ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996

Seria: ENERGETYKA z. 127 Nr kol. 1350

Jan CZEPELAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA WPŁYWU SPOSOBU EKSPLOATACJI KOTŁÓW NA TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę wpływu różnych parametrów pracy kotłów na trwałość jego elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania. Jako podstawowe parametry pracy elementu przyjęto ciśnienie czynnika wewnątrz oraz temperaturę metalu. Jako podstawowy parametr charakteryzujący proces rozruchu (odstawiania) przyjęto szybkość nagrzewania się (chłodzenia) metalu.

INFLUENCE ESTIMATION OF METHOD OF BOILER EXPLOITATION ON THE LIFE TIME OF PRESSURE ELEMENTS

Summary. The paper presents an analysis of the influence of various operational parameters of the boilers on the durability of its elements. The pressure of the inner medium and the metal temperature have been assumed as basic operational parameters of the element. The heating (cooling) velocity of the element has been assumed as the most important parameter of its unsteady state.

DIE AUSWERTUNG DES EINFLUSSES DER BETRIEBSWEISE VON KESSELN AUF DIE LEBENSDAUER DER DRUCKELEMENTE

Zusammenfassung. Die Arbeit enthält eine Analyse des Einflusses von Arbeitsparameter des Kraftwerksblockes auf die Lebensdauer der Elemente. Der Druck von Innenmedium und die Metalltemperatur sind als die Grundarbeitsparameter des Bestandteiles angenommen worden. Als der wichtigste Parameter des unbeständigen Zustands des Elementes ist die Geschwindigkeit der Erwärmung (Kühlung).

1. Wstęp

Elementy ciśnieniowe kotłów energetycznych w trakcie eksploatacji podlegają procesom zużywania się. Procesami powodującymi zużywanie się elementów eksploatowanych w temperaturach powyżej temperatury granicznej są: pełzanie, zjawiska zmęczeniowe (zarówno mechaniczne, jak i cieplne), korozja, a dla powierzchni ogrzewalnych dodatkowo erozja popiołowa. Najczęściej mamy do czynienia z sumarycznym działaniem wielu procesów, przy dominacji jednego z nich, najczęściej zjawiska pełzania. Często duży udział mają procesy niskocyklicznego zmęczenia – dotyczy to w szczególności elementów grubościennych typu komory zbiorcze, kolektory, trójniki itp.

Praca elementów ciśnieniowych w maszynach i urządzeniach energetycznych przebiega przy stałym i zmiennym obciążeniu. Konsekwencją tego są stałe oraz zmienne w czasie naprężenia w materiale. W przypadku obciążeń stałych zachodzi pełzanie materiału. W przypadku cyklicznie zmiennych obciążeń powstają zmienne odkształcenia $\varepsilon(t)$ o amplitudzie $\Delta\varepsilon$. Po długotrwałej eksploatacji element ciśnieniowy kotła osiąga stan graniczny wskutek zmęczenia niskocyklicznego, procesu pełzania, zmian własności materiału i ubytków korozyjno–erozyjnych.

Zagadnienie optymalizacji procesów eksploatacyjnych kotłów z punktu widzenia ich trwałości nabiera w ostatnich latach coraz większego znaczenia. Wynika to z faktu, że coraz więcej elementów bloków energetycznych osiąga obliczeniowy czas pracy lub zbliża się do niego. Istotne zatem staje się określenie teoretycznego i rzeczywistego poziomu ubytku trwałości elementów konstrukcyjnych po wieloletniej eksploatacji w warunkach obciążeń niskocyklicznych, wywołanych zmiennymi obciążeniami cieplnymi i mechanicznymi oraz pełzaniem materiału, a także dokonanie oceny możliwego jeszcze okresu dalszej eksploatacji urządzeń, aby zaplanować remonty, modernizacje lub wymianę elementów na nowe.

2. Cel pracy

Celem pracy jest przeprowadzenie analizy wpływu parametrów pracy na trwałość elementu ciśnieniowego na podstawie przedstawionego modelu w zależności od cech konstrukcyjnych, parametrów pracy, liczby rozruchów i parametrów rozruchowych kotła.

Jako podstawowe parametry pracy elementu przyjęto ciśnienie czynnika wewnątrz oraz temperaturę metalu. Jako podstawowy parametr charakteryzujący proces rozruchu (odstawiania) przyjęto szybkość nagrzewania się (chłodzenia) metalu.

3. Założenia modelu do określenia stopnia zużycia elementu ciśnieniowego

1. W przypadku kotłów przez cykl pracy rozumie się przebieg zmian obciążenia od momentu uruchomienia poprzez ruch ustalony do momentu odstawienia. Cykl pracy elementów określany jest poprzez wartości parametrów: ciśnienia (p), temperatury (T), oraz naprężenia (σ) w stanach skrajnych:
   - dolnym p^d, T^d, σ^d,
   - górnym p^g, T^g, σ^g.

   W pracy rozważane są 3 podstawowe warianty obciążenia cyklicznego (cykle pracy).

   a) O – P – O

   b) O – R – N – S – O

   c) N – S – G – R – N

   gdzie:

   O – stan zimny (określony przez temperaturę T = 20°C i nadciśnienie p = 0 MPa),

   P – próba ciśnieniowa (ciśnienie $p = 1{,}25\ p_{zn}$),

   R – rozruch ze stanu zimnego do nominalnego ze stałą szybkością wzrostu temperatury metalu v K/min,

   G – rozruch ze stanu gorącej rezerwy z szybkością wzrostu temperatury metalu v, (stan gorącej rezerwy określa temperatura $20°C < T^d < T_{zn}$ i ciśnienie $0 < p^d < p_{zn}$),

   S – schładzanie ze stałą szybkością zarówno do stanu rezerwy gorącej, jak i do stanu zimnego,

   N – stan pracy ustalony.

