

Gerard KOSMAN, Jan CZEPELAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

WPLYW OSADÓW NA POWIERZCHNIACH RURY NA JEJ TRWAŁOŚĆ

Streszczenie. W pracy rozpatrzono wpływ obecności osadów wewnętrznych i zewnętrznych na trwałość rury. Przyjęto równomierny rozkład osadów wewnętrznych po obwodzie. Dla osadów zewnętrznych analizowano dwa modele:

- osady zewnętrzne tworzą równomierną warstwę na obwodzie, pole temperatury jest niesymetryczne,
- kształt osadów jest zbliżony do rzeczywistego.

INFLUENCE OF DEPOSITS ON THE LIFE TIME OF TUBES

Summary. The influence of inner and outer deposits on the life time of heating surface tubes in steam generators has been presented. For the inner fouling an assumption has been made that the thickness of the deposit is constant. For outer ash deposits have been analysed two models:

- ash deposit with a constant thickness and asymmetric temperature distribution
- actual shape of deposits.

EINFLUß DER ANSÄTZE AUF DIE ZEITSTANDFESTIGKEIT DES ROHRES

Zusammenfassung. Der Einfluß von äußeren und inneren Rohransätze wurde betrachtet. Für innere Ansätze eine gleichmäßige Verteilung längs des Rohrumfangs wurde angenommen. Bei äußeren Ascheablagerungen zwei Modellannahmen wurde betrachtet:

- ascheablagerung mit gleichmäßiger Verteilung auf der Rohroberfläche und mit asymmetrischer Temperaturverteilung
- wirkliche Ablagerungsformen.

1. WSTĘP

W trakcie pracy kotła rury tworzące powierzchnie ogrzewalne ulegają zanieczyszczeniom zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz. Obecność osadów ma istotny wpływ na temperaturę ścianki oraz jej rozkład po obwodzie. Z kolei temperatura elementu decyduje o jego zużyciu pełzaniowym.

Wewnętrzna powierzchnia rur jest zanieczyszczona wskutek korozji metalu rury i tworzenia się tlenków żelaza oraz wytrącania się soli z mieszaniny parowodnej lub pary. Najczęściej są to węglany i siarczany. W zależności od typu osadów zmieniają się ich własności.

Dla najczęściej występujących osadów węglanowo-siarczanowych współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_{ow} = 4 \text{ W/mK}$ [1]. Dla warstwy osadów utworzonych z tlenków żelaza wartość ta jest niższa i można przyjąć $\lambda_{ow} = 1,0 \text{ W/mK}$ [2].

Charakter osadów zewnętrznych zależy od miejsca ich występowania [3]. W strefie wysokotemperaturowej (temperatura spalin w zakresie $1050 - 800^\circ\text{C}$) spotykane są osady spieczone, o dużej twardości i mogące osiągnąć znaczne rozmiary. Typowe kształty takich osadów przedstawia rys. 1.a. Współczynnik przewodności cieplnej takich osadów przyjmuje wartości w zakresie $0,4 - 1,5 \text{ W/mK}$.

W strefie średniotemperaturowej ($800 -$ temperatura rosenia spalin) występują wyłącznie osady sypkie o składzie zbliżonym do składu popiołu lotnego. Typowe kształty takich osadów przedstawia rys. 1.b. Współczynnik przewodności cieplnej zawiera się w zakresie $0,1 - 0,2 \text{ W/mK}$.

