

- zmierzyć grubość warstwy tlenków na powierzchni wewnętrznej,
- sprawdzić rzeczywiste wymiary, tj. grubość ścianki i średnicę wewnętrzną,
- obliczyć odkształcenie średnicy wewnętrznej,
- zbadać strukturę.

Na podstawie wyników badań i pomiarów można ocenić stan przegrzewacza wg algorytmu przedstawionego na rysunku 5.

Należy podkreślić, że ocena niezawodności eksploatacyjnego przegrzewacza powinna być kompleksowa (rys. 4), tj. wykorzystująca dane dotyczące:

- dotychczasowego stanu technicznego,
- rzeczywistych warunków pracy (temperatura czynnika, spalin, metalu),
- badań, pomiarów i obliczeń.

Ocenę niezawodności ze względu na możliwość zmiany warunków pracy kotła należy okresowo sprawdzać i korygować na podstawie nowo uzyskanych wyników.

### Wnioski

1. Częstość wymian węzownic przegrzewaczy pary w krajowych elektrowniach nie zawsze znajduje uzasadnienie w stopniu ich zużycia.
2. Stosując kompleksową diagnostykę można dość dokładnie ocenić dalszą przydatność węzownic i przewidzieć czas ich dalszej eksploatacji.

3. Ocena diagnostyczna powinna być okresowo powtarzana w celu uściślenia jej wyników.

### LITERATURA

- [1] Cwynar L.: Analityczne wyznaczenie rozrzutu temperatury pary w węzownicach stopnia przegrzewacza. *Energetyka* 1969, nr 5
- [2] Dobosiewicz J.: Ocena stanu przegrzewaczy pary kotłów wysokoprężnych. *Energetyka* 1986, nr 8
- [3] Dobosiewicz J., Miliński P.: Ocena powierzchni ogrzewalnej kotła po długotrwałej eksploatacji. Seminarium RAFAKO SA pt. „Kompleksowa ocena elementów ciśnieniowych kotła oraz prognozowanie czasu ich dalszej bezpiecznej eksploatacji. Katowice 21–23 września 1994 r.
- [4] Dobrzański J.: Degradacja struktury i własności materiału po długotrwałej eksploatacji. Seminarium RAFAKO SA pt. „Kompleksowa ocena elementów ciśnieniowych kotła oraz prognozowanie czasu ich dalszej bezpiecznej eksploatacji. Katowice 21–23 września 1994 r.
- [5] Dobosiewicz J., Krzywda Z.: Niezawodność powierzchni ogrzewalnych w kotłach typu OP-380K i OP-650K. *Energetyka* 1976, nr 4
- [6] Dobosiewicz J.: Uszkodzenia węzownic przegrzewaczy kotłów parowych wskutek przegrzania. *Energetyka* 1986, nr 7
- [7] Dobosiewicz J.: Uszkodzenia węzownic przegrzewaczy kotłów parowych wskutek korozji. *Energetyka* 1989, nr 9
- [8] Dobosiewicz J.: Katalog typowych uszkodzeń powierzchni ogrzewalnych. *Pro Novum*, 1993
- [9] Dobosiewicz J.: Badania diagnostyczne urządzeń cieplnomechanicznych. Wyd. Biuro Gamma, cz. I i II

panovum

Dr Wojciech Brunné

Pro Novum — Katowice

UKD 621.311:621.644

## Wyczerpanie trwałości materiału lanych czwórników wysokoprężnych rurociągów parowych

Wysokoprężne rurociągi w elektrowniach i elektrociepłowniach cechują się zazwyczaj złożonym przestrzennym kształtem. Te pozornie statyczne, wielkowymiarowe konstrukcje w trakcie wieloletniej eksploatacji podlegają zmiennym w czasie naprężeniom. Źródłem naprężeń są dwa główne czynniki, tj. zmienna temperatura i ciśnienie transportowanego przez rurociągi medium. Rozszerzalność cieplna materiału rurociągów wyzwała siły cieplne, które z kolei powodują występowanie momentów zginających i skręcających o znacznej wartości.

Współcześnie budowane rurociągi wysokoprężne są projektowane na podstawie analizy wyników obliczeń konstrukcyjnych i badań modelowych, co pozwala na zredukowanie do minimum obszarów spiętrzenia naprężeń.

Materiał rurociągów eksploatowanych od kilkunastu czy nawet kilkudziesięciu lat jest narażony na zmęczenie powodowane małą liczbą cykli. Proces technologiczny w elektrowni charakteryzuje się w pewnym uproszczeniu odzerowym trape-

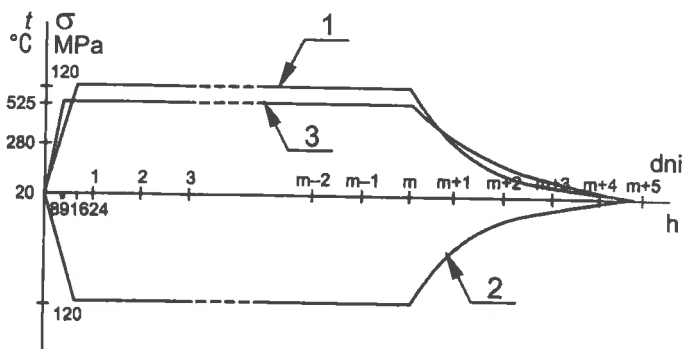
zoidalnym cyklem, który może trwać od kilku dni do kilkunastu miesięcy. Ponieważ amplituda naprężeń jest duża, a częstość zmian niewielka, ten rodzaj zmęczenia można analizować zgodnie z założeniami teorii złożonego zmęczenia małowyciskowego (LCF). Na zmęczenie małowyciskowe są narażone przede wszystkim sztywniejsze elementy czy obszary rurociągu, do których należą kształtki oraz spoiny doczołowe i pachwinowe.