2. W cyklu pracy pomija się zmiany obciążeń spowodowane wahaniami ciśnień i temperatury, których wartości naprężeń nie przekraczają granicy zmęczenia.

3. Całkowite zużycie się materiału rozpatrywanego elementu wyznacza się zgodnie z zasadą liniowej akumulacji defektów przez zsumowanie ubytków trwałości [1].

4. Z uwagi na to, że w metodzie obliczeniowej uwzględnia się rzeczywistą grubość ścianki, pomija się wpływ ubytków erozyjno–korozyjnych.

5. Zmianę własności mechanicznych materiału w trakcie eksploatacji określa się w sposób uproszczony przyjmując wytrzymałość na pełzanie RZ/T/t skorygowaną do 0,8 wartości normatywnej [2].

4. Algorytm obliczeń

Zużycie materiału badanego elementu wyznacza się jako sumę wskaźników ubytku trwałości od zmęczenia niskocyklicznego e_w i pełzania e_z.

$$e = e_w + e_z$$

Jest to obliczenie bardzo uproszczone. Brak jest jednak wyników badań skomplikowanego procesu obciążenia, złożonego z kombinacji pełzania i zmęczenia małocyklicznego stali, które rozstrzygnęłyby, czy słuszne jest sumowanie cząstkowych współczynników ubytków trwałości.

4.1. Pełzanie

Obliczeniowy współczynnik ubytku trwałości w procesie pełzania e_z w rozpatrywanym okresie eksploatacji jest sumą wartości Δe_z, które wyznaczane są dla poszczególnych klas temperatur (ewentualnie także ciśnień):

$$e_z = \sum \Delta e_z$$

przy czym:

$$\Delta e_z = \frac{Z_{T/p}}{Z_{B/T/p}}$$

Zakres wartości parametrów pracy dzieli się na odpowiednie klasy ciśnienia p i temperatury T. Dla każdej z klas znajduje się na podstawie danych eksploatacyjnych czas pracy elementu $Z_{T/p}$ i wyznacza się obliczeniową trwałość elementu dla tych wartości p i T. Obliczeniowy sposób określenia trwałości elementu $Z_{B/T/p}$ dla parametrów pracy T, p polega na określeniu naprężenia σ w elemencie ciśnieniowym, a następnie odniesieniu do własności wytrzymałościowych materiału $R_{z/T/t}$ w określonej temperaturze pracy. Naprężenie w ściance elementu wyznacza się jako średnią wartość na grubości ścianki z uwzględnieniem współczynnika wytrzymałościowego Z_w (uwzględniającego obecność otworów i spoin) z zależności [8]:

$$\sigma_B = \frac{p[D_z - (2 - Z_w)s]}{2Z_w s}$$

4.2. Zmęczenie niskocykliczne

Podobnie jak dla pełzania wskaźnik ubytku trwałości wskutek zmęczenia niskocyklicznego wyznacza się:

$$e_w = \sum \Delta e_w$$

Liczbę zmian obciążeń (cykli rozruch – odstawienie) dzieli się na klasy w zależności od amplitudy oscylacji naprężeń $2\sigma_a$ będącej wynikiem różnicy temperatury ΔT na grubości ścianki powstającej w trakcie procesu nagrzewania czy schładzania. Każdej takiej klasie odpowiada rzeczywista liczba zmian obciążenia N. Następnie wyznacza się wartości granicznej liczby cykli N_{gr} dla poszczególnych klas $2\sigma_a$. Do wyznaczania N_{gr} wykorzystuje się empirycznie wyznaczone charakterystyki małocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej [3, 4]. Charakterystyki te uzależniają liczbę cykli zmian obciążenia N do uszkodzenia (pęknięcia) od amplitudy zmian naprężeń $2\sigma_a$ w czasie cyklu oraz średniej temperatury cyklu. Jako temperaturę średnią cyklu (służącą do wyznaczania wielkości materiałowych zależnych od temperatury) przyjmuje się wartość określoną w następujący sposób [3, 4]:

$$T = 0{,}75T_{max} + 0{,}25T_{min}$$

gdzie T_{max}, T_{min} – maksymalna i minimalna temperatura cyklu.

Amplitudę naprężeń $\Delta\sigma$ wyznacza się jako różnicę naprężeń na początku schładzania (odstawiania) oraz na początku rozruchu:

$$\Delta\sigma = \sigma_c^{s'} - \sigma_c^{r} \tag{1}$$

Aby skorzystać z doświadczalnej charakterystyki zmęczeniowej, należy wyznaczoną wartość $\Delta\sigma$ skorygować w zależności od zakresu zmienności [3]:

– dla $\Delta\sigma \leq 2R_e(t)$

$$2\sigma_a = \Delta\sigma \cdot f\frac{(2R_{m(20)})^2}{(2R_{m(20)})^2 - (2R_{e(T)} - \Delta\sigma)^2}$$

– dla $\Delta\sigma > 2R_e(t)$

$$2\sigma_a = f\frac{(\Delta\sigma)^2}{2R_{e(T)}}$$

przy czym f uzależnione jest od rodzaju materiału:

$$f = \begin{cases} 1{,}0 & \text{jeżeli } R_{e(20)} < 360 \text{ MPa} \\ 1{,}2 & \text{jeżeli } R_{e(20)} = 360 \div 600 \text{ MPa} \\ 1{,}4 & \text{jeżeli } R_{e(20)} > 600 \text{ MPa} \end{cases}$$

Naprężenia, o których mowa w zależności (1), stanowią sumę naprężenia od ciśnienia wewnętrznego σ_p i naprężenia termicznego σ_T w miejscu największego wytężenia materiału, to jest na krawędziach otworów, gdzie występuje koncentracja naprężeń.