2. WPŁYW OSADÓW WEWNĘTRZNYCH

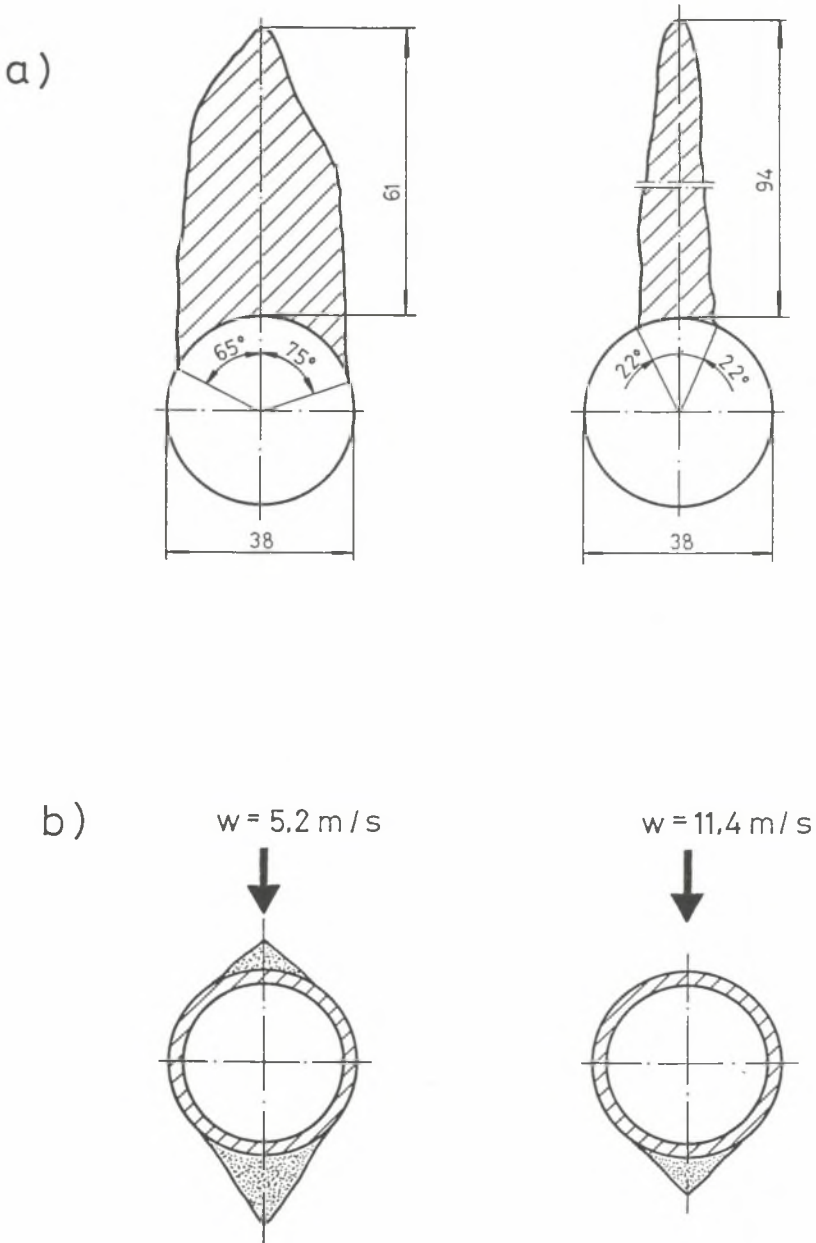
W kotłach parowych, w których obciążenia powierzchni ogrzewalnych są wysokie, powstawanie osadów na wewnętrznych ścianach rur ma istotne znaczenie. Obecność odpowiednio grubej warstwy zanieczyszczeń może decydować o trwałości i określa w znacznym stopniu okres niezawodnej eksploatacji.

Do rozważań dotyczących wpływu obecności osadów na trwałość można przyjąć założenie, że osady te rozłożone są równomiernie tworząc warstwę grubości g_{ow} o współczynniku przewodzenia ciepła λ_{ow} . Grubość warstwy osadów wewnętrznych jest zależna od czasu pracy oraz jakości wody kotłowej.

W przypadku gdy $\alpha_1 = \alpha_1(r, \varphi)$, rozkład temperatury w elemencie opisuje równanie (1),

$$T(r, \varphi) = A_0 + B_0 \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n r^n + B_n r^{-n}) \cos \varphi \quad (1)$$

przy czym stałe A_0 , B_0 , A_n i B_n wyznacza się z poniższych zależności [4]



Rys. 1. Typowe kształty osadów zewnętrznych: a) spieczonych – kocioł OP 380 El. Łaziska [3], b) sypkich – badania modelowe [7]

Fig. 1. Typical shapes of external deposits: a) sintered – boiler OP 380, Łaziska [3], b) dust – model investigation [7]

$$A_0 = \frac{q_0 R_z}{\lambda_{ow}} \left(\frac{1}{Bi_2} + \ln \frac{R_w}{R_{ow}} - \frac{\lambda_{ow}}{\lambda_m} \ln R_{ow} \right)$$

$$B_0 = \frac{q_0 R_z}{\lambda_m}$$

$$A_k = -\frac{q_k R_z}{\lambda_m k M} \left[(k - Bi_2)(\lambda_{ow} - \lambda_m) R_{ow}^k - (k + Bi_2)(\lambda_{ow} + \lambda_m) \left(\frac{R_w}{R_{ow}} \right)^k R_w^k \right]$$

$$B_k = -\frac{q_k R_z}{\lambda_m k m} \left[(k - Bi_2)(\lambda_{ow} + \lambda_m) R_{ow}^k + (k + Bi_2)(\lambda_{ow} - \lambda_m) \left(\frac{R_w}{R_{ow}} \right)^k R_w^k \right]$$

