

ANALIZA CIEPLNO-WYTRZYMAŁOŚCIOWA POŁĄCZENIA WALCZAKA I RURY OPADOWEJ W WARUNKACH NIEUSTALONYCH

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono obecnie stosowaną, opartą o niemiecką normę TRD metodę obliczania dopuszczalnych szybkości uruchamiania i odstawiania kotłów energetycznych. Wykazano że naprężenia powstające w najbardziej wyciężonych elementach grubościennych w trakcie nagrzewania i ochładzania kotłów według tej metody są znacznie niższe od dopuszczalnych. Uzasadnia to skrócenie czasów rozruchowo-odstawieniowych i poszukiwanie nowych metod określających dopuszczalne szybkości nagrzewania i ochładzania kotłów.

Słowa kluczowe: kocioł energetyczny, naprężenia dopuszczalne, walczak, MES

THERMAL AND STRUCTURAL STRESS ANALYSIS OF BOILER DRUM AND CENTRAL PIPE CONNECTION IN TRANSIENT CONDITIONS

In this paper the method based on German standard TRD of calculating acceptable speed of heating and cooling power boilers was presented. It was indicated that stresses occurring during heating and cooling according to this standard are much smaller than the acceptable ones. It motivates shortening of starting and shutting-down times and searching for new methods defining acceptable speeds of heating and cooling power boilers.

Keywords: power boiler, acceptable stresses, boiler drum, FEM

1. WSTĘP

Wyłączanie kotłów energetycznych z ruchu, a następnie ponowne ich uruchamianie jest nieodzownym elementem pracy każdej konwencjonalnej elektrowni czy elektrociepłowni. Czasowe zmiany w zapotrzebowaniu na energię bądź też konieczność wykonania przeglądu kotła wymuszają odstawienie kotła i ponowne jego uruchomienie.

W trakcie zmian obciążenia kotła lub czynności opisanych powyżej powstają w grubościennych elementach parowników kotłów znaczące naprężenia termiczne, które determinują dopuszczalne szybkości ochładzania lub nagrzewania. Z uwagi na fakt, iż największe gradienty temperaturowe występują od strony czynnika, naprężenia cieplne osiągną najwyższe wartości na powierzchni wewnętrznej. Ponieważ czynnikiem jest para lub woda pod wysokim ciśnieniem, przeto bezpośredni pomiar naprężeń byłby bardzo utrudniony. Dlatego też naprężenia cieplne wyznacza się pośrednio na podstawie pomiaru przebiegu temperatury w określonych punktach znajdujących się na izolowanej cieplnie zewnętrznej powierzchni ciśnieniowych elementów kotła. Sposób ten polega na rozwiązaniu odwrotnego zagadnienia nieustalonego przepływu ciepła, w wyniku czego wyznaczany jest czasowo-przestrzenny rozkład temperatury, a następnie wyliczenie naprężeń za pomocą metody elementów skończonych.

Dopuszczalne szybkości nagrzewania wyznacza się najczęściej na podstawie przepisów TRD (*Technische Regeln für Dampfkessel*) [1]. W pracy wykazane zostanie, iż maksymalne naprężenia powstałe w wyniku takiego grzania (lub chłodzenia) są dużo niższe niż dopuszczalne. Oznacza

to, że celowe są badania nad optymalizacją procesów rozruchowych i odstawieniowych [2].

W pierwszej części niniejszej pracy wyznaczone zostaną przebiegi temperatury i ciśnienia czynnika w funkcji czasu, przy wykorzystaniu przepisów TRD. Drugą część stanowić będzie analiza MES, w której obciążeniem będą obliczone w części pierwszej temperatura i ciśnienie w funkcji czasu. Ponieważ, największe naprężenia występują na wewnętrznych powierzchniach elementów, a w pobliżu otworów dodatkowo występuje koncentracja naprężeń, dlatego też przedmiotem analizy będzie wewnętrzna krawędź otworu połączenia centralnej rury opadowej z walczakiem kotła o wydajności 210 ton pary na godzinę. Połączenie to stanowi tzw. krytyczny węzeł konstrukcyjny całego kotła, który decyduje o dopuszczalnej szybkości nagrzewania i ochładzania walczaka, a tym samym o przebiegu temperatury i ciśnienia w parowniku kotła.

