

RECENZJA
pracy doktorskiej
mgra inż. Marcina Piotra Pilarczyka
p.t.: „Analiza cieplno-wytrzymałościowa krytycznych elementów kotła energetycznego
dużej mocy w warunkach nieustalonych”

1. Podstawa opracowania

Zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, pismo M.00-520-304/2017.

2. Wstęp

Postęp społeczno-gospodarczy istotnie związany jest z poziomem wytwarzania energii elektrycznej, która głównie bazuje w Polsce na węglu kamiennym (ok. 50%) i węglu brunatnym (31,4%). Dynamicznie rozwija się energetyka wiatrowa o mocy rzędu 7,14%. Podstawowymi jednostkami wytwarzania energii elektrycznej są bloki o mocy 200 i 360 MWe. Są to jednostki już o długim czasie eksploatacji. Nadążanie za zwiększającym się zapotrzebowaniem na energię elektryczną wymaga przy istniejących blokach energetycznych zwiększenia elastyczności ich pracy. Dodatkowo nowym wyzwaniem jest realizacja konkluzji *Best Available Technology* służąca określeniu wielkości emisji dla dużych zakładów przemysłowych. Pociąga to za sobą konieczność realizacji nowych inwestycji, które sprostają stawianym ograniczeniom emisji. Inwestycje te dotyczyć będą albo modernizacji istniejących bloków lub też wprowadzenie nowych jednostek na parametry nadkrytyczne w miejsce wycofywanych.

Dzisiejsze realia przesuwają bloki 200MWe do pracy podszczytowej oraz szczytowej co wymaga nowego podejścia eksploatacyjnego w którym będą skrócone czasy rozruchu (w szczególności ze stanu zimnego), obniżenie minimum mocy do 40% jej znamionowej wartości a ponadto zwiększenie liczby uruchomień do ok. 200 w ciągu roku. Wymagania te związane są z ciągłym monitorowaniem stanu obciążenia cieplnego w warunkach niestacjonarnych zmiany temperatury i ciśnienia pary. Niestacjonarne procesy są wynikiem harmonogramu pracy Krajowej Dyspozycji Mocy. Należy zwrócić uwagę w szczególności na procesy niestacjonarne związane z rozruchem bloku ze stanu zimnego. Skrócenie czasu rozruchu wiąże się ze zmniejszeniem zużycia kosztownego mazutu (ciężkiego oleju opałowego) powodującego duże obciążenie dla środowiska pod względem ekonomicznym. Zatem skrócenie czasu rozruchu jest z tych dwóch względów istotnym parametrem. W pracy zespołu Prof. J. Talera [11] przedstawiono możliwości skrócenia czasu rozruchu z 6,5 do 2 godzin z zachowaniem poziomu naprężenia termicznego. Dla określenia stanu naprężenia termicznego niezbędne jest określenie termicznych warunków brzegowych w obszarach szczególnie narażonych na uszkodzenia. Znajomość warunków brzegowych wymiany ciepła pozwala na określenie stanu naprężenia cieplnego. Dla celów monitorowania stanu obciążenia cieplnego Autor opracował na podstawie rozwiązania niestacjonarnego zagadnienia odwrotnego oryginalną metodę wyznaczania pola temperatury w grubościennym elemencie kotła.

W rozdziale 3 Autor szczegółowo przedstawia cel i zakres pracy stawiając na końcu tezę :

Eksperymentalnie zweryfikowana metoda wyznaczania rozkładu temperatury oraz naprężenia pozwala na przeprowadzenie kompleksowej i dokładnej analizy cieplno-wytrzymałościowej elementów krytycznych kotła energetycznego w warunkach nieustalonych.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną nie jest stałe w ciągu doby. Konsekwencją tego faktu jest konieczność zmiany obciążenia bloku co prowadzi do odstawienia bloku i w bardzo wielu przypadkach do ponownego uruchomienia ze stanu zimnego. Uruchomieniu ze stanu zimnego towarzyszą nie tylko lokalne stany niestacjonarne lecz również stany szokowe. Stany te istotnie wpływają na procesy degeneracyjne elementów silnie obciążonych termicznie jak również na wiele uszkodzeń mechanicznych wynikających z nierównomierniej rozszerzalności termicznej. Jak już wcześniej wspomniano dla określenia termicznego stanu naprężenia niezbędne jest określenie termicznych warunków brzegowych pola temperatury co stanowi podstawową informację dla wszelkich systemów diagnostycznych i sterowania. ***Na szczególną uwagę zasługuje analiza różnych systemów sterowania rozruchem nie tylko w aspekcie nieprzekroczenia dopuszczalnych obciążeń termicznych lecz również w aspekcie ekonomicznym pozwalającym na oszczędności mazutu w wyniku skrócenia czasu rozruchu bloku energetycznego w którym ważną rolę odgrywa kocioł.***

