

## **BADANIE ZMĘCZENIA CIEPLNO-MECHANICZNEGO W UJĘCIU OBOWIĄZUJĄCYCH NORM I JEGO KOMPUTEROWE MODELOWANIE**

**Jerzy P. OKRAJNI\***

\*Katedra Mechaniki Materiałów, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

[Jerzy.Okrajni@polsl.pl](mailto:Jerzy.Okrajni@polsl.pl)

**Streszczenie:** Celem pracy jest opis procesu pęknięcia elementów pracujących w przemyśle energetycznym poddanych oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym, których skutkiem jest zmęczenie cieplno-mechaniczne materiału w wybranych obszarach na powierzchni rozpatrywanych elementów. Poddano analizie lokalny proces odkształcania na powierzchni elementu przy użyciu MES. Wyznaczono zmienne w czasie pola naprężeń i odkształceń w urządzeniu podczas gwałtownego cyklicznego schładzania przy nieustalonych warunkach pracy. Analiza jest częścią złożonych metod badań, których głównym celem jest polepszenie dokładności opisu procesu zmęczenia cieplno-mechanicznego instalacji pracujących w energetyce oraz zastosowanie wyników badań materiałowych do oceny stanu technicznego i trwałości urządzeń.

### **1. WPROWADZENIE**

Energetyka jest jedną z gałęzi przemysłu, w których postęp w ostatnim okresie jest szczególnie intensywny, a zmiany zachodzące w zakresie metod projektowania urządzeń energetycznych mają swoje implikacje ekologiczne oraz wynikają z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa pracy tak nowych instalacji jak i tych po wieloletnim okresie użytkowania. Metody stosowane przez konstruktorów obiektów energetycznych modyfikowane są wraz z wprowadzaniem nowych materiałów i rozwojem dostępnych baz własności materiałowych. Coraz bardziej powszechne staje się przekonanie, że wytrzymałość elementów urządzeń energetycznych jest ich cechą aktualną, zmienną w czasie i zależną od historii użytkowania. Powstające bazy danych materiałowych oraz nowe metody obliczeniowe stwarzają możliwości oceny takiej aktualnej wytrzymałości. Pojawia się równocześnie potrzeba opracowania procedur i metod oceny stanu czy też trwałości resztkowej obiektów po wielu latach użytkowania przy znanej historii obciążenia oraz zmiennych w czasie właściwościach. Tego typu procedury określane są w języku angielskim słowem *assessment*, jak na przykład metody omówione w pracy I. J. Perrina i J. D. Fishburna (2005), dotyczącej metodyki projektowania i oceny wytrzymałości urządzeń energetycznych.

Wprowadzenie nowych sposobów konstruowania i badania obiektów pociąga za sobą zmiany, jakie zachodzą w normach. Zmiany te jednak przebiegają powoli, co uzasadnione jest w głównej mierze względami bezpieczeństwa oraz koniecznością praktycznej weryfikacji nowych metod i zasad. Do chwili obecnej najczęściej stosowano i stosuje się w dalszym ciągu klasyczne podejście nazywane „projektowaniem według reguł” (*design by rules*), w którym cechy konstrukcyjne elementów instalacji energetycznych

wyznaczane są na podstawie ogólnie przyjętych zależności ujętych w odpowiednich normach. Nowe podejście do zagadnienia projektowania opiera się na analizie zachowania się konstrukcji w określonych warunkach użytkowania (*design by analysis*). Stosowane są najczęściej w tym wypadku komputerowe metody symulacji działania złożonych systemów technicznych, w których uwzględnia się również możliwe zmiany ich cech materiałowych oraz procesy powstawania i rozwoju pęknięć. W ocenie aktualnego stanu urządzeń eksploatowanych wykorzystuje się więc w głównej mierze metody z zakresu analizy zachowania się układów przy oszacowanych charakterystykach materiałowych i wielkościach przewidywanych oddziaływań.

W opracowaniu skoncentrowano się na wybranym zagadnieniu z zakresu oceny wytrzymałości i trwałości elementów urządzeń energetycznych – na procesie zmęczenia cieplno-mechanicznego. Problematyka projektowania i oceny stanu technicznego oraz wytrzymałości elementów poddanych oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym, w których zachodzą procesy zmęczenia, omówiona zostanie na przykładzie grupy obiektów, którymi są grubocienne elementy ciśnieniowe kotłów.

Obecnie w Polsce obowiązuje norma, PN-EN 12952 (2000), na podstawie której oceniana jest między innymi trwałość urządzeń energetycznych. Norma ta złożona jest z 16 związanych ze sobą części, spośród których część trzecia – PN-EN 12952-3 dotyczy zasad obliczeń konstrukcyjnych, natomiast część czwarta – PN-EN 12952-4 poświęcona jest metodom oceny trwałości. Norma PN-EN 12952-4 zawiera w rozdziale A omówienie sposobu wyznaczenia uszkodzeń spowodowanych pełzaniem, natomiast jej rozdział B dotyczy zmęczenia. W normie zestawiono zależności matematyczne i przedstawiono sposób ich wykorzystania bez omówienia podstaw teoretycznych oraz interpretacji ujętych normą równań i metod postępowania.

Za koniecznością nowego spojrzenia na metody oceny właściwości materiałów oraz związane z nimi metody projektowania przemawiają stale rosnące wymagania odnośnie podwyższenia parametrów eksploatacji urządzeń, jakimi są w między innymi budowane obecnie w Polsce kotły o parametrach nadkrytycznych. Materiały stosowane w tych urządzeniach powinny wykazywać wyższe własności wytrzymałościowe podczas pracy w podwyższonej temperaturze, jak również wyższą odporność korozyjną od materiałów stosowanych w urządzeniach konwencjonalnych. Rozpatrując ich cechy wytrzymałościowe najczęściej bierze się w tym wypadku pod uwagę konieczność podwyższenia wytrzymałości na pełzanie przy uwzględnieniu wielu aspektów technologicznych wynikających ze zmian składu chemicznego, technologii przeróbki plastycznej, obróbki cieplnej oraz spawania. Rozwiązanie problemu zapewnienia właściwej wytrzymałości na pełzanie materiału nie gwarantuje jednak trwałości wykonanych z niego elementów. Wynika to z wielu przyczyn, w tym z faktu, że większość elementów bloku energetycznego poddana jest oddziaływaniu temperatury zmiennej w czasie, co powoduje występowanie w materiale procesów o charakterze zmęczeniowym. Procesy te z kolei mogą prowadzić do powstawania i rozwoju pęknięć.

Rozwój pęknięć w warunkach oddziaływania podwyższonej temperatury ma odmienny charakter od zjawisk opisywanych w ujęciu klasycznej mechaniki pęknięcia. W podwyższonej temperaturze istotny udział mają procesy reologiczne zachodzące w otoczeniu wierzchołka szczeliny oraz w części czynnej przekroju elementu. W chwili obecnej zjawiska rozwoju pęknięć w warunkach pełzania coraz częściej uwzględniane są w procedurach oceny trwałości elementów pracujących w podwyższonych temperaturach. Opisano je między innymi w normie BS 7910 (1994), w opracowaniach firmy Nuclear Electric Ltd. (1997), w sprawozdaniu z projektu FITNET (2001) oraz w książce G.A. Webstera i R.A. Ainswortha (1994). Ten sposób podejścia do obliczeń wytrzymałościowych nie dotyczy jednak większości obiektów konstruowanych i eksploatowanych w Polsce. Zastosowanie wymienionych procedur umożliwi zmniejszenie stopnia konserwatywności w ocenie wytrzymałości poprzez uwzględnienie możliwości występowania pęknięć w rozpatrywanych obiektach i zastosowanie metod prognozowania ich rozwoju. W dalszym ciągu problemem, którego nie uwzględniają procedury jest generowanie pęknięć w warunkach współoddziaływania zmiennej w czasie temperatury i związanych z nią naprężeń cieplnych.

Wynika stąd, że ocena trwałości w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego jest ciągle aktualnym i nie rozwiązany problemem. Inny jest bowiem charakter procesów zmęczeniowych wywołanych oddziaływaniem zmiennej w czasie temperatury oraz związanych z nią zmiennych równocześnie naprężeń cieplnych w porównaniu z klasycznym zmęczeniem w warunkach izotermicznych. Równoczesny wpływ temperatury na charakterystyki materiałowe oraz zmienne w czasie pola naprężeń powoduje, że porównywanie zmęczenia w warunkach izotermicznych w podwyższonej temperaturze ze zmęczeniem cieplno-mechanicznym jest niedoskonałym przybliżeniem,

co w niedostatecznym stopniu uwzględnia się w analizie wytrzymałości i trwałości elementów urządzeń energetycznych. Wraz ze wzrostem parametrów eksploatacji tych urządzeń problematyka zmęczenia cieplno-mechanicznego nabiera jednak coraz większego znaczenia. Wynika to w głównej mierze z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa ich użytkowania.

## 2. ZMĘCZENIE CIEPLNO-MECHANICZNE W KRYTERIACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH W UJĘCIU NORMY EN 12952

Używane powszechnie normy do projektowania elementów urządzeń energetycznych poddanych oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym opierają się na własnościach wyznaczonych w próbach pełzania. Dotyczy to zarówno podstawowych norm stosowanych przez konstruktorów w projektowaniu „*design by rules*” jak i procedur nie posiadających rangi normy, jak procedura R5, stosowana w metodach „*design by analysis*”, w których bierze się pod uwagę obecność pęknięć w elementach urządzeń i opisuje ich rozwój w warunkach pełzania. W przypadku konieczności uwzględnienia zjawisk zmęczenia normy i procedury opierają się na charakterystykach zmęczeniowych wyznaczonych w stałych temperaturach. Metody obliczeń naprężeń i odkształceń w warunkach zmęczenia cieplno-mechanicznego opierają się na wielu uproszczeniach, stąd też wynikają trudności w przypadku konieczności ich zastosowania w zagadnieniach analizy i optymalizacji cech konstrukcyjnych elementów.