### Warunki pracy głównych rurociągów parowych bloku energetycznego o mocy 200 MW

#### Cykl obciążeń termicznych

Z głównych rurociągów parowych bloku energetycznego o mocy 200 MW interesują nas rurociągi pary świeżej pracujące w temperaturze  $+540^{\circ}\text{C}$  i pod ciśnieniem 13,5 MPa oraz rurociągi pary wtórnie przegrzanej ( $+540^{\circ}\text{C}$ , 2,85 MPa).

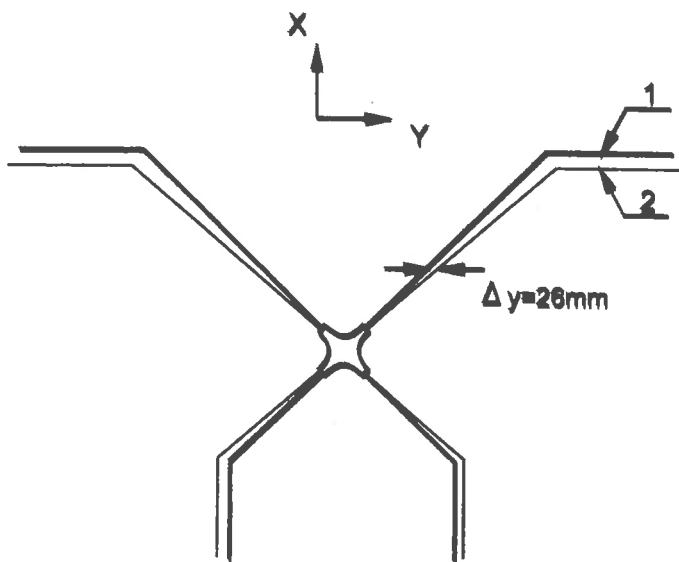
W trakcie rozruchu optymalna szybkość wzrostu temperatury wynosi  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , czyli pełne parametry pracy rurociągi osiągną po 9 godzinach. Przy odstawieniu bloku czas potrzebny do wystudzenia rurociągów wynosi około 5 dni. Obecnie średni czas między rozruchem a odstawieniem bloku wynosi od 50 do 60 dni. Praca bloku energetycznego charakteryzuje się zmiennością obciążenia w ciągu doby. Do naszych rozważań z bardzo dobrym przybliżeniem można przyjąć, że blok pracuje przy średnim obciążeniu wynoszącym 85% mocy znamionowej. Interesujące nas rurociągi w ciągu prawie 30 lat pracowały przez 158 956 h i były w tym czasie poddane 902 cyklom pracy. Można zatem przyjąć, że średni cykl obciążenia był taki, jak przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uśredniony cykl podstawowy obciążeń cieplnych  
1 — naprężenie rozciągające, 2 — naprężenie ściskające, 3 — temperatura

### Przemieszczenia cieplne

Przemieszczenia cieplne rurociągów między stanem zimnym a ustabilizowanym stanem gorącym wynikają z rozszerzalności cieplnej ich materiału oraz z konstrukcji kotła (ruszt podparty). Przemieszczenia rzeczywiste określono pomiarami geodezyjnymi i przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przemieszczenia cieplne rurociągów pary świeżej przed i za czwórnikami  
1 — stan zimny, 2 — stan gorący

### Wyniki nieniszczących badań defektoskopowych

Podczas wykonanych w 1996 roku okresowych badań diagnostycznych głównych rurociągów parowych stwierdzono powierzchniowe pęknięcia lanych czwórników rurociągów pary świeżej i rurociągów pary wtórnie przegrzanej.

Ultradźwiękowe badania defektoskopowe materiału czwórników nie wyjaśniły jednoznacznie wymiarów tych pęknięć ze względu na charakter tworzywa (materiał lany) i geometrię czwórników (liczne zmiany krzywizny ścianki i zmiany pola przekroju). Natomiast kontrolne badania endoskopowe powierzchni wewnętrznych czwórników potwierdziły również występowanie na powierzchni nieciągłości.

Uzyskane wyniki badań były podstawą zakwalifikowania do wymiany czwórników rurociągów pary świeżej i wtórnie przegrzanej.