$$M = \left(\frac{R_{ow}}{R_z} \right)^k (k - Bi_2) \left[(\lambda_{ow} + \lambda_m) + \left(\frac{R_z}{R_w} \right)^{2k} (\lambda_m - \lambda_{ow}) \right] + \\ + \left(\frac{R_{ow}}{R_z} \right)^k (k + Bi_2) \left[\left(\frac{R_w}{R_z} \right)^{2k} (\lambda_{ow} - \lambda_m) - (\lambda_{ow} + \lambda_m) \right]$$

gdzie

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 R_{ow}}{\lambda_{ow}}$$

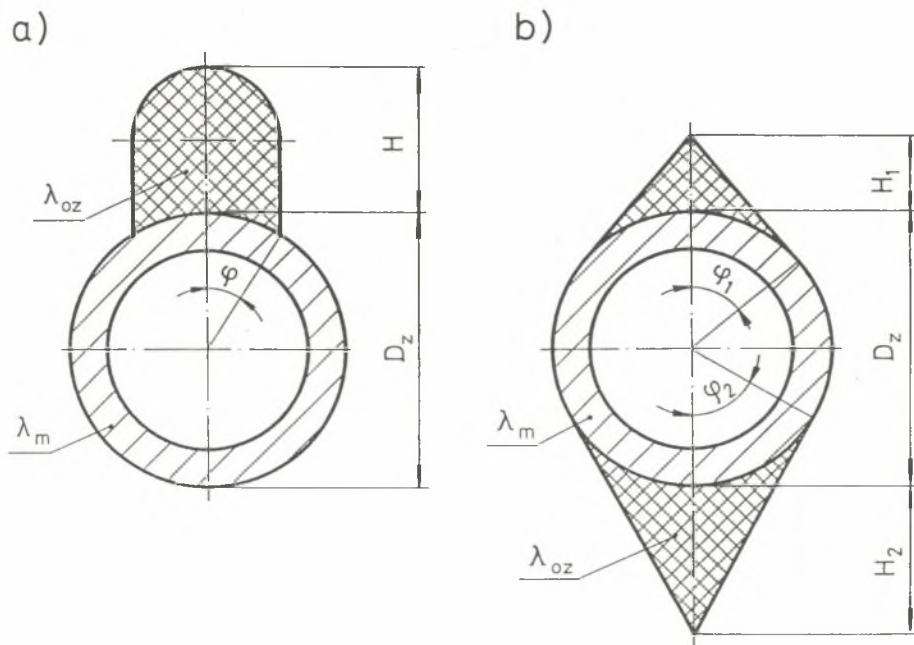
Naprężenia można wyznaczyć z zależności podanych w [10, 11].

3. WPLYW OSADÓW ZEWNĘTRZNYCH

Powstawanie osadów na powierzchni zewnętrznej rur powoduje zmianę kształtu powierzchni przejmującej ciepło, co pociąga za sobą również zmianę warunków omywania rur pęczka przez spaliny. Konsekwencją tego jest zmiana konwekcyjnego współczynnika ciepła od spalin do rury, co w efekcie wpływa na zmianę pola temperatur i naprężeń w rurze.

Wyniki badań [5] lokalnych wartości współczynnika wnikania ciepła wskazują, że ich przebieg dla rur pokrytych osadem różni się dość znacznie i jest łagodniejszy od przebiegu zaobserwowanego dla rur czystych. Powstawanie osadów na powierzchniach zewnętrznych ma również wpływ na intensywność radiacyjnej wymiany ciepła między spalinami a powierzchnią zanieczyszczonych rur. Zmianie ulegają zarówno emisyjność ścianki oraz spalin, jak temperatura powierzchni osadów [6].

Do rozważań wpływu osadów zewnętrznych przyjęto dwa modelowe kształty osadów, różne dla obu typów osadów. Przedstawiono je na rys. 2 wraz z charakteryzującymi je wymiarami.



rys. 2. Modelowe kształty osadów zewnętrznych przyjętych do obliczeń: a) dla osadów spieczonych, b) dla osadów sypkich

Fig. 2. Model shapes of external deposits assumed in the calculations: a) for sintered deposits, b) for dust deposits

W obszarze wyższych temperatur spalin (tam gdzie istnieją gorsze warunki pracy materiału rur) powstają osady zestalone na powierzchniach rur od strony napływu spalin. Dlatego też taki kształt przyjęto do dalszych rozważań. Dla porównania analizowano również przypadek równomiernego, po obwodzie, rozłożenia osadów zewnętrznych. W tym przypadku czynnikiem wywołującym niesymetryczność obciążeń rury był rozkład współczynnika wnikania ciepła $\alpha_1 = \alpha_1(r, \varphi)$.