Zależności, na podstawie których projektowane są elementy urządzeń energetycznych poddanych zmęczeniu cieplno-mechanicznemu wynikają, zgodnie z normą EN 12952-3, z sumowania naprężeń wyznaczonych dla naczyń cienkościennych obciążonych ciśnieniem wewnętrznym oraz naprężeń cieplnych oszacowanych na podstawie uproszczonych zależności. Naprężenia w normie liczone są dla naczyń z otworami prostopadłymi do ich ścianek. Przyjmuje się nietypowe dla naprężeń oznaczenia. Naprężenia główne w punkcie zaznaczonym na Rys. 1 na brzegu otworu w zbiorniku ciśnieniowym oznacza się jako  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ . Naprężenia te są równe:

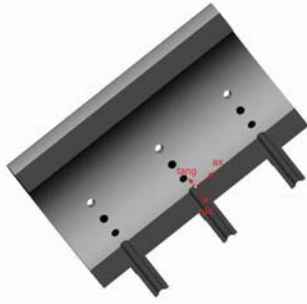
$$f_1 = f_{\tan g} = f_{\tan g, p} + f_{\tan g, t} \quad (1)$$

$$f_2 = f_{rad} = -p \quad (2)$$

$$f_3 = f_{ax} = -p \quad (3)$$

$f_1$  jest naprężeniem stycznym do korpusu podstawowego i stycznym do otworu, powodowanym ciśnieniem i różnicą temperatur w ściance,  $f_2$  jest naprężeniem promieniowym w odniesieniu do korpusu podstawowego, kompensującym ciśnienie płynu na wewnętrznej powierzchni otworu w korpusie podstawowym,  $f_3$  jest naprężeniem osiowym w odniesieniu do korpusu podstawowego, kompensującym ciśnienie płynu na zewnętrznej powierzchni otworu lub rozgałęzienia.

Na Rys. 1 oznaczono kierunki naprężeń w wybranym punkcie na brzegu otworu w powłoce walcowej.



Rys. 1. Oznaczenia kierunków naprężeń występujących we wzorach (1) – (3)

Różnice naprężeń głównych, z których największa co do modułu jest naprężeniem zastępczym zgodnie z hipotezą największego naprężenia stycznego, wyrażają się wzorami:

$$\Delta f_{12} = f_{\tan g} + p \quad (4)$$

$$\Delta f_{23} = 0 \quad (5)$$

$$\Delta f_{31} = -(f_{\tan g} + p) \quad (6)$$

Jeśli rozpatrywana jest praca kotła przy zmieniającym się ciśnieniu i temperaturze, wywołujących naprężenia na krawędzi otworu o maksymalnej wartości  $\Delta \hat{f}_{12}$  i minimalnej  $\Delta \check{f}_{12}$ , wprowadzane jest następujące wyrażenie określające zakres naprężeń:

$$2f_v = \Delta f_v = \Delta \hat{f}_{12} - \Delta \check{f}_{12} \quad (7)$$

W tym przypadku odejmowane są od siebie różnice naprężeń  $\Delta \hat{f}_{12}$  lub  $\Delta \check{f}_{12}$ , które należałoby rozumieć jako naprężenie maksymalne i minimalne wyznaczone zgodnie z hipotezą największego naprężenia stycznego. Wielkość  $\Delta$  w wyrażeniu  $\Delta f_v$  (7) oznacza różnicę w czasie. Natomiast  $\Delta$  w wyrażeniach  $\Delta \hat{f}_{12}$  i  $\Delta \check{f}_{12}$  oznacza odejmowanie wartości naprężeń głównych. Zakres naprężeń  $2f_v = \Delta f_v$  występujący we wzorze (7) jest największym spośród trzech zakresów:

$$2f_v = \max \left\{ \begin{array}{l} \Delta \hat{f}_{12} - \Delta \check{f}_{12}, \\ \Delta \hat{f}_{23} - \Delta \check{f}_{23}, \\ \Delta \hat{f}_{31} - \Delta \check{f}_{31} \end{array} \right\} \quad (8)$$

Zakresowi  $2f_v$  z równania (7) odpowiada naprężenie średnie:

$$\bar{f}_v = \frac{1}{2} (\Delta \hat{f}_{12} + \Delta \check{f}_{12}) \quad (9)$$

Norma, z uwagi na użycie w obliczeniach uproszczonych zależności, przewiduje stosowanie odpowiednich współczynników koncentracji naprężeń  $\alpha_m$  lub  $\alpha_{sp}$ . Współczynniki te nie muszą być stosowane w przypadku użycia metody elementów skończonych.

Jak można zauważyć podstawową wielkością, którą posługuje się norma jest różnica naprężeń głównych  $f_1$  i  $f_2$

rozumiana jako wielkość naprężenia zastępczego w wybranym punkcie na krawędzi otworu.

Obliczanie dopuszczalnego zakresu naprężeń, które odbywa się na podstawie załącznika B[2] – EN 12952-3:2001, jak również określanie własności fizycznych materiału na podstawie załącznika D powinno opierać się na temperaturze  $t^*$  wyznaczanej dla cyklu obciążenia:

$$t^* = 0,75 \times t_{\max} + 0,25 \times t_{\min} \quad (10)$$

gdzie  $t_{\max}$  jest temperaturą metalu w chwili, gdy dominuje największe naprężenie w cyklu obciążenia, a  $t_{\min}$  jest temperaturą metalu w chwili, gdy występuje najmniejsze naprężenie.

W częściach ciśnieniowych kotłów, które zawierają wodę lub mieszaninę wody i pary w warunkach pracy, w celu ochrony przed pękaniem warstwy występującego na ich powierzchni magnetytu wprowadza się ograniczenia dla wartości naprężeń:

$$f_{\tan g} \leq f_{\tan g, p_0} + 200 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$f_{\tan g} \geq f_{\tan g, p_0} - 600 \text{ MPa} \quad (12)$$

Wprowadzone we wzorach (11) i (12) wartości 200 MPa i –600 MPa wynikają z konieczności zabezpieczenia się przed możliwością pęknięcia przy rozciąganiu i ściskaniu warstwy tlenków żelaza tworzącej się w takich warunkach na powierzchni metalu posiadającej kontakt z wodą. Cykl zmęczeniowych oddziaływań musi mieścić się w zakresie zdefiniowanym równaniami (11) i (12). Zakłada się przy tym, że warstwa magnetytu powstaje w warunkach roboczych przy temperaturze  $t_0$  i ciśnieniu  $p_0$  i w tych warunkach nie występują w niej naprężenia. Po odstawieniu kotła z ruchu w warstwie magnetytu występować będą naprężenia ściskające.

Zakres naprężenia określony za pomocą równania (7) porównywany jest z zakresem dopuszczalnym  $2f_{va}$ .

$$\Delta f_v = 2f_{va} \quad (13)$$

Dopuszczalny zakres naprężenia w cyklu zmiennych obciążeń  $-2f_{va}$  powinien być zakresem zmian intensywności naprężeń wyznaczonych zgodnie z hipotezą największego naprężenia stycznego, co wynika z przedstawionych wcześniej zależności (4) – (8).

Można w ten sposób wyznaczyć na przykład dopuszczalny zakres naprężeń obwodowych na krawędzi wewnętrznej otworu, powstających w wyniku zmiennych obciążeń w zakresie ciśnienia od  $p_{\min}$  do  $p_{\max}$ . Zakres ten powinien wynosić:

$$\Delta f_{\tan g} = 2f_{va} - (p_{\max} - p_{\min}) \quad (14)$$

Sposób wyznaczania wartości naprężeń dopuszczalnych został w normie szczegółowo opisany z uwzględnieniem wpływu stanu powierzchni, rodzaju cyklu zmęczeniowego oraz temperatury pracy rozpatrywanego elementu.

Naprężenia obwodowe na powierzchni wewnętrznej otworu mogą być w ogólnym przypadku spowodowane ciśnieniem wewnętrznym oraz nierównomiernym polem temperatury. Dla elementów – powłok walcowych naprężenia te wyznaczone są zgodnie z zależnością:

$$f_{\text{tang}} = \alpha_m \cdot p \cdot \frac{d_m}{2 \cdot e_{ms}} + \alpha_t \frac{\beta_{Lt^*} \cdot E_{t^*}}{1 - \nu} \cdot (t_m - t_i), \quad (15)$$

gdzie

$$f_{\text{tang}, p} = \alpha_m \cdot p \cdot \frac{d_m}{2 \cdot e_{ms}} \quad (16)$$

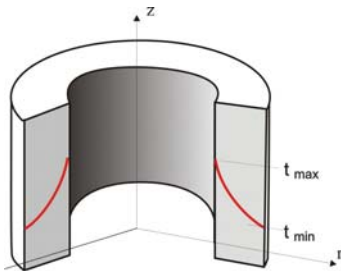
jest naprężeniem obwodowym, którego wielkość wynika z ciśnienia wewnętrznego w danym elemencie, natomiast naprężenie cieplne związane jest z różnicą temperatury pomiędzy powierzchnią wewnętrzną i zewnętrzną danego elementu (Rys. 2) i liczone jest zgodnie z zależnością:

$$f_{\text{tang}, t} = \alpha_t \frac{\beta_{Lt^*} \cdot E_{t^*}}{1 - \nu} \cdot (t_m - t_i) \quad (17)$$

W przypadku powłok kulistych wzór (16) przyjmuje postać:

$$f_{\text{tang}, p} = \alpha_{sp} \cdot p \cdot \frac{d_m}{4 \cdot e_{ms}} \quad (18)$$

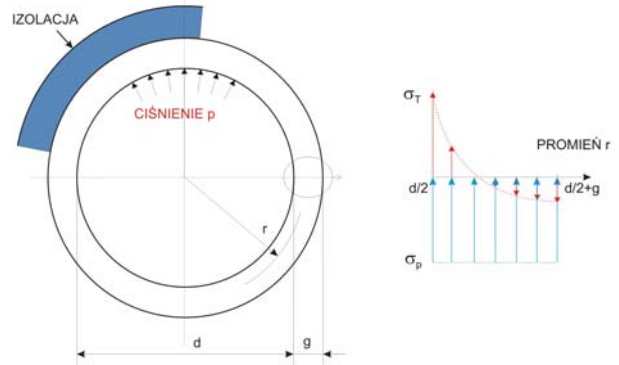
We wzorze (15) poszczególne litery oznaczają:  $p$  – ciśnienie nominalne,  $d_m$  – średnia wartość średnicy elementu,  $e_{ms}$  – obliczeniowa grubość ścianki,  $\alpha_m$ ,  $\alpha_t$ ,  $\alpha_{sp}$  – współczynniki koncentracji naprężeń,  $\beta_{Lt^*}$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej w temperaturze  $t^*$ ,  $t_m$  – średnia chwilowa temperatura na przekroju elementu,  $t_i$  – chwilowa temperatura powierzchni wewnętrznej  $E_{t^*}$  – moduł sprężystości w temperaturze  $t^*$ .



