

Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz, dr inż. Jerzy Trzeszczyński

Mgr inż. Ewa Zbroińska-Szczuchura, mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

UKD 621.184.7:628.518

Pro Novum — Katowice

## Uszkodzenia komór przegrzewaczy kotłów parowych

Podstawowymi naprężeniami w ściankach komór przegrzewaczy kotłów parowych są naprężenia wywołane działaniem ciśnienia wewnętrznego. Grubość ścianki komór jest określana ze względu na przewidywaną wartość tych naprężeń.

Pod wpływem ciśnienia w ściance rury powstają naprężenia obwodowe, osiowe i promieniowe. Dla grubościennych rur, do których należą komory przegrzewaczy, te trzy składowe naprężenia można obliczyć z następujących wzorów:

- naprężenie obwodowe  $\sigma_t = p \frac{\beta^2 + 1}{\beta_o^2 - 1}$ ,
- naprężenia osiowe  $\sigma_z = p \frac{\beta^2 - 1}{\beta_o^2 - 1} = \text{constans}$ ,
- naprężenia promieniowe  $\sigma_r = -p \frac{\beta^2 - 1}{\beta_o^2 - 1}$ ,

gdzie:

$$\beta = \frac{D_z}{D}$$

$$\beta_o = \frac{D_z}{D_w}$$

$p$  — ciśnienie,

$D_z, D_w, D$  — średnice: zewnętrzna, wewnętrzna i bieżąca.

Naprężenia obwodowe przyjmują maksymalną wartość na powierzchni wewnętrznej, a minimalną na powierzchni zewnętrznej, gdzie są one dwukrotnie większe od osiowych. Naprężenia osiowe są stałe na całej grubości ścianki komory. Naprężenia promieniowe na powierzchni wewnętrznej są równe ciśnieniu, a na powierzchni zewnętrznej zanikają do zera (rys. 1).

Zredukowane naprężenie obwodowe, wg którego jest obliczana grubość ścianki komory, wyraża się następującym wzorem:

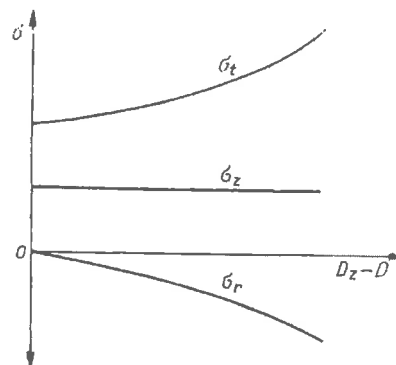
$$\sigma_t = \frac{p(D + g)}{2g}$$

( $g$  — grubość ścianki).