3.1. Osady zewnętrzne równomiernie rozłożone

W przypadku gdy $\alpha_1 = \alpha_1(r, \varphi)$, rozkład temperatury w elemencie opisuje równanie (1), przy czym stałe A_0 , B_0 , A_k i B_k określają poniższe zależności:

$$A_0 = \frac{q_0 R_z}{\lambda_m} \left(\frac{1}{Bi_2} - \ln R_w \right)$$

$$B_0 = \frac{q_0 R_z}{\lambda_m}$$

$$A_k = -\frac{2q_k R_z}{k M} (k + Bi_2) R_w^k$$

$$B_k = -\frac{2q_k R_z}{k M} (k - Bi_2) R_w^k$$

$$M = \left(\frac{R_{ow}}{R_z}\right)^k (k - Bi_2) \left[(\lambda_{ow} + \lambda_m) + \left(\frac{R_z}{R_w}\right)^{2k} (\lambda_m - \lambda_{ow}) \right] + \\ + \left(\frac{R_{ow}}{R_z}\right)^k (k + Bi_2) \left[\left(\frac{R_w}{R_z}\right)^{2k} (\lambda_{ow} - \lambda_m) - (\lambda_{ow} + \lambda_m) \right]$$

gdzie

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 R_w}{\lambda_m}$$

Napężenia wyznacza się z zależności podanych w [10, 11].

3.2. Osady zewnętrzne o kształcie rzeczywistym

Rozwiązanie zagadnienia rozkładu temperatury w rurze z zanieczyszczeniami powierzchni o postaci wg rys. 2.b podano w [7]. Równania różniczkowe z odpowiednimi warunkami brzegowymi stanowią nieliniowe zagadnienie brzegowe równania różniczkowego cząstkowego typu eliptycznego i może być rozwiązane analitycznie w sposób przybliżony. Rozwiązania tego nie można zastosować do wyznaczenia rozkładu temperatur dla zanieczyszczeń o postaci wg rys. 2.a. Wydaje się celowe zastosowanie do tego przypadku metod numerycznych. Można wtedy stosunkowo prosto uwzględnić rzeczywisty kształt osadów oraz rozkłady współczynników wnikania ciepła lub obciążenia cieplnego na obwodzie, a także uwzględnić równoczesną obecność osadów wewnętrznych.

Dysponując polem temperatury w rurze wyznaczonym numerycznie można wyznaczyć pole naprężeń w rurze wykorzystując odpowiednie równania dla stanu sprężystego oraz dla pełzania [10, 11].

Aby skorzystać z tych zależności, należy wyznaczyć współczynnik B_1 . Według [8] B_1 można wyznaczyć z zależności:

$$B_1 = \frac{4 R_w^0 \int_0^{R_z} \int_0^{2\pi} T_\varphi(r, \varphi) \left(r^2 - \frac{R_z^2 - R_w^2}{2} \right) \cos \varphi \, dr \, d\varphi}{\pi \left(R_z^2 - R_w^2 - \frac{R_z^2 + R_w^2}{\ln u} \right)} \quad (2)$$

Wykorzystując wyniki obliczeń numerycznych zastępujemy znaki całek sumami. Temperatura T_φ reprezentuje składnik zależny od kąta φ (człon będący sumą w równaniu (1) i można wyznaczyć ją z zależności:

$$T_\varphi = T - \Delta T \frac{\ln \frac{R_z}{r}}{\ln u} - T_{wc} \quad (3)$$

gdzie

$$\Delta T = T_{zc} - T_{wc} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} T(R_z, \varphi) \, d\varphi - \int_0^{2\pi} T(R_w, \varphi) \, d\varphi \right)$$

