

PIOTR DUDA\*  
WIESŁAW ZIMA  
BOHDAN WĘGŁOWSKI

Politechnika Krakowska  
Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki

## Kontrola wytrzymałościowych warunków pracy wybranych ciśnieniowych elementów kotła

W pracy przedstawiono analizę naprężeń występujących w połączeniu walczak-rura opadowa podczas rozruchu i wyłączenia z ruchu kotła OP-210. Biorąc pod uwagę zalecane przez producenta szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka kotła stwierdzono, że jeżeli nie będą one przekraczane, to nie występuje niebezpieczeństwo przekraczania naprężeń dopuszczalnych. Przedstawiono także konstrukcję i analizę naprężeń, występujących we wstawce termometrycznej, wykorzystywanej do wyznaczania obciążenia cieplnego ścian komór paleniskowych kotłów, podczas monitorowania sprawności kotła, strumieni masowych paliwa, pary świeżej, spalin i wody cyrkulującej w kotle. Pokazano, że nie ma niebezpieczeństwa przekroczenia maksymalnych dopuszczalnych naprężeń podczas pracy tego urządzenia.

### 1 Wstęp

Procesy rozruchu i wyłączenia z ruchu, jak również zmiany obciążenia kotła powinny być tak prowadzone, aby nie przekraczać naprężeń dopuszczalnych przy równoczesnym zachowaniu niezbędnej cyrkulacji naturalnej. Naprężenia kontrolowane są głównie w tzw. elementach kryterialnych warunkujących szybkość przeprowadzanych zmian obciążenia kotła. Jednym z takich elementów jest walczak, a szczególnie jego połączenia z rurami opadowymi. Rozkład naprężeń zredukowanych i obwodowych dla takiego połączenia zależy w dużej mierze od szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka. Dlatego też producenci kotłów podają zalecane szybkości jego nagrzewania i ochładzania, które niejednokrotnie mogłyby być większe. Zwiększenie tych szybkości pozwoliłoby na skrócenie czasu pracy kotła w warunkach nieustalonych.

W pracy przedstawiono analizę naprężeń występujących w połączeniu walczak-rura opadowa podczas rozruchu i wyłączenia z ruchu kotła OP-210. Obliczenia

---

\*E-mail: pduda@mech.pk.edu.pl

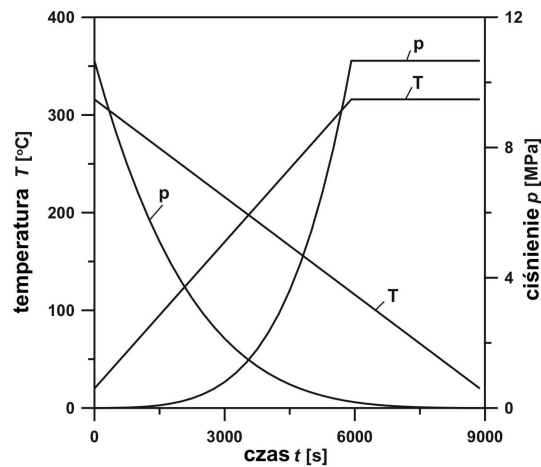
przestrzennego pola temperatury i naprężeń na brzegu rury opadowej wykonano za pomocą programu ANSYS [1].

Kontrola pracy kotła to również monitorowanie szeregu innych parametrów mających wpływ na jego sprawność i bezpieczną eksploatację. W pracach [2,3] przedstawiono układ pozwalający monitorować na bieżąco warunki pracy parownika kotła. Podstawowym jego elementem jest zespół oryginalnych wstawek termometrycznych służących do wyznaczania rozkładu temperatury i obciążenia cieplnego wzdłuż wysokości komory paleniskowej kotła, co jest bardzo istotne dla prawidłowej pracy parownika i komory paleniskowej [4–7]. Wyniki uzyskane za ich pomocą mogą również służyć do kontroli cyrkulacji mieszaniny parowo-wodnej i odkładania się osadów na wewnętrznych powierzchniach rur ekranowych.