**Rys. 2.** Przykładowy rozkład temperatury w elemencie rurowym w warunkach nagrzewania powierzchni wewnętrznej

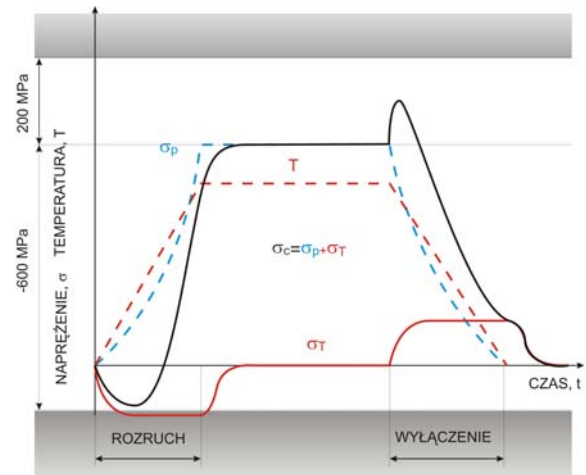
Współczynniki koncentracji naprężeń podane są w normie EN 12952-3:2001 w postaci nomogramów w zależności od wymiarów dla określonych rodzajów połączeń króćców z powłokami walcowymi i kulistymi. Różnice temperatur ( $t_m - t_i$ ) oblicza się na podstawie dopuszczalnych prędkości zmian temperatury definiowanych dla danego bloku energetycznego dla warunków jego rozruchu oraz wyłączenia.

Na Rys. 3 przedstawiono w sposób schematyczny rozkłady naprężeń na przekroju elementu rurowego opracowany na podstawie publikacji Fontaina i Golopina (2007). W dowolnej chwili czasu naprężenia w zakresie sprężystym są sumą naprężeń spowodowanych obciążeniem mechanicznym, którym jest ciśnienie oraz cieplnym wynikającym z nierównomiernego pola temperatury (Rys. 3)



**Rys. 3.** Przekrój elementu rurowego wraz ze schematem rozkładów naprężeń spowodowanych ciśnieniem wewnętrznym i naprężeń cieplnych – na podstawie publikacji Fontaina i Golopina (2007)

Naprężenia spowodowane ciśnieniem posiadają stałe ten sam znak. Zmienia się natomiast znak naprężeń cieplnych w przypadku rozruchu i wyłączenia bloku energetycznego (Rys. 4).

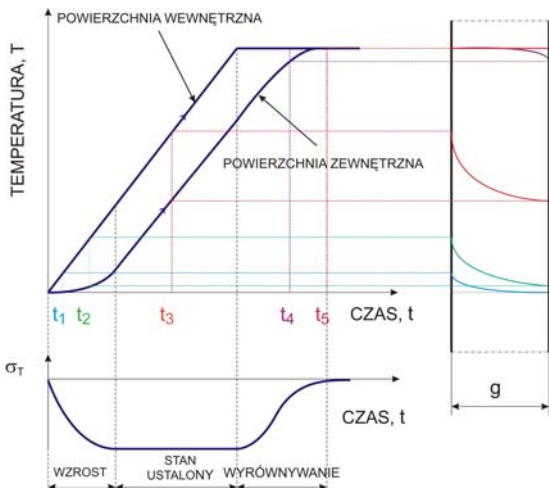


**Rys. 4.** Wpływ zmian temperatury w cyklu pracy bloku energetycznego na wartość maksymalnego i minimalnego naprężenia w cyklu obciążeń zgodnie z normą EN 12952 na podstawie publikacji Fontaina i Golopina (2007).

Na Rys. 5 przedstawiono zmiany temperatury w czasie na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej naczynia podczas nagrzewania. Pokazano również rozkłady temperatury w poszczególnych chwilach czasu.

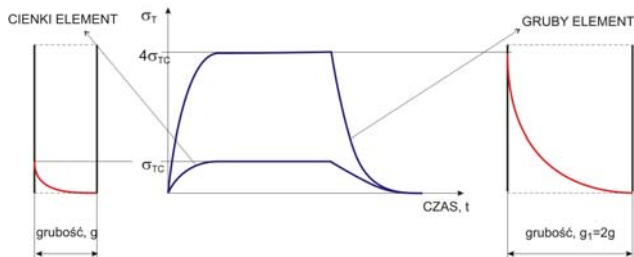
Podczas nagrzewania można wyróżnić:

- okres wzrostu zróżnicowania temperatury na przekroju naczynia („*building of temperature field*”);
- okres, w którym gradienty temperatury pozostają stałe, natomiast rosną jej wartości – okres stacjonarnego rozkładu temperatury („*temperature sliding*”);
- okres wyrównywania temperatury na przekroju, podczas przechodzenia do ustalonych warunków pracy bloku energetycznego („*temperature gradient vanishing*”).



Rys. 5. Wykresy zmian temperatury w czasie na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej naczynia ciśnieniowego podczas nagrzewania oraz rozkłady temperatury w poszczególnych chwilach czasu (Fontanie i Golopin, 2007)

Tak więc naprężenia cieplne rozpatrywane są w elementach urządzeń energetycznych zgodnie z normą EN 12952 jedynie w stanach nieustalonych podczas rozruchu i wyłączenia bloku energetycznego. Wielkość tych naprężeń zależy od cech geometrycznych elementów oraz własności fizycznych materiałów. Można uzasadnić, że wielkość naprężeń cieplnych spowodowanych nierównomiernym rozkładem temperatury w okresie nagrzewania i chłodzenia jest w przybliżeniu proporcjonalna do kwadratu grubości naczyń ciśnieniowych poddanych oddziaływaniu nierównomiernego rozkładu temperatury, które stanowią elementy instalacji energetycznych (Rys. 6).



Rys. 6. Wykresy zmian w czasie naprężeń cieplnych na powierzchni wewnętrznej naczyń o różnej grubości ścianek (Fontanie i Golopin, 2007)

Z przebiegu wykresów przedstawionych na Rys. 6 wynika wniosek istotny dla praktyki przemysłowej, odnośnie korzyści związanych ze stosowania w energetyce stali o wyższej wytrzymałości na pełzanie. Zastosowanie takich materiałów umożliwi zmniejszenie grubości ścianek rozpatrywanych elementów, co z kolei prowadzi do istotnego zmniejszenia wielkości naprężeń cieplnych. W ogólnym przypadku dla elementów urządzeń energetycznych istnieje zatem dodatnie sprzężenie pomiędzy wytrzymałością na pełzanie oraz wielkością naprężeń cieplnych.

Zmienne w czasie naprężenia wyznaczone od obciążeń zewnętrznym polem siłowym oraz nierównomiernego pola temperatury wykorzystuje się zarówno w wytrzymałościowych obliczeniach sprawdzających jak i w procedurach

oceny trwałości. Jako pierwszy rozpatrzony zostanie przypadek obliczeń wytrzymałościowych.

## 2.1. Obliczenia z uwagi na dopuszczalny zakres naprężeń

Po obliczeniu  $2f_{va}$  wprowadza się współczynniki korekcyjne uwzględniające wpływ karbów (mikrokarbów), w połączeniu ze strukturą powierzchni i złączy spawanych. W każdym przypadku decyduje końcowy stan powierzchni, osiągnięty po procesie wytwarzania. Oblicza się na tej podstawie skorygowany zakres naprężenia:

$$2f_{va}^* = 2f_{va} \times C_k \quad (19)$$

Odpowiadająca temu zakresowi wartość skorygowanego średniego naprężenia cyklu wynosi:

$$2\bar{f}_v^* = 2\bar{f}_v \times C_k \quad (20)$$

Współczynnik korekcyjny  $C_k$  określany jest na podstawie prób zmęczeniowych lub przyjmuje się jego wartości oznaczone w normie przez:  $C_{k0}, C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}$ . Dla powierzchni gładkich przyjmowany jest współczynnik  $C_{k0}$ , dla którego norma podaje odpowiedni wzór oraz przedstawia nomogram. Współczynniki  $C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}$  zależą od rodzaju złączy spawanych, które zestawiono w tablicach, a wartości współczynników ujęto za pomocą nomogramów w zależności od liczby cykli  $N_A$  do powstania początkowego pęknięcia.

W tej części normy wprowadza się pojęcie „miarodajnego zakresu naprężeń”  $2f_a^*$ . Sposób wyznaczania miarodajnego zakresu zależy od tego, czy odkształcanie w warunkach zmęczenia przebiega w obszarze odkształceń sprężystych, sprężysto-plastycznych czy też odkształceń plastycznych. W normie podane są odpowiednie kryteria dla każdego z tych przypadków, wynikające z porównania charakterystyk cyklu naprężeń z granicą plastyczności w temperaturze odniesienia.

### 2.1.1. Przypadek zmęczenia w zakresie sprężystym

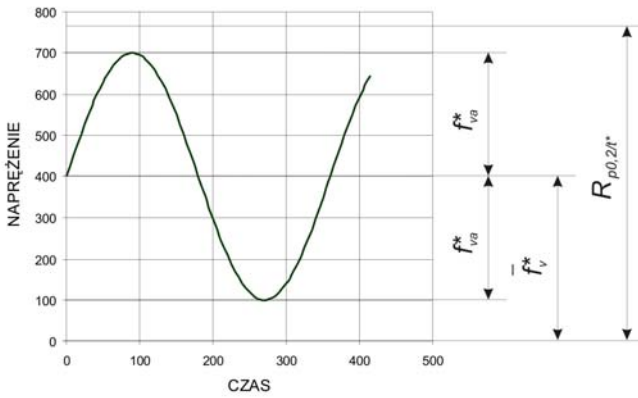
Przypadek taki ma miejsce, jeżeli spełniony jest warunek:

$$\left| \bar{f}_v^* \right| + \frac{2f_{va}^*}{2} \leq R_{p0,2/t^*} \quad (21)$$

Wartości naprężeń występujących w zależności (21) przedstawiono na Rys. 7 w powiązaniu z przebiegiem przykładowego cyklu zmiennych naprężeń.