4. WYNIKI OBLICZEŃ

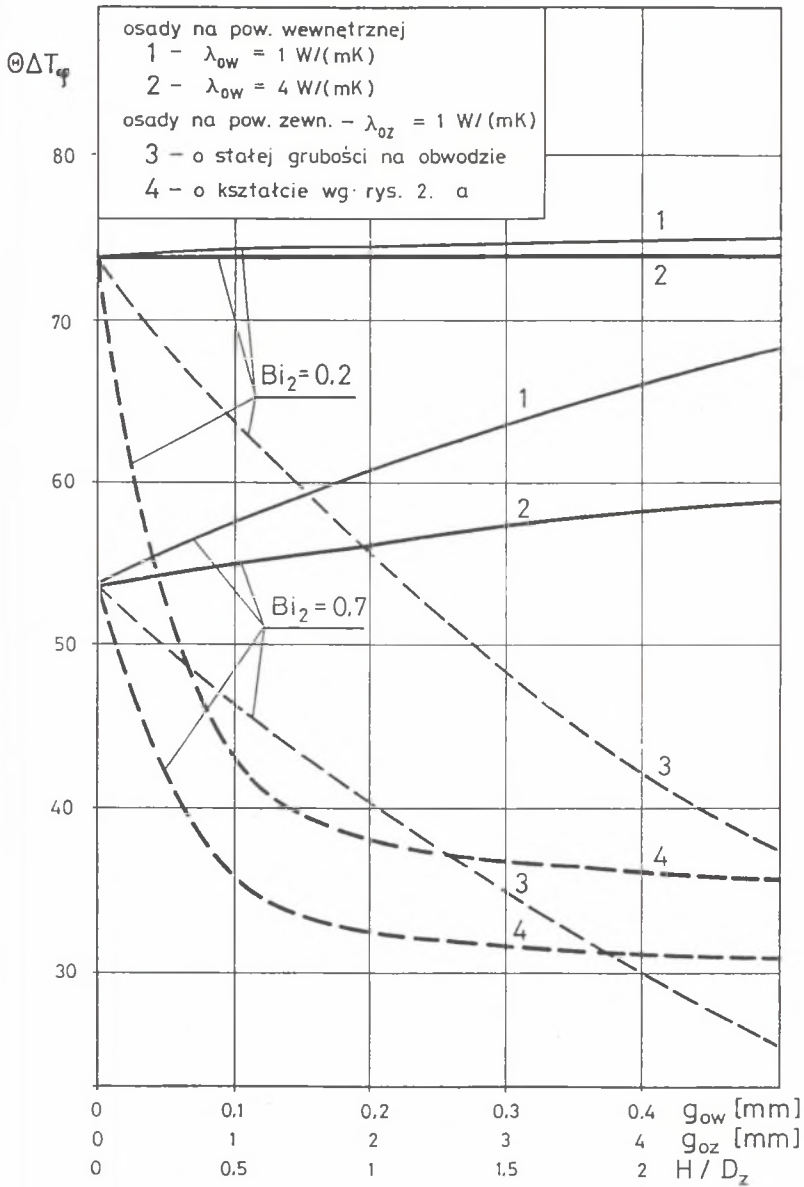
Za pomocą opracowanego programu opartego na metodzie bilansów elementarnych przeprowadzono obliczenia dla osadów zewnętrznych o kształcie jak na rys. 2.a. Przyjęto, że kąt φ jest równy 60° , a współczynnik przewodzenia ciepła osadów $\lambda_{oz} = 1 \text{ W/(mK)}$. Dla osadów wewnętrznych współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_{ow} = 4 \text{ W/mK}$ odpowiada osadom węglanowo-siarczanowym, a $1,0 \text{ W/mK}$ warstwie tlenków.

Wyniki obliczeń wykonane dla rury o średnicy zewnętrznej 32 mm i stosunku średnic $u = 1,4$ przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5. Pokazano na nich wpływ zarówno osadów wewnętrznych, jak i zewnętrznych, co pozwala na łatwiejsze porównanie obecności osadów na wartości $\Theta \Delta T_\varphi$, Θ_w oraz t_B .

Na rys. 3 przedstawiono wpływ obecności osadów na powierzchniach wewnętrznej i zewnętrznej oraz liczb Biota na nierównomierność rozkładu temperatury na powierzchni zewnętrznej rury przedstawionej w formie bezwymiarowej $\Theta \Delta T_\varphi = \Delta T_\varphi / (T_s - T_c)$.

