

Jan TALER, Bohdan WĘGŁOWSKI

Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Politechnika Krakowska

UKŁAD DO AUTOMATYCZNEGO WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH I OCENY TRWAŁOŚCI RESZTKOWEJ CIŚNIENIOWYCH ELEMENTÓW BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono teoretyczne podstawy wyznaczania naprężeń cieplnych na podstawie pomiaru temperatury zewnętrznej powierzchni elementu ciśnieniowego w czasie. Ponadto wyznaczono stopień uszkodzenia elementu w wyniku pełzania i zmęczenia małowyklicznego, wywołanego zmiennymi w czasie naprężeniami cieplnymi. Wykorzystano przy tym hipotezę liniowego sumowania uszkodzeń Palmgrena–Minera. Omówiono zbudowany komputerowy układ do kontroli naprężeń cieplnych i oceny trwałości resztkowej elementów ciśnieniowych działających w trybie on–line i nadający się do zastosowania w elektrowniach.

ON–LINE MONITORING SYSTEM FOR DETERMINING THERMAL STRESSES AND REMAINING LIFE OF POWER UNIT COMPONENTS

Summary. An on–line monitoring system for tracking transient thermal stresses and creep–fatigue usage in operating power plants is described. The creep–fatigue damage is determined real time using actual plant data: temperature and pressure. Thermal stress are calculated based on temperature measurements taken at outside surface of the component. The cumulative damage theory by Palmgren and Miner is used to assess creep–fatigue damage caused by actual transients.

EIN AUTOMATISCHES ÜBERWACHUNGSSYSTEM ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMESPANNUNGEN UND RESTLEBENSDAUER DER DRUCKFÜHRENDEN BAUTEILE VON KRAFTWERKSBLÖCKEN

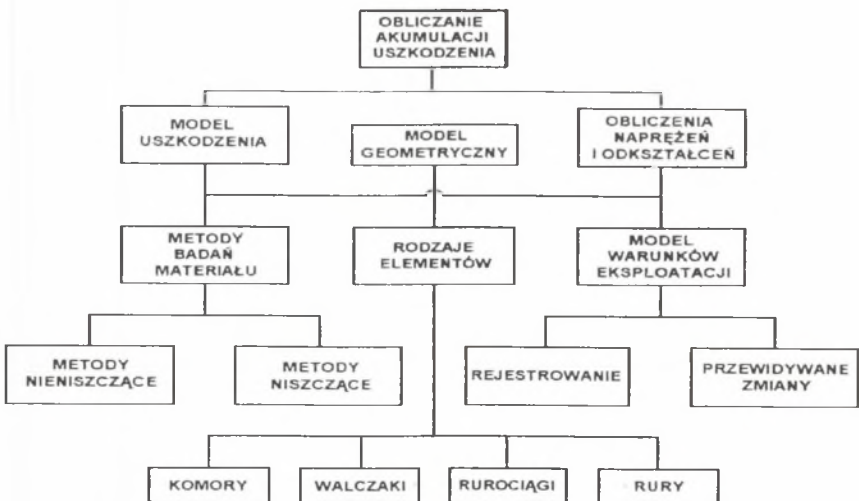
Zusammenfassung. Es wurde ein System dargestellt, mit dem nicht nur die Wärmespannungen sondern auch der Lebensdauerverbrauch infolge Werkstoffermüdung und Zeitstandbeanspruchung

erfaßt und on-line verarbeitet werden kann. Die Erschöpfung wird automatisch anhand ständig erfaßter Temperatur- und Druckmeßwerte berechnet. Zur Berechnung der Wärmespannungen wird nur eine Temperatur-Meßstelle an der Außenoberfläche des Bauteils benutzt. Die Gesamterschöpfung durch Wechsel- und Zeitstandbeanspruchung wird nach der linearen Schadensakkumulationshypothese von Palmgren und Miner ermittelt.

1. WSTĘP

Ocena trwałości resztkowej elementu jest złożonym zagadnieniem wymagającym stosowania metod niszczących, jak również rejestracji warunków pracy analizowanego elementu (rys. 1). W pracy przedstawiony zostanie sposób postępowania przy ocenie trwałości resztkowej elementów kotłów pracujących w warunkach pełzania oraz zmęczenia małowyklicznego. W metodzie tej muszą być wyznaczone naprężenia cieplne występujące w elementach ciśnieniowych kotłów w czasie eksploatacji.

Znajomość naprężeń cieplnych w elementach kotłów umożliwia również prawidłowe przeprowadzenie operacji rozruchu, jak i wyłączenia z ruchu bloku energetycznego. Do wyznaczania obliczeniowego zapasu żywotności wykorzystywana jest zależność podana przez Palmgrena-Minera:



Rys. 1. Obliczanie akumulacji uszkodzenia elementu ciśnieniowego kotła

Fig. 1. Evaluation of total creep-fatigue damage value of pressure boiler elements

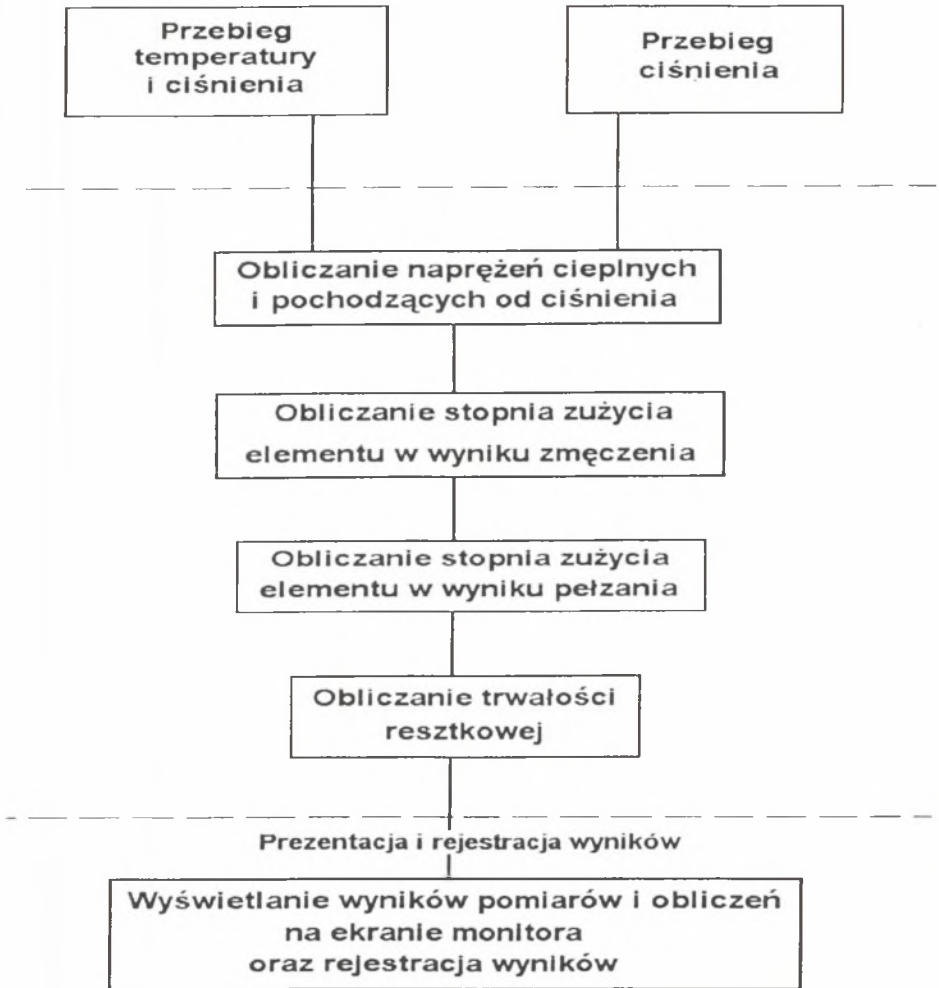
$$\sum_{j=1}^p \left(\frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{k=1}^q \left(\frac{t}{T_d} \right)_k \leq D, \quad (1)$$

gdzie:

- D – dopuszczalne uszkodzenie pochodzące od zmęczenia i pełzania,
- n – ilość cykli przy j–tych warunkach obciążenia,
- N_d – liczba dopuszczalnych cykli zmian obciążenia przy j–tych warunkach obciążenia,
- t – czas trwania obciążenia przy k–tych warunkach,
- T_d – dopuszczalny czas trwania obciążenia statycznego przy k–tych warunkach obciążenia.