Miarodajny zakres naprężeń w cyklu  $2f_a^*$  określa się z wykorzystaniem skorygowanego zakresu naprężeń zastępczych  $2f_{va}^*$  i skorygowanej wartości średniej  $\bar{f}_v^*$  wykorzystując równanie (22)

$$2f_a^* = \frac{2f_{va}^*}{1 - \left( \frac{\bar{f}_v^*}{R_m} \right)^2} \quad (22)$$



**Rys. 7.** Wykres z zaznaczonymi wielkościami charakteryzującymi cykl naprężeń dla przypadku zmęczenia w zakresie sprężystym

Równanie (22) wynika ze znanego wzoru Gärbera, ujmującego wpływ wartości naprężenia średniego na w wytrzymałość zmęczeniową. Zastosowanie takiego ujęcia jest konieczne, ponieważ wykresy zmęczeniowe, którymi posługuje się norma dotyczą wahadłowego cyklu naprężeń. Powstaje zatem problem wyznaczenia dopuszczalnego zakresu naprężeń dla innych przypadków zmiennych w czasie oddziaływań.

**2.1.2. Zakres częściowo plastyczny**

W tym przypadku naprężenia maksymalne  $f_v^*$  w cyklu zmiennych oddziaływań przekraczają granicę plastyczności w temperaturze odniesienia  $-R_{p0,2/t^*}$ , co oznacza, że:

$$|\bar{f}_v^*| + \frac{2f_{va}^*}{2} > R_{p0,2/t^*}$$

dla

$$f_v^* = C_k \times \max(|\Delta f_{23}|, |\Delta f_{12}|, |\Delta f_{31}|), \tag{23}$$

lecz

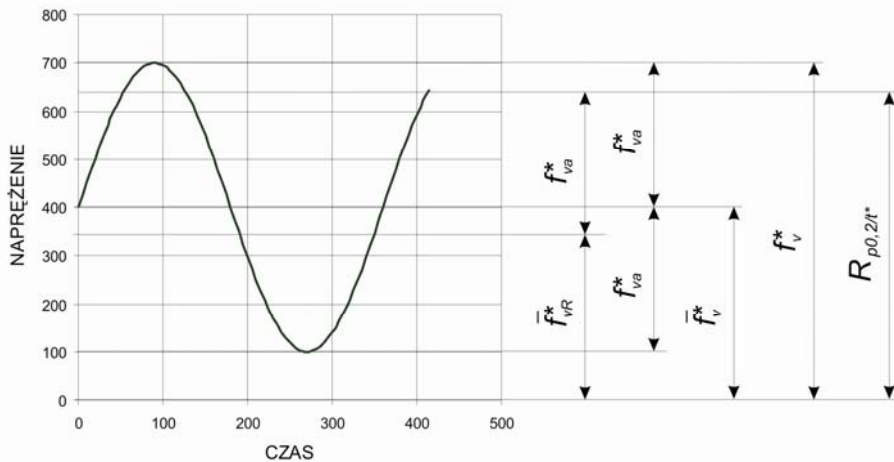
$$\frac{2f_{va}^*}{2} \leq R_{p0,2/t^*} \tag{24}$$

Wówczas do obliczania zakresu miarodajnych naprężeń należy zastosować, jak i w poprzednim przypadku, wzór (22).

We wzorze tym podstawia się jednak skorygowaną wartość naprężenia średniego:

$$\bar{f}_{vR}^* = R_{p0,2/t^*} - \frac{2f_{va}^*}{2} \tag{25}$$

Wpływ średniej wartości naprężenia zależy od jego amplitudy odniesionej do granicy plastyczności. Dla wartości zakresu naprężenia  $2f_{va}^*$  bliskiej dwukrotnej granicy plastyczności wpływ wartości średniej zgodnie z normą jest pomijalnie mały.



**Rys. 8.** Wykres z zaznaczonymi wielkościami charakteryzującymi cykl naprężeń dla przypadku zmęczenia w zakresie częściowo plastycznym

**2.1.3. Zakres plastyczny**

Jeśli skorygowany zakres naprężeń w cyklu  $2f_{va}^*$  przekracza dwukrotną wartość granicy plastyczności:

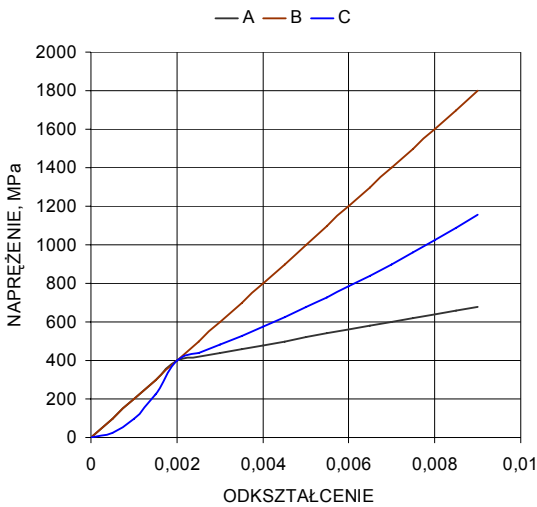
$$2f_{va}^* > 2R_{p0,2/t^*} \tag{26}$$

wówczas naprężenie średnie powinno być przyjęte jako  $\bar{f}_v^* = 0$ . Zakres miarodajnych naprężeń  $2f_a^*$  wyznacza się w tym przypadku w zależności od granicy plastyczności za pomocą równania:

$$2f_a^* = \frac{(2f_{va}^*)^2}{2R_{p0,2/t^*}} \tag{27}$$

Jak podaje norma, wzoru (27) nie powinno się stosować w przypadku, gdy zakres naprężenia określono jako naprężenie wirtualne z całkowitego odkształcenia  $-2\varepsilon_{atot}$ , uwzględniającego odkształcenie sprężyste i plastyczne za pomocą teoretycznej lub eksperymentalnej analizy naprężeń z zależności  $2f_a^* = 2\varepsilon_{atot}$ .

Ten sposób podejścia uzasadniony jest relacją pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonymi z zależności (27) oraz na podstawie oszacowania jako  $2f_a^* = 2E\varepsilon_{atot}$ . Oszacowanie to ma charakter konserwatywny i daje zawyżone wartości zakresu naprężenia  $2f_a^*$  (Rys. 9).



Rys. 9. Naprężenie w funkcji odkształcenia: A – prawo Hooke’a, B –  $f_a^* = E\varepsilon_{atot}$ , C – zależność (30) (dla  $E = 200000$  MPa,  $R_{q0,2/t^*} = 400$  MPa,  $n = 4000$  MPa)

### 2.2. Współczynnik korekcyjny

Dla temperatury odniesienia  $t^* \geq 100^\circ\text{C}$  uwzględnia się zmniejszenie zakresu naprężeń spowodowanego temperaturą poprzez współczynnik korygujący  $C_{t^*}$ . W procedurze określania dopuszczalnego zakresu naprężeń dla zadanej liczby cykli wprowadza się pojęcie „wirtualnego miarodajnego zakresu naprężenia”:

$$2f_{at^*}^* = \frac{2f_a^*}{C_{t^*}} \quad (28)$$

Wartości współczynnika  $C_{t^*}$  podano w normie w postaci wzorów oraz w formie nomogramów dla stali ferrytycznych i austenitycznych.

### 2.3. Dopuszczalny zakres naprężeń

Dopuszczalny zakres naprężeń dla danej liczby cykli obciążeń wymaga dodatkowo wprowadzenia współczynników bezpieczeństwa dla naprężeń  $S_s = 1,5$  oraz dla liczby cykli obciążeń  $S_L = 10$ . W załączniku B do normy EN 12952-3 podano zależności matematyczne, z których można obliczyć wartość  $f_a$  dla danej liczby cykli obciążeń.

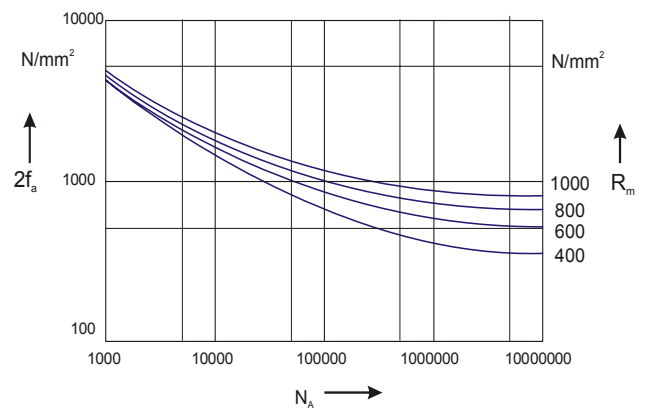
Dopuszczalny zakres naprężeń wyznacza się ze wzoru:

$$2f_{at^*}^* \leq \min \left\{ \frac{2f_{as}}{S_s}, 2f_{al} \right\} \quad (29)$$

w którym występuje:

- zakres naprężenia  $2f_{as}$ , wyznaczony dla danej projektowanej liczby cykli  $N_A = N$ , podzielony przez współczynnik bezpieczeństwa dla naprężeń;
- oraz zakres naprężenia  $2f_{al}$  wyznaczony dla projektowanej liczby cykli  $N$  pomnożonej przez współczynnik bezpieczeństwa dla liczby cykli obciążeń –  $N_A = S_L N$ .

Na Rys. 10 przedstawiono wykresy zmęczeniowe, które stanowią podstawę dla wyznaczenia dopuszczalnej wartości zakresu naprężenia. Wykresy te różnicują zmęczeniowe własności materiału, które należy wziąć pod uwagę w obliczeniach wytrzymałościowych z uwagi na kryterium trwałości, w zależności od wartości wytrzymałości na rozciąganie. Korzystając z tych wykresów można dla założonej wartości  $N_A$  wyznaczyć  $2f_a$  a następnie  $2f_{as}$  i  $2f_{al}$ .



Rys. 10. Wykresy zmęczeniowe zilustrowane na podstawie normy EN 12952-3

### 3. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA W UJĘCIU NORMY EN 12952-4

Jeśli przedmiotem rozważań jest stopień uszkodzenia w wyniku zmęczenia, wówczas stosuje się normę EN 12952-4, która zawiera opis sposobu identyfikacji cykli obciążeń opierający się na metodzie „range pair” przedstawionej w pracy N. E. Dowlinga (1973). Może być również stosowany, oparty na tej metodzie, sposób zliczania cykli „rain-flow-load”. Ekstrema naprężeń oznaczane są w tej części normy literą  $x_i$ .