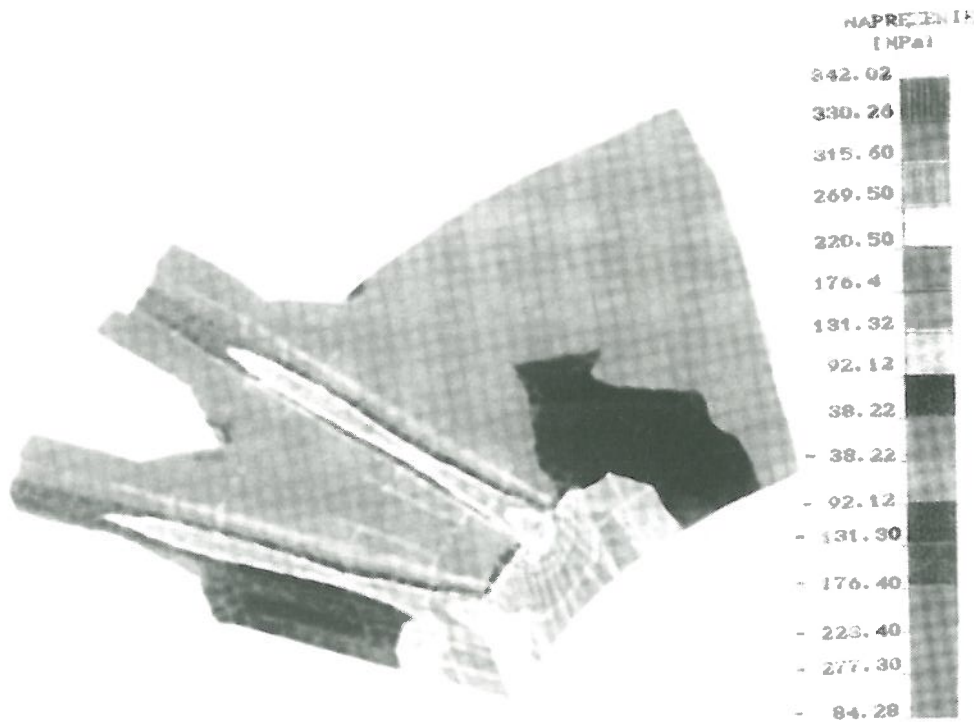
Z przedstawionej analizy naprężeń wynika, że ze względu na działanie ciśnienia wewnętrznego uszkodzenia komór powinny mieć charakter pęknięć podłużnych biorących początek na powierzchni wewnętrznej; spostrzeżenie to potwierdza praktyka (rys. 2). Ponadto, w zależności od konstrukcji i sposobu eksploatacji komory mogą wystąpić w niej naprężenia cieplne wywoływane ograniczeniem możliwości

Rys. 1. Rozkład naprężeń od ciśnienia na grubości ścianki komory

$\sigma_t$  — naprężenia obwodowe  $\sigma_z$  — naprężenia osiowe,  $\sigma_r$  — naprężenia promieniowe,  $D_z$  — średnica zewnętrzna,  $D$  — średnica bieżąca



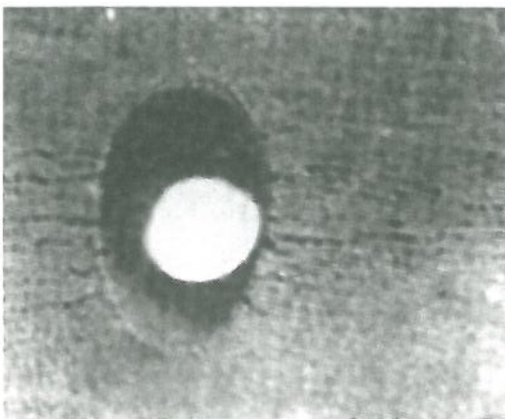
Rys. 2. Typowe pęknięcia międzyotworowe od pelznania



Rys. 3. Rozkład naprężeń cieplnych w ścianie komory przegrzewacza pary świeżej obliczonych za pomocą elementów skończonych (wg firmy Babcock)

swobodnego wydłużania się (rozszerzalności cieplnej). Najczęściej naprężenia cieplne w ścianie komory są wywołane nierównomiernym rozkładem temperatury w kierunkach: osiowym, promieniowym i obwodowym. Powstające w ten sposób naprężenia, zwłaszcza obwodowe, sumują się z obwodowymi od ciśnienia i mogą znacznie przekraczać naprężenia dopuszczalne (rys. 3).

Z doświadczeń eksploatacyjnych wynika, że naprężenia cieplne (obwodowe) są często 2—3-krotnie większe od naprężeń obwodowych od ciśnienia; powodują uszkodzenia typu pełzającego lub zmęczeniowego, a najczęściej obu rodzajów. Uszkodzenia pełzaniowe są z reguły związane ze stałym przyrostem trwałego odkształcenia średnicy, aż do pęknięć właznie (rys. 4), a uszkodzenia zmęczeniowe z inicjacją i propagacją pęknięć bez odkształcenia. Zmęczenie i pełzanie nakładają się, a mechanizm tego nakładania do dzisiaj nie został opisany dokładnym wzorem matematycznym.