W zależności (1), stosowanej zarówno przez amerykańskie [1] jak i niemieckie [2] przepisy kotłowe, pierwsza część lewej strony przedstawia udział uszkodzenia pochodzący od zmęczenia cieplnego, druga natomiast udział uszkodzenia wywołany pełzaniem. Schemat czynności przy obliczaniu zapasu trwałości z wykorzystaniem pomierzonych przebiegów czasowych ciśnienia i temperatury w elemencie grubościennym przedstawiono na rys. 2. Znając zmiany amplitudy sumy naprężeń cieplnych i pochodzących od ciśnienia oraz naprężenia statyczne można według wzoru (1) i przepisów kotłowych wyznaczyć uszkodzenie D, a następnie zapas trwałości. Problem wyznaczania zapasu trwałości jest bardzo istotny dla energetyki krajowej, gdyż blisko 1/3 dużych bloków (kotłów) osiągnęła lub przekroczyła założoną przez projektanta trwałość (zwykle 100 tys. godzin). Zagadnienie określania stopnia uszkodzenia elementów ciśnieniowych kotłów i turbin jest w ostatnich latach przedmiotem intensywnych badań [3 – 5]. Podstawowe czynniki, które powinny być uwzględnione w procesie określania trwałości elementów kotłów, przedstawione są na rys. 2. Elementami, które ulegają najczęściej uszkodzeniom, są komory, rurociągi i walczaki. W czasie rozruchu, wyłączania z ruchu i zmian obciążenia kotła w jego grubościennych elementach powstają wysokie naprężenia cieplne. W ostatnich latach opracowano kilka układów automatycznego sterowania rozruchem kotłów, turbin lub też całego bloku energetycznego, tak aby naprężenia w najbardziej obciążonych elementach grubościennych wymienionych urządzeń nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych. Dzięki zastosowaniu takich układów znacznie skraca się czas rozruchu. Straty rozruchowe są mniejsze oraz wydłuża się trwałość elementów bloku.

Istotnym elementem systemów automatycznego sterowania jest układ pomiaru naprężeń cieplnych w najbardziej obciążonych elementach bloku, tzw. elementach krytycznych.

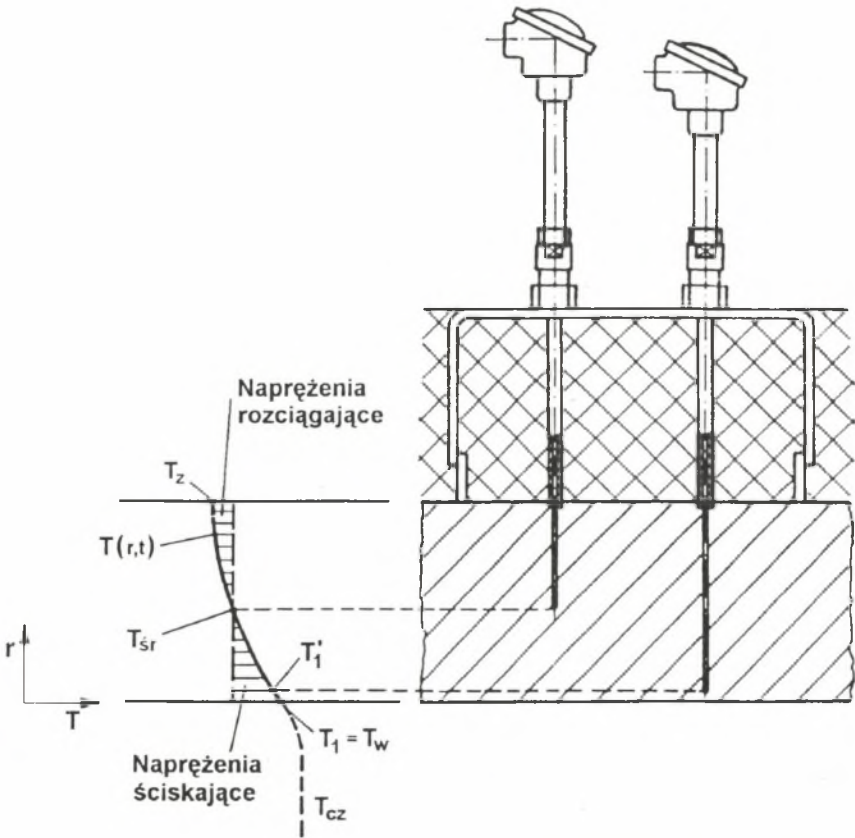


Rys. 2. Komputerowa ocena trwałości resztkowej ciśnieniowych elementów kotła, pracujących w warunkach pełzania

Fig. 2. Automatic remaining life estimation of pressure boiler elements operating under creep conditions

2. OMÓWIENIE OBECNIE STOSOWANYCH METOD KONTROLI NIEUSTALONYCH NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH W ELEMENTACH GRUBOŚCIENNYCH URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH

Ciągły pomiar nieustalonych naprężeń cieplnych przy temperaturach występujących w parowniku kotła lub przegrzewaczach pary jest przy obecnym stanie techniki mało dokładny i w praktyce niestosowany. Dodatkową trudnością, oprócz wysokich temperatur, jest fakt, iż najwyższe co do wartości bezwzględnej naprężenia występują po stronie czynnika roboczego.