## 2 Analiza dopuszczalnych szybkości zmiany ciśnienia w walczaku kotła z uwagi na naprężenia cieplne

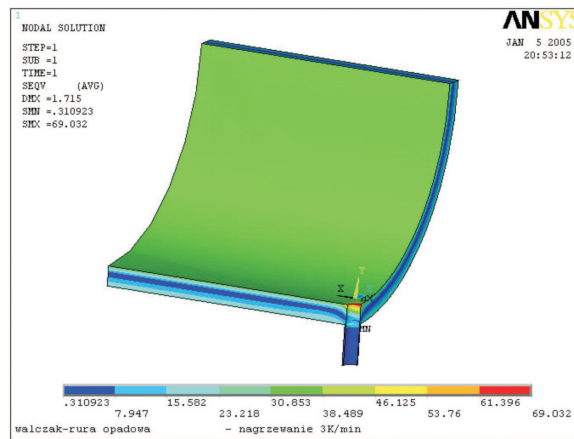
Przeprowadzono obliczenia naprężeń zredukowanych i obwodowych dla połączenia walczak-rura opadowa kotła OP-210, biorąc pod uwagę zalecane szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka kotła, pod kątem nieprzekraczania naprężeń dopuszczalnych. Kocioł OP-210 jest kotłem jednowalczakowym z naturalną cyrkulacją wody. Przeznaczony jest do wytwarzania pary przegrzanej o wysokim ciśnieniu, podawanej w przewód główny elektrowni. Znamionowa wydajność kotła wynosi 210 t/h przy ciśnieniu pary na wylocie 9,8 MPa oraz temperaturze  $540_{-10}^{+5}$  °C. Kocioł ma układ II-kształtny z zawieszeniem powierzchni ogrzewalnych na wieńcu stropu. Składa się z przyzmatycznej komory paleniskowej otwartej typu i drugiego ciągu (komory konwekcyjnej), połączonych ze sobą międzyciągiem. W kanale tym rozmieszczone są trzy stopnie konwekcyjnego przegrzewacza pary oraz przegrzewacz grodziowy. W komorze drugiego ciągu na drodze przepływu spalin umieszczone są dwa stopnie podgrzewacza wody zasilającej i trzy ciągi rurowego podgrzewacza powietrza. Zalecana przez producenta szybkość nagrzewania i ochładzania walczaka kotła OP-210 wynosi odpowiednio 3 K/min i 2 K/min.

Wykonano trójwymiarowe obliczenia pola temperatury i naprężeń na brzegu rury opadowej za pomocą programu ANSYS. Walczak kotła o wymiarach: średnica zewnętrzna  $d_z = 1880$  mm, grubość ścianki  $g = 90$  mm; wykonany jest ze stali K22M. Rury opadowe o średnicy zewnętrznej  $d_{zo} = 102$  mm i grubości ścianki  $g_o = 6$  mm są doprowadzone do dziesięciu rur opadowych o większych średnicach. Ciśnienie nasycenia w walczaku znajdujące jest na podstawie przebiegu temperatury (rys. 1).



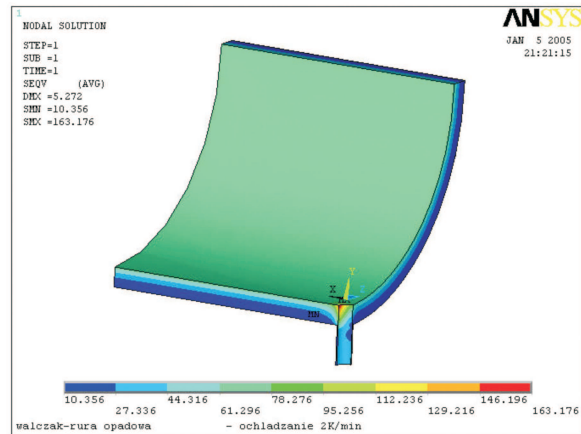
Rysunek 1. Przebieg temperatury i ciśnienia w walczaku podczas jego nagrzewania i ochładzania

Najwyższe naprężenia cieplne podczas nagrzewania pojawiają się w czasie 2000 s. Ciśnienie czynnika w tej chwili jest jeszcze małe więc naprężenia sumaryczne są w przybliżeniu równe cieplnym. Rozkład zredukowanych naprężeń sumarycznych pochodzących od obciążenia cieplnego i od ciśnienia wewnętrznego przedstawiono na rys. 2.