### Wyniki niszczących badań materiałowych

#### Opis uszkodzeń czwórników

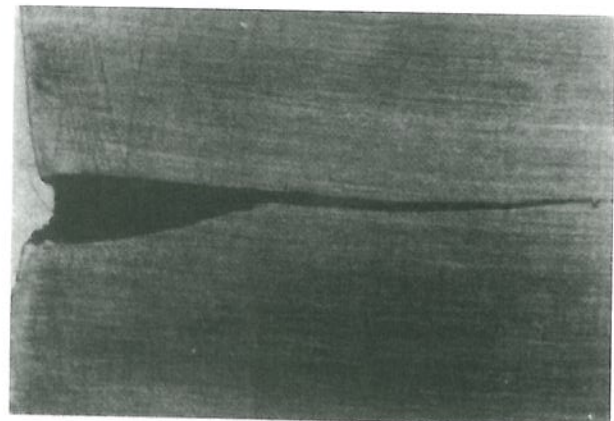
Po wycięciu czwórników poddano je badaniom materiałowym. W tym celu przecięto czwórniki wzdłuż prostopadłych płaszczyzn symetrii. Na rysunku 3 pokazano wewnętrzną powierzchnię czwórnika pary świeżej po takim przecięciu.

Długości pęknięć czwórników mierzone po powierzchni wewnętrznej były zbliżone do średnicy rur i wynosiły: 300 mm — rurociąg pary świeżej  $\varnothing 324$  mm oraz 460 mm — rurociąg pary wtórnie przegrzanej  $\varnothing 508$  mm.

Przekrój poprzeczny ujawnił, że pęknięcie czwórnika pary świeżej było bardzo głębokie (rys. 4), a jego wierzchołek stępiony.



Rys. 3. Wewnętrzna powierzchnia czwórnika rurociągu pary świeżej od strony wlotu pary



Rys. 4. Rozwój pęknięcia w materiale czwórnika pary świeżej

Tabela 1

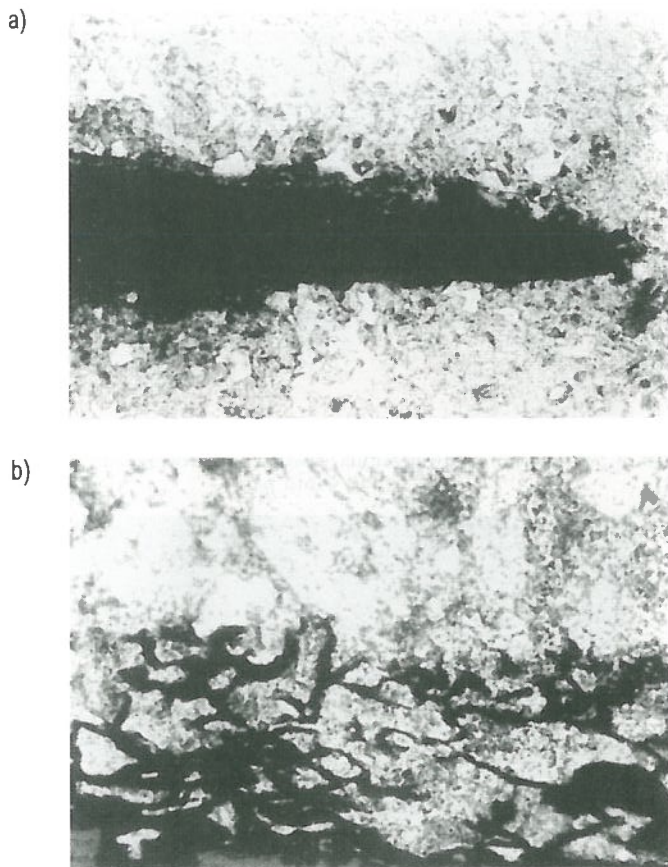
Skład chemiczny badanych materiałów, % mas.

Pierwiastek Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al <sub>całk.</sub>
Czwórnik pary świeżej	0,17	0,56	0,40	0,026	0,022	1,32	0,66	0,31	0,08	0,08	0,020
Czwórnik pary wtórnie przegrzanej	0,18	0,57	0,40	0,027	0,023	1,36	0,67	0,32	0,08	0,08	0,020

### Wyniki badań metalograficznych

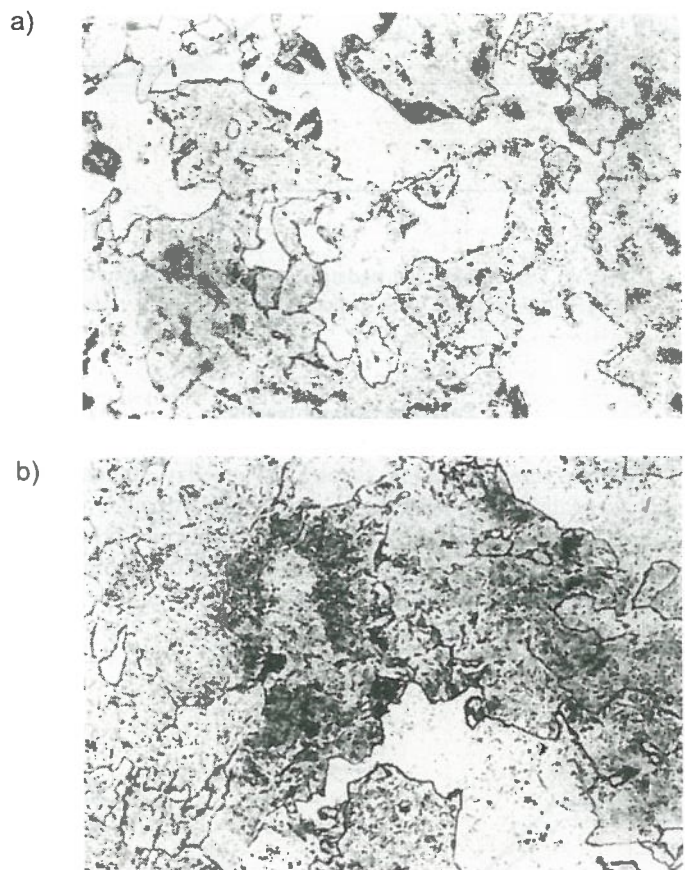
Dokładniejsze obserwacje mikroskopowe wykazały, że pęknięcie ma charakter śródziarnowy, zmęczeniowo-korozyjny (rys. 5).