$$\sigma_c^s = \sigma_p^s + \sigma_T^s = \alpha_k p^g \frac{D}{2s} + \alpha_T \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta\Theta^s$$

$$\sigma_c^r = \sigma_p^r + \sigma_T^r = \alpha_k p^d \frac{D}{2s} + \alpha_T \frac{\beta E}{1-\nu} \Delta\Theta^r$$

Przy założeniu, że występujące podczas rozruchu czy odstawiania przebiegi nagrzewania i schładzania elementu ciśnieniowego mają charakter quasi–stacjonarny (szybkość zmian temperatury jest ustalona), różnicę temperatury w ściance wyznacza się z zależności:

$$\Delta T^r = \frac{\Phi_f}{a_T} v^r s^2$$

$$\Delta T^s = \frac{\Phi_f}{a_T} v^s s^2$$

Współczynnik koncentracji naprężeń od ciśnienia α_k można określić z [4, 5], a dla współczynnika koncentracji naprężeń termicznych przyjmuje się wartość równą 2 [5]. Poniżej podano zależności do wyznaczenia pozostałych wielkości występujących w powyższych wzorach.

$$D = \frac{D_z + D_w}{2}$$

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

$$a_T = \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right)_T$$

5. Analiza wpływu parametrów eksploatacyjnych na trwałość

Analizę wpływu rozpatrywanych w pracy parametrów na trwałość przeprowadzono na przykładzie kilku grubościennych elementów ciśnieniowych kotła:

- komory wylotowej końcowego stopnia przegrzewacza pary pierwotnej kotła OP 650,
- komory wylotowej końcowego stopnia przegrzewacza pary wtórnej kotła OP 650,
- wężownic obu powyżej wymienionych przegrzewaczy.

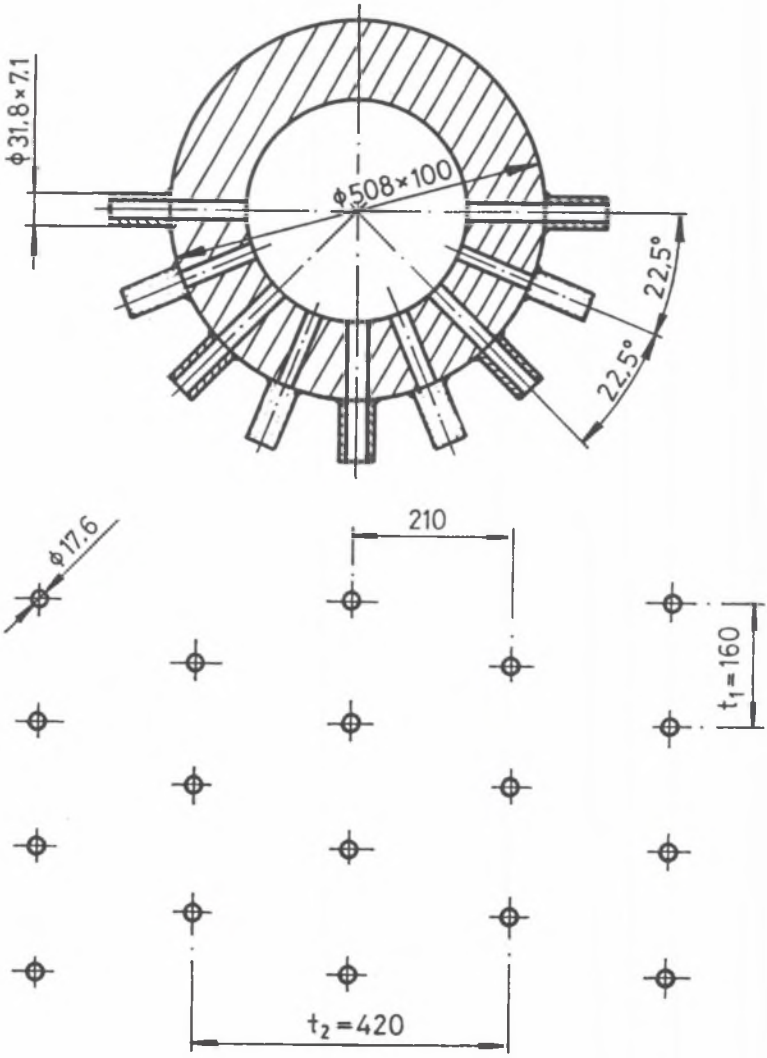
Elementy te pracują w wysokich temperaturach, ale przy różnych ciśnieniach, a zatem charakteryzują się znaczną różnicą grubości ścianki. Poniżej w tabeli podano dane przyjęte do obliczeń, a na rysunkach 1 i 2 pokazano przekroje komór oraz schemat owierceń otworów na króćce. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 ÷ 6. Na ich podstawie można przeprowadzić analizę wpływu rozważanych czynników na ubytek trwałości.

Tablica 1

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Przegrzewacz pary pierwotnej		Przegrzewacz pary wtórnej	
			komora wylotowa	wężownica	komora wylotowa	wężownica
Materiał			10H2M	10H2M	10H2M	10H2M
Średnica zewnętrzna	D_z	mm	508	31,8	558	57
Średnica wewnętrzna	D_w	mm	308	17,6	498	49
Minimalna grubość ścianki	s	mm	100	7,1	30	4,0
Średnica otworu króćca	d	mm	17,6	–	49	–
Stosunek średnic	$u = D_z/D_w$	–	1,649	1,809	1,120	1,163
Temperatura znamionowa	T_{zn}	°C	540	540	540	540
Ciśnienie znamionowe	p_{zn}	MPa	13,8	13,8	2,45	2,45
Wsp.koncentracji naprężeń od ciśnienia	α_k	–	2,55	1	3,20	1
Wsp. wytrzymałościowy	Z_w	–	0,958	1	0,591	1