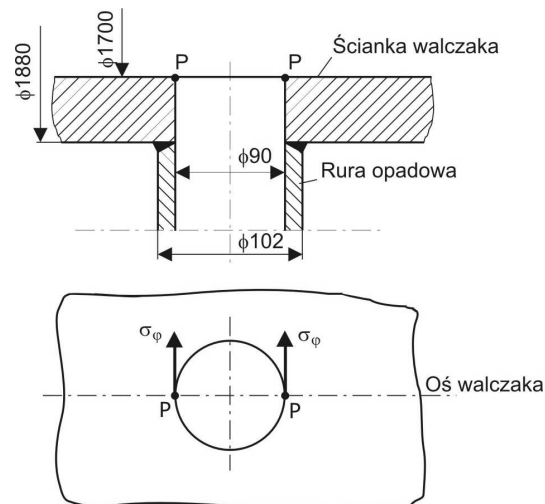


Rysunek 2. Rozkład zredukowanych naprężeń pochodzących od obciążenia cieplnego i od ciśnienia w czasie  $t = 2000$  s, w trakcie rozruchu kotła ze stanu zimnego

Rozkład zredukowanych naprężeń sumarycznych po 2000 s od momentu rozpoczęcia ochładzania połączenia waleczak-rura opadowa przedstawiono na rys. 3. Ze względu na wysokie ciśnienie czynnika naprężenia sumaryczne różnią się od cieplnych. Maksymalne naprężenia w połączeniu pojawia się w punkcie P pokazanym na rys. 4.

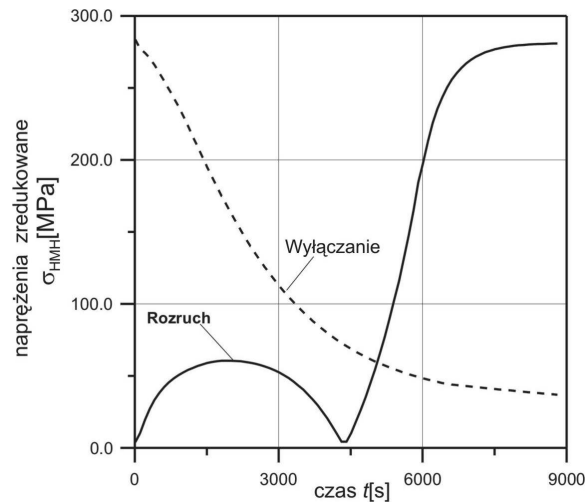


Rysunek 3. Rozkład zredukowanych naprężeń pochodzących od obciążenia cieplnego i od ciśnienia w czasie  $t = 2000$  s, w trakcie odstawiania kotła

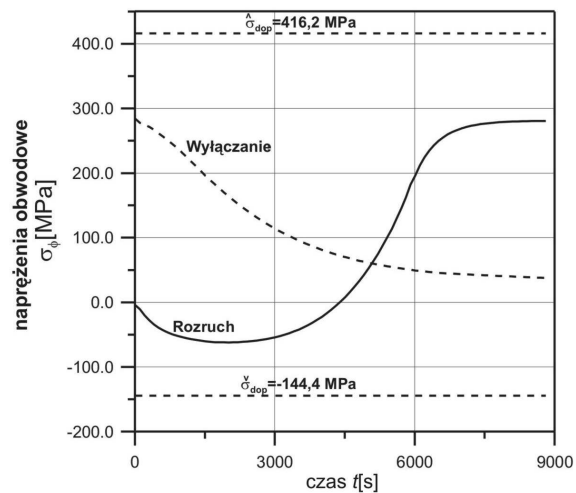


Rysunek 4. Połączenia waleczak rura opadowa; punkt P oznacza miejsce koncentracji naprężeń

Na rys. 5 i 6 przedstawiono odpowiednio, przebiegi naprężeń zredukowanych oraz obwodowych na brzegu otworu pod rurę opadową na wewnętrznej powierzchni walczaka w punkcie P.



