

Aleksander ZYK

Centralne Biuro Konstrukcji Kotłów  
Tarnowskie Góry

## O POPRAWĘ DYSPOZYCYJNOŚCI KOTŁÓW PAROWYCH

Streszczenie. Podstawą do wykonania obliczeń wytrzymałościowych elementów pracujących pod ciśnieniem są przepisy dozоровe. Elementy kotłów parowych zgodnie z wymaganiami polskiego Urzędu Dozoru Technicznego podlegają w sposób obligatoryjny tylko obliczeniom wytrzymałościowym statycznym. Spełniające podobne funkcje urządzenia w EJ obliczane są z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych, temperaturowych, cyklicznych itp. Pozwala to w sposób dokładniejszy i pewniejszy skonstruować określone urządzenie i ustalić odpowiednie jego wymiary, co w wydatny sposób przyczyni się do zmniejszenia awaryjności urządzenia.

Zagadnienia te omawiane są w niniejszym opracowaniu. Dla ilustracji omawianych zagadnień przytoczone są również przykłady niektórych urządzeń energetyki jądrowej.

Do najważniejszych wskaźników charakteryzujących wyniki pracy urządzeń należy dyspozycyjność, która w odniesieniu do dużych bloków energetycznych ma szczególne znaczenie.

Dyspozycyjność bloku jest funkcją dyspozycyjności poszczególnych urządzeń i ich liczby. Obniżenie tego wskaźnika zależne jest od awaryjności urządzeń w tym większym stopniu im jest ich więcej w układzie. Jest rzeczą oczywistą, że poza tym na dyspozycyjność ma również wpływ rezerwa mocy w systemie elektroenergetycznym oraz polityka remontowa i jakość samych remontów.

Największy udział w awaryjności bloków mają kotły. Wskaźnik ten osiąga wartość nawet 50 %, co oznacza, że połowa przypadków awaryjnych przypada na te urządzenia, reszta na turbiny, urządzenia pomocnicze, części elektryczne z generatorem włącznie. Jest to zrozumiałe, jako że urządzenia te posiadają wiele urządzeń i elementów składowych, a duża ich część pracuje w szczególnie trudnych warunkach. Część ciśnieniowa kotła, a przede wszystkim elementy przegrzewaczy pary oraz powierzchni ogrzewalne ekranów ulegają najczęściej uszkodzeniom. Na część ciśnieniową przypada nawet ponad 80 %, z czego połowa na przegrzewacze pary. W mniejszym stopniu przypadki takie występują na: komorach parowników oraz powierzchniach ogrzewalnych podgrzewaczy wody. Analizując zagadnienie z punktu widzenia rodzaju paliwa, największy wskaźnik awaryjności stwierdza się na kotłach opalanych paliwem stałym. Do wyłączeń

materiałowych pochodzących od wysokich ciśnień i temperatur dochodzą negatywne oddziaływania erozji popiołowej i to tym większe im gorsze jest paliwo, tzn. im jest większa ilość popiołu, gorsze jego charakterystyki erozyjne oraz większe prędkości cząstek stałych względem powierzchni ogrzewalnych. Oddziaływanie to jeszcze wzmacnia się w przypadku lokalnego wzrostu koncentracji popiołu w spalinach w stosunku do wartości średniej. Jak zauważono wyżej wśród elementów ciśnieniowych najwięcej uszkodzeń notuje się na przegrzewaczach pary.