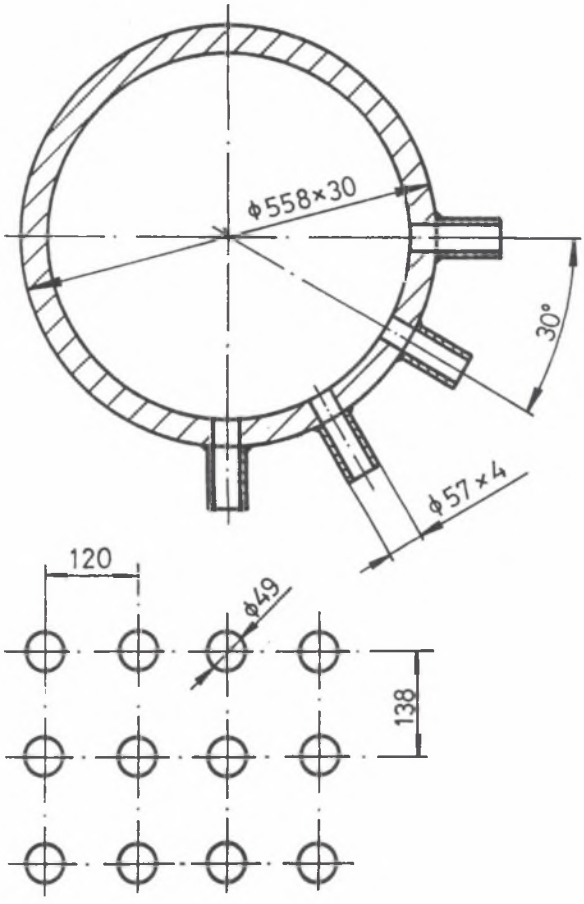
5.1. Wpływ parametrów eksploatacyjnych na trwałość w procesie pełzania

Wpływ parametrów pracy dla komór wylotowych przegrzewaczy pary na obliczeniowy ubytek trwałości w procesie pełzania e_z pokazują rysunki 4 i 6.