Przeprowadzona w pracy analiza cieplno-wytrzymałościowa może być pomocna dla producentów kotła, przy ustalaniu dopuszczalnych szybkości zmiany temperatury czynnika w walczaku kotła w czasie rozruchu kotła i wyłączenia go z ruchu.

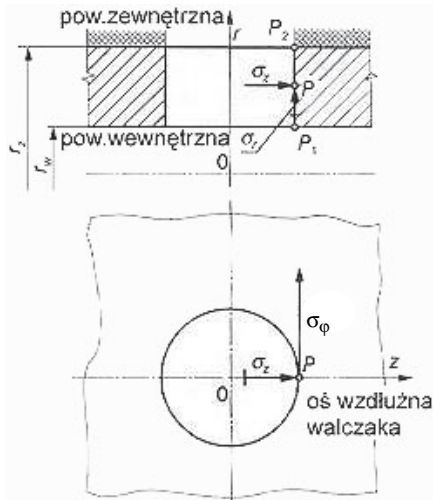
Dopuszczalne szybkości nagrzewania lub ochładzania walczaka wyznacza się zwykle na podstawie przepisów TRD z warunku, by naprężenia sumaryczne na brzegu otworu nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych, wyznaczonych na podstawie krzywej Wöhlera dla zmęczenia małowyciskowego.

Zarówno w przepisach kotłowych, jak i w obliczeniach inżynierskich stosuje się przybliżone zależności uwzględniające koncentrację naprężeń.

Rysunek 1 [5] przedstawia wycinek walczaka w miejscu, w którym jest on osłabiony otworem cylindrycznym.

* Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych; taler@ss5.mech.pk.edu.pl

** Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Zakład Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn; kmichal@agh.edu.pl



Rys. 1. Szkic ścianki walczaka osłabionej otworem

Stosując oznaczenia jak na rysunku 1, można opisać wzorem (1) największe naprężenia obwodowe σ_φ

$$\sigma_\varphi = \alpha_p \sigma_{p,\varphi} + \alpha_T \sigma_{T,\varphi} \quad (1)$$

Jak wynika z powyższego równania, naprężenia obwodowe są sumą naprężeń termicznych i mechanicznych (pochodzących od ciśnienia) [5].

Przy założeniu, że pole temperatury jest quasi-stacjonarne, naprężenia obwodowe na brzegu otworu w punkcie P (rys. 1) są określone wzorem

$$\alpha_p \frac{(p-p_0)d_{sr}}{2g} + \alpha_T \frac{E\beta}{1-\nu} \cdot \frac{\nu_T}{g^2} \cdot \Phi_w \leq |\sigma_{dop}| \quad (2)$$

gdzie Φ_w oznacza współczynnik kształtu dany wzorem

$$\Phi_w = \frac{1}{8} \frac{(u^2-1)(3u^2-1) - 4u^4 \ln u}{(u^2-1)(u-1)^2} \quad (3)$$

We wzorach (1)–(3) przyjęto następujące oznaczenia:

- α_p – współczynnik koncentracji naprężeń pochodzących od ciśnienia,
- p – ciśnienie absolutne w MPa,
- p_0 – ciśnienie otoczenia w MPa,
- $d_{sr} = 0,5(D_w + D_z)$ – średnia średnica walczaka w m,
- g – grubość ścianki walczaka w m,
- $\alpha_T = 2$ – współczynnik koncentracji naprężeń cieplnych na brzegu otworu,
- E – moduł Younga w MPa,
- β – liniowy współczynnik rozszerzalności temperaturowej w $1/K$,
- ν – liczba Poissona,
- ν_T – szybkość zmiany temperatury w K/s ,
- a – współczynnik wyrównywania temperatur w m^2/s ,
- $u = D_z/D_w$ – stosunek średnicy zewnętrznej walczaka do wewnętrznej.