Zidentyfikowane cykle obciążeń powinny być zliczane w klasy o amplitudzie naprężeń  $2f_{va}$  w temperaturze odniesienia  $t^*$ .

$$2f_{va} = |x_2 - x_3| \quad (30)$$

Podczas obliczania zakresu naprężenia za pomocą metody elementów skończonych nie jest konieczne uwzględnianie współczynnika wpływu karbu  $C_k$  i wówczas  $2f_{va}^* = 2f_{va}$ .

Temperatura odniesienia dla cyklu obciążenia, jak wynika z równania (8), powinna być obliczana z zależności:

$$t^* = 0,75 \max [t(x_2), t(x_3)] + 0,25 \min [t(x_2), t(x_3)] \quad (31)$$

Norma zawiera szczegółową procedurę obliczania wymienionych wielkości wraz z przykładami jej użycia.

Uszkodzenie spowodowane zmęczeniem obliczone dla każdej z klas cykli obciążenia wyraża się zależnością:

$$\Delta D_{Fik} = \frac{n_{ik}}{N_{ik}} \quad (32)$$

gdzie:  $n_{ik}$  jest zliczoną liczbą cykli obciążeń w klasie  $i$ ,  $k$ ,  $N_{ik}$  jest dopuszczalną liczbą cykli obciążeń w klasie  $i$ ,  $k$ .

Całkowite uszkodzenie spowodowane zmęczeniem liczy się z zależności:

$$D_F = D_{FRSE} + \sum_i \sum_k \Delta D_{Fik} \quad (33)$$

gdzie  $D_{FRSE}$  oznacza uszkodzenie spowodowane opisanym w normie ciągiem  $RSE$ .

Tak obliczone uszkodzenie sumuje się następnie z uszkodzeniem spowodowanym pełzaniem. Obliczona suma powinna być mniejsza od jedności. Norma nie uwzględnia w tym wypadku współczynników bezpieczeństwa, które zawarte są w konserwatywnym mierzonym jak i obliczanych wielkości. Pod tym względem różni się od stosowanych wcześniej powszechnie procedur TRD, w których przyjmowano dopuszczalną wielkość zużycia równą 0,5.

#### 4. BADANIA CHARAKTERYSTYK OBCIĄŻEŃ OBIEKTU

Trzeba jednak mieć na uwadze, że przedstawiony sposób wyznaczania naprężeń, jest wprawdzie zgodny z normami, nie uwzględnia jednak wielu możliwych stanów, które pojawiają się podczas pracy bloku energetycznego. Dotyczy to w szczególności gwałtownych zmian temperatury wynikających z procesu sterowania zarówno w warunkach rozruchu i wyłączenia jak i korygowania parametrów pracy bloku. Konieczność lokalnego wprowadzania medium chłodzącego podczas pracy instalacji energetycznych powoduje gwałtowne, lokalne chłodzenie wywołane parowaniem wody. Dotyczy to w szczególności elementów znajdujących się w pobliżu tak zwanych schładzaczy wtryskowych, jak na przykład komory przegrzewaczy. Niekiedy również podczas pracy instalacji występują efekty nagłego schładzania spowodowane odparowaniem skraplającej się pary wodnej. Cykliczny charakter pracy schładzaczy jest powodem występowania dużych, powstających i zanikających, gradientów temperatury na powierzchni rozpatrywanych elementów. Częstość zmian obciążeń cieplnych oraz szybkość zmian temperatury jest w takich przypadkach kilkadziesiąt lub nawet kilkaset razy większa od częstości rozruchów i odstawiń bloków. Efekt ten spowodowany jest oddziaływaniem wody zraszającej powierzchnię wewnętrzną komór przegrzewaczy – „spray-water effect” i został opisany między innymi w pracy Adamsa i innych (2007). Jego wpływ na obciążenia cieplne jest w chwili obecnej przedmiotem dyskusji w środowisku inżynierów energetyków, zwłaszcza w odniesieniu do tych przypadków, w których bloki energetyczne pracują w systemie cyklicznym, w którym częstość rozruchów i odstawiń jest znacznie większa w odniesieniu do warunków pracy bloków konwencjonalnych. Zróżnicowanie temperatury na

przekroju elementów grubościennych bloku spowodowane jest również działaniem systemu sterującego temperaturą na drodze pomiędzy kotłem i turbiną. Przyjęcie w takim przypadku do obliczeń założonej przez projektanta średniej szybkości zmian temperatury pary w warunkach rozruchu, jak proponuje norma, nie zapewnia możliwości dokładnego określenia wartości naprężeń cieplnych w elementach krytycznych instalacji. Dokładniej naprężenia dla poszczególnych chwil czasu można wyznaczyć opierając się na wynikach pomiarów lokalnych zmian temperatury lub w oparciu o obliczenia jej rozkładów przy założeniu odpowiednich warunków brzegowych.

#### 5. MODELOWANIE PROCESU ZMĘCZENIA CIEPLNO-MECHANICZNEGO

Jednym z wielu elementów bloku energetycznego, w których zachodzą procesy zmęczenia cieplno-mechanicznego w sposób szczególnie intensywny są elementy układu przegrzewaczy pary. Należą do nich tak zwane komory w postaci rur grubościennych łączących poszczególne stopnie przegrzewaczy. Do komór – kolektorów rur wężownic doprowadzana jest para układem rur „dolotowych” i odprowadzana z nich za pomocą układu rur „wylotowych”. Układy rur o mniejszej średnicy przyspawane są do rur grubościennych za pomocą odpowiednich króćców. Fragment jednej z komór przegrzewaczy stosowanych w polskich elektrowniach pokazano na Rys. 11. Rysunek ten przedstawia model geometryczny rury grubościennej wraz z króćcami i układem wewnętrznych otworów, przez które przepływa para wodna. Model zbudowany został przy użyciu programu Alibre Design, którego opis można znaleźć na stronie internetowej <http://www.alibre.com/>. Model do obliczeń przygotowano przy użyciu programu MES Algor Opis programu wraz z wieloma przykładami przedstawiono w książkach Spyrakosa (1994, 1997). Program użyto do obliczeń zmiennych w czasie pól temperatury, naprężeń i odkształceń.

Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń rozkładów naprężeń i odkształceń założono biorąc pod uwagę pomiary temperatury wykonane podczas eksploatacji oraz symetrię obiektu. Warunki w postaci ograniczenia swobody przemieszczeń w odpowiednich kierunkach wynikają między innymi z symetrii obiektu i założono je podobnie jak we wcześniejszych opracowaniach Mutwila i Cieśli (2007) oraz Okrajniego i innych (2007).

W obliczeniach przyjęto współczynniki przyjmowania ciepła zestawione w Tab. 1. Współczynniki te założono na podstawie podręcznika pod redakcją Z. Orłósia „Naprężenia cieplne” (1991), przyjmując intensywną wymianę ciepła zarówno w warunkach nagrzewania, przy kontakcie powierzchni wewnętrznej z parą przegrzaną, jak i w warunkach chłodzenia, przy kontakcie powierzchni wewnętrznej z odparowującą wodą. Na powierzchni zewnętrznej przyjęto wymianę ciepła dla przypadku kontaktu z powietrzem o temperaturze pokojowej.

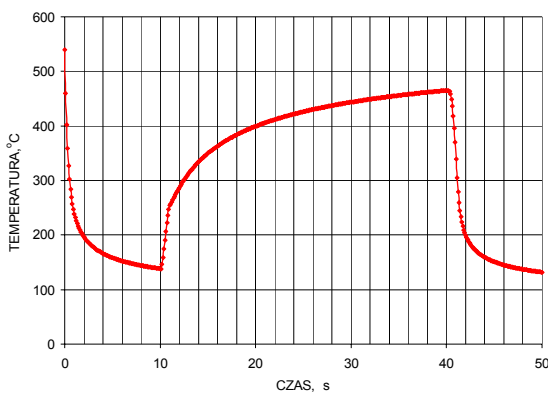
Założono, że komora poddana jest stałemu obciążeniu ciśnieniem wewnętrznym, dla którego oddzielnie wykonano obliczenia rozkładów naprężeń oraz przyjęto, że cykl



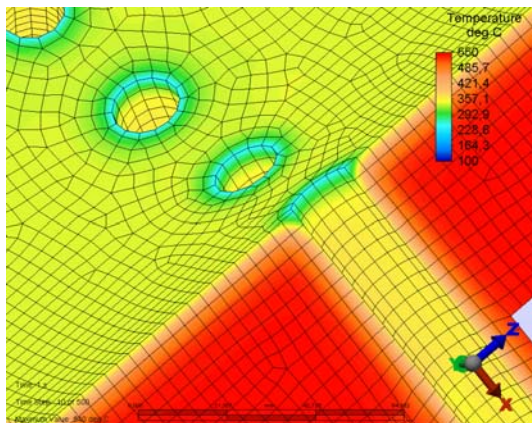
zmian temperatury wyznaczone zostanie po okresie dłuższego czasu nagrzewania parą przegrzaną o temperaturze 540 °C, aż do momentu wyrównania jej rozkładu na przekroju komory. Cykl zmian temperatury składał się z krótkiego czasu chłodzenia –10 s, związanego z koniecznością nagłego schłodzenia medium (pary przegrzanej) w warunkach sterowania blokiem energetycznym oraz z dłuższego okresu nagrzewania –30 s. Wykonano następnie obliczenia, na podstawie których wyznaczono rozkłady oraz wartości zmiennej w czasie temperatury w wybranych punktach komory (Rys. 12-15).