Rys. 1. Przekrój oraz schemat owierceń komory ϕ 508 × 100

Fig. 1. Cross-section and layout of drill-holes of the collector ϕ 508 × 100

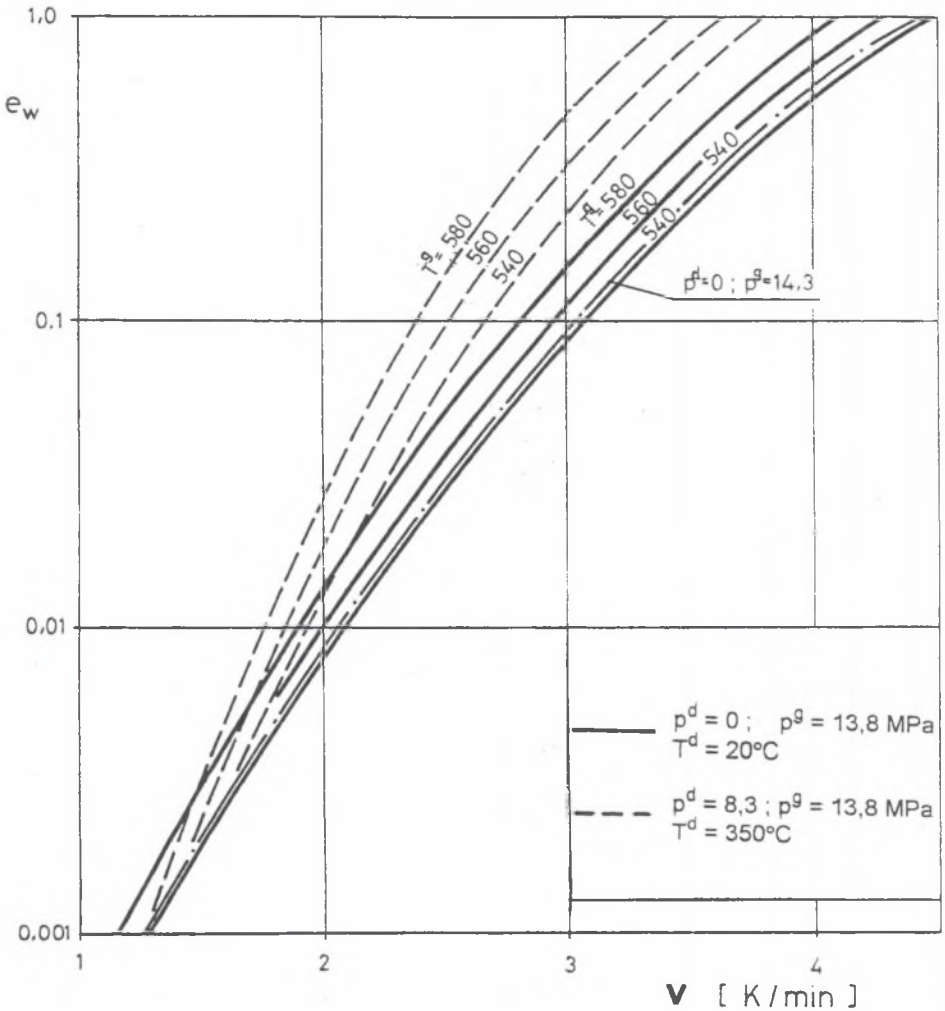


Rys. 2. Przekrój oraz schemat owierceń komory ϕ 558 × 30

Fig. 2. Cross-section and layout of drill-holes of the collector ϕ 558 × 30

a) Wpływ ciśnienia czynnika wewnętrznego

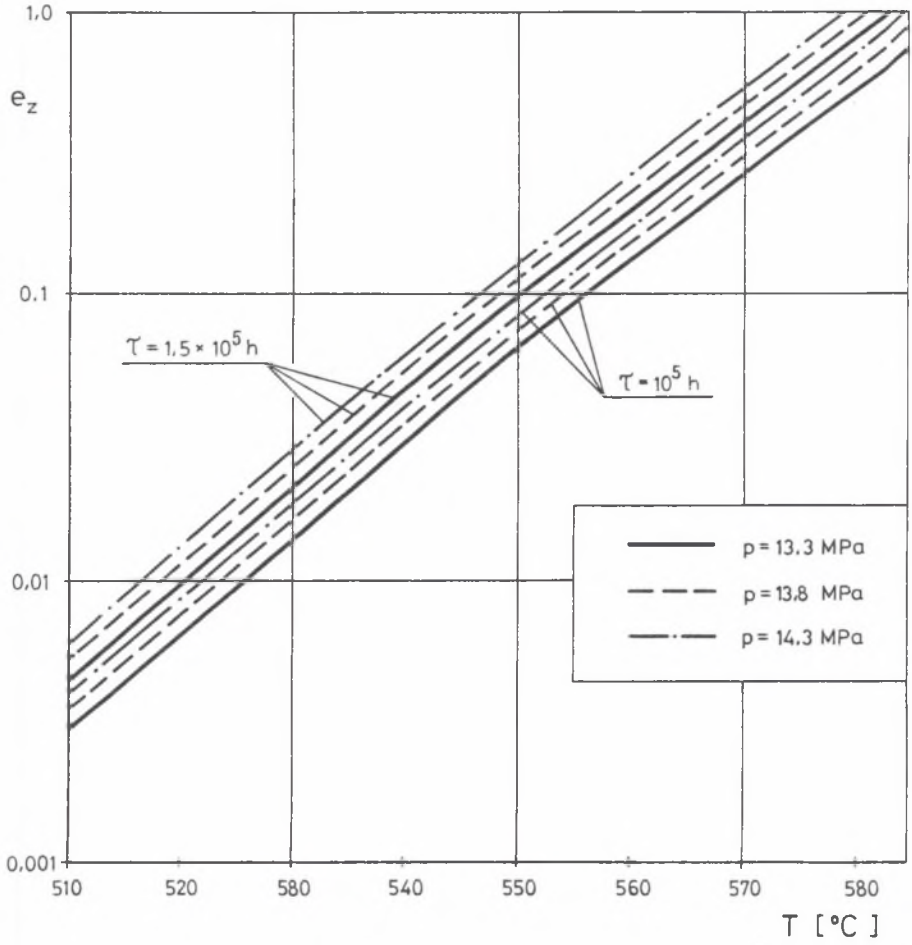
Na rysunku 4 przedstawiono wpływ ciśnienia dla komory wylotowej przegrzewacza pary pierwotnej. Oprócz krzywych dla ciśnienia p = 13,8 MPa wrysowano dwie krzywe dla wartości mniejszej i większej o 0,5 MPa (13,3 i 14,3 MPa). Z wykresu wynika, że zmiana ciśnienia rzędu 3,7% wpływa na wartość ubytku trwałości e_z o 14 ÷ 16% (w rozpatrywanym zakresie temperatur).



Rys. 3. Wpływ parametrów pracy na ubytek trwałości komory ϕ 508 × 100 wskutek zmęczenia niskocyklicznego. Liczbę cykli pracy przyjęto N = 1000

Fig. 3. Influence of the operational parameters on the durability loss for the collector ϕ 508 × 100 caused by the low-cycle fatigue. Number of cycles N = 1000

Podobnie na rysunku 6 przedstawiono wpływ ciśnienia dla komory wylotowej przegrzewacza pary wtórnej. Dla ciśnień 2,0, 2,45 i 2,9 MPa (zmiana ciśnienia ok. 20%) różnica e_z jest około 100%. Zatem można stwierdzić, że wpływ zmian ciśnienia jest tego samego rzędu (obie komory są wykonane z tego samego materiału).