2. WYZNACZENIE DOPUSZCZALNYCH SZYBKOŚCI NAGRZEWANIA

Szybkość zmiany temperatury można więc przedstawić następująco

$$\nu_T = a + bp \quad (4)$$

Stałe a i b zostaną wyznaczone z warunków:

$$\nu_{T1} = a + bp_1 \quad (5)$$

$$\nu_{T2} = a + bp_2 \quad (6)$$

z których po przekształceniu otrzymuje się:

$$b = \frac{\nu_{T2} - \nu_{T1}}{p_2 - p_1} \quad (7)$$

$$\nu_{T1} = a + \frac{\nu_{T2} - \nu_{T1}}{p_2 - p_1} p_1,$$

$$a = \frac{\nu_{T1}p_2 - \nu_{T2}p_1}{p_2 - p_1}.$$

Po podstawieniu a i b do wzoru (4) otrzymuje się

$$\nu_T = \frac{p_2\nu_{T1} - p_1\nu_{T2}}{p_2 - p_1} + \frac{\nu_{T2} - \nu_{T1}}{p_2 - p_1} p \quad (8)$$

Optymalny przebieg temperatury czynnika może być więc wyznaczony z równania

$$\frac{dT}{dt} = \frac{p_2\nu_{T1} - p_1\nu_{T2}}{p_2 - p_1} + \frac{\nu_{T2} - \nu_{T1}}{p_2 - p_1} p(T) \quad (9)$$

przy założeniu następującej zależności ciśnienia od temperatury

$$p = e^{(A+B \ln T)} \quad (10)$$

gdzie ciśnienie p wyrażone jest w MPa a temperatura T w $^\circ C$. Stałe A i B wynoszą $A = -21,976254$, $B = 4,2301301$. Stałe A i B wyznaczone zostały metodą najmniejszych kwadratów na podstawie tablic parowych.

Równanie (9) z uwzględnieniem zależności (10) scałkowane zostało metodą Rungego–Kutty czwartego rzędu, przy warunku początkowym $T(t=0) = T_0$, gdzie T_0 jest temperaturą początkową czynnika w walczaku.

Na podstawie [1] wyznaczono przebieg zmian temperatury czynnika przy nagrzewaniu i ochładzaniu walczaka kotła OP 210/110 ze stali rosyjskiej K22M o następujących wymiarach: $D_z = 1,880$ m, $D_w = 1,700$ m.

Z obliczeń przeprowadzonych zgodnie z przepisami TRD otrzymano następujące, dopuszczalne szybkości nagrzewania i ochładzania:

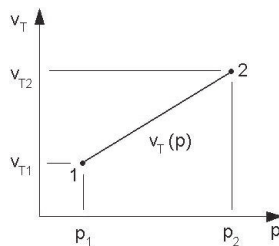
– nagrzewanie:

$$\begin{aligned} v_{T1} &= 5,196 \text{ K/min} && \text{dla } p_1 = 0 \text{ MPa,} \\ v_{T2} &= 14,98 \text{ K/min} && \text{dla } p_2 = 10,87 \text{ MPa,} \end{aligned}$$

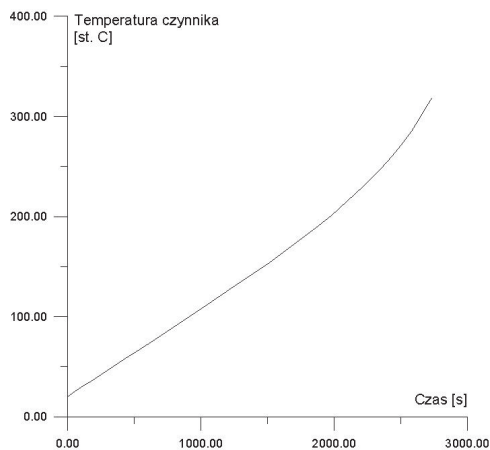
– ochładzanie:

$$\begin{aligned} v_{T1} &= -5,196 \text{ K/min} && \text{dla } p_1 = 10,87 \text{ MPa,} \\ v_{T2} &= -14,98 \text{ K/min} && \text{dla } p_2 = 0 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