**Tab. 1.** Współczynniki przyjmowania ciepła

|                 |  |
|-----------------|--|
| Para przegrzana | $\alpha_w = 0,001 \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$    |
| Woda -wrzenie   | $\alpha_w = 0,01 \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$     |
| Powietrze       | $\alpha_z = 0,000001 \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |



**Rys. 12.** Przebieg zmian w czasie temperatury w punkcie 2 na powierzchni wewnętrznej komory przegrzewacza pary

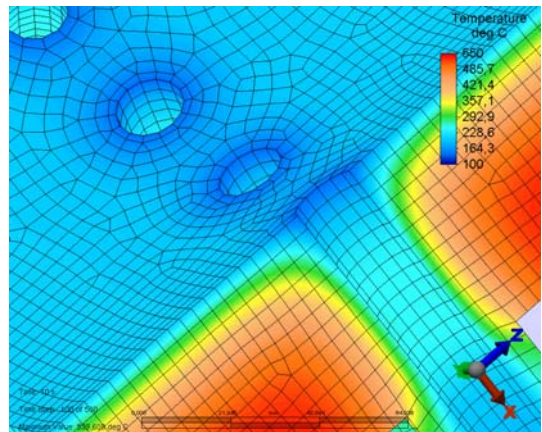


**Rys. 13.** Rozkład temperatury na powierzchni i przekroju komory wyznaczone dla przypadku jej cyklicznego chłodzenia i nagrzewania: 1 s – chłodzenie

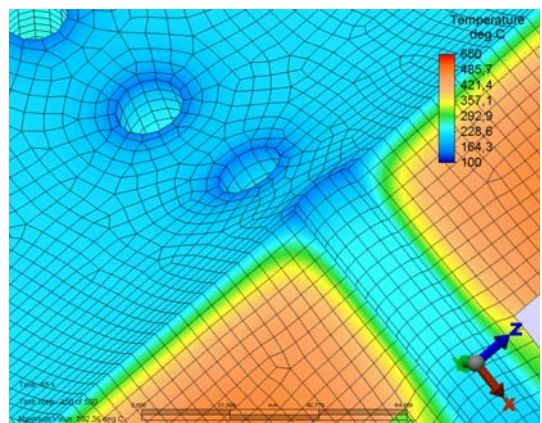
W celu oszacowania relacji pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w przypadku powstawania cyklicznych plastycznych odkształceń przyjęty został termo-plastyczny model materiału (Rys. 16).

Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału z liniowym umocnieniem, w którym moduł sprężystości i współczynnik umocnienia były zależne od temperatury. Wyniki

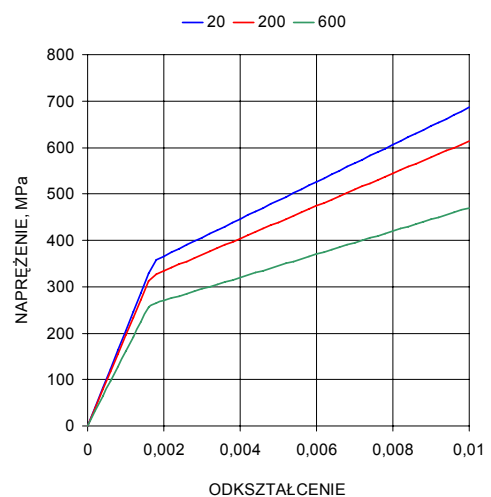
obliczeń rozkładów naprężeń dla wybranych chwil czasu przedstawiono na Rys. 17-19.



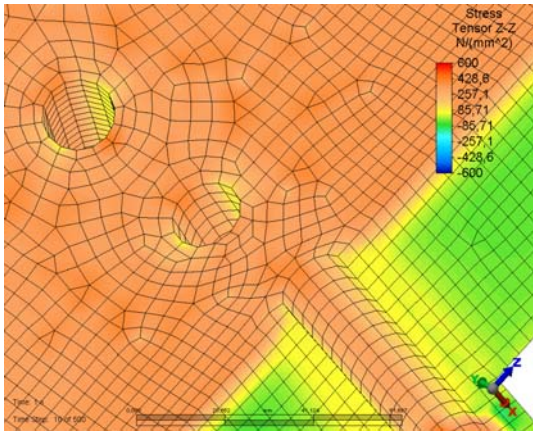
**Rys. 14.** Rozkład temperatury na powierzchni i przekroju komory wyznaczone dla przypadku jej cyklicznego chłodzenia i nagrzewania: 10 s – chłodzenie



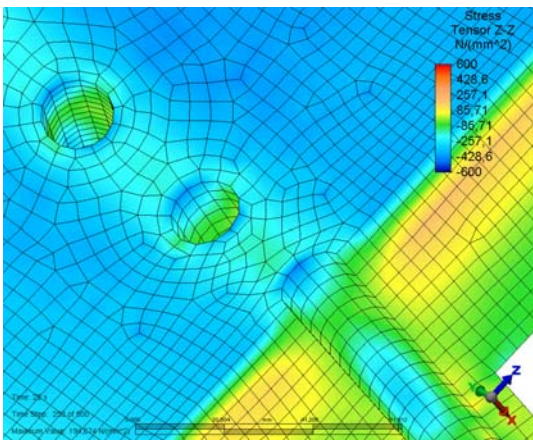
**Rys. 15.** Rozkład temperatury na powierzchni i przekroju komory wyznaczone dla przypadku jej cyklicznego chłodzenia i nagrzewania: 45 s – chłodzenie



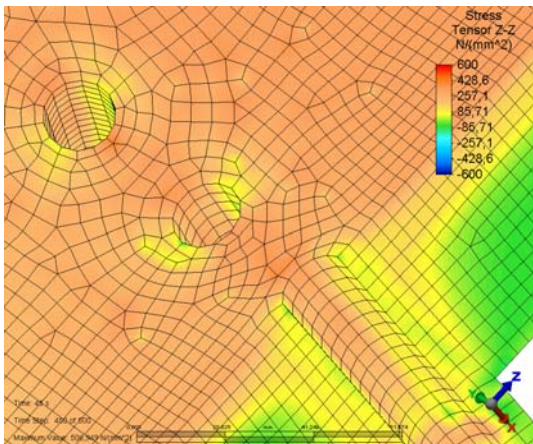
**Rys. 16.** Charakterystyki izotermiczne modelu materiału przyjętego do obliczeń rozkładów odkształceń i naprężeń cieplnych spowodowanych oddziaływaniem nierównomiernego pola temperatury; poszczególne linie odpowiadają różnym wartościom temperatury podanym w legendzie w °C



Rys. 17. Rozkład naprężeń osiowych na powierzchni i przekroju komory przegrzewacza: 1 s – chłodzenie

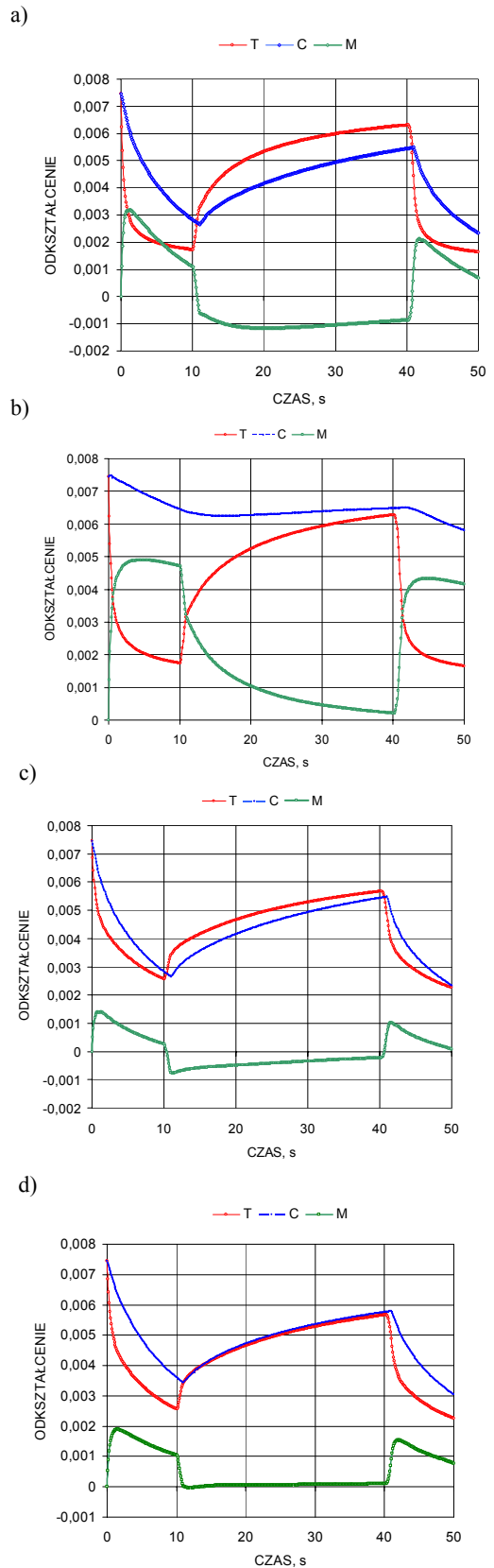


Rys. 18. Rozkład naprężeń osiowych na powierzchni i przekroju komory przegrzewacza: 25 s – nagrzewanie

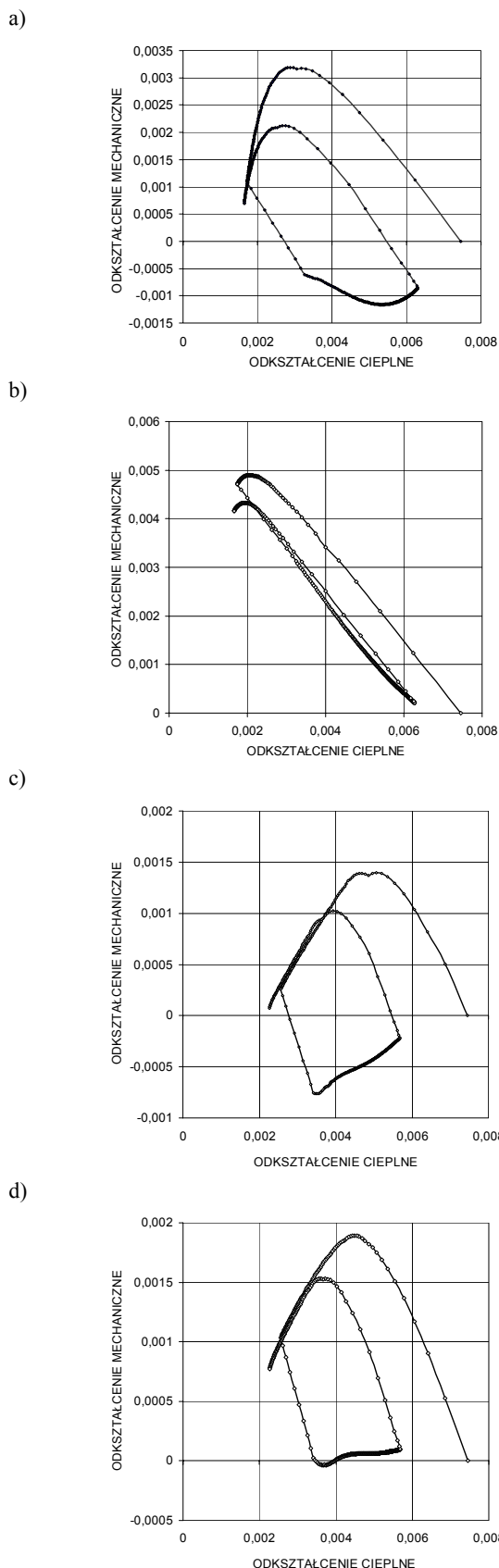


Rys. 19. Rozkład naprężeń osiowych na powierzchni i przekroju komory przegrzewacza: 45 s - chłodzenie