W tabeli 1 zestawiono wyniki analizy składu chemicznego materiału czwórników. Ze składu tego wynika, że odlewy zostały odlane prawdopodobnie ze staliwa L21HMF wg PN (21CrMoV11 wg DIN; Grade F24 wg ASTM), charakteryzującej się przekroczoną zawartością chromu. Materiał czwórników ma strukturę ferrytyczno-bainityczno-perlityczną ze skoagulowanymi węglkami w bainicie i w perlicie (rys. 6). Przeważa ferryt quasi-poligonalny ze znaczną liczbą globularnych węglików.



Rys. 5. Wierzchołek pęknięcia zmęczeniowo-korozyjnego czwórnika rurociągu pary świeżej, zgląd trawiony nitalem:  
a) pow. 200 ×, b) pow. 630 ×

Bardzo liczne węgliki po graniach ziarn są bogate w chrom. W obszarach przygranicznych badanych elementów występuje segregacja fosforu.



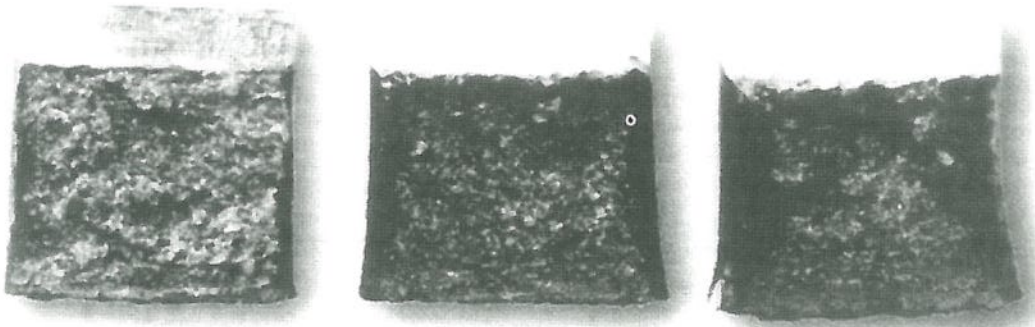
Rys. 6. Struktura materiału czwórników, zgląd trawiony nitalem — pow 400 ×;  
a) czwórnik pary świeżej, b) czwórnik pary wtórnie przegrzanej

### Wyniki badań udarności i wytrzymałości

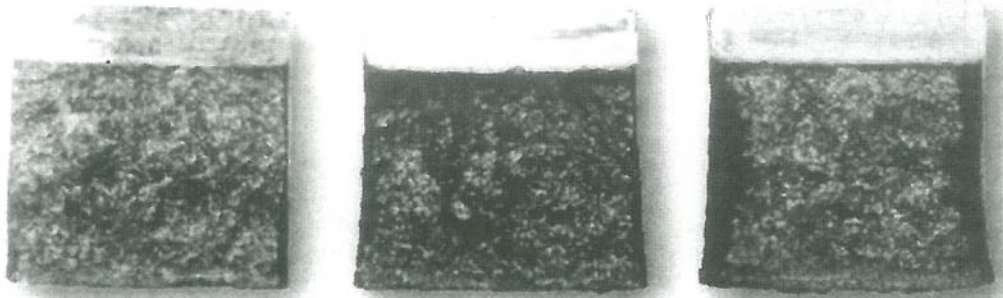
Badania udarności wykonano na próbkach wzdłużnych o karbie prostopadłym do powierzchni czwórników. Badania przeprowadzono w temperaturach 20, 50 i 80°C (rys. 7), a ich wyniki zebrano w tabeli 2.

Z materiału czwórników pochodzącego z najgrubszego ich przekroju wykonano pięć próbek ( $\varnothing$  8 mm) do statycznej próby rozciągania. Wyniki badań w temperaturze otoczenia zamieszczono w tabeli 3.

a)



b)



Rys. 7. Przelomy udarowe (pow.  $2,3 \times$ ):  
 a) próbki pochodzące z czwornika pary świeżej;  
 b) próbki pochodzące z czwornika pary wtórnie przegrzanej

Tabela 2

Wyniki badań udarności

Parametr	Czwornik pary świeżej		Czwornik pary wtórnie przegrzanej	
Temperatura: +20°C				
Udarność, J/cm <sup>2</sup>	33	25	5	12
% przelomu krystalicznego	100	100	100	100
Temperatura: +50°C				
Udarność, J/cm <sup>2</sup>	52	50	29	40
% przelomu krystalicznego	95	100	100	100
Temperatura: +80°C				
Udarność, J/cm <sup>2</sup>	88	80	40	42
% przelomu krystalicznego	64	90	100	100