Rys. 3. Kontrola naprężeń cieplnych na podstawie pomiaru różnicy temperatur $\Delta T_{sr} = T'_{sr} - T'_1$

Fig. 3. Monitoring of thermal stress based on measurements of temperature difference $\Delta T_{sr} = T'_{sr} - T'_1$

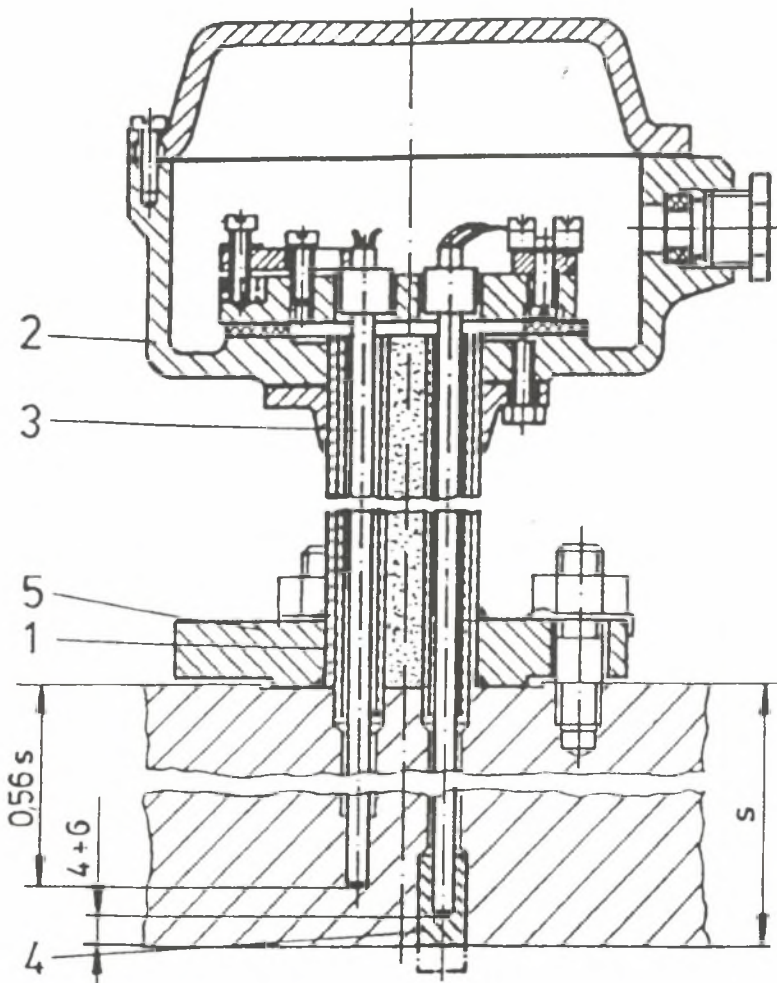
Rozmieszczenie tensometrów na wewnętrznej powierzchni elementu grubościennego sprawia ogromne trudności z uwagi na bardzo wysokie ciśnienia i konieczność wiercenia otworów w ściankach rurociągu dla doprowadzenia przewodów do czujników. Dlatego też pomiar naprężeń cieplnych w elementach grubościennych kotłów i turbin przeprowadza się metodą pośrednią, mierząc różnicę między średnią temperaturą T_{sr} i temperaturą wewnętrznej powierzchni elementu T_w . Typowe układy pomiarowe przedstawiono na rysunkach 3 – 6. Termoelement do pomiaru średniej temperatury elementu cylindrycznego umieszczony jest w środku ścianki, natomiast do pomiaru temperatury $T_w = T_1$ w odległości $e = 4 - 10$ mm od wewnętrznej powierzchni elementu. Tak więc w rzeczywistości nie jest mierzona temperatura $T_w = T_1$, lecz temperatura T_1' (rys. 3). Również temperatura w środku grubości ścianki T_{sr}' nie jest rzeczywistą, średnią temperaturą ścianki obliczoną ze wzoru:

$$T_{sr} = \frac{2}{r_z^2 - r_w^2} \int_{r_w}^{r_z} r T(r, t) dr \quad (2)$$

Przypadek, gdzie $T_{sr} = T_{sr}'$, zachodzi tylko przy liniowym rozkładzie temperatury na grubości ścianki, co w stanach nieustalonych jest rzadkością. W celu usunięcia wymienionych niedokładności w pracach [6, 7] wprowadzono współczynniki korekcyjne, ważne jednak tylko dla quasi-stacjonarnego pola temperatury występującego w ściance po dłuższym czasie nagrzewania jej lub ochładzania ze stałą szybkością. Te same uwagi krytyczne dotyczą mocowania termoelementów umieszczonych w masywnych osłonach. Dodatkową wadą jest zakłócanie pola temperatury w ściance elementu przez osłony. Na rysunku 4 przedstawiono konstrukcję specjalnej sondy do pomiaru różnicy $\Delta T_{sr} = T_{sr}' - T_1$ [8]. W konstrukcji uwidocznionej na rysunku 4 termoelement do pomiaru średniej temperatury ścianki uwidoczniono w odległości 0,56 s od zewnętrznej, izolowanej powierzchni elementu cylindrycznego. Odległość ta odpowiada położeniu średniej temperatury ścianki płaskiej przy istnieniu quasi-stacjonarnego pola temperatury. Wadą sond, oprócz już wymienionych i odnoszących się do rozwiązania przedstawionego na rysunku 3, są dosyć duże zakłócenia pola temperatury wywołane masywną konstrukcją tych sond.

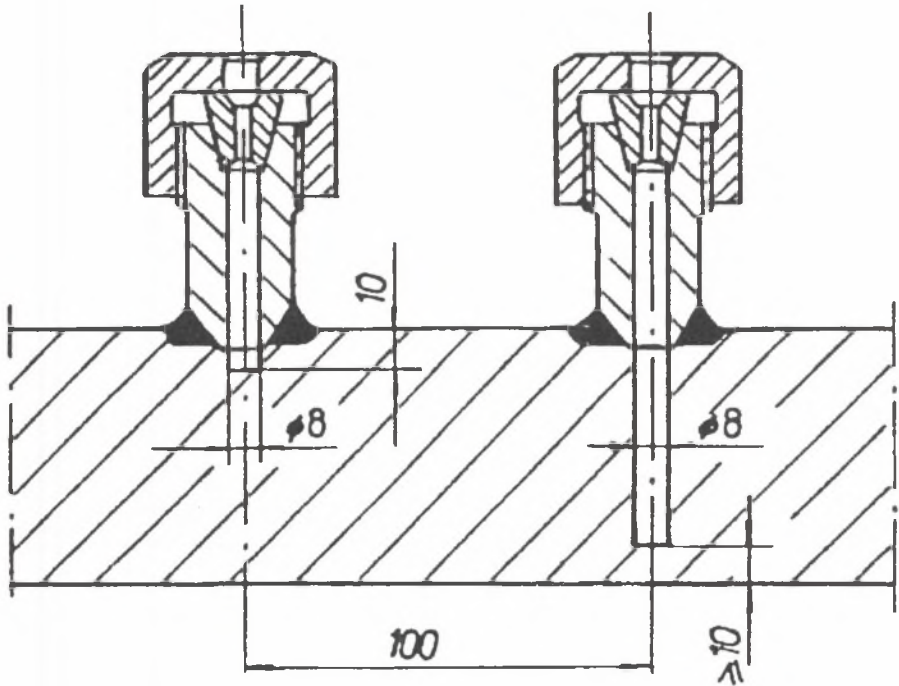
Na rysunku 5 przedstawiono rozwiązanie Raciborskiej Fabryki Kotłów RAFAKO do kontroli różnicy temperatury na grubości ścianki walczaka kotła OP-380. Ponieważ termoelementy umieszczone są w odległości 10 mm od wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni walczaka, rzeczywisty spadek temperatury w ściance w czasie nieustalanej pracy kotła może być znacznie większy od mierzonego.