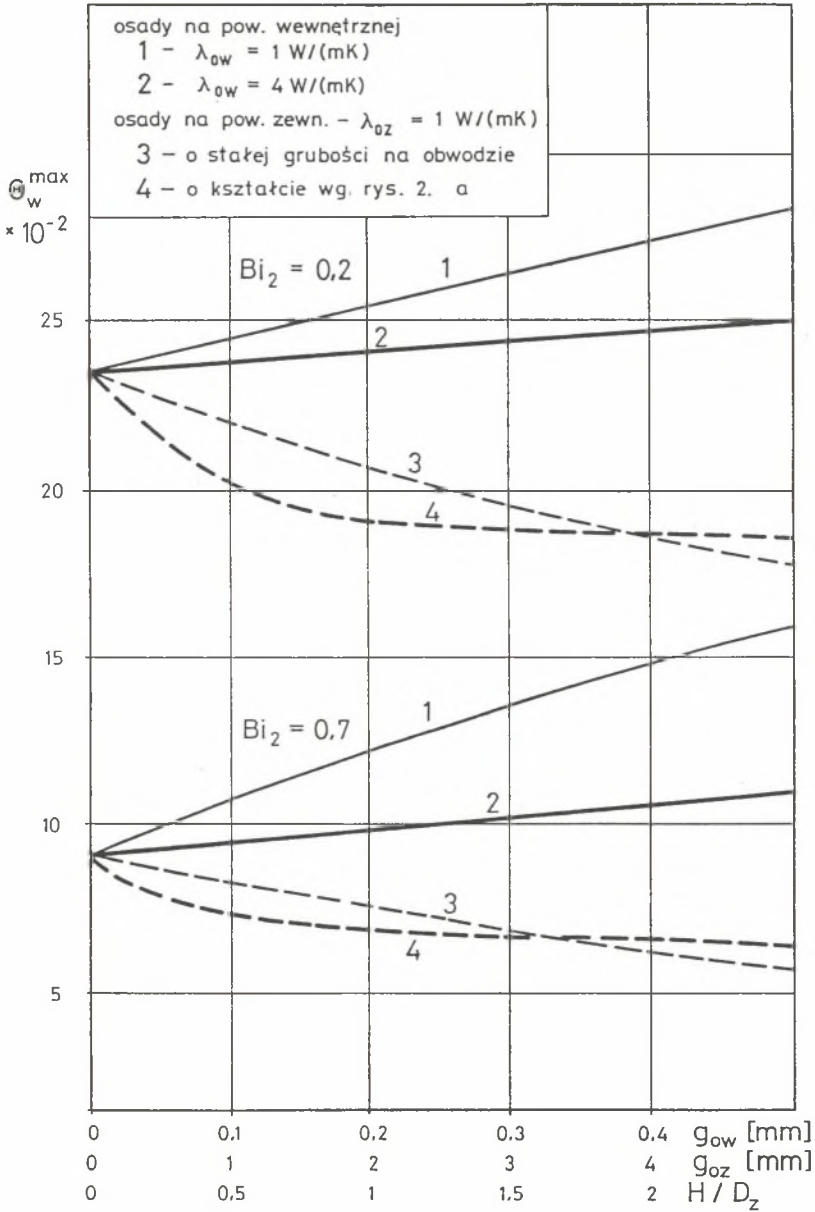
Z kolei rysunek 4 przedstawia wpływ osadów oraz liczb Biota na przebieg bezwymiarowej temperatury na powierzchni wewnętrznej Θ_w . Do obliczeń przyjęto rozkład po obwodzie wg typowego przebiegu dla rury w głębi pęczka w układzie przestawnym [9] (dla osadów równomiernie rozłożonych) i według [5] dla osadów o kształcie rzeczywistym.

Wpływ obecności osadów wewnętrznych na trwałość elementu przy uwzględnieniu niesymetrycznego obciążenia cieplnego przedstawiono na rys. 5.



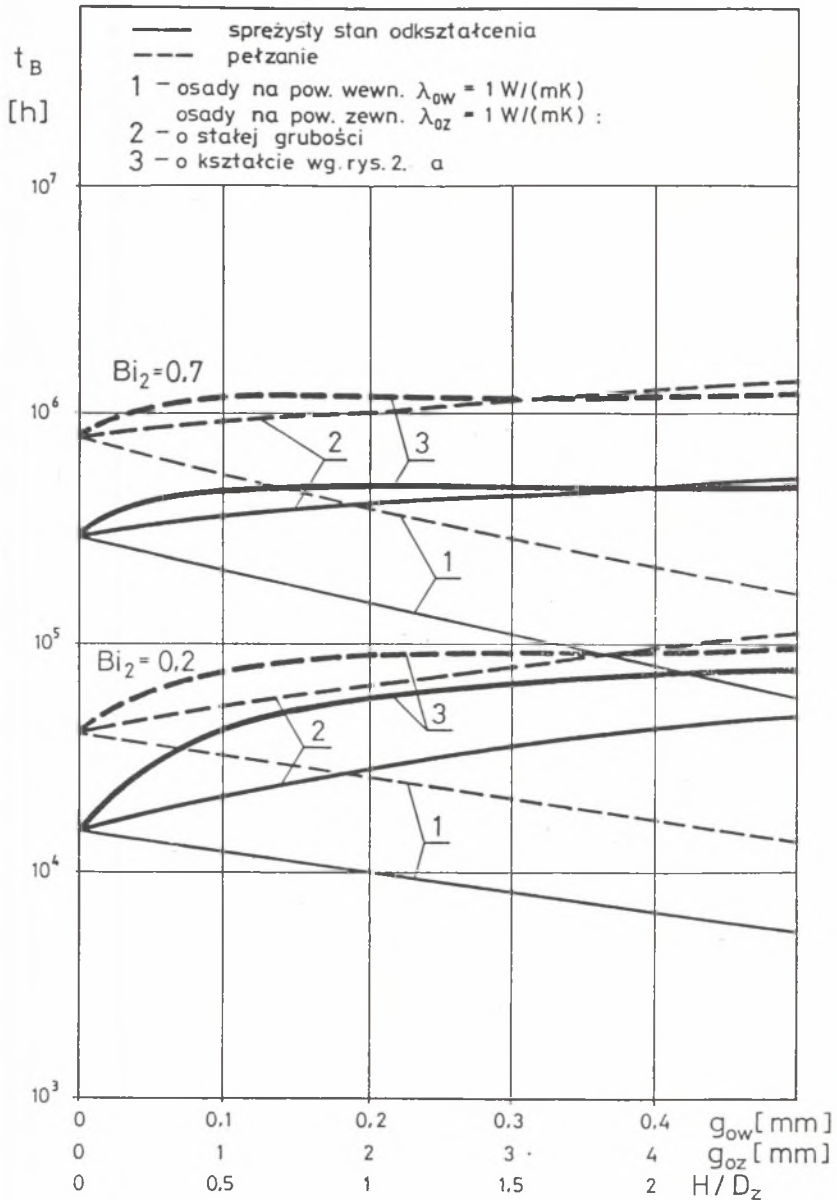
Rys. 3. Wpływ osadów na bezwymiarową różnicę temperatury na obwodzie rury $\Theta \Delta T_{\varphi}$: $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$