Tabela 3

Wyniki statycznej próby rozciągania i pomiarów twardości

Element	$R_e$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %	$HV_{30}$
Czwornik pary świeżej	280	525	24,0	śred. 155
	281	535	23,5	
Czwornik pary wtórnie przegrzanej	280	552	22,0	śred. 172
	282	551	21,0	

## Dyskusja

Pęknięcia zostały zainicjowane w obszarach koncentatorów naprężeń (mini-wady technologiczne odlewów, karby geometryczne, wżery korozyjne). Przebieg pęknięć ma charakter śródziarnowy z mikroodgażeniami (rys. 5) z tępym wierzchołkiem. Pęknięcia są wypełnione tlenkami z wysepkami nieskorodowanego metalu. Jak wskazuje doświadczenie, tego typu pęknięcia zachodzą przy jednoczesnym działaniu na materiał znacznych naprężeń i czynnika korozyjnego [1].

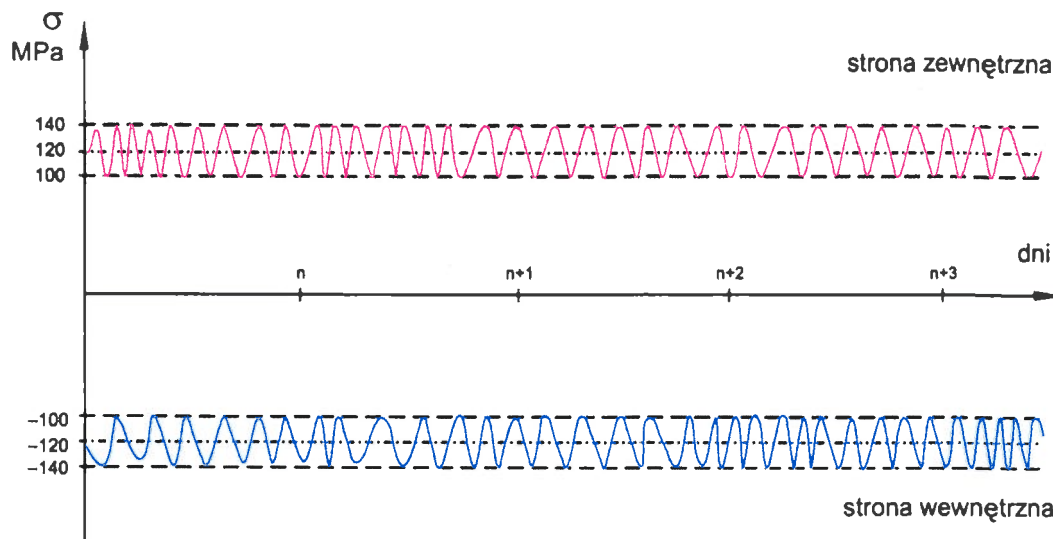
Na badane czworniki destrukcyjnie oddziaływały:

- zmęczenie małowyciskowe (LCF),
- korozja parowo-wodna.

### Zmęczenie małowyciskowe

Biorąc pod uwagę historię eksploatacji rurociągów można przyjąć, że na czworniki oddziaływały naprężenia o zróżnicowanym przebiegu. Czas odciążenia między cyklami obciążenia był zmienny i wynosił od kilku godzin do kilkudziesięciu dni. Nie prowadzono dokładnej rejestracji czasu postojów; wiadomo jednak, że uruchomienie ze stanu zimnego (postój > 72 h) było 523. Tak najogólniej można scharakteryzować przebieg głównych obciążeń LCF.

Jak już wspomniano, naprężenia w czasie pracy rurociągu zmieniają się (oscylują) w ciągu doby. Zmiany te zależą od aktualnego zapotrzebowania na energię elektryczną i są ograniczone od góry maksymalną, a od dołu minimalną wydajnością kotła, przy której praca bloku energetycznego jest jeszcze stabilna (maks. 60% obciążenia). Można z pewnym uproszczeniem przyjąć, że trapezoidalny cykl obciążenia, ogólnie przedstawiony na rysunku 1, należy zmodyfikować, tj. uwzględnić szczyt podstawowego cyklu dobowego (rys. 8). Należy pamiętać o tym, że warstwy wewnętrzne czwornika przy wzroście temperatury podlegają naprężeniom ściskającym, a przy spadku temperatury — naprężeniom rozciągającym.



Rys. 8. Zmodyfikowany cykl naprężeń z uwzględnieniem zmian dobowych

Zależność opisującą wzajemne relacje między naprężeniem  $\sigma$ , odkształceniem  $\epsilon$  i liczbą cykli ich zmian  $N_f$  podali najpierw Manson i Coffin. W literaturze problem ten jest najczęściej opisywany wzorem podanym przez Morrowa:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2 N_f)^b + \epsilon'_f (2 N_f)^c$$

W rozpatrywanym przez nas przypadku powyższa formuła mogłaby mieć zastosowanie do opisu zmęczenia wg cyklu podstawowego (uśredniającego dobowe zmiany naprężeń). Do ilościowego opisu zmęczenia — uwzględniającego (z pewnym uproszczeniem) zmiany dobowe naprężeń i odkształceń — należy wprowadzić człon dotyczący dobowych odkształceń plastycznych:

$$\epsilon'_d (2 N_d)^{c'}$$

gdzie:

- $\epsilon'_d$  — współczynnik dobowego odkształcenia zmęczeniowego,
- $N_d$  — liczba cykli do zniszczenia dla cyklu dobowego,
- $c'$  — stała materiałowa uwzględniająca występowanie warstwy ochronnej.