Rys. 4. Odkształcenia i pęknięcia otworów wskutek pełzania

Rodzaj naprężeń, a tym samym ich szkodliwość zależą od sposobu eksploatacji komór. Najczęściej uszkodzają się komory wylotowe, które pracują zawsze w wyższych temperaturach niż komory wlotowe, a ponadto w czasie uruchamiania jest wtłaczany do nich kondensat gromadzący się w dolnych częściach węzownic.

Maksymalne naprężenia stałe i zmienne występują z reguły na krawędziach otworów i decydują o powstawaniu uszkodzeń pełzaniowych. W obliczeniach grubości ścianki komór osłabionych otworami uwzględnia się współczynnik wytrzymałości  $z$ , aby naprężenie zredukowane utrzymać na odpowiednim poziomie zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_r = \frac{\rho(D_z - g)}{2gz}$$

Znając współczynnik wytrzymałości  $z$ , który zazwyczaj jest mniejszy od jedności, można obliczyć stosunek naprężeń w części owierconej  $\sigma$  i nie owierconej  $\sigma_r$

$$\frac{\sigma}{\sigma_r} = \frac{1}{z}$$

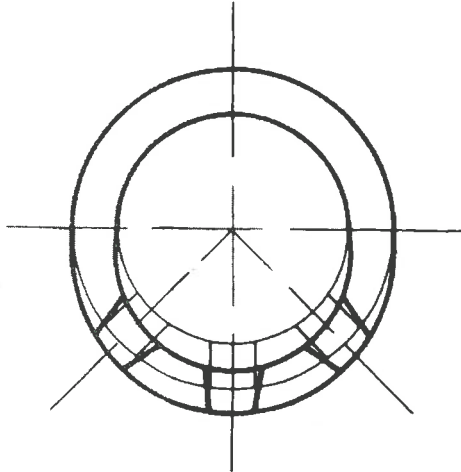
Oprócz tego na krawędziach otworów od strony wewnętrznej występuje koncentracja naprężeń, wg TRD współczynnik tej koncentracji  $u_k$  w zależności od rodzaju króćca może wynosić od 2 do 3. Dlatego komory odkształcają się najbardziej w strefie, gdzie występują otwory.

Dane eksploatacyjne wykazują, że w przypadku pełzania najszybciej ulegają uszkodzeniom owiercone części komór, gdzie z wymienionych względów dochodzi do znacznych odkształceń otworów, a następnie mostków (rys. 5).

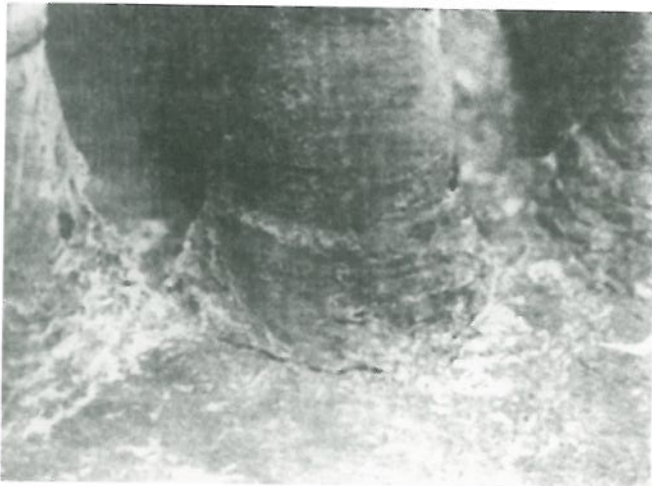
W komorach pracujących w temperaturze ok. 540°C i obliczonych przy uwzględnieniu współczynnika wytrzymałości  $z \approx 0,75$ , szybkość pełzania na mostku jest 5 razy większa niż w części nie owierconej, a na krawędzi otworu 10 razy. Dopuszczalna zmiana średnicy zewnętrznej komór

wykonanych ze stali typu HM wynosi 1,5—2%, natomiast uszkodzenie występuje przy wartości 6—10%. W praktyce wartości te na krawędziach otworów od strony wewnętrznej osiągają 30% i towarzyszą im pęknięcia.