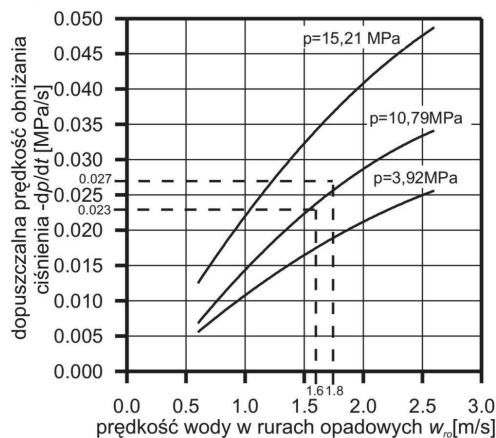
Rysunek 5. Przebieg naprężeń zredukowanych  $\sigma_{\text{HMH}}$  na brzegu otworu w punkcie P



Rysunek 6. Przebieg naprężeń obwodowych  $\sigma_{\phi}$  na brzegu otworu w punkcie P

Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 5 i 6 wynika, że sumaryczne naprężenia maksymalne (co do wartości bezwzględnej) w punkcie koncentracji naprężeń P są mniejsze od naprężeń dopuszczalnych  $|\hat{\sigma}_{dop}^{\vee}| = 144,4 \text{ MPa}$  i  $|\hat{\sigma}_{dop}^{\wedge}| = 416,2 \text{ MPa}$ , wyznaczonych według przepisów TRD 301 [8], przy założeniu 2000 rozruchów ze stanu zimnego.

Szybkość obniżania ciśnienia w walczaku kotła, wynikająca z zalecanych przez producenta szybkości ochładzania walczaka (rys. 7), jest mniejsza od dopuszczalnej szybkości obniżania ciśnienia z uwagi na stabilność obiegu wody w parowniku kotła.

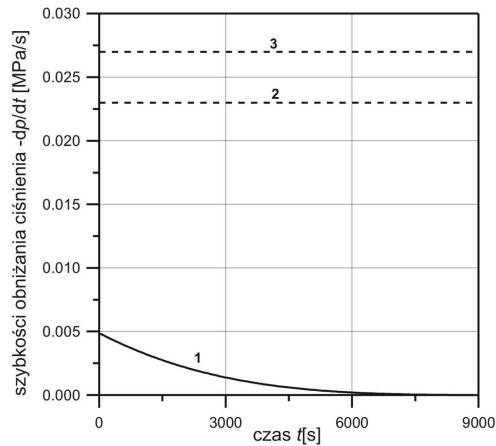


Rysunek 7. Przybliżone wartości dopuszczalnych prędkości obniżania ciśnienia  $dp/dt$  w zależności od prędkości wody  $w_{ro}$  w rurach opadowych

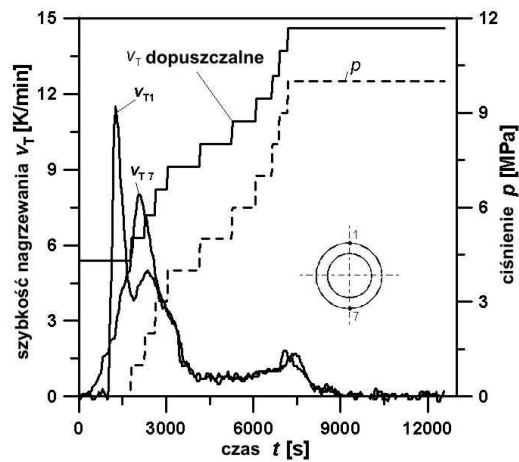
Dla zmierzonych prędkości wody w rurach opadowych  $w_{ro}$  zawartych w przedziale  $1,6 \text{ m/s} < w_{ro} < 1,8 \text{ m/s}$  i ciśnienia  $p = 10,79 \text{ MPa}$  (początek wyłączenia z ruchu) dopuszczalna prędkość obniżania ciśnienia mieści się w przedziale  $0,023 \text{ MPa/s} < dp/dt < 0,027 \text{ MPa/s}$  (rys. 8).