W USA stosowany jest inny sposób wyznaczania naprężeń w elementach grubościennych [3], rys. 6. Z uwagi na fakt, że przepisy zabraniają wiercenia otworów w ściankach elementów ciśnieniowych, mierzona jest temperatura zewnętrznej powierzchni elementu cylindrycznego na górnej i dolnej tworzą-



Rys. 4. Konstrukcja sondy do kontroli naprężeń cieplnych w korpusach turbin parowych

Fig. 4. Cross section of device for thermal stress monitoring in turbine casing



Rys. 5. Usytuowanie termoelementów do pomiaru różnicy temperatury na grubości ścianki walczaka

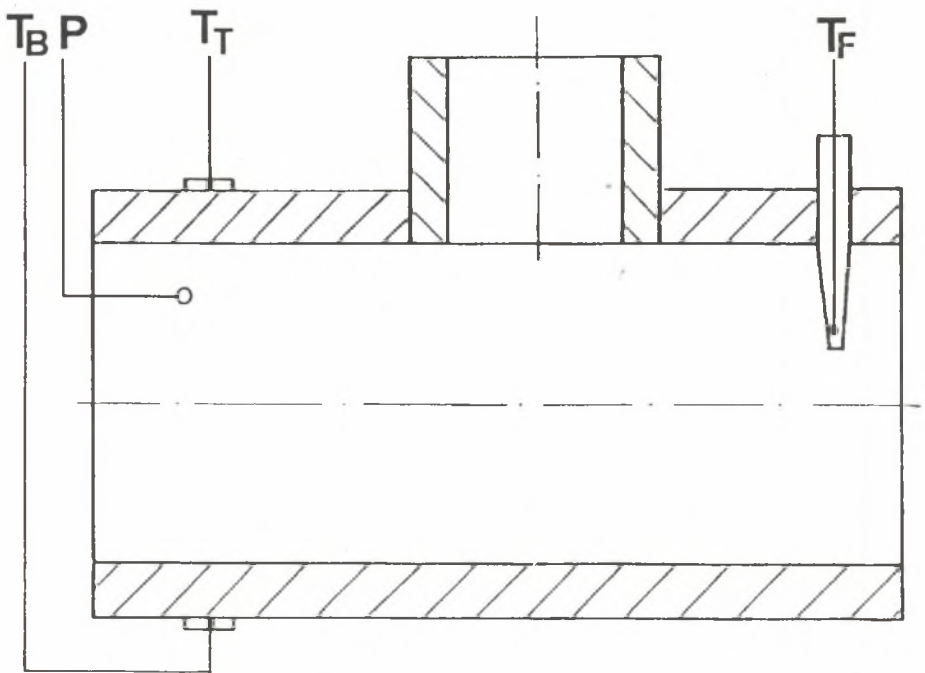
Fig. 5. Positions of thermocouples for measurements of temperature difference across boiler drum wall

cej, tak aby uwzględnić dodatkowe naprężenia pochodzące od różnicy temperatury na obwodzie elementu. Promieniowy rozkład temperatury na grubości ścianki jest przybliżony wielomianem drugiego stopnia

$$T(r, t) = C_1 + C_2 r + C_3 r^2, \quad (3)$$

gdzie: C_1 , C_2 i C_3 są współczynnikami zależnymi od czasu.

W pracy [9] wykazano, że stosując przybliżenie pola temperatury wielomianem (3) otrzymuje się bardzo dobre wyniki przy zmianach temperatury czynnika ze stałą szybkością. Przy szybkich i nieregularnych zmianach temperatury oraz przy występowaniu uderzeń cieplnych wywołanych np. kondensacją



Rys. 6. Usytuowanie punktów pomiaru temperatury do określania naprężeń cieplnych stosowanych w USA; T_B – temperatura dolnej części, T_T – temperatura górnej części, T_F – temperatura cieczy, p – ciśnienie

Fig. 6. Component monitoring points used in the USA for thermal stress determining; T_B – temperature bottom surface, T_T – temperature top surface, T_F – temperature fluid, p – pressure

pary na wewnętrznych powierzchniach elementów lub zalaniem elementu wodą o temperaturze wyższej lub niższej niż temperatura elementu (jak ma to miejsce np. przy napełnianiu walczaka wodą), dokładność aproksymacji wyrażeniem (3) znacznie obniża się.

W pracy [10] proponuje się, aby określić pole temperatury w elemencie grubościennym na podstawie przebiegu temperatury zewnętrznej powierzchni elementu, zmierzonej w kilku punktach. Zakładając, że własności cieplne materiału nie zależą od temperatury, wprowadza się tzw. elementarne czasowe zmiany temperatury czynnika i wyznacza się czasowe zmiany temperatury zewnętrznej powierzchni elementu. Dla odtworzenia rzeczywistego przebiegu zewnętrznej temperatury elementu, stosując zasadę superpozycji oblicza się temperaturę wewnętrzną powierzchni elementu jako ważoną sumę

elementarnych zmian. Nie przedstawiono jednak szczegółów proponowanej metody oraz jej praktycznego zastosowania.

W przypadku przyjęcia założenia o istnieniu quasi-stacjonarnego pola temperatury do określenia naprężeń wystarczy jeden punkt pomiarowy. Jak już jednak wspomniano, quasi-stacjonarne pole temperatury występuje rzadko w praktyce.

W niniejszej pracy do wyznaczania rozkładu temperatury i naprężeń w elementach cylindrycznych na podstawie czasowego przebiegu temperatury mierzonego na powierzchni zewnętrznej zastosowano metodę szeregów potęgowych [11].

3. WYZNACZANIE ROZKŁADU TEMPERATURY I NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH W ELEMENTACH CYLINDRYCZNYCH

Metoda szeregów potęgowych [11] znajduje szerokie zastosowanie w kontroli naprężeń cieplnych na podstawie pomiaru temperatury na zewnętrznej powierzchni elementu konstrukcyjnego. Zaletą metody jest jej beziteracyjny charakter.

Przyjmując, że:

- zewnętrzna powierzchnia elementu cylindrycznego jest izolowana cieplnie,
- przepływ ciepła odbywa się tylko w kierunku promieniowym,
- właściwości termofizyczne materiału elementu są niezależne od miejsca i temperatury,
- znana jest z pomiaru temperatura f_i , $i = 1, \dots, J$ mierzona w równych odstępach czasowych Δt , która aproksymowana zostanie wielomianem

$$y(F_0) = \sum_{n=0}^p c_n t^n = \sum_{n=0}^p \frac{a^n t^n}{r_z^{2n}} c_n \frac{r_z^{2n}}{a^n} = \sum_{n=0}^p \omega_n F_0^n, \quad (4)$$

gdzie:

$$F_0 = \frac{at}{r_z^2}, \quad \omega_n = \frac{c_n r_z^{2n}}{a^n}, \quad p - \text{stopień wielomianu aproksymującego.}$$

Rozkład temperatury w ścianie elementu określony jest funkcją:

$$T(R, F_0) = \sum_{n=0}^p T_n(R) F_0^n, \quad (5)$$

gdzie

$$R = \frac{r}{r_z}.$$

Po podstawieniu (5) do równania nieustalonego przewodzenia ciepła otrzymuje się po przekształceniach równanie różniczkowe zwyczajne, którego rozwiązaniem jest funkcja:

$$T_n(R) = A_n + B_n \ln R + P_n(R) \quad (6)$$

Stałe A_n i B_n występujące we wzorze (6) wyznaczone z warunków:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{R=1} = 0 \quad (7)$$

i

$$T(R_E, Fo) = \sum_{n=0}^p \omega_n Fo^n \quad (8)$$

wynoszą:

$$A_n = \omega_n - B_n \ln R_E - P_n(R_E) \quad (9)$$

i

$$B_n = -P'_n(1), \quad n = p, p-1, \dots, 1, 0,$$

gdzie $R_E = r_E/r_z$.