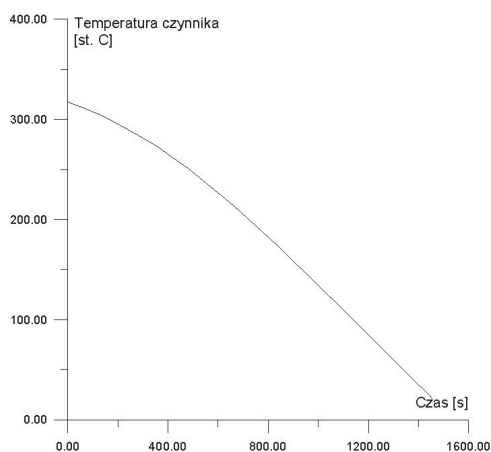
Na rysunkach 2–4 przedstawiono obliczone przebiegi zmian temperatury czynnika w czasie dla nagrzewania i dla chłodzenia.



Rys. 2. Zmiana szybkości nagrzewania w funkcji ciśnienia



Rys. 3. Temperatura czynnika w funkcji czasu przy nagrzewaniu

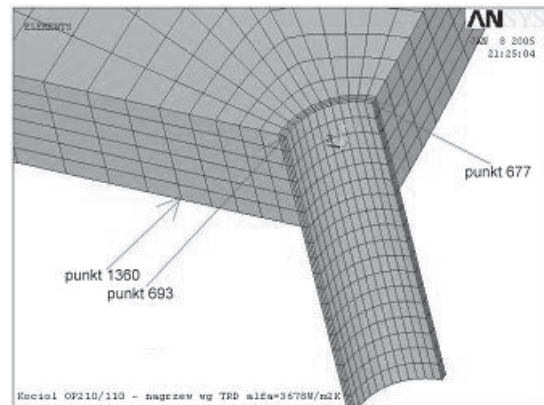


Rys. 4. Temperatura czynnika w funkcji czasu przy ochładzaniu

3. SYMULACJA PROCESU METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

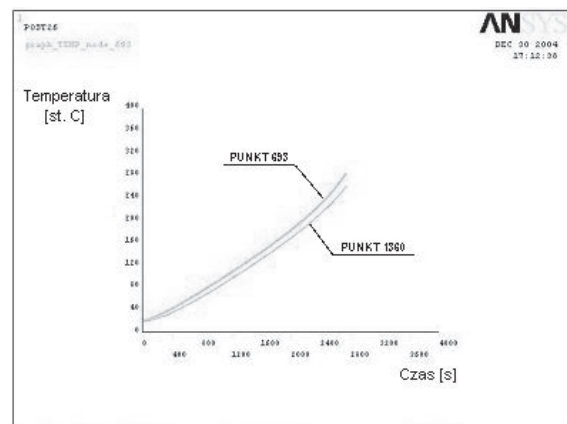
Ze względu na istniejącą symetrię układu walczak – centralna rura osadowa do rozważań przyjęto jedną czwartą połączenia walczaka z centralną rurą opadową, a resztę modelu zastąpiono odpowiednimi warunkami brzegowymi.

Fragment modelu, wraz z zaznaczonymi charakterystycznymi punktami, przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Fragment siatki modelu z zaznaczonymi charakterystycznymi węzłami

Niska szybkość grzania/chłodzenia według przepisów TRD 301, powoduje powstanie niewielkich gradientów na grubości ścianki, co ilustrują przebiegi czasowe temperatur w punktach 693 i 1360 na rysunku 6.