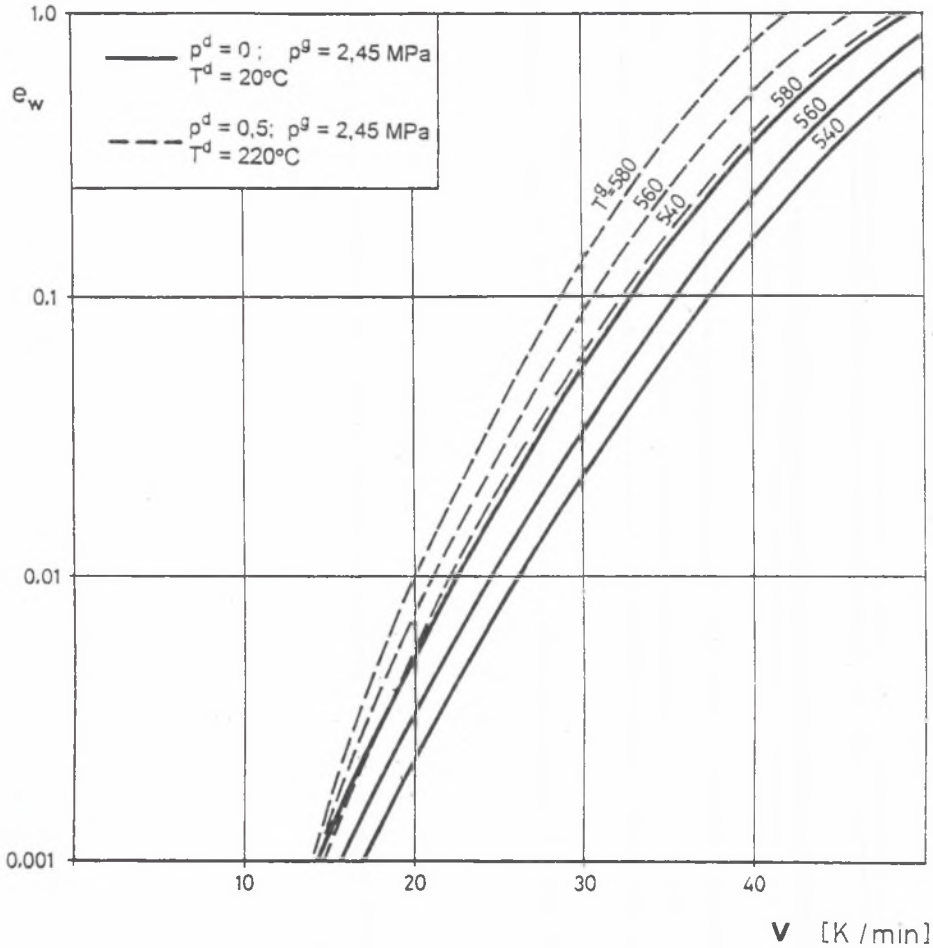


Rys. 4. Wpływ parametrów pracy na ubytek trwałości komory ϕ 508 × 100 wskutek pełzania

Fig. 4. Influence of the operational parameters on the durability loss for the collector ϕ 508 × 100 caused by the creep

b) Wpływ temperatury ścianki

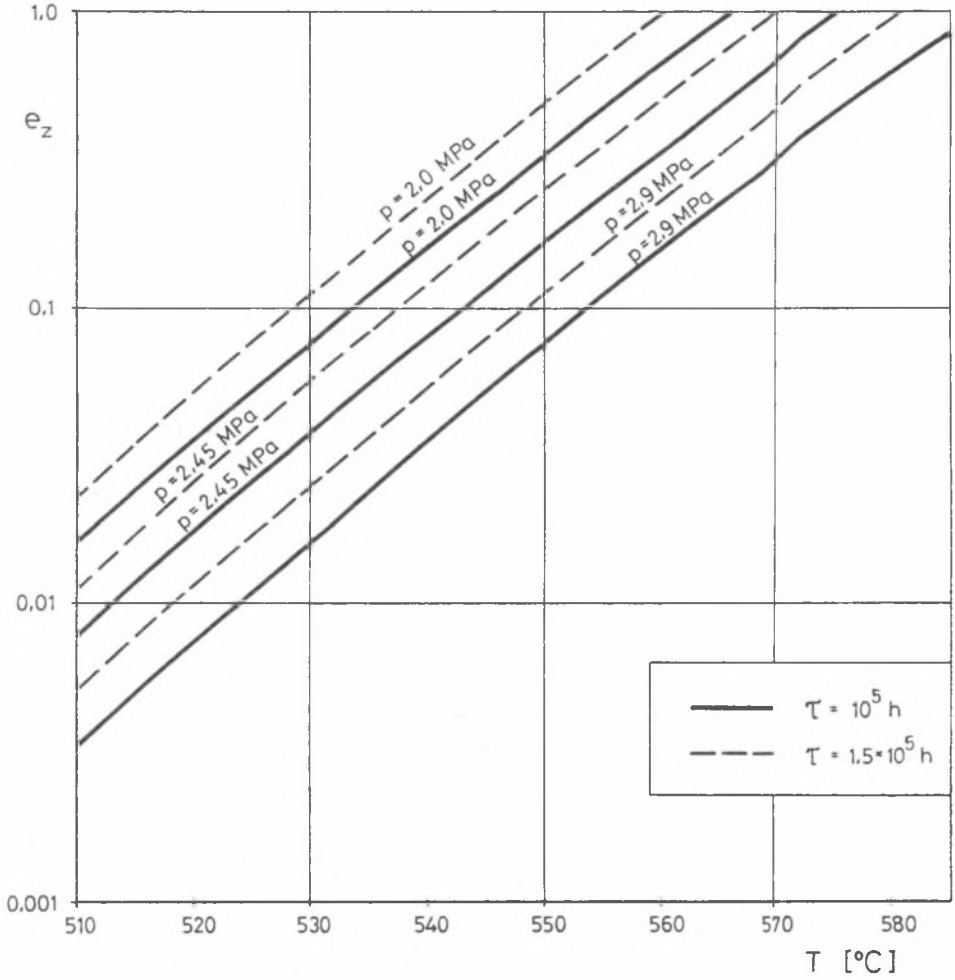
Na podstawie licznych badań oraz analizy przepływu pary przez wężownice można stwierdzić [6], że występuje istotne zróżnicowanie temperatury pary wypływającej z poszczególnych wężownic przegrzewacza. O czasie bezpiecznej eksploatacji decyduje odcinek, który pracuje w najwyższej temperaturze. Dodatnia nadwyżka temperatury na wylocie z wężownic bardzo często przekracza wartość średnią za stopniem o ponad 20°C.



Rys. 5. Wpływ parametrów pracy na ubytek trwałości komory ϕ 558 × 30 wskutek zmęczenia niskocyklicznego. Liczbę cykli pracy przyjęto N = 1000

Fig. 5. Influence of the operational parameters on the durability loss for the collector ϕ 558 × 30 caused by the low-cycle fatigue. Number of cycles N = 1000

Wykresy 4 i 6 wykonano dla zakresu temperatury ścianki elementu ciśnieniowego 520 – 585°C (w takim zakresie temperatur stosowana jest stal 10H2M). Wpływ temperatury, w jakiej pracuje element w warunkach pełzania, jak widoczne jest to na wykresach, jest znaczny. Zwiększenie temperatury o 10°C powoduje dwukrotny wzrost ubytku trwałości. I tak dla p = 13,8 MPa wzrost temperatury z 540°C do 550°C powoduje wzrost e_z z 0,035 do



Rys. 6. Wpływ parametrów pracy na ubytek trwałości komory ϕ 558 × 30 wskutek pełzania

Fig. 6. Influence of the operational parameters on the durability loss for the collector ϕ 558 × 30 caused by the creep

0,0733. Podobnie dla drugiej rozpatrywanej komory. Odpowiednie wartości e_z dla tych samych temperatur wynoszą 0,078 oraz 0,162.