Biorąc pod uwagę charakter procesu zmęczenia małowyciklicznego zaproponowano następujący opis:

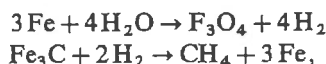
$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2 N_f)^b + \epsilon'_f (2 N_f)^c + \Omega [\epsilon'_d (2 N_d)^{c'}]$$

Stała  $\Omega$  jest współczynnikiem obrazującym intensywność procesu dobowego zmęczenia małowyciklicznego; na drodze eksperymentalnej dotychczas nie wyznaczono wartości tej stałej. Przypuszcza się, że dla stali trójskładnikowej wartość współczynnika dobowego zmęczenia zawiera się w przedziale 1,4—1,7.

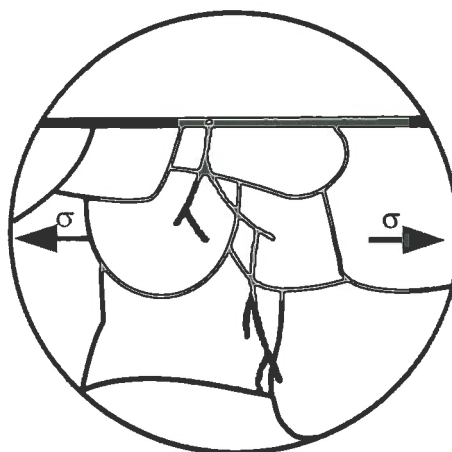
### Korozja parowo-wodna

Pomimo stosowania wielu zabiegów chemicznych woda kotłowa, a co za tym idzie przegrzana para wodna nie są

czynnikami obojętnymi. Biorąc pod uwagę aspekt ilościowy, czyli przepływ w ciągu godziny prawie 650 ton pary (wydajność kotła), nawet niewielka agresywność pary wodnej jest wystarczającym czynnikiem korozyjnym. Proces korozyjny występuje tam, gdzie na skutek naprężeń zmiennych pęka warstwa ochronna (naprężenia są większe od granicy plastyczności warstewki ochronnej). Wówczas para wodna reaguje z czystym żelazem wg zależności:



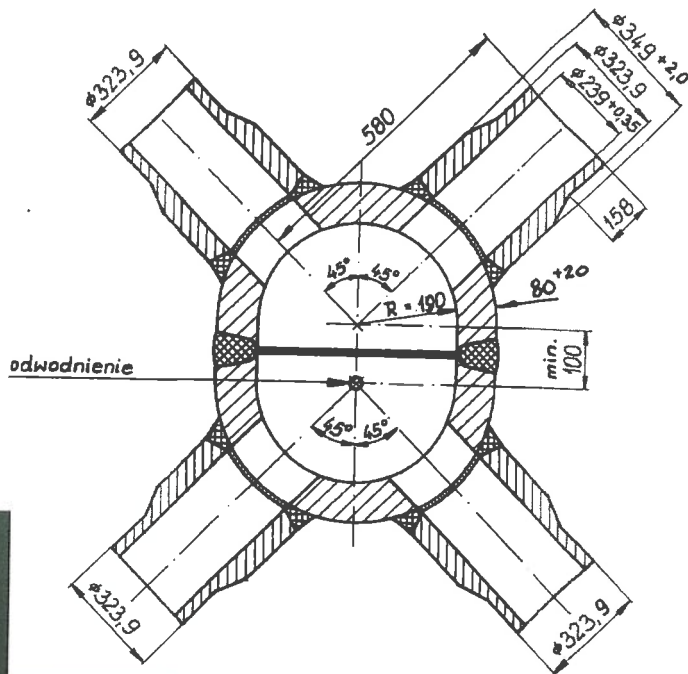
co powoduje rozkład perlitu w rejonie pęknięć (rys. 5). Ponieważ opisany mechanizm wywołują występujące jednocześnie naprężenia zmienne i środowisko agresywne korozyjne nosi on nazwę zmęczenia korozyjnego (KZ) — rys. 9. Występowanie tego zjawiska tłumaczy fakt, że wierzchołek pęknięcia zmęczeniowego jest stępiony, a na bocznych płaszczyznach pęknięcia występują liczne mikropęknięcia.