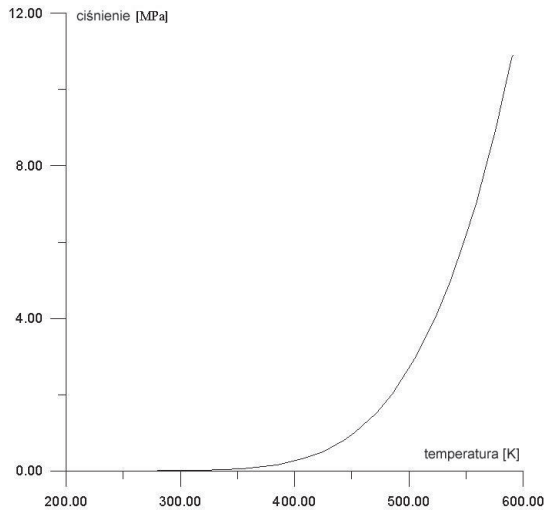


Rys. 6. Przebieg temperatury, w trakcie nagrzewania, w węzłach nr 693 i nr 1360

Jak widać z powyższych wykresów, przebiegi czasowe temperatur są niemal identyczne.

Ponieważ zmiana temperatury przebiega po linii nasycenia $x = 0$, więc każdej temperaturze odpowiada ciśnienie nasycenia. Zależność tę dla nagrzewania przedstawiono na rysunku 7.

Do obliczeń numerycznych wzięto własności fizyczne stali K22M w temperaturze 200°C. W analizach termicznych uwzględniono konwekcyjny warunek brzegowy na wewnętrznej powierzchni walczaka i rury omywanych mieszaniną parowo-wodną.



Rys. 7. Ciężnienie czynnika w funkcji temperatury nasycenia podczas nagrzewania walczaka

Współczynnik wnikania ciepła przyjęto równy $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ na całej powierzchni wewnętrznej walczaka, poza miejscem łączenia się walczaka z rurą opadową gdzie, na podstawie analizy wymiarowej i danych z rzeczywistego obiektu, jakim jest kocioł OP210/110 w Skawinie, współczynnik ten przyjęto równy $3678 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

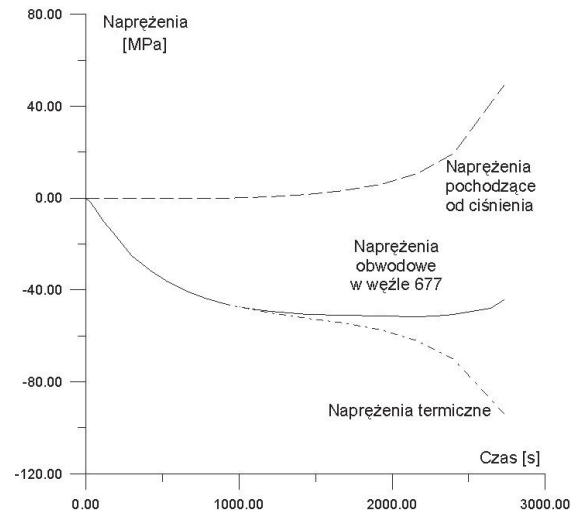
Analiza termiczna składała się z symulacji rozruchu i odstawiania kotła. Wyniki symulacji zostały następnie wprowadzone do kolejnych analiz strukturalnych jako obciążenia. Ponieważ zamodelowano jedynie jedną czwartą połączenia walczaka z centralną rurą opadową, należało zastąpić brakujące elementy odpowiednimi warunkami brzegowymi. Warunki te wynikają z symetrii układu i naprężeń rozciągających w powłoce walcowej walczaka oraz przekroju poprzecznym rury opadowej. Wartości tych naprężeń obliczono dla kolejnych temperatur. Jak wspomniano w rozdziale pierwszym, na stan wyężenia w analizowanych punktach walczaka składają się naprężenia mechaniczne, pochodzące od ciśnienia, oraz naprężenia ciepłne, wywołane gradientem temperatur na grubości ścianki.