Dla wężownic przegrzewaczy pary wykonanych ze stali 10H2M ubytek trwałości jest zbliżony do wartości uzyskanych dla komór. Również wpływ ciśnienia i temperatur ścianki na wartość e_z ma podobny charakter.

Zagadnienie wpływu innych czynników, takich jak naprężeń termicznych, obecności osadów na powierzchniach rur czy nierównomiernych obciążeń cieplnych istotnych dla trwałości wężownic omówiono szerzej w [9 – 11].

5.2. Wpływ parametrów eksploatacyjnych na trwałość w procesie zmęczenia niskocyklicznego

Wpływ parametrów pracy dla komór wylotowych przegrzewaczy pary na obliczeniowy ubytek trwałości dla obciążeń zmiennych e_w pokazują rysunki 3 i 5. Przy wyznaczaniu e_w przyjęto liczbę zmian (cykli) równą 1000 oraz przyjęto założenie, że szybkości nagrzewania i schładzania w cyklu są równe.

a) Wpływ ciśnienia

Zarówno w przypadku rozruchów ze stanu zimnego, jak i ze stanu gorącej rezerwy wpływ ciśnienia p^g jest niewielki. Przykładowo wzrost ciśnienia p^g z 13,8 MPa do 14,3 MPa (rys. 3) daje wzrost e_w z 0,087 do 0,09 (dla T_g = 540°C i v = 3 K/min) czyli o 3,4%. Podobnego rzędu wpływ ciśnienia obserwuje się dla drugiej rozpatrywanej komory. A zatem wpływ ciśnienia na e_w jest mniejszy niż dla ubytku w procesie pełzania.

b) Wpływ temperatury

Wpływ temperatury T^g jest dużo większy niż ciśnienia. Przy czym dla cykli z rozruchem ze stanu gorącej rezerwy (gorących) wpływ jest minimalnie większy. Znacznie większy jest wpływ temperatury T^d. Dla przykładu przy szybkości v = 3 K/min i temperaturze T^g = 560°C dla cykli „gorących" (temperatura T^d = 350°C) ubytek trwałości e_w = 0,316 a dla cykli „zimnych" (T^d = 20°C) e_w = 0,114 (dla komory ϕ 508 × 100). Podobne różnice występują w przypadku komory ϕ 558 × 30. Wynika to z faktu, że dla cyklu „gorącego" przy takiej samej wartości T^g wyższa jest temperatura średnia cyklu.

c) Wpływ szybkości zmian temperatury

Szybkość zmian temperatury ścianki w trakcie rozruchu i odstawiania ma tym większy wpływ na ubytek trwałości, im grubsza jest ścianka elementu – wartość naprężeń cieplnych jest zależna od grubości ścianki w kwadracie. Dlatego też szybkość zmian temperatury v odpowiadająca tej samej wartości e_w dla komory wylotowej przegrzewacza pary wtórnej jest przeciętnie o rząd wielkości większa niż dla komory przegrzewacza pary pierwotnej. Przy czym dla cykli z rozruchem ze stanu gorącej rezerwy wpływ jest większy – ten sam przyrost wartości e_w uzyskuje się przy niższych przyrostych prędkości zmian temperatury ścianki.

d) Wpływ prób ciśnieniowych na trwałość

Cykle typu próba ciśnieniowa mają pomijalnie mały udział w ubytku trwałości w wyniku działania obciążeń zmiennych. Wynika to przede wszystkim

z braku naprężeń termicznych i niskiej średniej temperatury cyklu. Naprężenia, które powstają na krawędzi otworów pod działaniem podwyższonego ciśnienia (bez udziału innych czynników), przyjmują takie wartości, że podwójnej amplitudzie zmian naprężenia $2\sigma_a$ odpowiada graniczna liczba cykli $N_{gr} >> 10^6$. A zatem, zakładając na przykład liczbę 100 cykli typu próba ciśnieniowa, otrzymujemy $e_w << 0{,}001$.

Równocześnie wartość naprężenia na krawędzi otworów dla rozważanych tu komór nie przekracza wartości granicy plastyczności $R_{e(20)}$, a zatem nie powstają w wyniku próby ciśnieniowej odkształcenia plastyczne będące po odciążeniu elementu źródłem naprężeń wstępnych.

e) Wpływ zmęczenia niskocyklicznego na trwałość wężownic przegrzewaczy pary

Wykonane obliczenia dla wężownic pary pokazały, że podobnie jak w przypadku prób ciśnieniowych dla komór, obciążenia zmienne będące wynikiem rozruchów i odstawień kotła mają znikomy udział w ubytku trwałości. Graniczna liczba cykli wyznaczona dla warunków pracy wężownic wynosi znacznie powyżej 10^6, co przy założeniu liczby cykli $N_{gr} = 1000$ prowadzi do $e_w << 0{,}001$.