Z przeprowadzonych w niniejszym rozdziale rozważań wynika, że jeżeli nie będą przekraczane zalecane przez producenta szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka, to nie ma niebezpieczeństwa przekroczenia naprężeń dopuszczalnych i niestabilności obiegu wody w parowniku kotła.

Istotnym elementem podczas rozruchu i wyłączenia kotła z ruchu jest nieprzekraczanie dopuszczalnych szybkości zmian temperatury górnej oraz dolnej części walczaka. Na rys. 9 pokazano porównanie zarejestrowanych szybkości nagrzewania tych części z wartościami dopuszczalnymi, na podstawie przepisów TRD 301, przy ciśnieniu  $p$ . Analiza tego rysunku wskazuje, że w początkowej



Rysunek 8. Porównanie szybkości obniżania ciśnienia  $dp/dt$ , wynikającej z zalecanej przez producenta kotła dopuszczalnej szybkości ochładzania walczaka, z wartościami dopuszczalnymi wynikającymi z warunku zachowania stabilności obiegu wody w parowniku kotła: 1 – szybkość obniżania ciśnienia przy ochładzaniu walczaka z dopuszczalną szybkością  $v_T$ , 2 i 3 – dopuszczalne szybkości obniżania ciśnienia z uwagi na stabilność obiegu wody w parowniku dla zmierzonej minimalnej i maksymalnej prędkości wody w rurach opadowych

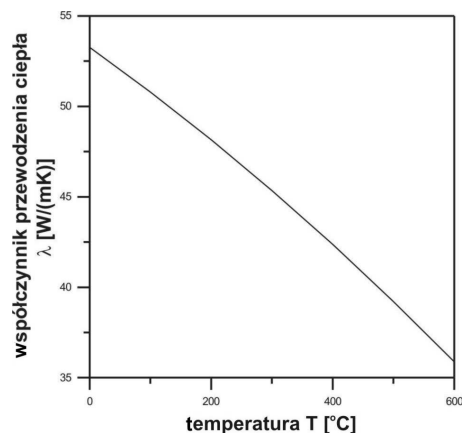


Rysunek 9. Porównanie zarejestrowanych szybkości nagrzewania górnej  $v_{T1}$  i dolnej  $v_{T7}$  części walczaka kotła OP-210 z szybkościami nagrzewania przy ciśnieniu  $p$  dopuszczalnymi na podstawie przepisów TRD 301

fazie nagrzewania szybkości dopuszczalne są przekraczane. Wynika to z przyjętej technologii rozruchu kotła. Na początku rozruchu, w górnej części walczaka na jego powierzchni wewnętrznej zachodzi intensywna kondensacja pary i ta część walczaka jest znacznie szybciej nagrzewana w porównaniu z częścią dolną.

### 3 Analiza naprężeń występujących we wstawce termometrycznej

Rozkład temperatury spalin, a zatem i rozkład gęstości strumienia ciepła przejmowanego przez ekrany (obciążenia cieplnego), wpływa na emisję tlenków azotu, zawartości części palnych w żużlu i lotnym popiele oraz na procesy zanieczyszczania przegrzewaczy i ścian komory paleniskowej. W celu wyznaczenia rozkładu obciążeń cieplnych wzdłuż wysokości komory paleniskowej kotłów opracowana została w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Krakowskiej, w pełni oryginalna, wstawka pomiarowa. Konstrukcja wstawki, zasada pomiaru oraz wyniki otrzymane za jej pomocą przedstawione zostały m.in. w pracach [2,9]. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną natomiast wyniki obliczeń naprężeń w celu sprawdzenia, czy wstawka będzie bezpiecznie pracować. Obliczenia przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych.



Rysunek 10. Współczynnik przewodzenia ciepła stali 20G w funkcji temperatury

Wstawka została wykonana ze stali 20G, dla której współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  określony jest zależnością (rys. 10):

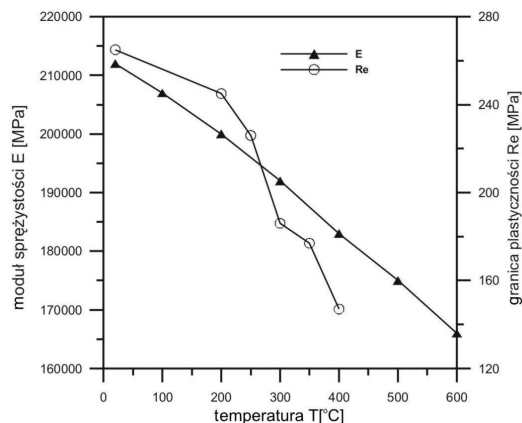
$$\lambda(T) = 53,26 - 0,02376224T - 8,6713310^{-6}T^2, \quad (1)$$



gdzie:

- $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(mK);
- $T$  – temperatura wstawki, °C.