Jeśli zmierzony na zewnętrznej powierzchni elementu ($R_E = 1$) przebieg temperatury przybliżyć wielomianem trzeciego stopnia ($p = 3$), to wyrażenie (5) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} T(R, Fo) = & \sum_{n=0}^3 \omega_n Fo^n - \frac{1}{4} \sum_{n=1}^3 n \omega_n Fo^{n-1} \cdot (1 - R^2 + 2 \ln R) - \\ & - \frac{1}{64} \sum_{n=2}^3 n(n-1) \omega_n Fo^{n-2} \cdot [5 - 4R^2 - R^4 + 4(1 + 2R^2) \ln R] - \\ & - \frac{\omega_3}{384} [10 + 9R^2 - 18R^4 - R^6 + 6(1 + 6R^2 + 3R^4) \ln R] \quad (10) \end{aligned}$$

Znając rozkład temperatury (10) można wyznaczyć osiowe naprężenia cieplne na wewnętrznej powierzchni:

$$\begin{aligned} \sigma_T = \sigma_{T,z}(k, Fo) &= \frac{E\beta}{1-\nu} (T_{sr} - T|_{r=r_w}) = \frac{E\beta}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{8} \sum_{n=1}^3 n \omega_n Fo^{n-1} \left(3 - k^2 + \frac{4lnk}{1-k^2} \right) + \right. \\ &+ \frac{1}{32} \sum_{n=2}^3 n(n-1) \omega_n Fo^{n-2} \left[\frac{1}{3} (8 - k^2 - k^4) + \frac{2lnk}{1-k^2} (1 + 2k^2 - k^4) \right] + \\ &\left. + \frac{\omega_3}{384} \left[\frac{1}{4} (41 + 65k^2 - 43k^4 - 3k^6) + \frac{6lnk}{1-k^2} (1 + 6k^2 - 2k^6) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

gdzie: $k = r_w/r_z$, $Fo = at/r_z^2$.

Temperaturę średnią T_{sr} wyznaczono ze wzoru (2) z uwzględnieniem (10). Jeżeli szybkość nagrzewania elementu jest stała, to

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dFo} &= \omega_1 = \frac{v_T r_z^2}{a}, \\ \omega_2 &= \omega_3 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Uwzględniając (12) w (11) otrzymuje się:

$$\sigma_T = \frac{E\beta}{1-\nu} \frac{v_T r_z^2}{a} \frac{1}{8} \left(3 - k^2 + \frac{4lnk}{1-k^2} \right), \quad (13)$$

a więc wzór stosowany w przepisach TRD [2], ważny dla stanu quasi-stacjonarnego.

4. APROKSYMACJA ZMIERZONEGO PRZEBIEGU TEMPERATURY

Na wyznaczany rozkład temperatury i naprężeń w ściance elementu bardzo duży wpływ mają przypadkowe błędy pomiaru. W celu ich wyeliminowania zmierzony przebieg temperatury przybliżono wielomianem trzeciego stopnia ($p = 3$). Z uwagi na złożony charakter zmian mierzonej temperatury w czasie zastosowano aproksymację lokalną wielomianem ortogonalnym Grama, prowadzącą do następujących wzorów, określających filtr cyfrowy siedmiopunktowy (rys. 7).

$$\omega_0 = y_3(0) = \frac{1}{21}(-2f_{-3} + 3f_{-2} + 6f_{-1} + 7f_0 + 6f_1 + 3f_2 - 2f_3),$$

$$\omega_1 = \left. \frac{dy}{dFo} \right|_{Fo=0} = \frac{1}{252\Delta Fo} (22f_{-3} - 67f_{-2} - 58f_{-1} + 58f_1 + 67f_2 - 22f_3), \tag{14}$$

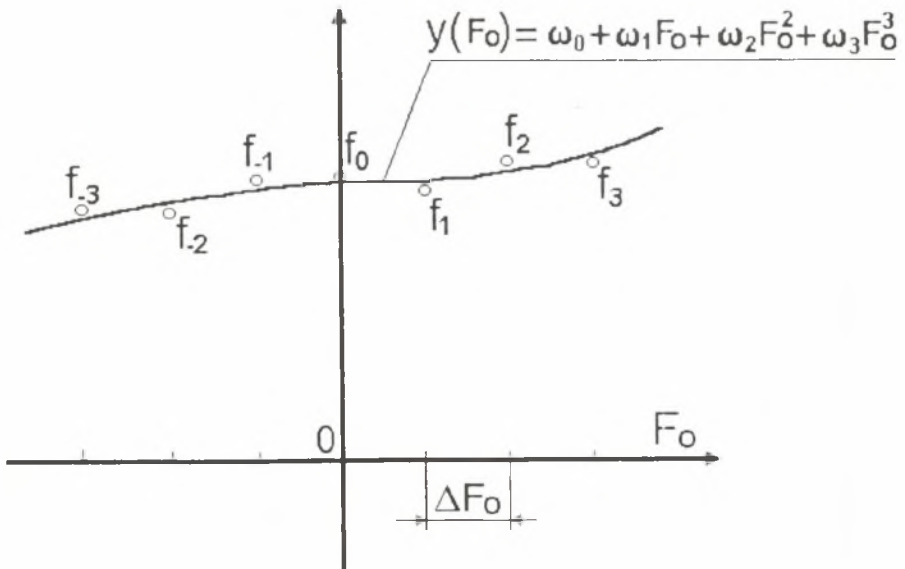
$$\omega_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{d^2y}{dFo^2} \right|_{Fo=0} = \frac{1}{84(\Delta Fo)^2} (5f_{-3} - 3f_{-1} - 4f_0 - 3f_1 + 5f_3),$$

$$\omega_3 = \left. \frac{1}{6} \frac{d^3y}{dFo^3} \right|_{Fo=0} = \frac{1}{36(\Delta Fo)^3} (-f_{-3} + f_{-2} + f_{-1} - f_1 - f_2 + f_3),$$

gdzie $\Delta Fo = \frac{a\Delta t}{r_z^2}$.

Podobne zależności można wyprowadzić dla pozostałych $2L = 6$ punktów.

Wartość wielomianu aproksymującego i jego pochodnych obliczono tylko w punkcie centralnym $Fo = 0$ (rys. 7), gdyż dokładność określenia wymienionych



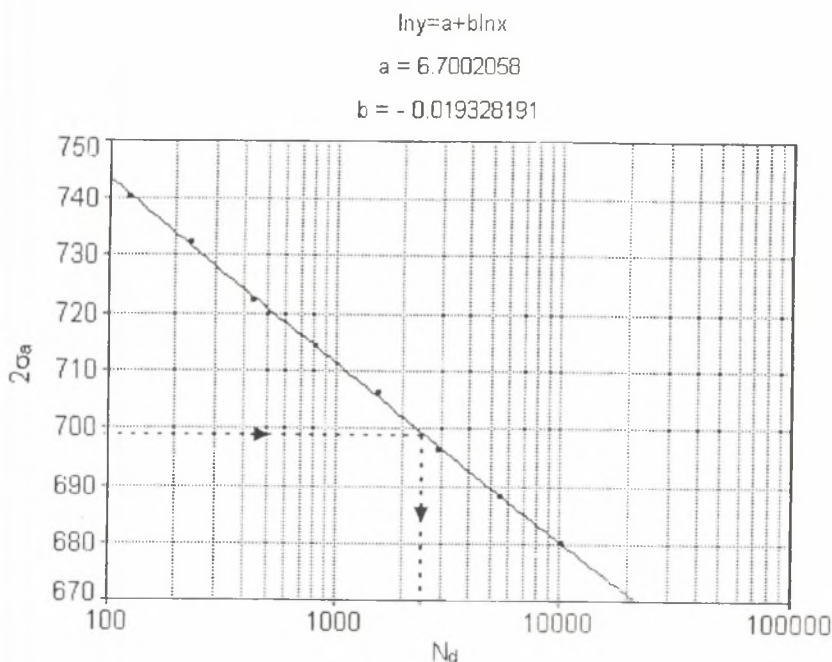
Rys. 7. Wygładzanie zmierzonego przebiegu temperatury za pomocą siedmiopunktowego filtra cyfrowego