Fig. 3. Influence of deposits upon the nondimensional difference of temperature around the periphery of a tube $\Theta \Delta T_{\varphi}$: $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$



Rys. 4. Wpływ osadów na bezwymiarową temperaturę ścianki wewnętrznej θ_w : $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$

Fig. 4. Influence of deposits upon the nondimensional temperature of the inner wall surface θ_w : $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$



Rys. 5. Wpływ obecności osadów wewnętrznych i zewnętrznych na trwałość elementu ciśnieniowego: $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$, $T_s = 800^\circ\text{C}$, $T_c = 500^\circ\text{C}$

Fig. 5. Influence of internal and external deposits upon the life time of a pressure element: $u = 1,4$, $Bi_1 = 0,05$, $T_s = 800^\circ\text{C}$, $T_c = 500^\circ\text{C}$

PODSUMOWANIE

Wyniki otrzymane w pracy pozwalają na ocenę wpływu na trwałość rur osadów tworzących się w trakcie pracy na powierzchniach ogrzewalnych kotła.

Obecność osadów na powierzchni wewnętrznej rur powoduje niekorzystny, z punktu widzenia trwałości, wzrost temperatury tym większy, im gorsza jest wymiana ciepła na wewnętrznej ściance (niższa wartość Bi_2), większa grubość i niższa wartość współczynnika przewodzenia osadów. Z drugiej strony maleje wartość różnicy temperatury: na grubości ścianki ΔT oraz na obwodzie rury ΔT_φ , co powoduje obniżenie wartości naprężeń cieplnych. W efekcie obecność tych osadów znacznie skraca czas pracy elementu. Nieuwzględnienie w obliczeniach asymetryczności obciążenia cieplnego daje zawyżone wartości czasu pracy.

Osady na powierzchni zewnętrznej stanowią swego rodzaju warstwę ochronną, obniżającą temperaturę ścianki elementu. Równocześnie maleją wartości ΔT oraz ΔT_φ . Prowadzi to do wydłużenia czasu pracy.

Przyjęcie do obliczeń uproszczonego modelu osadów w postaci warstwy o stałej grubości obniża wyliczoną wartość czasu pracy dla mniejszych ilości osadu – $g_{oz} \leq 3 - 6$ mm (co odpowiada parametrowi $H/D_z = 0,4 - 0,9$). Dla większych osadów obserwuje się relację odwrotną. Graniczna wartość g_{oz} (H/D_z) zależna jest od liczby Bi_2 (niższa dla $Bi_2 = 0,7$, wyższa dla $Bi_2 = 0,2$).

Wpływ obecności osadów na trwałość jest większy dla elementu znajdującego się w zakresie odkształceń sprężystych (podobnie zresztą jak to jest w przypadku wpływu innych czynników [10]) i zmniejsza się ze wzrostem wartości liczby Bi_2 .

Tablica 1

Obciążenie cieplne	Stan odkształcenia	Obliczeniowy czas pracy $t_B \times 10^5$ [h]			
		Element bez osadów	Osady na pow. wewnętrznej $g_{ow} = 0,1$ mm $\lambda_{ow} = 1$ W/(nK)	Osady na pow. zewnętrznej	
				równ. rozłoż. $g_{oz} = 3$ mm $\lambda_{oz} = 1$ W/(nK)	kształt rzeczywisty $H/D_z = 0,4$ $\varphi = 60^\circ$ $\lambda_{oz} = 1$ W/(nK)
$T = T(r)$	I	4,97	3,72	7,41	–
	II	13,51	9,97	19,12	–
$T = T(r, \varphi)$	I	2,89	2,096	4,64	4,42
	II	7,76	5,27	11,61	11,22
Oznaczenia		I – stan sprężysty elementu II – pełzanie ustalone			

W tablicy 1 zamieszczono wartości trwałości elementu wyznaczone dla rozpatrywanych w niniejszej pracy przypadków. Obliczenia wykonano przy-

mując dane: $T_s = 800^\circ\text{C}$, $T_c = 500^\circ\text{C}$, $Bi_1 = 0,05$, $Bi_2 = 0,7$ oraz $D_z = 32$ mm. Osadom zewnętrznym określonym wymiarami: $H/D_z = 0,4$ i $\alpha = 60^\circ$ odpowiada warstwa osadów o grubości 3 mm.