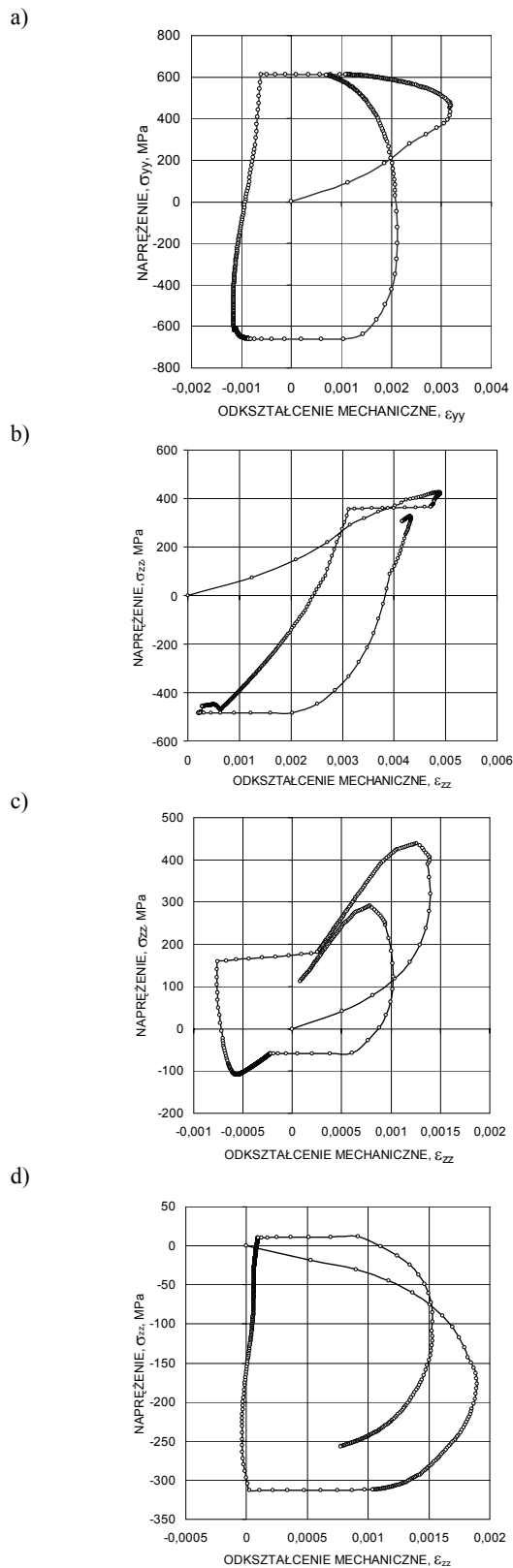
Zmienne w poszczególnych chwilach wartości odkształceń mechanicznych i cieplnych dla wyznaczonych zmiennych w czasie rozkładów temperatury oraz charakterystyki zależności pomiędzy odkształceniami cieplnymi i odkształceniami mechanicznymi, wyznaczone dla poszczególnych punktów na powierzchni komory (1-4 na Rys. 11) przedstawiono na Rys. 20 i 21.



Rys. 20. Przebiegi zmian odkształceń cieplnych, całkowitych i mechanicznych w funkcji czasu w wybranych punktach na powierzchni komory w warunkach sterowania blokiem energetycznym: a) punkt 1 z Rys. 11 – wydłużenia właściwe w kierunku osi y, b) punkt 2 – wydłużenia właściwe w kierunku osi x, c) punkt 3 – wydłużenia właściwe w kierunku osi z, d) punkt 4 – wydłużenia właściwe w kierunku osi z



**Rys. 21.** Charakterystyki zmian odkształceń mechanicznych w funkcji odkształceń cieplnych wyznaczone dla punktów 1-4 (Rys. 11) na powierzchni komory: a) punkt 1 z Rys. 11 – wydłużenia właściwe w kierunku osi y, b) punkt 2 – wydłużenia właściwe w kierunku osi z, c) punkt 3 – wydłużenia właściwe w kierunku osi z, d) punkt 4 – wydłużenia właściwe w kierunku osi z



**Rys. 22.** Charakterystyki zmian naprężeń w funkcji odkształceń cieplnych w wybranych punktach 1-4 położonych na powierzchni komory: a) punkt 1 z Rys. 11 – naprężenia normalne i wydłużenia właściwe w kierunku osi y, b) punkt 2 – naprężenia normalne i wydłużenia właściwe w kierunku osi z, c) punkt 3 – naprężenia normalne i wydłużenia właściwe w kierunku osi z, d) punkt 4 – naprężenia normalne i wydłużenia właściwe w kierunku osi z

Niektóre spośród charakterystyk pokazanych na rysunkach 21a do 21d wykazują pewne podobieństwo do przyjmowanych w badaniach zmęczeniowych ujętych w Code-of-Practice (Hähner, 2008). Wykres na Rys. 21b można na przykład odnieść do liniowej zależności pomiędzy odkształceniem mechanicznym i cieplnym w teście, w którym wymienione odkształcenia przesunięte są w fazie o kąt  $180^\circ$  w tak zwanym „out of phase test” (OP). Wykres na rysunku 21c można porównać z charakterystyką testu, w którym cykl odkształceń mechanicznych przesunięty jest w fazie w odniesieniu do cyklu odkształceń cieplnych o kąt  $90^\circ$  – tak zwanego cyklu „diamond”. O ile jednak wykresy te wykazują pewne podobieństwo do charakterystyk powszechnie stosowanych testów zmęczenia cieplno-mechanicznego (Hähner, 2008; Bresser i Remy, 1996; Sehitoglu, 1996), to w przypadku zależności pomiędzy odkształceniami mechanicznymi i naprężeniami różnice te są znacznie bardziej istotne.

Wykonane wcześniej obliczenia rozkładów naprężeń i odkształceń w komorze przegrzewacza wykazały, że naprężenia i odkształcenia mechaniczne spowodowane oddziaływaniem nierównomiernego pola temperatury mogą być znacznie większe od naprężeń i odkształceń wywołanych ciśnieniem wewnątrz komory (Mutwil i Cieśla, 2007; Okrajni i inni, 2007). Rozciągające naprężenia cieplne o wysokich wartościach powstają zwłaszcza w warunkach nagłego schładzania podczas nieustalanej pracy bloku energetycznego

## 6. PODSUMOWANIE

Opracowanie w części wstępnej przedstawia sposób oceny wytrzymałości i trwałości elementów poddanych zmęczeniu cieplno-mechanicznemu w ujęciu obowiązującej obecnie normy, w której poddano analityczne zależności dla naprężeń cieplnych oraz naprężeń od obciążeń zewnętrznym polem siłowym – w omawianym przypadku ciśnieniem wewnętrznym. Ujęcie to obarczone jest wieloma przybliżeniami, wpływającymi na dokładność wyników obliczeń. Obecnie coraz częściej stosuje się komputerowe metody wyznaczania rozkładów naprężeń w tym metodę elementów skończonych. Metody te oprócz zwiększenia dokładności obliczeń, zwłaszcza w obszarach koncentracji naprężeń, dają dodatkowo możliwość wykonania analizy przebiegu zmiennych w czasie rozkładów naprężeń, przemieszczeń i odkształceń w całej objętości danego elementu, gdy tymczasem norma traktuje problem lokalnie i podaje wzory jedynie dla naprężeń ekstremalnych lub ich zakresów w określonych miejscach danego elementu. Przy użyciu metod komputerowych możliwe jest wyznaczenie lokalnych charakterystyk omawianego procesu w postaci relacji pomiędzy naprężeniami, odkształceniami i temperaturą w zależności od czasowych charakterystyk cyklu cieplno-mechanicznego w dowolnym punkcie rozpatrywanego elementu.

Przebieg zależności pomiędzy temperaturą, odkształceniami mechanicznymi i naprężeniami decyduje o charakterze oraz intensywności zjawisk powstawania pęknięć w procesie zmęczenia cieplno-mechanicznego i charakteryzuje warunki tego procesu w danym obszarze konkretnego