Fig. 7. Smoothing of the temperature data using seven-point moving average filter

funkcji jest największa w środku przedziału. Do aproksymacji wykorzystuje się siedem punktów pomiarowych. Po obliczeniu funkcji i jej pochodnych w punkcie centralnym cały analizowany przedział czasowy $6\Delta F_0$ przesuwa się o jeden krok ΔF_0 do przodu, odrzucając pierwszy punkt przedziału i dołączając nowy punkt pomiarowy na końcu przedziału. Opisany sposób wygładzania zmierzonego przebiegu temperatury jest bardzo efektywny, a jednocześnie nadaje się do zastosowania w trybie on-line, gdyż obliczanie pola temperatury i naprężeń w elemencie ciśnieniowym kotła jest opóźnione tylko o $3\Delta F_0$ w odniesieniu do chwili pomiaru temperatury ścianki.

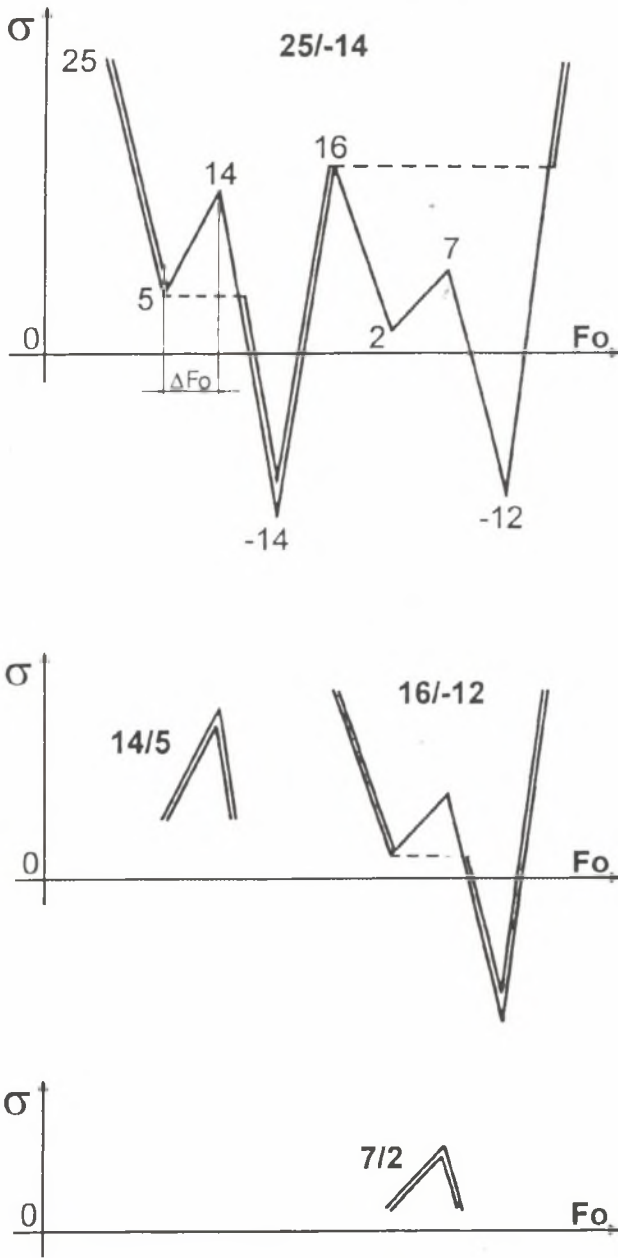
5. OBLICZANIE STOPNIA ZUŻYCIA ELEMENTU W WYNIKU ZMĘCZENIA MAŁOCYKLICZNEGO

W wyniku szybkiego nagrzewania i ochładzania elementów ciśnieniowych kotłów i turbin w miejscach naprężeń, np. na brzegach otworów, powstają odkształcenia plastyczne oraz po dłuższym czasie eksploatacji pęknięcia zmę-



Rys. 8. Wyniki badań zmęczeniowych stali 15HM w temperaturze 550°C

Fig. 8. Fatigue curve for 15HM mild steel at 550°C



Rys. 9. Zliczenie liczby cykli metodą spadającego deszczu

Fig. 9. Rainflow fatigue cycle counting procedure

zeniowe. Znając różnicę między maksymalnym i minimalnym naprężeniem $2\sigma_a$ w czasie jednego cyklu można z wykresu zmęczeniowego (rys. 8) [12] wyznaczyć liczbę cykli, przy której następuje zniszczenie elementu.

Krzywe zmęczeniowe dla stali ferrytycznych zawarte są w niemieckich przepisach kotłowych TRD [2]. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych w Instytucie Badań Jądrowych dla stali 15HM w temperaturze 550°C . W celu określenia stopnia uszkodzenia elementu w wyniku zmęczenia małowyciskowego niezbędne jest zliczanie liczby cykli zmian naprężeń cieplnych. Należy przy tym uwzględnić nie tylko główny cykl: rozruch–wyłączenie z ruchu ale również mniejsze cykle, wynikające z chwilowych zmian temperatury czynnika i ciśnienia. Sposobem zliczania cykli, dających wyniki zbliżone do rzeczywistości, jest metoda spadającego deszczu „Rainflow Method”. Na rysunku 9 zaznaczono również maksymalną i minimalną wartość naprężenia w cyklu. Opracowano odpowiednie programy obliczania dopuszczalnej liczby cykli N_d , zliczania liczby cykli za pomocą „Rainflow Method” oraz stopnia uszkodzenia elementu od zmęczenia cieplnego.