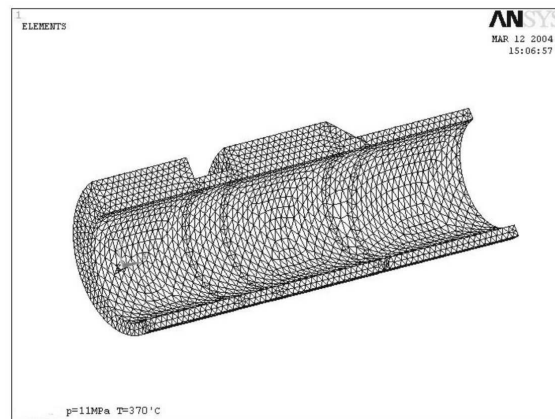
Zmiany modułu Young'e'a  $E$  oraz granicy plastyczności  $R_e$  w funkcji temperatury dla materiału wstawki przedstawiono na rys. 11.



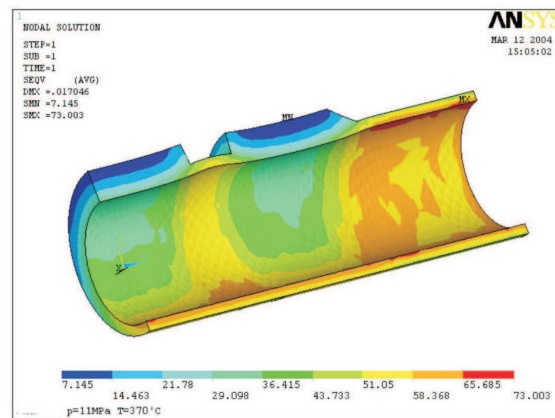
Rysunek 11. Własności wytrzymałościowe stali 20G

Obliczenia przeprowadzono zakładając ciśnienie czynnika wynoszące  $p = 11$  MPa i temperaturę obliczeniową całego elementu  $T_{obl} = 370$  °C. Temperaturę obliczeniową  $T_{obl}$  otrzymano, zgodnie z przepisami UDT, dodając do temperatury pary nasyconej o ciśnieniu 11 MPa wartość 50 °C.

Rozkład naprężeń w zaprojektowanym elemencie obliczono za pomocą elementów skończonych z wykorzystaniem programu ANSYS. W tym celu stworzono model MES, który przedstawiono na rys. 12. Ze względu na symetrię zjawiska zamodelowano jedynie połowę wstawki. Rozpatrywany obszar podzielono na 21880 elementów przestrzennych, bryłowych. W miejscach połączenia wstawki z rurą ekranową kotła założono płaszczyznę przekrojów. Wyznaczony rozkład naprężeń przedstawiono na rys. 13. Naprężenia dopuszczalne wynoszą  $177/1,5 = 118$  MPa, podczas gdy maksymalne naprężenia przy założonym obciążeniu osiągają wartość 73 MPa. Pojawiają się one na powierzchni wewnętrznej wstawki. Naprężenia maksymalne są więc mniejsze od naprężeń dopuszczalnych, co pozwala na stwierdzenie, że opracowana wstawka będzie pracować bezpiecznie. Potwierdzeniem tego są cztery wstawki zainstalowane i pracujące na jednej rurze parownika kotła OP-210 w jednej z krajowych elektrowni.