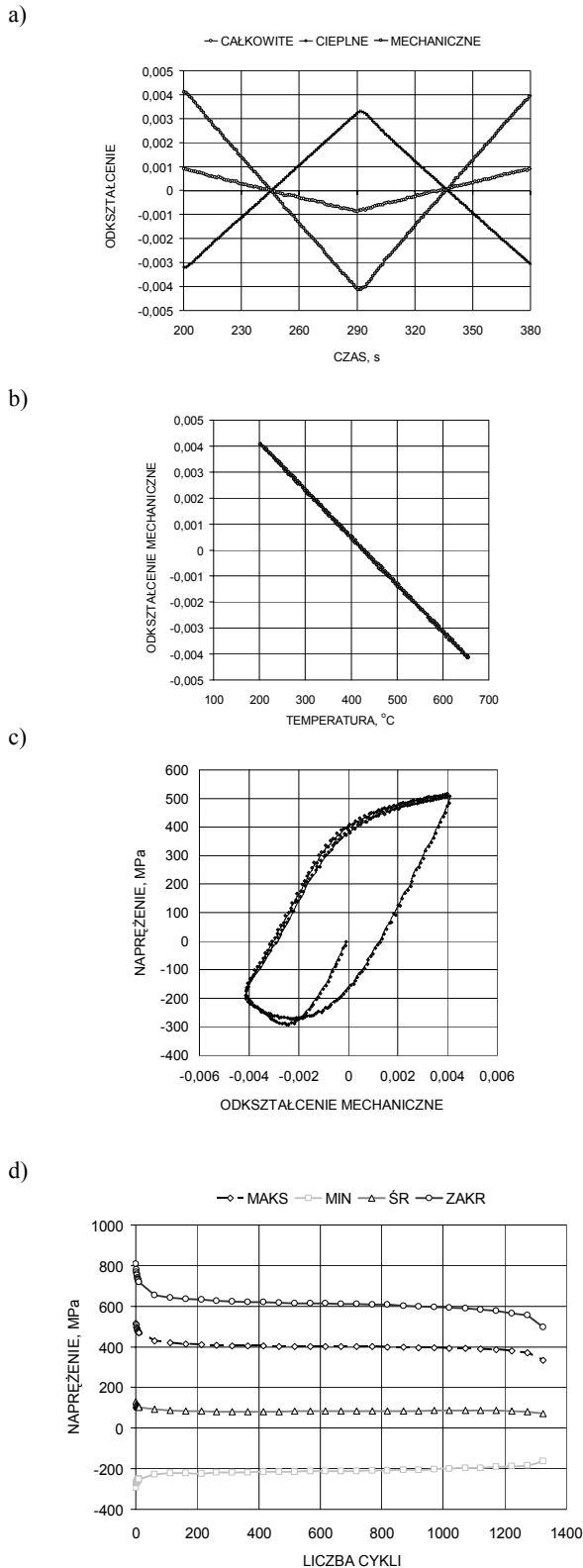
elementu. Dane uzyskane na podstawie metod modelowania komputerowego można następnie odnieść do warunków testu, podczas którego wyznaczana jest trwałość zmęczeniowa – w tym również testów „IP” lub „OP” (Hähner, 2008; Bresser i Remy, 1996; Sehitoglu, 1996).

Problem zmęczenia cieplno-mechanicznego jest zagadnieniem w dalszym ciągu w pełni nie rozwiązany. Pomimo powszechnego przekonania wśród inżynierów energetyków co do roli tego zjawiska w procesach degradacji własności wytrzymałościowych materiałów, w dalszym ciągu własności te w nieadekwatnym stopniu do ich znaczenia uwzględniane są w procedurach oceny trwałości elementów urządzeń energetycznych. W chwili obecnej w Polsce brak jest bazy danych umożliwiających ocenę wytrzymałości materiałów żarowytrzymałych w warunkach oddziaływań mechanicznych i cieplnych. W szczególności stwierdzenie to można odnieść do stopów metali stosowanych w energetyce. Wyjaśnienia wymaga problem interakcji pomiędzy zmęczeniem i procesami reologicznymi istotny dla kryteriów oceny stopnia degradacji własności materiałów poddanych oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym.

Tak więc można przypuszczać, że w najbliższych latach wraz ze wzrostem wiedzy na temat procesów zmęczenia wywołanego oddziaływaniem nierównomiernego, zmiennego w czasie pola temperatury zmianom ulegać będą normy obliczeń wytrzymałościowych elementów ciśnieniowych pracujących w podwyższonej temperaturze. Wcześniej podjęto działania zmierzające do unormowania metodyki badania zmęczenia cieplno-mechanicznego. W chwili obecnej istnieje jednak jedynie procedura tego typu badań, opracowana w ramach 5. Programu Ramowego w projekcie pod tytułem TMF – Standard „The route to standardisation” (Hähner, 2008). Zapoczątkowano prace zmierzające do nadania tej procedurze rangi normy o zasięgu europejskim. Wraz ze wzbogacaniem wiedzy na temat charakterystyk poszczególnych materiałów należy oczekiwać w niedalekiej przyszłości jej implementacji w metodyce projektowania i oceny stanu technicznego elementów instalacji energetycznych. Należy jednak mieć na uwadze, że testy zmęczeniowe mogą być realizowane jedynie dla wybranych rodzajów cykli odkształceń i temperatury.

W takim wypadku wykonane obliczenia mogą stanowić podstawę do określenia parametrów testu materiałowego, który stanowiłby przybliżenie warunków zmęczeniowych występujących lokalnie w rozpatrywanym elemencie. Na tej podstawie można byłoby dokonać oszacowania trwałości w oparciu o charakterystyki wyznaczone w warunkach laboratoryjnych.

Można dokonać porównania charakterystyk wyznaczonych dla wybranego obszaru w elemencie poddanym zmęczeniu cieplno-mechanicznemu z wynikami testów zmęczeniowych (Rys. 23).



**Rys. 23.** Charakterystyki zmęczenia ciepłno-mechanicznego wyznaczone dla próbek w testach laboratoryjnych: a) charakterystyki cykli odkształceń całkowitych, mechanicznych i cieplnych – test OP, stal P92, b) zależność pomiędzy odkształceniem mechanicznym i temperaturą – test OP, stal P92, c) zależność pomiędzy odkształceniem mechanicznym naprężeniem – test OP, stal P92, d) zmiany naprężenia maksymalnego (MAX), minimalnego (MIN), średniego (ŚR) i zakresu naprężenia (ZAKR) w funkcji liczby cykli - test OP, stal P92

Porównywanie trwałości wyznaczonej w testach zmęczeniowych z trwałością materiału w warunkach eksploatacji wymaga więc dużej ostrożności i w chwili obecnej nie ma powszechnie akceptowanych kryteriów, które umożliwiłyby takie porównywanie.

Przedstawione rozważania mogą stanowić jedynie przyczynek do opisu charakteru zjawiska zmęczenia ciepłno-mechanicznego przedstawionego w ujęciu modeli MES oraz badanego warunkach laboratoryjnych. Istniejące rozbieżności tych dwóch ujęć mają różne źródła. Jednym z nich jest przyjmowany w obliczeniach MES rodzaj termoplastycznego modelu materiału. Na obecnym etapie zastosowanie przybliżenia polegającego na założeniu stałego w danej temperaturze współczynnika umocnienia wynikało z ograniczeń użytego do obliczeń programu MES. W kolejnych pracach przewiduje się zastosowanie różnych modeli materiałowych, zakładających możliwość występowania odkształceń plastycznych z uwzględnieniem różnego charakteru umocnienia oraz procesów reologicznych.

Poza dyskusją pozostawiono na obecnym etapie problem ilościowego porównania stanów odkształcenia w próbce i w rozpatrywanych obiektach, łącząc go z zagadnieniem opracowania odpowiednich modeli konstytutywnych materiałów. Zagadnienie to w dalszym ciągu nie zostało w pełni rozwiązane, pozostaje więc przedmiotem prac prowadzonych przez wiele ośrodków w tym również Katedrę Mechaniki Materiałów Politechniki Śląskiej (Okrajni i inni, 2008).

#### LITERATURA

1. Adams R., Kaegi U., Sherikar S. V. (2007), Getting reliable Turbine Bypass System performance in Cycling Power Plants, *ETD Conference on Cyclic Operation of Power Plant*, London.
2. Bressers J., Remy L. (eds.) (1996), *Fatigue under Thermal and Mechanical loading*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
3. Dowling N. E. (1973), Fatigue Life end inelastic Strain Response under Complex Historie for an Alloy Steel, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 1 No.4, 271/87.
4. Fontaine P., Golopin J-F. (2007), HRSG Optimization for cycling duty based on Euro Norm EN 12952-3, *ETD Conference on Cyclic Operation of Power Plant*, London.
5. Hähner P. et al. (2008), Research and development into a European code-of-practice for strain-controlled thermo-mechanical fatigue testing, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, Issue 2, 372-381.
6. Mutwil K., Cieśla M. (2007), Czynniki determinujące trwałość komór przegrzewaczy pary, *Energetyka*, z. nr 14, Oficyna Wydawnicza Energia COSiW, Katowice, 81-84.
7. Okrajni J., Marek A., Junak G. (2008), Thermo mechanical fatigue: code of practice and development of mechanical models, *Internet Journal*, OMMI (Operation Maintenance and Materials Issue), Vol. 5, Issue 1.
8. Okrajni J., Plaza M., Marek A. (2007), Zmęczenie ciepłno-mechaniczne elementów urządzeń energetycznych, *Energetyka*, z. nr 14, Oficyna Wydawnicza Energia COSiW, Katowice, 85-89.
9. Orłoś Z. [red.] (1991), *Naprężenia cieplne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

10. **Perrin I. J., Fishburn J. D.** (2005), A Perspective on the Design of High Temperature Boiler Components, *Proceedings of Conference Creep and Fracture in High Temperature Components*, DEStech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania 17601 USA.
11. **Sehitoglu H.** (1996), *Thermal and Thermo-mechanical Fatigue of Structural Alloys*, Fatigue and Fracture, Vol. 19, ASM Handbook, 527-556.
12. **Spyrakos C.** (1994), *Finite Element Modeling in Engineering Practice*, ALGOR Publishing Division, Pittsburgh, PA.
13. **Spyrakos C., Raftoyiannis J.** (1997), **Finite Element Modeling In Engineering Practice**, Algor Publishing Division, Pittsburgh, PA.
14. **Webster G. A., Ainsworth R. A.** (1994), *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall, London.
15. BS 7910, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in structures (replacing PD 6493 and PD 6539), British Standards Institution, London 1994.
16. Nuclear Electric Ltd: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structure. Proc. R5 Issue 2, UK. 1997.
17. Project European Thematic Network FITNET FFS-GIRT-CT-2001-05071.
18. Standards EN 12952, EN 12952-3:2001 (E), EN 12952-4:2000.
19. <http://www.alibre.com/>

## THE THERMO-MECHANICAL FATIGUE IN STANDARDS AND COMPUTER MODELLING

**Abstract:** The main purpose of this work is the description of the mechanical behaviour of power plant components working under mechanical and thermal loading that cause the thermo-mechanical fatigue fracture in selected areas of the component surfaces. The computer modelling has been used to describe the local stress-strain behaviour of the chosen component. The stress and strain fields have been determined under thermal loading. Tensile thermal stresses of high values are created especially under conditions of sudden cooling during unsteady work of a power unit. The presented analysis is the part of the complex investigation method which main purpose is increasing accuracy of the TMF process description and thermo-mechanical life assessment.

### Podziękowania

Pracę wykonano w ramach projektu: "Trwałość elementów urządzeń poddanych oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym z uwzględnieniem efektów pełzania" nr N N507 375435 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autor uprzejmie dziękuje za stworzenie możliwości przeprowadzenia badań i upowszechnienia ich wyników.