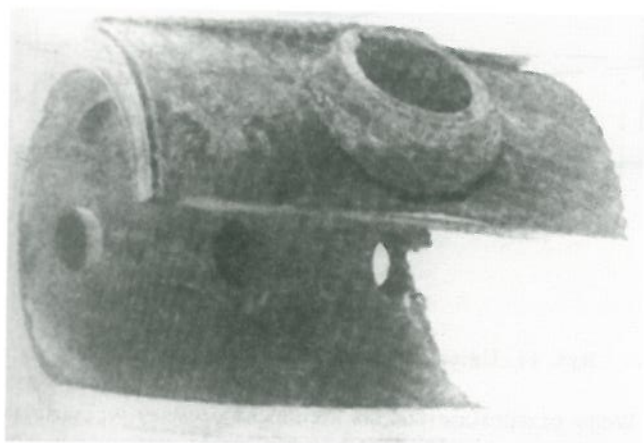
Nieszczelności grubościennych komór biorą początek na powierzchni zewnętrznej w okolicy króćców (rys. 6), tj. w przejściu spoiny króćca w płaszcz, a następnie rozprzestrzeniają się na mostek (rys. 7). Gdy  $D_z/D_w > 1,3$  komory



Rys. 5. Odkształcenia komory w wyniku pełzania



Rys. 6. Pęknięcia na powierzchni zewnętrznej w okolicy króćców wskutek pełzania

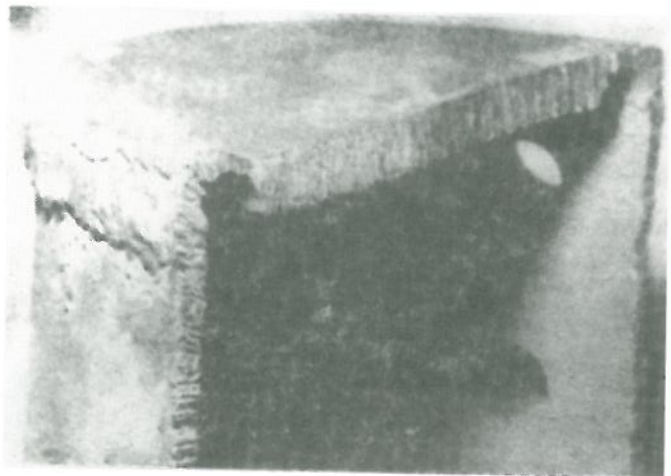


Rys. 7. Pęknięcia na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej mostków będące skutkiem pełzania

nie ulegają lawinowym (eksplozywnym) uszkodzeniom pod wpływem naprężeń statycznych. Można to tłumaczyć spadkiem współczynnika koncentracji naprężeń wzdłuż grubości ścianki. Gdy  $D_z/D_w < 1,3$  inicjacja i propagacja uszkodzeń dotyczy jednocześnie całej grubości; w takim przypadku nie można wykluczyć uszkodzenia lawinowego. Uszkodzenia pełzaniowe komór z odkształceniem bardzo często występują w okolicy spoin obwodowych (rys. 8), zwłaszcza przy denkach z tzw. rowkiem odciążającym (rys. 9).