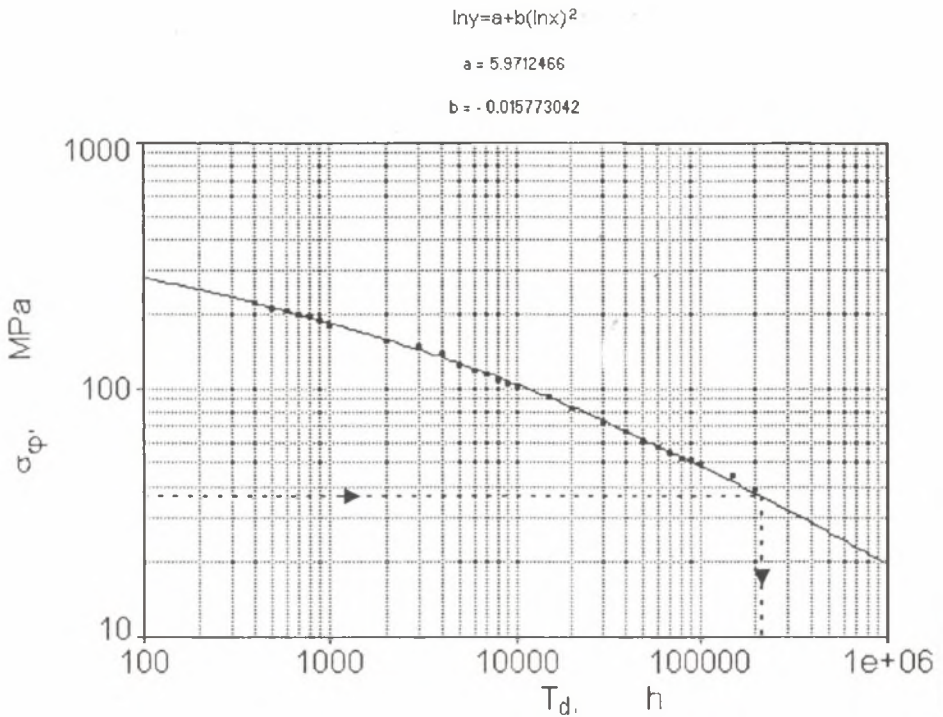
6. OBLICZANIE STOPNIA ZUŻYCIA ELEMENTU W WYNIKU PEŁZANIA

Dla elementów ciśnieniowych kotła, pracujących powyżej temperatury ok. 400°C , należy uwzględnić również zjawisko pełzania. W przypadku elementów o prostych kształtach, jak np. rurociągi, czas do zniszczenia elementu T_d można wyznaczyć korzystając z wykresu wytrzymałości na pełzanie, otrzymanego dla danej temperatury. Przykład wyznaczania czasu T_d dla elementu ze stali 15HM, pracującego w temperaturze 550°C , przedstawiono na rys. 10.

Na osi rzędnych odkłada się wartość naprężenia obwodowego $\sigma_{\phi} = \frac{P \cdot d_{sr}}{2g}$, wyznaczając następnie czas do zniszczenia T_d . Przy ustalaniu tego czasu należy uwzględnić również fakt, że temperatura pracy elementu może się zmieniać w czasie jego eksploatacji. Łączne uszkodzenie elementu w wyniku pełzania i zmęczenia cieplnego wyznacza się ze wzoru (1).

7. UKŁAD DO AUTOMATYCZNEGO WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH

Do wyznaczania zarówno naprężeń cieplnych, jak i trwałości resztkowej elementów konstrukcyjnych kotłów zgodnie z opisaną metodyką zbudowano komputerowy układ pracujący w czasie rzeczywistym. Danymi wyjściowymi jest temperatura zewnętrznej powierzchni oraz ciśnienie wewnątrz elementu w funkcji czasu. Układ składa się z czujników temperatury, ciśnienia, komputerowego układu akwizycji danych oraz komputera klasy PC. Funkcjono-



Rys. 10. Obliczanie czasu T_d do zniszczenia elementu cylindrycznego w wyniku pełzania

Fig. 10. Creep life prediction for cylindrical element

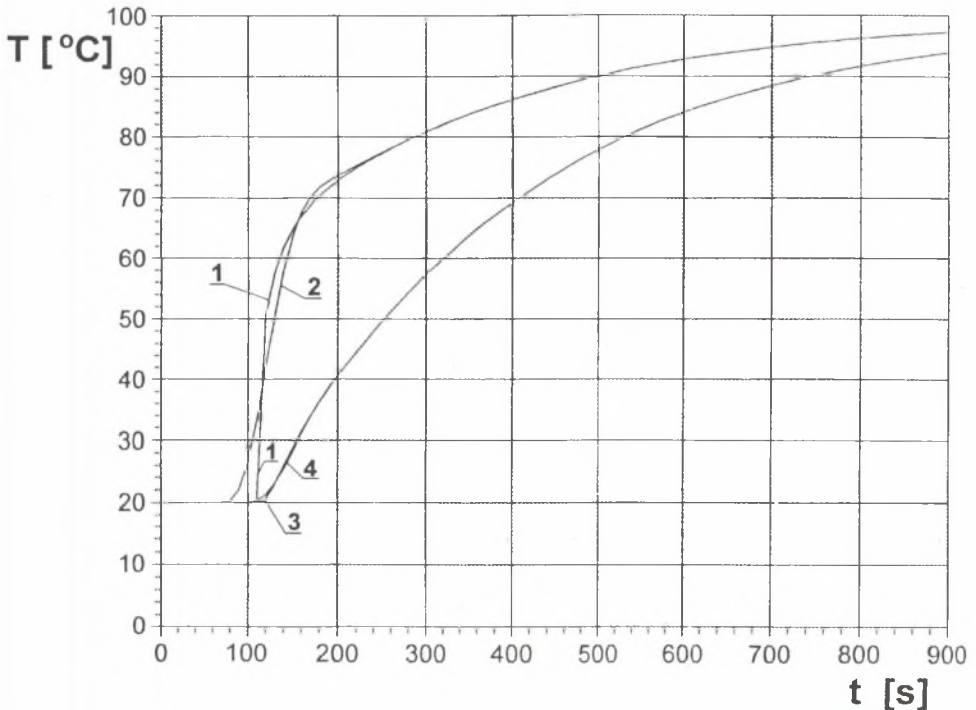
wanie układu zostało zweryfikowane doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych, a obecnie trwają prace nad jego wdrożeniem w energetyce.

8. PRZYKŁADY LICZBOWE

Z uwagi na fakt, że najtrudniejszą procedurą jest wyznaczenie naprężeń cieplnych, przedstawiony zostanie przykład ilustrujący wyznaczanie tych naprężeń w czasie szoku cieplnego, zachodzącego na wewnętrznej powierzchni komory wylotowej ze stali X20CrMoV 12.1. Komorę o wymiarach $r_w = 0,15$ m i $r_z = 0,2003$ m nagrzewano przy skokowym wzroście temperatury czynnika od temperatury początkowej 20°C do końcowej 100°C , przy współczynniku wnikania ciepła równym 1500 W/m²K. „Dane pomiarowe” wygenerowano obliczając temperaturę zewnętrznej powierzchni rury metodą numeryczną. Do obliczeń przyjęto następujące dane: $a = 5,072 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $\lambda = 25,64$ W/mK,