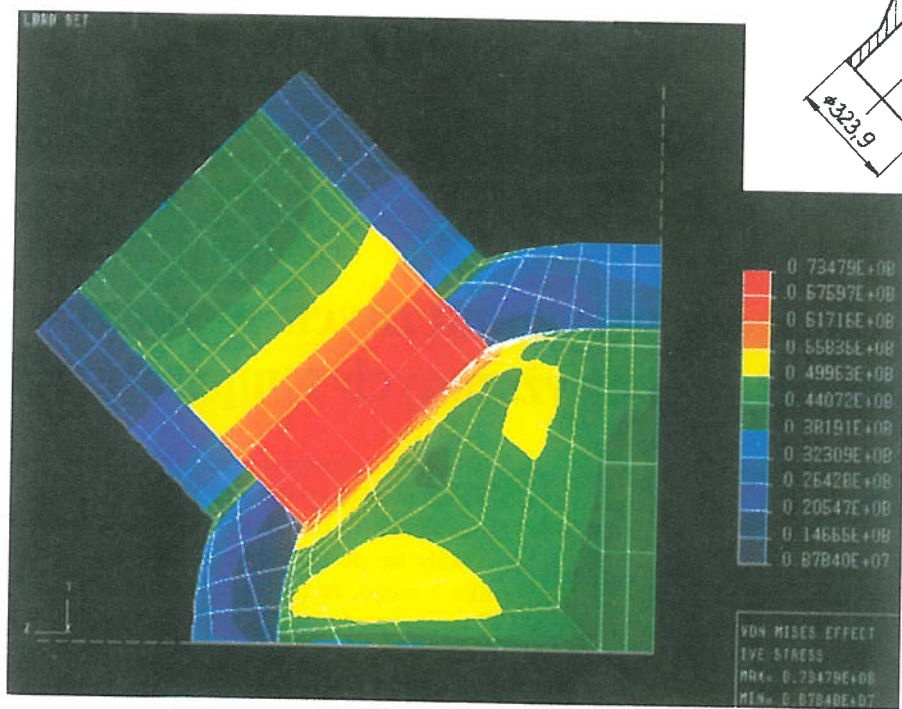
Rys. 9. Model rozwoju pęknięcia korozyjno-zmęczeniowego

**Podsumowanie**

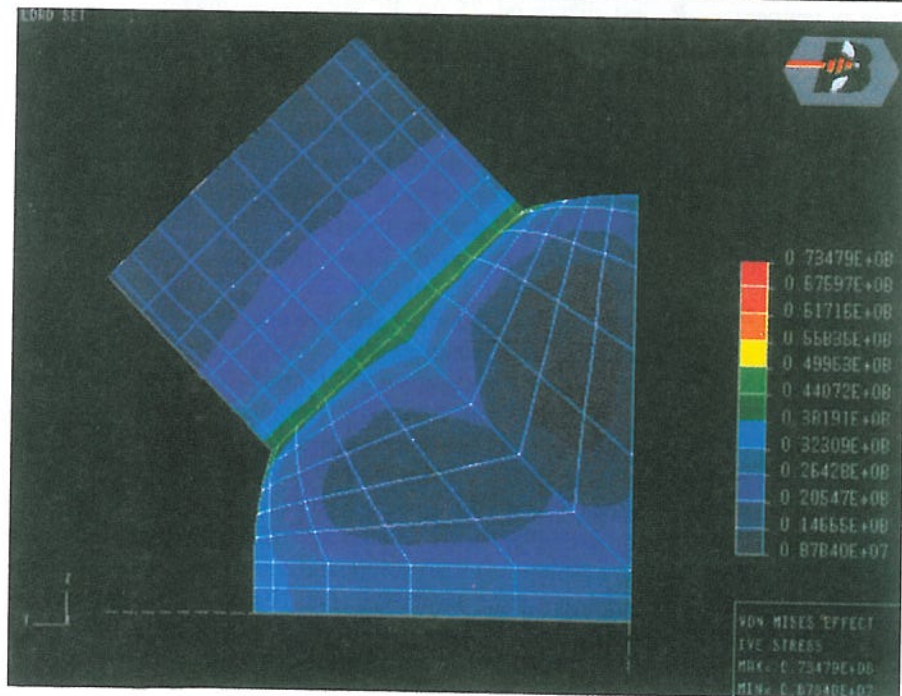
Materiał lanych czwórników pary świeżej i pary wtórnie przegrzanej uległ uszkodzeniu, prowadzącemu aż do ich zniszczenia, w wyniku jednoczesnego oddziaływania dwóch procesów (mechanizmów) degradacyjnych. Z jednej strony, wywołany znacznymi naprężeniami proces małocyklicznego zmęczenia powodował niszczenie warstewki ochronnej metalu, z drugiej zaś — agresywne działanie pary wodnej na czysty metal powodowało korozję parowo-wodną. Oba te mechanizmy zniszczenia „współdziałały” stanowiąc dla siebie wzajemne stimulatory zniszczenia. Mikropęknięcia i obniżenia własności plastycznych oraz działanie korozji parowo-wodnej połączone z segregacją fosforu (tab. 3) w istotny sposób



Rys. 10. Nowa konstrukcja czwórnika rurociągu pary świeżej



a)



b)

Rys. 11. Rozkład naprężeń głównych (a) i zredukowanych wg hipotezy Misesa (b) pochodzących od ciśnienia wewnętrznego w sferycznej części czwórnika z króćcem

zwiększały destrukcyjny wpływ na metal zmęczenia małowycelnego. Postępujące pęknięcia zmęczeniowe warstewki ochronnej i samego metalu zwiększały obszar czynny korozyjnie (nie osłonięty metal). Można zatem stwierdzić, że przyczyną degradacji materiału czwórników było zmęczenie korozyjne.