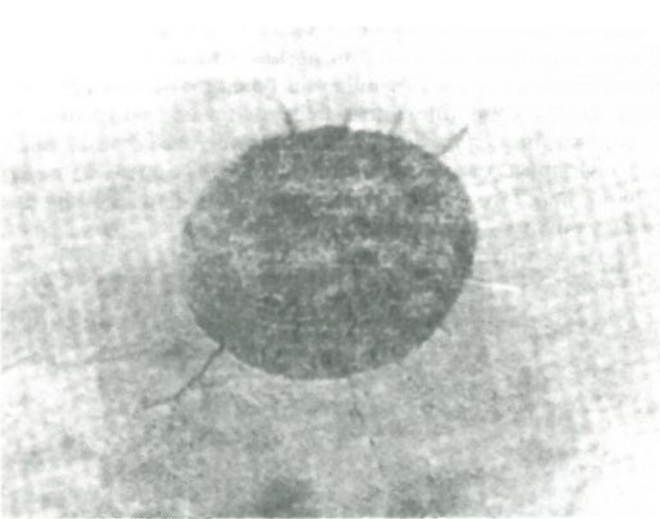


Rys. 8. Pełzaniowa deformacja przekroju w okolicy spoiny



Rys. 9. Pełzaniowe uszkodzenie w okolicy denka

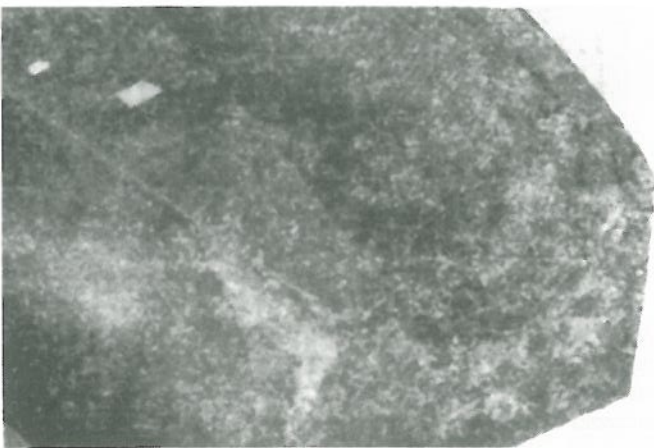
Najczęściej jednak komory ulegają uszkodzeniom zmęczeniowym w okolicy otworów służących do odwadniania, odpowietrzania i do pomiaru ciśnienia. Ich przyczyną są termoszoki wywołane wypływem kondensatu z rurociągów pracujących okresowo (rys. 10) lub omywaniem dolnej tworzącej wodą w przypadku niewłaściwego działania wtrysku. Uszkodzeniom zmęczeniowym często towarzyszą procesy korozyjne i wtedy charakter uszkodzenia różni się od zmęczeniowego (rys. 11) i różne są prędkości propagacji.



Rys. 10. Termoszkowe pęknięcia w okolicy otworów odwodnień



Rys. 11. Termoszkowe pęknięcia w okolicy otworów (schładzacz)



Rys. 12. Uszkodzenie zmęczeniowo-krozyjne wskutek wtłaczania kondensatu (mostek osiowy)

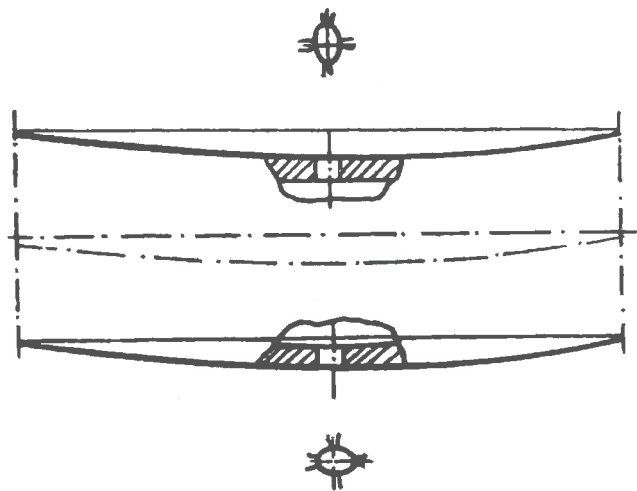
Uszkodzenia zmęczeniowo-korozyjne rozprzestrzeniają się wolniej. Ostatnio wykryto takie uszkodzenia również na mostkach i to obwodowych, w których — jak wiadomo — naprężenia są o połowę mniejsze niż w mostkach osiowych. Przyczyną tych uszkodzeń jest stosunkowo cienki mostek, który na swej krawędzi podczas uruchamiania jest nagle schładzany na całej szerokości, co powoduje chwilowy wzrost naprężeń rozciągających (rys. 12).