Rysunek 12. Podział modelu wstawki na elementy skończone



Rysunek 13. Rozkład naprężeń zredukowanych, MPa

## 4 Wnioski końcowe

Analizując naprężenia występujące w połączeniu walczak-rura opadowa kotła OP-210 stwierdzono, że jeżeli nie będą przekraczane zalecane przez producenta szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka kotła, to nie występuje niebezpieczeństwo przekraczania naprężeń dopuszczalnych. Na podstawie obliczeń przeprowadzonych za pomocą metody elementów skończonych można wręcz zauważyć, że ograniczenia przyjęte przez producenta są zbyt konserwatywne. Podczas

nagrzewania walczaka z dopuszczalną szybkością  $v_T = 3$  K/min i ochładzaniu z  $v_T = 2$  K/min, naprężenia w krytycznym węźle konstrukcyjnym walczak-rura opadowa są bowiem znacznie mniejsze od dopuszczalnych.

W czasie rozruchu kotła, w jego początkowej fazie, stwierdzono na obwodzie walczaka różnice temperatury dochodzące do ok. 60 K, przy czym szybkości nagrzewania dochodząc do 12 K/min przekraczają wartości zalecane przez producenta kotła. Wynika to z technologii rozruchu, przy której walczak jest tylko częściowo napełniony wodą.

Przedstawiona w pracy analiza pola naprężeń występującego we wstawce termometrycznej wskazuje, że wstawka ta będzie pracować w bezpiecznym zakresie naprężeń pochodzących od temperatury i ciśnienia. Wstawki te mogą znaleźć zastosowanie do ciągłego monitorowania rozkładu obciążenia cieplnego ekranów komory paleniskowej kotłów, umożliwiając ciągłą kontrolę ilości ciepła wywiązującego się wzdłuż wysokości komory paleniskowej kotła, a tym samym kontrolę przebiegu procesu spalania i temperatury spalin.

*Praca wpłynęła do redakcji w kwietniu 2007 r.*

## Literatura

- [1] DUDA P.: *Monitorowanie cieplno-wytrzymałościowych warunków pracy ciśnieniowych elementów urządzeń energetycznych*. Monografia Politechniki Krakowskiej, ser. Mechanika z. 81, Kraków 2004.
- [2] Taler J., Węglowski B., Cebula A., Duda P., Grądziel S., Sobota T., Taler D., Zima W.: *Komputerowy układ monitorowania eksploatacji kotła*. Prace Naukowe — Mechanika, VII Konferencja: Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Warszawa 2005, 289–300.
- [3] Taler J., Węglowski B., Duda P., Zima W., Cebula A., Grądziel S., Sobota T., Taler D.: *Monitorowanie cieplno-przepływowych warunków pracy parownika kotła*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, ser. Elektryka z. 56, Opole 2006.
- [4] Lehmann H.: *Dampferzeugerpraxis. Grundlagen und Betrieb*. Resch Verlag, Gräfelfing/München 1988.
- [5] Taler J.: *A method of determining local heat flux in boiler furnace*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 6, 1992, 1625–1634.
- [6] Taler J.: *Messung der Wärmebelastung der gasdicht verschweißten Verdampfer-Rohrwände in Dampferzeugern*. VGB Kraftwerkstechnik 70, 1990, 664–650.
- [7] Węglowski B.: *Identyfikacja cieplnych warunków pracy ścian komór paleniskowych kotłów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, ser. Mechanika, z. 76, Kraków 1995.
- [8] TRD — *Technische Regeln für Dampfkessel*. Carl Heymanns Verlag KG, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2001.
- [9] Taler J., Węglowski B., Cebula A.: *Wyznaczanie obciążeń cieplnych ekranów komór paleniskowych kotłów*. Energetyka 9/2006, 646–650.

**Control of operating strength conditions of selected pressure elements of a boiler****S u m m a r y**

The paper presents an analysis of stresses occurred in the boiler drum and down-comer junction during start up and shut down of the steam boiler OP-210. Taking into consideration recommended boilers drum heating and cooling velocity, it was identified that there is no risk of exceeding the maximum allowable stresses, if the boiler drum heating and cooling velocity are not exceeded. An analysis of the stresses in the thermometric inserts for determining heat flux absorbed by membrane water-walls is also presented. This device allows for monitoring boilers efficiency, mass flow rates of fuel, live steam, combustion gas and water circulating in boiler evaporators. It was presented that there is no risk of exceeding the maximum allowable stresses during operation of this device.