Analiza różnych metod dotyczących określenia rozkładu temperatury w elementach grubościennych przeprowadzona przez Autora pozwoliła na opracowanie metody bazującej na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego typu Cauchy'ego (zadane są dwa warunki na jednym brzegu) co jest zagadnieniem szczególnie wrażliwym na błędy pomiaru. Metodę tę Autor opracował w oparciu o metodę objętości skończonych i potwierdzenie jej skuteczności uzyskał na podstawie badań eksperymentalnych. Ważną metodą analityczną było rozwiązanie ściśle Stefana-Burgrafa-Langforda szeroko opisane w monografii Prof. J. Talera. Rozwiązanie numeryczne Autor oparł o metodę objętości skończonych (bilansów elementarnych), którą szczegółowo przedstawił w punkcie 7.2. Symetryczność pola temperatury względem osi pionowej (dla komory rurowej) pozwoliła na zredukowanie liczby niewiadomych. W metodzie objętości skończonych Autor uwzględnił nieliniowe własności ciała co na ogół prowadzi do całkowania równania bilansu (7.18) metodą Rungego-Kutty. Ponieważ rozwiązanie zagadnienia odwrotnego bazuje na pomiarach temperatury i strumienia ciepła na powierzchni zewnętrznej komory parowej (zagadnienie typu Cauchy'ego), przeto jest ono szczególnie wrażliwe na przypadkowe błędy pomiarowe. Jednym ze sposobów zmniejszenia wpływu błędów przypadkowych jest filtracja danych pomiarowych. W oparciu o pracę Prof. Talera [26] Autor przedstawił wyznaczanie proces filtrowania danych pomiarowych według filtru jedenastopunktowego. Porównanie metody analitycznej z uwzględnieniem błędów losowych z metodą rozwiązania zagadnienia odwrotnego według autorskiej metody Autor przedstawił na rys. 8.3. Porównania dokonano dla różnej długości kroku czasowego. Cechą charakterystyczną dla odwrotnych zagadnień niestacjonarnych jest tłumienie oscylacji wraz z rosnącą długością kroku czasowego ponadto z wydłużeniem kroku czasowego rośnie wpływ błędu przypadkowego. Biorąc pod uwagę miary jakości rozwiązania zagadnienia odwrotnego (8.2) i (8.3) na podstawie eksperymentu numerycznego Autor wyznaczył optymalną długość kroku czasowego wynosząca 20[s].

Przedstawione przez Autora rozważania w pierwszej części stanowią podstawę do przeprowadzenia analizy cieplno-wytrzymałościowej komory parowej. Zamocowanie 19 termopar na połowie obwodu komory parowej pozwoliło na rejestrację temperatury

w wybranych punktach komory co dalej służy do analizy termicznej komory. Zastosowanie 3 termopar wgłębnych pozwala Autorowi na validację opracowanego algorytmu rozwiązywania zagadnienia odwrotnego i wybranie optymalnej długości kroku czasowego według kryteriów (8.2) i (8.3). Rysunki 9.5-9.7 przedstawiają porównanie zmierzonej i obliczonej temperatury w punktach wgłębnego pomiaru. Autor na podstawie zjawisk fizycznych wyjaśnił zachodzące niewielkie odchylenia. Porównania te stały się podstawą optymalnego doboru długości kroku czasowego.

Uwaga na str. 68₁₂ nie w pełni zdaniem recenzenta jest uzasadniona, gdyż dla całkowitego wyeliminowania oscylacji należałoby narzucić na aproksymatę zachowanie się jej I pochodnej (w formie ograniczenia nierównościowego). W tekście na str. 69 należałoby raczej używać bezwzględnej wartości gradientu, gdyż zmienia się jego znak, rys. 9.9.

Badania zamieszczone na rys. 9.10 pozwoliły Autorowi na wyznaczenie optymalnej liczby termoelementów służących do identyfikacji cieplnych warunków pracy. Z rozważań Autora wynika, że ich liczba powinna wynosić 13 dla możliwie najlepszego odwzorowania nierównomiernego rozkładu temperatury na obwodzie komory parowej.