Ze względu na wysokie ciśnienie i największe temperatury pary, ścianki rur i komór posiadają największe grubości, a warunki pracy należą do najtrudniejszych. Dochodzą do tego nierównomierności przepływów czynników zarówno po stronie spalin, jak i po stronie pary, niejednakowy stopień zanieczyszczenia poszczególnych węzłowic i nierównomierne ich ogrzewanie. Również własności materiałowe odgrywają w tych przypadkach istotną rolę. Dotyczy to w szczególności ostatnich stopni przegrzewaczy pary, w których ze względu na wysokie temperatury pary niezbędne jest zastosowanie stali stopowych czy nawet stali austenitycznych. Szczególnie te ostatnie, dzięki swoim własnościom fizycznym i mechanicznym, są mało odporne na zmienne warunki pracy oraz są znacznie trudniejsze technologicznie od stali perlitycznych, co stwarza określone problemy eksploatacyjne i remontowe, mając w konsekwencji wpływ na awaryjność a zatem i dyspozycyjność urządzenia. Wysiłki konstruktorów zmierzają do wprowadzenia rozmaitych zabiegów konstrukcyjnych, zmniejszających wpływ tych niekorzystnych czynników i maksymalnego wyrównania temperatur ścianek. Tym niemniej różnice te są istotne i stąd naprężenia jakie mają miejsce są bardzo zbliżone do naprężeń dopuszczalnych lub są od nich niewiele mniejsze. Zdarzają się wypadki, że je nawet w określonych warunkach przekraczają. Dotyczy to zwłaszcza elementów grubościennych, takich jak: walczaki, komory zbiorcze itp. oraz węzłów o dużym stopniu nieciągłości konstrukcji - połączenia króćców z grubościennymi elementami cylindrycznymi, nagłe zmiany grubości ścianki. Ogólnie rzecz biorąc obliczenia przewidywanych rzeczywiście naprężeń wykonywane są z dokładnością nieadekwatną do warunków występujących w normalnej eksploatacji, nie mówiąc już o licznych stanach przejściowych.

Podstawą prawną dla wykonania obliczeń wytrzymałościowych elementów ciśnieniowych są obowiązujące Przepisy Dozoru technicznego. W Polsce obowiązują dokumenty dozоровe /1/ wydane w 1975 roku, które dotyczą obliczania elementów ciśnieniowych podlegających obciążeniom statycznym i w których nie uwzględnia się naprężeń temperaturowych, ani cyklicznych.

Wydaje się, że zakres ten jak na aktualne warunki i potrzeby jest niedostateczny. Potwierdzeniem takiej oceny zagadnienia jest szeroko już stosowana praktyka, obowiązująca przy projektowaniu i konstruowaniu urządzeń dla energetyki jądrowej. Odpowiednie przepisy dozоровe za granicą precyzują szczegółowo warunki jakie muszą być spełnione przy

wykonaniu obliczeń wytrzymałościowych. Poza obliczeniami od obciążeń statycznych przepisy takie, np. ASME czy radzieckie /2 / uwzględniają szereg obciążeń dynamicznych, wynikających z różnych stanów pracy, zmiany temperaturowe w warunkach nieustalonych jakie mają miejsce w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych urządzenia, obliczenia wytrzymałości cyklicznej. W każdym przypadku winno być dokonane sprawdzenie poszczególnych kategorii naprężeń oraz ich analiza. Aby tego rodzaju zadania mogły być wykonane niezbędne są dokładne założenia. Obejmują one przede wszystkim:

- zestawienie przewidywanych stanów pracy z określeniem ich ilości w całym okresie pracy urządzenia. Dotyczy to w szczególności warunków rozruchu ze stanu zimnego i gorącej rezerwy, odstawienia normalnego i awaryjnego oraz rozruchu po odstawieniu awaryjnym, naboru i zrzutu obciążenia, zmiany obciążeń w granicach  $\pm 10\%$  obciążenia normalnego oraz w zakresie 50-100%, badania szczelności i próby wodnej, badanie układów automatyki i blokad oraz szeregu innych stanów pracy;
- zestawienie przewidywanych cykli obciążeń z podaniem ich ilości. Np. stan zimny - rozruch ze stanu zimnego - stan normalnej pracy - odstawienie do stanu zimnego - np. 50 cykli itd.
- przebiegi czasowe parametrów czynników roboczych z uwzględnieniem strumieni masy, wielkości ciśnień, temperatur, a dla czynników dwufazowych również stopień suchości, odpowiadające przewidywanym stanom pracy;
- zakładane temperatury otoczenia w poszczególnych stanach pracy;
- zakładane temperatury montażu;
- inne istotne informacje i stany jakie mogą zaistnieć w ciągu całego okresu pracy urządzenia.