6. Podsumowanie

Analiza przedstawiona w punkcie 5 pozwala na sformułowanie następujących uwag i wniosków:

1. Cykle typu próba ciśnieniowa mają pomijalnie mały udział w ubytku trwałości w wyniku działania obciążeń zmiennych. Wynika to przede wszystkim z braku naprężeń termicznych i niskiej średniej temperatury cyklu.
2. Dla elementów ciśnieniowych typu wężownica przegrzewacza pary udział obciążenia zmiennego (zmęczenia) jest praktycznie nieistotny w porównaniu z obciążeniem stałym (pełzanie). W rozpatrywanych przypadkach obliczeniowych graniczna wartość cykli powodujących uszkodzenie była powyżej 10^6. A zatem przyjęcie założenia upraszczającego, że rury powierzchni ogrzewalnych podlegają jedynie zużyciu wskutek pełzania nie odbiega od stanu rzeczywistego.
3. Dla grubościennych elementów ciśnieniowych typu komora przegrzewacza udział obciążeń zmiennych w zużyciu elementu może mieć charakter dominujący. W rozważanych przypadkach udział ubytku trwałości przy 1000 cyklach rozruchowych ze stanu zimnego (dla v = 3 K/min dla I komory i v = 36 K/min dla II komory) jest porównywalny z ubytkiem trwałości w wyniku procesu pełzania po 10^5 h, a dwukrotnie wyższy dla 1000 cykli rozruchowych ze stanu gorącego.

4. Przedłużenie eksploatacji ponad okres projektowy wymaga spowolnienia procesu zużywania się obiektu. W tym celu należy przeanalizować możliwości:
   - zmodyfikowania sposobu prowadzenia eksploatacji przez ograniczenie ilości rozruchów i odstawień oraz obniżenie szybkości zmiany mocy bloku,
   - obniżenia parametrów pracy bloku (temperatury, ewentualnie ciśnienia).

Literatura

1. Gnilke W.: Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente. Berlin VEB Verlag Technik 1981.
2. TRD 508 Technische Regeln für Dampfkessel. Anlage 1. Zusatzliche Prüfungen an Bauteilen Verfaren zur Berechnung von Bauteilen mit Zeitabhangigen Festigkeitskennwerten. 1978.
3. TRD 301 Technische Regeln für Dampfkessel. Zyllinderscheller unter innerem Überdruck, 1975.
4. Cwynar L.: Rozruch kotłów parowych. WNT, Warszawa 1981.
5. Wróblewski T. Sikorski W., Rzepa K.: Urządzenia kotłowe. WNT, Warszawa 1972.
6. Cwynar L.: Wpływ schematu przepływowego przegrzewacza pary na rozkład temperatur w komorach wylotowych stopni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka z. 120, Gliwice 1994.
7. Norma PN-89/M-34162 Kotły parowe i wodne. Współczynniki wytrzymałościowe i wzmocnienie otworów.
8. Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. Warszawa 1986.
9. Czepelak J.: Ocena trwałości pełzaniowej elementów ciśnieniowych obciążonych niesymetrycznie. Rozprawa Doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1993.
10. Kosman G., Czepelak J.: Trwałość elementów ciśnieniowych obciążonych niesymetrycznie. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka z. 121, Gliwice 1994.
11. Kosman G., Czepelak J.: Wpływ osadów na powierzchniach rury na jej trwałość Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka z. 121 Gliwice 1994.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a_T – współczynnik wyrównania temperatury,
c – ciepło właściwe,
d – średnica otworu króćca,
D_w – średnica zewnętrzna,
D_z – średnica wewnętrzna,
e – wskaźnik ubytku trwałości,
e_w – wskaźnik ubytku trwałości w procesie zmęczenia,
e_z – wskaźnik ubytku trwałości w procesie pełzania,
f – współczynnik,
E – moduł sprężystości podłużnej,
N – rzeczywista liczba cykli w danej klasie obciążeń zmiennych,
N_{gr} – graniczna liczba cykli dla danej klasy obciążeń,
p – ciśnienie,
R_e – granica plastyczności,
R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
$R_{z/T/t}$ – czasowa wytrzymałość na pełzanie,
s – minimalna zmierzona grubość ścianki,
t_t – podziałka obwodowa otworów,
t_z – podziałka wzdłużna otworów,
T – temperatura,
$u = D_z/D_w$ – stosunek średnic,
v – szybkość nagrzewania metalu,
$Z_{T/p}$ – czas eksploatacji z temperatura T i ciśnieniem p,
$Z_{B/T/p}$ – obliczeniowa trwałość elementu w temperaturze T i ciśnieniu p,
Z_w – współczynnik wytrzymałościowy,
α_k – współczynnik koncentracji naprężeń od ciśnienia,
α_T – współczynnik koncentracji naprężeń cieplnych,
β – współczynnik rozszerzalności cieplnej,
ΔT – różnica temperatury na grubości ścianki,
$\Delta\sigma$ – amplituda zmian naprężenia,
λ – współczynnik przewodności cieplnej,
ν – współczynnik Poissona,
ρ – gęstość,
σ – naprężenie,
σ_B – średnie naprężenie w ściance elementu,
Φ_f – współczynnik kształtu,
$2\sigma_a$ – amplituda zmian naprężenia odpowiadająca N_{gr}.

Indeksy dolne

zn – warunki znamionowe,
(20) – w temperaturze otoczenia (20°C),
T) – w temperaturze średniej cyklu,

Indeksy górne

r – rozruch (nagrzewanie),
s – odstawianie (schładzanie),
g – wartość graniczna górna,
d – wartość graniczna dolna.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edward Kostowski

Wpłynęło do Redakcji: 10. 10. 1996 r.

Abstract

The paper presents an analysis of the influence of various operational parameters of the boilers on the durability of its elements. The pressure of the inner medium and the metal temperature have been assumed as basic operational parameters of the element. The heating (cooling) velocity of the element has been assumed as the most important parameter of its unsteady state.

The loss of the durability of the element has been determined as a sum of two factors: for low-cycle fatigue and for the creep.

The analysis of the influence of operational parameters on the durability has been shown on example of few thick-wall boiler elements.

The results have been given on the figures.