Na przedstawionych wykresach (rys. 8–11) pokazano naprężenia obwodowe w najbardziej wyężonych punktach. Z rysunku 8 wynika, że naprężenia obwodowe będące sumą naprężeń termicznych i tych pochodzących od ciśnienia mogą być mniejsze niż jeden z jej składników.

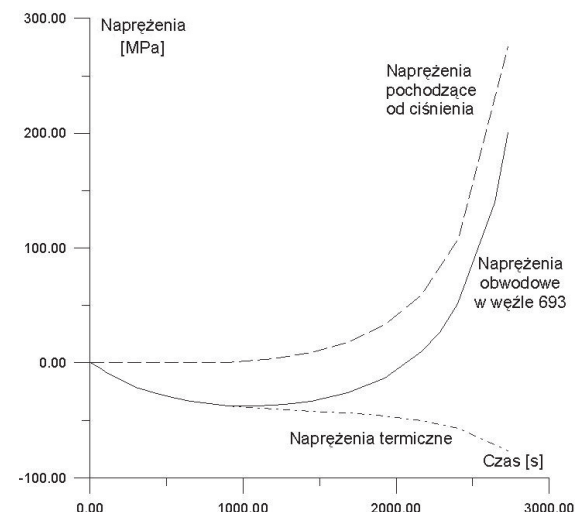
Na wykresach (rys. 8) zaznacza się pozytywny wpływ naprężeń ciepłnych w trakcie nagrzewania, na zmniejszenie sumarycznych naprężeń obwodowych. Podobnie wygląda stosunek naprężeń termicznych do mechanicznych (pochodzących od ciśnienia) w węźle 693 w trakcie nagrzewu, co widać na rysunku 9.

Dopuszczalne naprężenia obwodowe w czasie nagrzewania wyznaczone zgodnie z normą [1] wynoszą $\sigma_{dop} = -144,37 \text{ MPa}$.

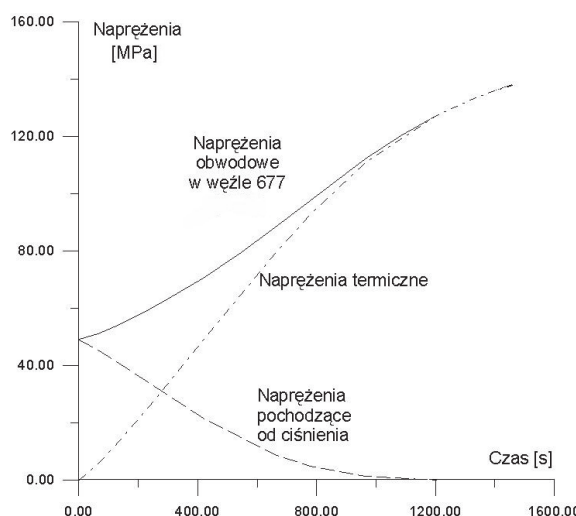
W wypadku chłodzenia zgodnie z przepisami TRD, maksymalne naprężenia obwodowe osiągają wyższe wartości niż w trakcie nagrzewu. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono naprężenia obwodowe w punktach 677 i 693 w funkcji czasu, w trakcie symulacji odstawiania kotła.