Wynik Autora ma bardzo duże znaczenie dla poprawnego określenia stanu obciążenia termicznego eksperymentalnej komory parowej a w praktyce elementów grubościennych kotła.

Określenie temperatury na wewnętrznej powierzchni komory parowej stanowi domykający warunek brzegowy dla określenia rozkładu temperatury na podstawie którego wyznacza się rozkład naprężenia termicznego. Autor przeprowadził obliczenia temperatury na podstawie pakietu ANSYS na siatce dopasowanej do siatki z metody objętości skończonych (węzły narożne siatki MES pokrywały się węzłami środkowymi siatki metody objętości skończonych). Ze względu na zróżnicowanie temperatury na górnej i dolnej powierzchni komory parowej należało dla poprawnego określenia obciążenia dobrać optymalną siatkę dla metody elementu skończonego.

Na stronie 72 Autor pisze o zaniku oscylacji w metodzie elementu skończonego. Oscylacje te nie występują w obszarze nawet w przypadku oscylacyjnego warunku brzegowego, przeto uwaga Autora jest nie w pełni zrozumiała.

W rozdziale 9.3 Autor rozważa różne stany obciążenia termicznego i wynikające stąd rozkłady temperatury i naprężenia. Szczególnie ważne jest rozpatrzenie naprężenia termicznego wynikające z niekołowo-symetrycznego rozkładu temperatury charakterystycznego dla procesów uruchomień ze stanu zimnego. Autor korzysta z zależności na naprężenia styczne wyprowadzone dla powłok cienkościennych przy założeniu pominięcia gradientu temperatury w kierunku promieniowym. Przy tym samym założeniu Autor oblicza te naprężenia w środowisku ANSYS. *Wniosek o małej dokładności wyrażony na str. 80₅ nie wynika z przeprowadzonych obliczeń. Warto byłoby pokazać na prostym przykładzie, że tak jest.* Na poziom naprężenia ma wpływ naprężenie mechaniczne pochodzące od ciśnienia pary. Jego wartość ma znaczenie przy dużych ciśnieniach występujących w rzeczywistych blokach. Równoczesny wpływ naprężenia termicznego i mechanicznego uzyskuje się metodą superpozycji.

W rzeczywistych przypadkach ze względu na skomplikowaną geometrię Autor wykorzystuje metodę elementu skończonego w systemie ANSYS. Oprogramowanie ANSYS pozwala na przeprowadzenie analizy cieplno-wytrzymałościowej. Celem uzyskania optymalnej siatki Autor przeprowadził obliczenia porównawcze pod kątem względnego błędu określenia naprężenia stycznego i wzdłużnego dla różnej liczby elementów po grubości ścianki, Tabela 9.1 i stałej liczby elementów wzdłuż długości komory co pozwoliło dalej do

wyboru optymalnej siatki i wyznaczyć naprężenie obwodowe i osiowe po upływie 640 sekund.

Dla uzyskania poprawnych wyników dokonano zainstalowania 19 rozet tensometrycznych na powierzchni zewnętrznej badanej komory. Odształcenia względne były mierzone w 3 głównych kierunkach 0° , 45° , 90° . Autor dokonał korekty pomierzonych wielkości ze względu na zależność temperaturową stałej tensometru, rys. 9.22-9.23. Interesujące jest zbadanie wpływu odparowania kondensatu z dolnej powierzchni wewnętrznej po zamknięciu zaworu pary dolotowej. Zjawisko to ma wpływ na powstanie zwiększonej różnicy naprężenia pomiędzy górną a dolną powierzchnią komory parowej. Rysunek 9.24 przedstawia rozkład naprężenia w kierunku obwodowym (w punkcie T0_z) wyznaczony metodą elementu skończonego i metodą analityczną oraz pomierzony i skorygowany (ze względu na zależność stałej tensometru od temperatury). Rysunek 9.25 przedstawia przebieg naprężenia termicznego w kierunku osiowym w tym samym punkcie. Przebiegi obliczeniowe względnie dobrze zgadzają się ze skorygowanym pomiarem naprężenia. Dla kolejnych kątów na których umieszczono tensometry Autor zamieścił wyniki porównań w Dodatku nr 1. Dla uzyskania przejrzystości porównań przy tak dużej liczbie punktów pomiarowych Autor zestawiał w Tablicy 9.2 porównanie pomiędzy metodą analityczną, elementu skończonego, tensometrią i tensometrią skorygowaną. Porównania dokonano dla kierunku osiowego i kierunku obwodowego na powierzchni zewnętrznej komory parowej w przedziale kątów $\langle 0^\circ, 180^\circ \rangle$. Analiza tablicy pozwala na stwierdzenie w których miejscach kątowych zgodność znakomita a w których przeciętna. Miejsca gorszej zgodności związane są z mniej dokładnym pomiarem temperatury.