Wyżej wymienione założenia, uzupełnione być muszą o dane dotyczące rodzaju materiałów oraz ich własności fizyczne i wytrzymałościowe z jakich wykonane mają być określone fragmenty urządzenia, przebieg strumieni ciepła z konkretnymi współczynnikami wymiany ciepła, aktualne kształty i wymiary elementów podlegających obliczeniom. Ten zakres danych powstaje w trakcie prac projektowych i konstrukcyjnych, a źródłem jest dokumentacja projektowo-konstrukcyjna z warunkami technicznymi wykonania i odbioru włącznie. W oparciu o tak zestawione dane informacyjne, dokonuje się szczegółowej analizy konstrukcyjnej całego urządzenia, wyodrębnia się poszczególne węzły konstrukcyjne, których stan obciążenia jest istotny dla pracy całego urządzenia, opracowuje się modele matematyczne do obliczania procesów przepływowo-ciepłnych, obliczania nieustalonych pól temperatur, stanu naprężeń i obciążeń cyklicznych.

Przy założeniu, że istnieją programy obliczeniowe na EMC, uruchamia się wielowariantowe obliczenia, na podstawie których przeprowadza się analizę ich wyników dokonując obliczenia stanu naprężeń w konkretnych

węzłach z podziałem na ich kategorie i naprężeń cyklicznych na cały okres pracy urządzenia.

W wyniku tego kompleksu analiz, prac projektowych i pracochłonnych obliczeń może powstać końcowy raport o stanie bezpiecznej pracy urządzenia. Na przykład dla wytwornicy pary bloku 440 MWe konieczne było wykonanie obliczeń 19 węzłów konstrukcyjnych w warunkach 22 stanów pracy przy uwzględnieniu licznych zmian temperatury. Uwzględniono przy tym cztery kategorie naprężeń, to jest ogólne i miejscowe membranowe, ogólne i miejscowe zginające, ogólne i miejscowe temperaturowe oraz przyrosty naprężeń w strefach nieciągłości i koncentracji naprężeń. W wyniku tych obliczeń uwzględniono ponad sto wyodrębnionych przekrojów konstrukcyjnych wytwornicy, dla kilkuset momentów czasu. Z tego około dwieście stanów obciążenia węzłów wprowadzono do końcowej analizy naprężeń.

Należy podkreślić, że węzły konstrukcyjne wytwornicy pary nie różnią się od podobnych rozwiązań konstrukcyjnych w kotłach parowych. Dla ilustracji można podać, że grubości ścianek korpusu wynoszą 75mm i 135mm, grubości kolektorów 20mm i 60-136mm, a wymiary króćców od 16-90mm. Jak wykazały przeprowadzone obliczenia decydujące o wytrzymałości węzłów omawianego urządzenia są stany przejściowe /rozruch, studzenie/ a nie normalne warunki pracy. Dotyczy to w szczególności elementów znajdujących się na pograniczu rozdziału faz i o znacznych różnicach temperatur /np. króćce i kolektor wody zasilającej/.

Zauważyć trzeba, że niejednokrotnie w trakcie wykonywania tego rodzaju obliczeń, zachodzi konieczność wprowadzenia zmian konstrukcyjnych i materiałowych w konkretnych fragmentach czy nawet zmiany założeń. Przykładem w tym zakresie mogą być wykonywane w CBKK obliczenia, wydawało się początkowo prostego urządzenia w instalacji badawczej przeznaczonej dla reaktora "Maria". Dla zrealizowania rozwiązań konstrukcyjnych spełniających wymagania bezpieczeństwa, konieczne było wykonanie kilkunastu alternatyw konstrukcyjnych. Przyczyną była konieczność umożliwienia szybkich rozruchów i występujące w tych warunkach duże gradienty temperaturowe w jednym tylko węźle konstrukcyjnym. Wymaganie takie spełniono przez dobór odpowiednich materiałów i specjalne ukształtowania omawianego fragmentu urządzenia.