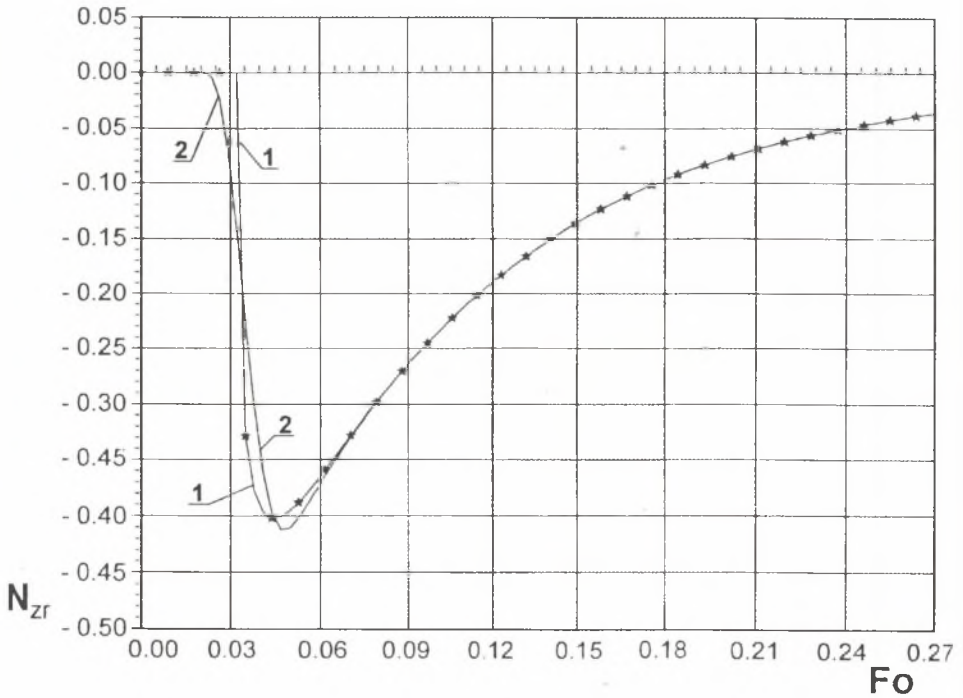
$E = 165 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, $\nu = 0,3$, $\beta = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Przyjęto, że pomiary temperatury zewnętrznej powierzchni komory przeprowadzano co 10 sekund. Wyniki obliczeń przebiegu temperatury w środku i na wewnętrznej powierzchni ścianki oraz naprężeń bezwymiarowych $N_{zr} = \frac{(1-\nu)\sigma_T}{E\beta(T_{cz} - T_p)}$ na wewnętrznej powierzchni komory przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Z analizy rysunków 11 i 12 wynika, że dokładność wyznaczania rozkładu temperatury w ściance jak i na wewnętrznej powierzchni jest bardzo dobra. Jest to tym bardziej godne podkreślenia, że analizowano szok cieplny zach-



Rys. 11. Przebieg temperatury komory cylindrycznej wyznaczony na podstawie pomiaru temperatury na zewnętrznej powierzchni komory; 1, 3 – temperatury obliczone metodą numeryczną odpowiednio na wewnętrznej powierzchni i w jej środku (rozwiązania wzorcowe), 2, 4 – odpowiednio temperatura wewnętrznej powierzchni i środka ścianki komory wyznaczone na podstawie temperatury mierzonej na powierzchni zewnętrznej

Fig. 11. Temperature of cylindrical header determined from the temperature measurements taken at outside, insulated surface of the header; 1, 3 – temperature from direct solution at inside surface and in the middle of cylinder wall, respectively; 2, 4 – temperature from inverse solution at inside surface and in the middle of cylinder wall, respectively



Rys. 12. Przebieg naprężeń cieplnych na wewnętrznej powierzchni komory cylindrycznej wyznaczony na podstawie pomiaru temperatury na jej zewnętrznej powierzchni; 1 – naprężenia wzorcowe obliczone numerycznie, 2 – naprężenia wyznaczone na podstawie temperatury mierzonej na powierzchni zewnętrznej

Fig. 12. Axial thermal stress of cylindrical header determined from temperature measurements taken at outside, insulated surface; 1 – direct solution using method of straight lines, 2 – stress estimated from temperature measurement at outside surface (inverse solution)

dzący na wewnętrznej powierzchni rury. Szybkie zmiany temperatury zachodzące na wewnętrznej powierzchni elementu odtwarzane są więc na podstawie wytlumionych i opóźnionych zmian temperatury powierzchni zewnętrznej. W warunkach rzeczywistych dokładność odwzorowania pola temperatury i naprężeń będzie jeszcze wyższa, gdyż zmiany temperatury czynnika są wolniejsze.

9. UWAGI KOŃCOWE

W referacie przedstawiono efektywną metodę wyznaczania rozkładu temperatury i naprężeń cieplnych w grubościennych elementach kotłów na podstawie pomiaru temperatury zewnętrznej powierzchni elementu. Opisano również sposób komputerowej oceny stopnia zużycia elementów konstrukcyjnych, pracujących w warunkach zmęczenia cieplnego oraz pełzania. Scharakteryzowano również układ komputerowy, umożliwiający kontrolę naprężeń cieplnych i ocenę stopnia zużycia elementów ciśnieniowych kotła.

LITERATURA

- [1] ASTM Standard E 1049-85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. American Society for Testing and Materials, approved February 22, 1985, published Jun 1985.
- [2] TRD 301 Anlage 1: Technische Regeln für Dampfkessel: Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwelenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck- und Temperaturänderungen. Ausgabe 1986. Carl Heymans Verlag, Köln, und Beuth-Verlag, Berlin.
- [3] Davidson M. J., Jones T. J., Rosard D. D., Scheibel J. R.: Monitoring for life extension, Transaction of the Asme, Journal of Pressure Vessel Technology Vol. 107, August 1985, 255-259.
- [4] Stevens G. L., Ranganath S.: Use of on-line fatigue monitoring of nuclear reactor components as a tool for plant life extension, Transaction of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 113, August 1991, 349-357.
- [5] Liu K. M.: Laufendee Überwachung der Standzeit von Dampfturbinenläufern, VGB Kraftwerkstechnik 1988, Heft 7, 704-709.
- [6] Leithner R., Pich R., Erlman K., Steege F., Trung Chi.: Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der Temperaturdifferenz in dickwandigen Bauteilen für die Lebensdauerberechnung, VGB Fachtagung „Dampfkessel und Dampfkesselbetrieb“ am 7.09.1989 in Essen.
- [7] Pich R., Erlman K.: Automatische Überwachung der rechnerischen Lebensdauererschöpfung druckführender Bauteile, VGB Kraftwerkstechnik 63, 1983, Heft 6, 537-544.
- [8] Kießling G.: Eine Sonde zur Erfassung der Temperaturverteilung in dickwandigen Bauteilen (Wandtemperatursonde), Energietechnik, Vol. 26, 1976, Heft 7, 291-295.
- [9] Taler J.: Dynamisches Verhalten dickwandiger Dampferzeugerbauteile, Brennstoff-Wärme-Kraft, Vol. 38, 1986, Nr. 1/2, 20-25.

- [10] Miksch M.: Betriebsbegleitende Erfassung der Werkstoffermüdung von Komponenten eines Kernkraftwerkes, Siemens Forschung und Entwicklung-Berichte, Vol. 17, 1988 Nr. 4, 165–171.
- [11] Mikhailov M. D., Özisik M. N.: Unified analysis and solutions of heat and mass diffusion. John Wiley and Sons, New York 1984.
- [12] Wasiak J. i inni: Nowe materiały i ich technologie. CPBR 2.4, 1980–90, Politechnika Warszawska.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerard KOSMAN

Wpłynęło do Redakcji 10.08.1994 r.

Abstract

Automatic, continuous monitoring of power plant transients and keeping track of the cumulative creep-fatigue usage for major critical components in fossil power plant is described. On-line monitoring of creep-fatigue usage is performed using a microcomputer. Since the data monitoring and analysis is done on a real time basis, the software, by definition, not involve time consuming extensive computation. The data acquisition system records and stores component temperatures and system pressures. The system utilizes padded thermocouples welded to the outside of the component wall. The inside fluid temperature is measured by utilizing existing thermowells. The pressures are measured directly when possible or calculated based on known pressures. Thermal stress are calculated based on temperature measurements at the stress-rupture time at a given stress level. In order to calculate fatigue damage, an accurate assessment of the number, magnitude, and temperature of stress cycles is performed using the rainflow method. The linear theory by Palmgren and Miner is used to determine total creep-fatigue damage.