Analizy naprężenia na powierzchni wewnętrznej (brak tensometrów) Autor dokonuje przez wykorzystanie metody elementu skończonego (obliczanie naprężenia w kierunku obwodowym i osiowym) i opracowanej metody analitycznej. Przedstawione na rysunkach 9.28-9.32 przebiegi wskazują na wysoką zgodność naprężenia termicznego uzyskanego z metod analitycznych i metody elementu skończonego.

Badania Autora pozwalają na stwierdzenie zgodności wyników z metody analitycznej z wynikami tensometrycznymi.

Przedstawione porównania uzyskano na stanowisku laboratoryjnym. Następnym krokiem Autora jest sprawdzenie autorskiej metody na obiekcie rzeczywistym jakim była komora parowa kotła OP-650. Autor rozpatrzył rozruch ze stanu zimnego i na podstawie danych pochodzących z systemu rejestracji i akwizycji danych na powierzchni zewnętrznej na podstawie autorskiego programu wyznaczył przebieg temperatury na powierzchni wewnętrznej co dalej pozwoliło na wyznaczenie pola temperatury i naprężenia termicznego w ścianie komory wylotowej pary świeżej V stopnia badanego kotła. Podobnie jak poprzednio Autor określił optymalną gęstość siatki dla metody elementu skończonego na podstawie kryterium wyznaczania naprężenia co zamieścił w Tabeli 10.3. W dalszej części wyznaczył rozkład temperatury w komorze parowej w chwili osiągnięcia maksymalnego naprężenia jak również przebiegi naprężenia obwodowego i osiowego w newralgicznym punkcie A i B. Istotnym wynikiem jest wyznaczenie rzeczywistych szybkości nagrzewania według autorskiej metody i porównanie z zalecanymi teoretycznymi. W rzeczywistości szybkość nagrzewania V stopnia nie przekraczała 3 K/min co prowadzi do wniosku o możliwości skrócenia czasu rozruchu ze stanu zimnego. ***Stanowi to zatem podstawę i nowy rozdział badań dla skrócenia czasu bezpiecznego rozruchu.***

Autor wnioskami zakończył rozprawę doktorską.

4. Ocena pracy

Praca ma charakter o dużym znaczeniu praktycznym. Istotą jej jest to, iż składa się z części teoretycznej opracowanej na podstawie literatury i własnych doświadczeń. Doktorant poszukiwał rozwiązań zagadnień praktycznych o dużym znaczeniu poznawczym mających istotne zastosowanie w energetyce. Prezentowane w pracy metody badawcze mają bardzo bogate odniesienie w literaturze. Podjęty przez doktoranta problem badania obciążeń termicznych rzeczywistego obiektu jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo i niezwykle ważnym ze względów użytkowych.

Głównym osiągnięciem Autora jest opracowanie oryginalnego algorytmu służącego do określania nieustalonych pól temperatury i naprężenia termicznego w grubościennym elemencie cylindrycznym. Algorytm ten został sprawdzony na stanowisku laboratoryjnym. Autor do obróbki wyników pomiarowych temperatury zastosował filtry cyfrowe minimalizujące błędy przypadkowe na które jest szczególnie wrażliwe rozwiązanie zagadnienia odwrotnego typu Cauchy'ego. Zastosowane filtry pozwoliły na skrócenie kroku czasowego bez stosowania metody regularyzacji w rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego.

Opracowany algorytm ma również zastosowanie w przypadku komory parowej z króćcami.

Przedstawione badania w pełni potwierdzają postawioną przez Autora tezę.

Wyniki badań przedstawione w rozprawie mogą być wykorzystane przez konstruktorów i inżynierów nadzorujących rozruch i eksploatację urządzeń poddanych obciążeniom cieplnym. Rozprawa napisana jest bardzo starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy Doktoranta w zakresie metod numerycznych i badań eksperymentalnych.

5. Wnioski

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów badań, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Marcina Pilarczyka w zakresie badania obciążenia termicznego newralgicznych grubościennych elementów komory parowej kotła z zastosowaniem oryginalnej autorskiej metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego typu Cauchy'go, oceniam Jego rozprawę doktorską **bardzo wysoko**.

Praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę „O Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz O Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki”, przeto wnoszę do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