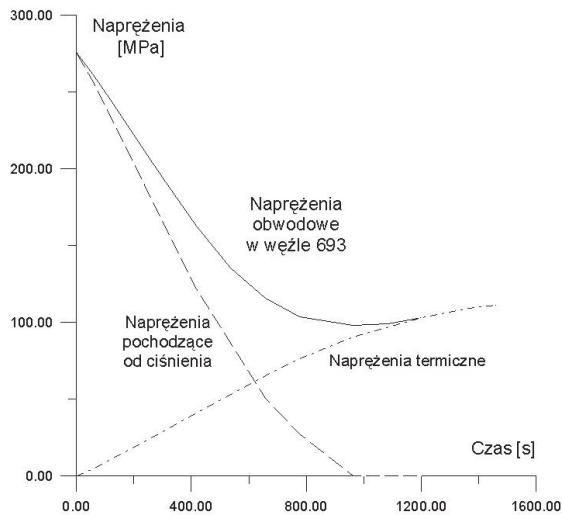
Rys. 8. Naprężenia obwodowe na krawędzi otworu w punkcie 677 w funkcji czasu, w trakcie nagrzewania



Rys. 9. Naprężenia obwodowe na krawędzi otworu w punkcie 693 w funkcji czasu, w trakcie nagrzewania



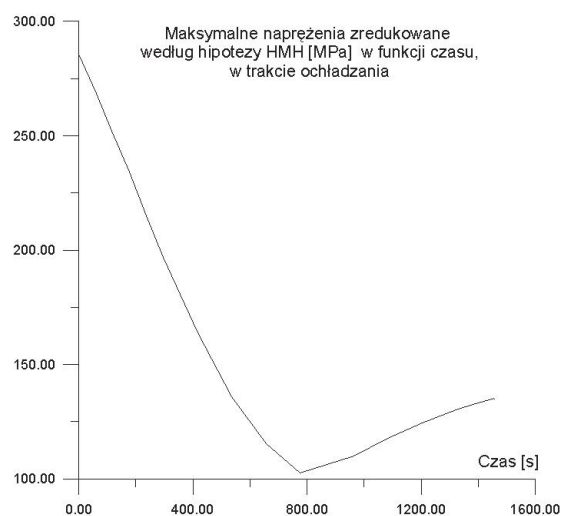
Rys. 10. Naprężenia obwodowe na krawędzi otworu w punkcie 677 w funkcji czasu, w trakcie ochładzania



Rys. 11. Naprężenia obwodowe na krawędzi otworu w punkcie 693 w funkcji czasu, w trakcie ochładzania



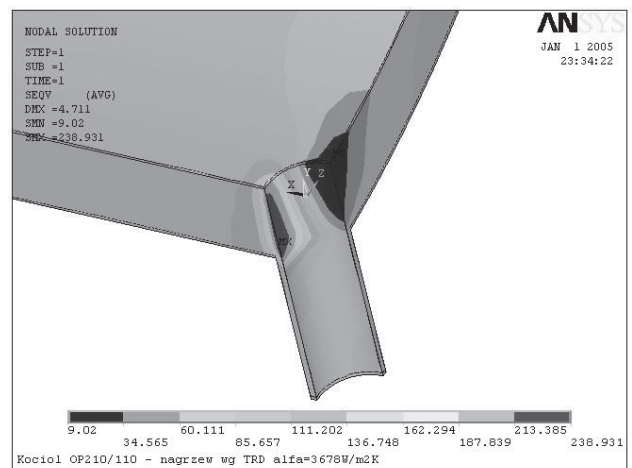
Rys. 12. Maksymalne naprężenia zredukowane w całym połączeniu w funkcji czasu, w czasie nagrzewania



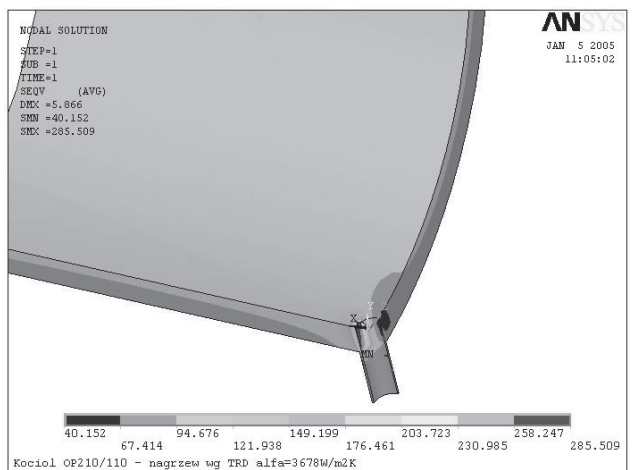
Rys. 13. Maksymalne naprężenia zredukowane w całym połączeniu w funkcji czasu, w czasie ochładzania