Podstawowe parametry pracy elektrowni konwencjonalnych są wyższe niż elektrowni jądrowych. Najogólniej rzecz traktując odpowiednikiem kotła w elektrowni konwencjonalnej, w którym występuje wyzwalamie się energii cieplnej z paliwa konwencjonalnego i wytwarzanie jej kosztem pary przegrzanej są w elektrowni jądrowej reaktor i wytwornice pary, produkujące najczęściej parę nasyconą. Obieg ten nazywany jest pierwotnym. Natomiast cały obieg wtórny, tj. turbina, układ regeneracji, stacje odgazowania, przygotowanie wody, zespół rurociągów itp. nie różni się istotnie od swoich odpowiedników w elektrowni konwencjonalnej. Wyjątkiem w tym za-

kresie jest elektrownia z reaktorem typu BWR, w którym nie istnieją wytwornice pary, a cały obieg łącznie z turbiną jest w określonym stopniu skażony. Znajdujące się w reaktorze duże ilości energii promieniotwórczej stwarzają specjalne wymagania techniczne wszystkim urządzeniom, a zwłaszcza urządzeniom obiegu pierwotnego.

Tak więc, przy obliczaniu urządzeń przeznaczonych dla EJ, w grę wchodzi, jako pierwszoplanowe względy bezpieczeństwa. Istotny jest również czynnik ekonomiczny. Długotrwały postój bloku energetycznego dużej mocy pociąga za sobą jednakowe skutki finansowe niezależnie od tego, czy zainstalowany jest w EJ, czy EK. Dlatego też wydaje się konieczne, szczególnie dla urządzeń ciśnieniowych dużych bloków, obowiązkowe wykonanie wytrzymałościowych obliczeń kontrolnych uwzględniających zarówno wszelkie przewidywane zmiany obciążeń dynamicznych, jak i naprężeń termicznych. W pierwszej kolejności, ze względu na największy udział we wskaźnikach awaryjności, dotyczy to elementów ciśnieniowych kotłów parowych, a także innych elementów grubościennych. Bardzo często można by uniknąć uszkodzeń awaryjnych czy długotrwałych i kłopotliwych napraw, gdyby na drodze obliczeniowej znane były wyciężenia materiałowe w określonych węzłach, czy elementach konstrukcji. W tym miejscu przypomnieć wystarczy ile kłopotów stwarzały naszej energetyce i wytwórcom urządzeń rysy i pęknięcia w walczakach licznych kotłów, występujące w otoczeniu otworów i spawów wzdłużnych walczaków. Na szczęście nie były one związane z groźnymi w skutkach awariami. Przypadek pęknięcia i rozpadnięcia okazałych rozmiarów walczaka  $d_w = 1700 \text{ mm}$   $l = 22,5 \text{ m}$  zdarzył się w jednej z elektrowni angielskich / el. Cockenzie / podczas próby wodnej. Brak możliwości wykonania w owym czasie reprezentatywnych obliczeń wytrzymałościowych, spowodowało zastosowanie gorszych rozwiązań konstrukcyjnych kotła. Mam tu na myśli zastosowanie tak zwanych "pajaków" łączących centralne rury opadowe z walczakami zamiast połączenia bezpośredniego centralnych rur opadowych z walczakiem. Niejednokrotnie nawet niewielkie obniżenie temperatury w określonym miejscu konstrukcji, może radykalnie zmienić stan naprężeń i przyczynić się do poprawy niezawodności pracy urządzenia. Przykładem w tym zakresie może być poziom temperatury pary na wylocie z kotła. Nie tak odległą jeszcze praktyką cechowała dążność do maksymalnego podwyższenia temperatury pary przegrzanej. Aktualne tendencje światowe odznaczają się obniżaniem tych temperatur. Przez długi okres temperatury pary wynosiły  $540/540^\circ\text{C}$ . Szereg kotłów zagranicznych posiada już temperatury  $535/535^\circ\text{C}$ , a np. el. Niderhausen /RFN/ wykonano kotły o wydajności  $1870 \text{ t/h}$ , ciśnieniu  $17,2 \text{ MPa}$  / $175 \text{ atn}$ /, w którym temperatura pary dla obu przegrzewaczy wynosi  $530^\circ\text{C}$ . Ustalenie właściwego i bezpiecznego poziomu temperatur, możliwe jest właśnie na drodze wspomnianych wyżej obliczeń.