LITERATURA

- [1] Sierakowski E., Mrozek J.: Kontrola wody i pary w energetyce. WNT, Warszawa 1979.
- [2] Glebov W. P., Eskin N. B., Trubaczew W. M., Taratura W. A., Kjaar Ch. A.: Wnutritrubny obrazowanija w parowych kotlach swerchkriticzesko-go dawljenja. Energoatomizdat, Moskwa 1983.
- [3] Gaiński J., Pronobis M.: Badania zanieczyszczeń kotłowych powierzchni konwekcyjnych. Energetyka nr 12, 1989.
- [4] Młynarski F., Taler J.: Analytische Untersuchung der Temperatur und Spannungsverteilung in strahlungsbeheizten Kesselrohren unter der Berücksichtigung der wasserseitigen Ablagerungen. VGB Kraftwerkstechnik, Heft 5, 1976.
- [5] Pronobis M.: Einflu der Verschmutzung auf den Wärmeaustausch in konvektiven Kesselrohrbündeln. VGB Kraftwerkstechnik Hef 2 1986.
- [6] Pronobis M.: Konwekcyjne i radiacyjne współczynniki wnikania ciepła od spalin do zanieczyszczeń rur kotłowych. ZN Pol. Śl. s. Energetyka, Z. 110, Gliwice 1990.
- [7] Skiepmo T.: Rozkład temperatury w ścianie rury konwekcyjnej powierzchni wymiany ciepła w kotle. Archiwum Energetyki nr 4/1980.
- [8] Bijlaard P. P., Dohrman R. J., Duke J. M.: Thermmal stress analysis of nonuniformly heated cylindrical shell and its application to a steam generator membrane wall. Trans. of the ASME Journal of Engineering for Power, Januar 1968.
- [9] Żukauskas A. A.: Konwektiwnyj perenos w tieploobmennikach. Nauka, Moskwa 1982.
- [10] Kosman G., Czepelak J.: Trwałość elementów ciśnieniowych obciążonych niesymetrycznie. ZN Pol. Śl. s. Energetyka, Z. 121, Gliwice 1994.
- [11] Czepelak J.: Ocena trwałości pełzaniowej elementów ciśnieniowych obciążonych niesymetrycznie. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice listopad 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan TALER

Wpłynęło do Redakcji 8.08.1994 r.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- D –średnica rury
g –grubość elementu
p –ciśnienie
q –gęstość strumienia ciepła
R –promień rury
r –promień bieżący
u –stosunek promieni R_z/R_w
T –temperatura
 t_B –obliczeniowy czas pracy
 α_1 –współczynnik wnikania ciepła do powierzchni zewnętrznej
 α_2 –współczynnik wnikania ciepła do czynnika wewnątrz rury
 ΔT –różnica temperatury
 ΔT_φ –nierównomierność temperatury na obwodzie
 Θ –temperatura bezwymiarowa
 λ –współczynnik przewodzenia ciepła
 σ_{red} –naprężenie zredukowane
 φ –współrzędna kąтова

Indeksy dolne

- c –dotyczy czynnika wewnątrz rury
m –dotyczy materiału elementu
ow –dotyczy osadów na powierzchni wewnętrznej
o –dotyczy osadów na powierzchni zewnętrznej
s –dotyczy czynnika na zewnątrz rury
w –dotyczy powierzchni wewnętrznej rury
z –dotyczy powierzchni zewnętrznej rury

Abstract

The paper deals with the problem of the influence of inner and outer fouling on the service life of heating boiler surfaces. The deposits have an effect on the temperature level and distribution over tube perimeter and both factors have an influence on the creep fatigue.

For the inner fouling an assumption has been made that the thickness of the deposit is constant. For outer ash deposits two models have been analysed:

- ash deposit with a constant thickness and asymmetric temperature distribution
- actual shape of deposits.

Calculations results have been shown in a form of diagrams. The influence of fouling on the maximum temperature of inner tube wall, the temperature

distribution over tube perimeter as well as the calculated service life have been described.

An assumption has been made that the steam generator tubes can be operated by elastic strain or by steady-creep conditions.