 1991, nr 1–2. PWN, 1992, ss. 3–18.
- [7] Sokół W. A., Ober J.: Kompleksowa analiza procesów w urządzeniach energetycznych za pomocą mikrokomputerowego systemu modelowania matematycznego. Część II. Archiwum Energetyki. Tom XX, 1991, nr 3–4, PWN, 1992, ss. 76–93.
- [8] Warunki Techniczne Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe. Obliczenia wytrzymałościowe. DT–UC–90/WO–O.
- [9] Sokół W. A.: Analiza wytrzymałościowa minionej i przyszłej pracy komory P3 i króćców wodooddzielacza kotła BB–1150 w Elektrowni Bełchatów w warunkach zmiennych obciążeń na podstawie symulacji komputerowej i wyników badań diagnostycznych. Oprac. CBKKiIE „ECOPLANT–KATOWICE”, marzec 1994, nie publikowane.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek PRONOBIS

Wpłynęło do Redakcji 28.08.1994 r.

Abstract

In the paper methodical basis of life estimation of the pressure parts of boilers by means of the complex simulation of the processes in structure during the past and future exploitation and diagnostical study of materials are given.

This method was applied in the case of utility steam boilers like: BB-1150, OP-650b (11 -units), OP-380b and OP-380k, boilers for district heating plants: CKTI-75, KE-25S (3 units), water boiler WR-5, recovery boiler BABCOCK and 31 drums.

Results of life analysis of the selected structure: steam separator and steam chamber P3 of BB-1150 boiler are more detailed presented in the paper.