W procesie eksploatacji dochodzi często do skrzywienia komór parowych. Jest ono niepożądane ze względu na przekroczenie odkształcalności metalu na zewnętrznym łuku, zwłaszcza w okolicy otworów (wymagania wytrzymałościowe) oraz niemożliwość odwodnienia komory (wymagania technologiczne). Bezpośrednią przyczyną ugięcia komory są naprężenia cieplne powstające w wyniku odkształcenia jej ścianek wskutek dostatecznie dużej różnicy temperatury metalu i gromadzącej się wody. Naprężenia te przekraczają granicę plastyczności metalu, a po wyrównaniu temperatur w materiale komory pozostają odkształcenia trwałe i ugięcia.

Obecność otworów w ścianie komory powoduje wzrost ugięcia, zwłaszcza gdy znajdują się one w strefie kontaktu z wodą. Otwory zwiększają objętość metalu narażonego na schładzanie, zmniejszają moment bezwładności przekroju i są koncentratorami naprężeń i odkształceń.

Analiza procesu odkształcania komory poddanej schładzaniu w części przekroju poprzecznego potwierdza możliwość nie ograniczonego wzrostu jednostronnego trwałego odkształcenia. Uzasadnia to konieczność ustalenia granicznego, dopuszczalnego ugięcia według warunków ograniczenia odkształcenia.

Nagłe zmiany temperatury są jednocześnie przyczyną powstawania pęknięć wskutek zmęczenia cieplnego powierzchni wewnętrznej. Krawędzie otworów znajdujących się w strefie działania maksymalnych różnic temperatur w ugiętych komorach pękają najwcześniej w miejscach przecięcia się osi pionowej z podłużną osią komory (rys. 13). Pęknięcia w tych miejscach osiągają dużą głębokość. Z kolei pęknięcia w postaci siatki oraz pęknięcia między otworami wzdłuż osi komory są zwykle płytkie.



Rys. 13. Ugięcie komory i uszkodzenie otworów

Woda przedostaje się do komór najczęściej w czasie zatrzymywania i uruchamiania kotła przez wyrzucanie korków wodnych z nie odwadnianych węzłownic przegrzewacza lub rurociągów komunikacyjnych.

Komory przegrzewaczy pary poddaje się najczęściej:

- oględzinom,
- badaniom endoskopowym,
- badaniom magnetycznym,
- pomiarom średnic otworów i denek,
- pomiarom prostoliniowości komory,
- badaniom ultradźwiękowym,
- badaniom struktury i twardości,
- pomiarom grubości ścianki.

### Podsumowanie

Komory przegrzewaczy kotłów parowych pracują w warunkach pełzania i zmęczenia cieplnego. W wyniku takich warunków pracy dochodzi do zniszczenia komór. Procesy pełzaniowe powodują nadmierną deformację w strefie otworów i mostków i są to uszkodzenia nienaprawialne. Natomiast w wyniku działania naprężeń zmiennych dochodzi

do pęknięć krawędzi otworów i ugięcia komór. Te uszkodzenia są naprawialne, ale tylko do pewnych granic (zależy to od rodzaju i rozmiarów uszkodzenia), a ich naprawa musi być poprzedzona obliczeniami wytrzymałościowymi. Do oceny stanu komór przegrzewaczy konieczne są: pomiary deformacji otworów i prędkości odkształcenia, przeliczenia wytrzymałościowe oparte na wymiarach rzeczywistych (z uwzględnieniem współczynników koncentracji naprężeń), badania endoskopowe wewnętrznej ścianki komór oraz badania strukturalne, które jednak przy ocenie komór są jedynie uzupełnieniem, a to ze względu na niemożliwość pobrania próbki z miejsc najbardziej wyężonych i odkształconych. Z tego też powodu bardziej miarodajne są pomiary odkształceń otworów niż średnic zewnętrznych.