Decyzja o wymianie czwórników, która została podjęta na podstawie wyników badań diagnostycznych, była zatem decyzją słuszną. Zaprezentowane wyniki badań czwórników w pełni potwierdziły prognozę ich rychłej degradacji. Zaproponowano nową konstrukcję czwórnika (rys. 10), która minimalizuje geometryczny koncentrator naprężeń i jest poprawna od strony termodynamicznej. Rozkład naprężeń głównych i naprężeń zredukowanych (obliczonych wg hipotezy Misesa) pochodzących od ciśnienia w części sferycznej nowego czwórnika pokazano na rysunku 11.

## LITERATURA

[1] Effertz P. H., Forchhammer P.: *VGB* 1982, nr 5

- [2] Brunné W., Goss C., Kocańda S. In: Proceedings of the VIII-th International Colloquium Mechanical Fatigue of Metals. Technical University Press, Gdańsk 1986, pp. 73—82
- [3] Brunné W., Kocańda S. In: Proceedings of the 7th Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals. Technical University for Heavy Industry, Miskolc, 1983, 38, pp. 19—36
- [4] Dobosiewicz J. In: Proceedings of 7 Scientific-Technological Conference „Participation of industrial chemistry in increasing the effectiveness of power equipment”. Szczyrk 1998
- [5] Zbroińska-Szczęchura E.: Uszkodzenia wsporników urządzeń separacyjnych walczków. *Energetyka* 1997, nr 3

**Uwaga:** Artykuł stanowi rozwinięcie referatu wygłoszonego przez autora na konferencji „Fatigue Design 1998” w Espoo Finlandia.

penovum

**Prof. dr hab. inż. Stefania Stachura**

UKD 669.14.018

Politechnika Częstochowska  
Instytut Inżynierii Materiałowej

## Zmiany struktury i własności mechanicznych w stalach i staliwach eksploatowanych w podwyższonych temperaturach

Długotrwała eksploatacja w podwyższonych temperaturach elementów ze stali i staliwa Cr-Mo-V i Cr-Mo prowadzi do obniżenia własności wytrzymałościowych i wzrostu kruchości. To niekorzystne pogarszanie się własności przypisuje się zmianie dyspersji i rozmieszczenia węglików oraz segregacji fosforu do granic ziaren [1—12].

Na przykładzie badań elementów rurociągów oraz czwórnika, wykonanych ze stali 12HMF, 13HMF, 10H2M i staliwa L21HMF, eksploatowanych przez 160 000 godzin w temperaturze 535°C, w artykule omówiono zmiany struktury, jakie zachodzą w podwyższonych temperaturach i ich wpływ na własności użytkowe. Składy chemiczne badanych stopów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny badanych stali i staliwa, % wag.

Stal/staliwo	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
12HMF	0,10	0,53	0,25	0,011	0,020	1,07	0,28	0,20
13HMF	0,14	0,59	0,24	0,009	0,025	0,48	0,59	0,25
10H2M	0,09	0,49	0,24	0,021	0,020	1,90	1,04	—
L21HMF	0,18	0,57	0,40	0,027	0,023	1,36	0,67	0,32

### Własności mechaniczne oraz pękanie stali i staliwa po długotrwałej eksploatacji

Podobnie jak w przypadku większości elementów długotrwale pracujących w podwyższonych temperaturach, nie były

znane własności badanych elementów przed eksploatacją, dlatego za stan odniesienia przyjęto wymagania norm dla nowych rur i odlewów. Wymagania te oraz własności, jakimi badane stopy charakteryzowały się po eksploatacji przedstawiono na rysunku 1a. Wynika z niego, że ponad dwudziestoletnia eksploatacja w 535°C nie spowodowała dużego spadku własności wytrzymałościowych. Wszystkie badane stopy spełniają wymagania odnośnie do  $R_m$ ,  $HB$  i  $A_5$  dla nowych elementów,  $R_e$  jest niższe od 25 do 40 MPa od wymaganego minimum (stanowi to ok. 10% wymaganych własności).

Stale 13HMF i 10H2M oraz staliwo L21HMF miały udarność dużo niższą od wymagań dla nowych elementów (rys. 1b). Pękanie próbek charakteryzowało się kruchością i łupliwością (typowymi dla stopów kruchych) z małą ilością pochłanianej energii ze względu na ograniczone odkształcenie plastyczne poprzedzające to pękanie. Ponadto we wszystkich przelomach występowały liczne pęknięcia wtórne przebiegające po granicach ziaren (rys. 2a i b). Obecność międzyziarnistych pęknięć odłamowych dowodzi osłabienia i kruchości granic. Z niską udarnością jest związana temperatura przejścia w stan kruchy, przesunięta do temperatur wyższych od temperatury otoczenia (rys. 3). Niewielki wzrost temperatury powoduje szybki wzrost udarności, i tak udarność stali: 10H2M w temperaturze +35°C, stali 13HMF w +55°C, a staliwa L21HMF w +50°C osiągnęły wartości wymagane dla nowych elementów. Tylko stal 12HMF charakteryzowała się po eksploatacji udarnością znacznie wyższą od wymaganego minimum dla nowych rur (rys. 1b). W stali tej na ok. 20% przelomu (pod karbem) pękanie przebiegało w sposób plastyczny (rys. 2c). Istotną cechą plastycznego rozrywania ma-