Również warunki pracy ekranów komór paleniskowych kotłów pracujących

w zakresie ciśnień zbliżonych do krytycznych lub je przewyższających mogą stanowić określone zagrożenie. Przyczyną są wartości współczynników wymiany ciepła, tym niższe im większe są lokalne obciążenia powierzchni ogrzewalnych ekranów. I w tym przypadku można uniknąć ewentualnych, przykrych konsekwencji niewłaściwego doboru materiałów czy wielkości powierzchni ogrzewanej w komorze paleniskowej, dokonując obliczeń wytrzymałościowych z uwzględnieniem naprężeń termicznych i obciążeń dynamicznych.

Przytoczone wyżej, dla ilustracji przykłady świadczą o tym, że również dla urządzeń ciśnieniowych dużych bloków energetycznych elektrowni konwencjonalnych, winny być zaostrożone wymagania w zakresie wykonania obliczeń wytrzymałościowych. Przyczynią się one napewno do poprawy dyspozycyjności urządzeń i wpłyną na poprawę wyników ekonomicznych.

#### Podsumowanie

Wymagania dotyczące urządzeń elektrowni konwencjonalnych w stosunku do urządzeń energetycznych elektrowni jądrowych różnią się tylko o wymagania bezpieczeństwa. Wszystkie pozostałe kryteria, takie jak: dotrzymanie projektowych parametrów, sprawność, jakość czy niezawodność pozostają w pełni aktualne. Długotrwały postój awaryjny bloku niesie w obu przypadkach jednakowe skutki ekonomiczne. Uwzględniając jednakże wielkość i parametry nowoczesnych bloków energetycznych elektrowni konwencjonalnych, wydaje się konieczne postawienie takich samych wymagań, odnośnie zakresu obliczeń wytrzymałościowych urządzeń tych bloków, jakie stawiane są odnośnie urządzeniom elektrowni jądrowych. Dotyczyć to winno szczególnie bloków największych mocy, których dyspozycyjność, jak wykazują doświadczenia, jest stosunkowo najmniejsza.

#### LITERATURA

- /1/ Przepisy Dozoru Technicznego. Obliczenia wytrzymałościowe naczyń ciśnieniowych. Wyd. 1975 r.
- /2/ Normy rasczeta na procnost elementow reaktorow, parogieniatorowych, sosudow i truboprowodow atomnych elektrostancji, opytnych i issledowatielskich jadiernych reaktorow i ustanowok. Moskwa, Wyd. Metalurgija 1973 r.

К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Резюме

На основании требования правил котлонадзора выполняется расчёт на прочность элементов паровых котлов работающих под давлением.

Согласно требованиям польского Котлонадзора расчёт на прочность элементов паровых котлов выполняется только от статических нагрузок. Соответствующие оборудование работающее на АЭС подвергается поверочным расчётам учитывая температурные, динамические и циклические нагрузки. Это позволяет более правильно и точно определить соответствующие размеры элементов оборудования а следовательно снизить количество аварий.

Эти проблемы более подробно описаны в рассматриваемом докладе.

TO INCREASE AVAILABILITY OF BOILERS

Summary

The strength calculations of the boilers on the basis of national standards are carried out. With compliance to the Polish boiler standards, calculations of the component parts of boiler concern statical loads only. In the corresponding safety standards for nuclear power engineering the thermal, dynamical and fatigue loads are taken into consideration. It improves selection of the general dimensions of equipment and decreases the possibility of damage.

These problems are presented in this paper in detail.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.