proNovum

Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz, dr Wojciech Brunné

Pro Novum — Katowice

UKD 621.311:621.644.2.004.58

## Ocena stanu technicznego głównych rurociągów parowych bloków energetycznych

Bloki energetyczne w krajowych elektrowniach osiągają lub przekroczyły obliczeniowy czas pracy, tj. 100 tys. h. Możliwość budowy nowych bloków czy nawet kompleksowego zmodernizowania eksploatowanych jest i będzie w najbliższych latach bardzo ograniczona. Główne rurociągi parowe stanowią integralny element bloku energetycznego, toteż wpływają na jego niezawodność i dalszą przydatność eksploatacyjną. Łączą kocioł z turbiną, a więc w przypadku awarii (rys. 1) stwarzają największe zagrożenie dla obsługi i urządzeń technicznych bloku. Eksploatacja głównych rurociągów parowych po upływie okresu projektowego — warunkująca dalszą pracę większości krajowych bloków energetycznych — jest możliwa pod warunkiem, że będzie bezpieczna [1, 2, 3]. Podjęcie takiej decyzji musi poprzedzać ocena stanu technicznego tych rurociągów, oparta na:

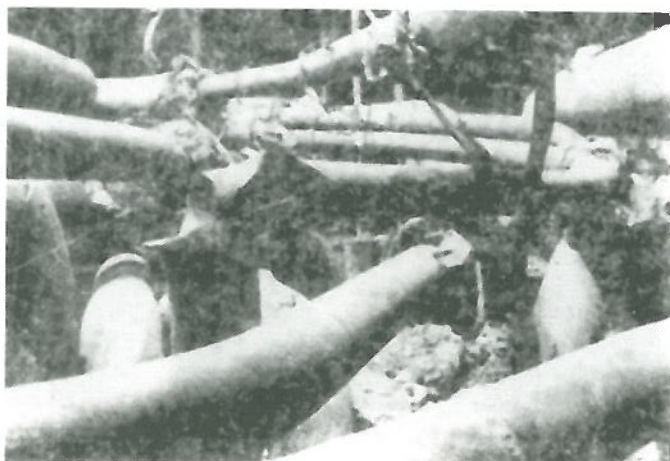
- porównaniu stanu istniejącego z dokumentacją (inwentaryzacja rurociągu),
- analizie warunków eksploatacji,
- analizie wykrytych uszkodzeń i sposobu ich naprawy,
- analizie wyników badań i pomiarów diagnostycznych zarówno aktualnych jak i dotychczasowych,
- sprawdzeniu trasy rurociągów (spady), przeglądzie i pomiarze reakcji zamocowań,
- obliczeniach konstrukcyjnych,
- obliczeniu stopnia wyczerpania trwałości materiału (ocena stanu obecnego),
- prognozie dalszej pracy.

### Inwentaryzacja rurociągu

Podczas wieloletniej eksploatacji głównych rurociągów parowych mogą być wprowadzane rozwiązania techniczne poszczególnych węzłów konstrukcyjnych różniące się od przewidywanych w pierwotnej dokumentacji. Zmiany te nie zawsze są odnotowywane w dokumentacji rurociągu. Ponadto dokumentacja, jaką dysponuje elektrownia jest często niepełna. Tymczasem, aby obliczenia konstrukcyjne były możliwie dokładne należy dysponować pełną inwentaryzacją głównych rurociągów parowych, a tam gdzie jest to konieczne — odtworzyć dokumentację z natury.

### Analiza warunków eksploatacji

Pełna i możliwie dokładna ocena stanu technicznego głównych rurociągów parowych wymaga wnikliwej analizy warunków eksploatacji bloków energetycznych. Stosunkowo najłatwiejszą do uzyskania i obciążoną najmniejszym błędem jest informacja o łącznym czasie pracy i liczbie uruchomień (choć nie zawsze z podziałem na uruchomienia



Rys. 1. Przykład awarii głównych rurociągów parowych