Wyliczone dopuszczalne naprężenia obwodowe [1] w trakcie ochładzania wynoszą $\sigma_{dop} = 416,19$ MPa. Analizując powyższe wykresy, można stwierdzić, że maksymalne naprężenia obwodowe w trakcie nagrzewu są niższe niż maksymalne naprężenia obwodowe w trakcie chłodzenia. Co więcej, maksymalne naprężenia obwodowe w trakcie chłodzenia występują na samym początku tego procesu, co znaczy, że pochodzą tylko od nadciśnienia panującego w walczaku. Oznacza to, że istnieje możliwość przyspieszenia rozruchu bez zwiększenia wyteżenia materiału walczaka. Tezę tę potwierdzają rysunki 12 i 13 – przedstawiające maksymalne naprężenia zredukowane, według hipotezy Hubera (HMH), występujące w materiale walczaka.

Zarówno w trakcie nagrzewu, jak i podczas odstawiania, naprężenia zredukowane nie przekraczają naprężeń wywołanych samym tylko nominalnym ciśnieniem pracy walczaka. Na wykresach konturowych (rys. 14 i 15) przedstawiono rozkłady naprężeń zredukowanych w ostatniej sekundzie nagrzewania (stan nieustalony) i w pierwszej sekundzie chłodzenia (stan ustalony).



Rys. 14. Maksymalne naprężenia zredukowane HMH w trakcie nagrzewu



Rys. 15. Maksymalne naprężenia zredukowane HMH w trakcie ochładzania

Rysunek 15 przedstawia rozkład naprężeń zredukowanych w nominalnych warunkach pracy kotła. Naprężenia te pochodzą jedynie od ciśnienia. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych w połączeniu wyniosła około 285 MPa, czyli o prawie 47 MPa więcej niż w trakcie nagrzewu.

4. PODSUMOWANIE

Szybkość procesów rozruchowo-odstawieniowych kotłów decyduje o elastyczności elektrowni i jej możliwościach dostosowywania się do zmian w zapotrzebowaniu na energię. Celowe jest więc badanie możliwości wzrostu szybkości uruchamiania i odstawiania kotłów.

Na podstawie przedstawionych symulacji można stwierdzić, że istnieje możliwość przyspieszenia nagrzewania i chłodzenia grubościennych elementów kotłów. Widać również, że obliczony przy wykorzystaniu przepisów TRD przebieg zmian szybkości nagrzewania nie jest optymalny

ze względu na minimalizację stanu wyężenia w grubościennych elementach kotłów.

Literatura

- [1] TRD 301 – *Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwelenden Innendruck bzw. Durch kombinierte Innendruck – und Temperaturänderungen*. Technische Regeln für Dampfkessel, Berlin-Köln, Heymanns Beuth, 2001
- [2] Taler J., Zborowski M.: *The method of determining the optimal temperature changes during heating of thick-walled components*. Third International Congress on Thermal Stresses. Thermal Stresses, 99, 13–17 kwietnia, Kraków, S. 507–510
- [3] Węglowski B., Taler J., Duda P.: *Cieplno-wytrzymałościowe warunki pracy walczaków kotłów w trakcie rozruchów i odstawiania z ruchu*. IX Konferencja Kotłowa 2002, Szczyrk, Orle Gniazdo, 12–15 Listopada 2002, t. 4, Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
- [4] Polska Norma PN-75/H-84024
- [5] Taler J.: *Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła*. Ossolineum, 1995
- [6] Cwynar L.: *Rozruch kotłów parowych*. Warszawa, WNT 1989