



Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

Pro Novum — Katowice

UKD 621.313.52:620.179.1

Badania nieniszczące wałów wirników generatorów

Wał wirnika generatora — charakteryzujący się skomplikowanymi kształtami i dużą masą — przenosi podczas eksploatacji naprężenia stałe i zmienne. Naprężenia te mogą spowodować naruszenie całości materiału, które w najlepszym przypadku może uczynić wał niezdatnym do dalszego użytkowania, a w najgorszym — doprowadzić do zniszczenia całego turbozespołu. Nagłe rozerwanie wału generatora zdarza się rzadko. Najczęściej uszkodzenia rozwijają się stopniowo, toteż można je wykryć kontrolując w sposób ciągły stan dynamiczny wirnika oraz wykonując okresowo odpowiednie badania i przeglądy.

Zakres, miejsca i metody badań zależą od czasu pracy i liczby uruchomień wirnika oraz własności mechanicznych stali użytej do wyrobu wirnika.

Warunki pracy wału wirnika

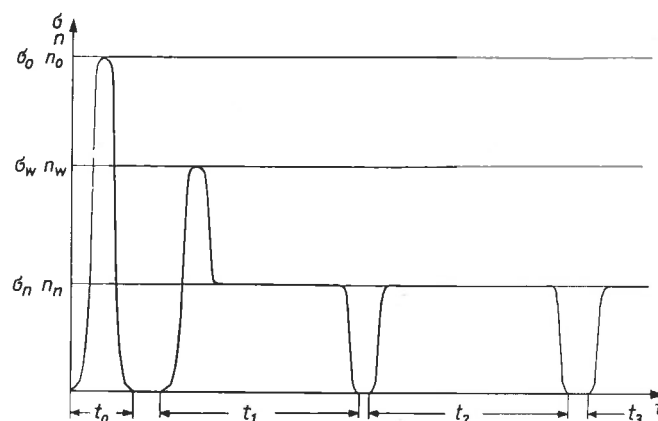
Do budowy wałów wirników generatorów używa się niskostopowych stali ferrytyczno-perlitycznych, najczęściej typu CrNiMo w stanie ulepszonym cieplnie. Podczas eksploatacji w materiale wirnika nie zachodzą zmiany strukturalne, z uwagi na niską temperaturę pracy. Ale po wieloletniej pracy wału, wskutek działania naprężeń stałych i zmiennych mogą powstać pęknięcia zainicjowane na koncentracjach naprężeń (technologicznych lub konstrukcyjnych). W przeważającej części wału dominują naprężenia kinetostatyczne wywołane działaniem siły odśrodkowej. Pozostałe naprężenia — od ciężaru, sił elektromagnetycznych, momentu obrotowego itp. — są małe i można je w obliczeniach pominąć. Ponieważ podczas uruchamiania generatora naprężenia wraz z prędkością obrotową narastają do wartości maksymalnych, w przypadku częstszych uruchomień można zatem mówić o pracy wału w warunkach zmęczenia małowyciskowego (rys. 1).

Każdemu uruchomieniu towarzyszy wzrost naprężeń kinetostatycznych, czyli każde uruchomienie można traktować jako pulsację naprężenia. Najmniejsze zmiany naprężenia oczywiście odpowiadają normalnym uruchomieniom (σ_n) bez próby wytrząsków (σ_w). Największa zmiana naprężenia σ_o występuje podczas odwirowywania nowego wirnika; jest to próba jednorazowa. Dlatego przy obliczeniu ich stopnia wyczerpania nie uwzględnia się naprężenia maksymalnego σ_o , lecz naprężenia w stanie ustalonym i dla próby wytrząsków oraz liczbę uruchomień i liczbę prób wytrząsków.

Naprężenia zmienne zależą od sposobu eksploatacji i mają charakter odzerowo-tętniący-pulsacyjny. Naprężenia zmienne charakteryzuje współczynnik asymetrii $R = \sigma_{\min.}/\sigma_{\max.}$ i naprężenie średnie $\sigma_m = (\sigma_{\max.} + \sigma_{\min.})/2$. Dla pulsacji $\sigma_{\min.} = 0$ i również współczynnik asymetrii $R = 0$.

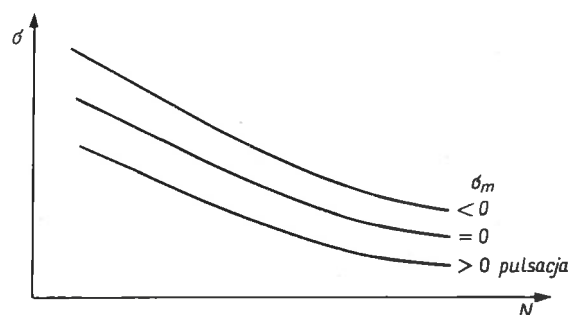
Wytrzymałość zmęczeniowa wału wirnika zależy od:

- charakteru naprężenia (rys. 2); element pracujący w warunkach naprężenia pulsacyjnego ma najmniejszą odporność na zmęczenie;



Rys. 1. Warunki pracy wału wirnika

n_n — znamionowa prędkość obrotowa (3000 obr./min)
 n_w — próbną prędkość obrotową — sprawdzenie wytrząsków (3300 obr./min),
 n_o — prędkość obrotowa odwirowywania wirnika nowego (3600 obr./min)



Rys. 2. Krzywe wytrzymałości stali na zmęczenie
 σ — naprężenie, σ_m — naprężenie średnie, N — liczba cykli do uszkodzenia

- warunków eksploatacji, temperatury, środowiska; ze wzrostem temperatury obniża się odporność stali na zmęczenie; podobnie wpływa obecność środowiska agresywnego;
- składu chemicznego i stanu materiału (obróbka cieplna); stale o wysokiej granicy plastyczności są z reguły mało odporne na zmęczenie, zwłaszcza małowyciskowe;
- kształtu geometrycznego; liczne, nagłe zmiany kształtu (wpusty, otwory, wady technologiczne) stają się koncentratorami naprężenia i mogą być inicjatorami pęknięć.

Należy zwrócić uwagę na to, że siły odśrodkowe i powstające od nich naprężenia są proporcjonalne do kwadratu prędkości obrotowej. Jeżeli robocza prędkość obrotowa wynosi 3000 obr./min, to mechaniczne obliczenia wytrzymałości wału wykonuje się dla prędkości o 30% większej, tj. równej 3900 obr./min. Z taką prędkością wirnik obraca się rzadko, właściwie tylko podczas badań prototypowych wykonywanych na specjalnych stanowiskach u dostawcy. Przekroczenie tej prędkości w eksploatacji jest zwykle jednoznaczne z uszkodzeniem wirnika.

Wał generatora przenosi również naprężenia od zginania spowodowanego ciężarem własnym oraz naprężenia od momentu skręcającego. Wartości tych naprężeń nie są duże, ale należy pamiętać, że naprężenia te mają charakter naprzemienny. Naprężenia zginające rosną znacznie w czasie przechodzenia przez krytyczną prędkość obrotową, zwłaszcza jeżeli wirnik jest nieodpowiednio wyważony lub ekscentryczny.

Naprężenia zginające sumują się z naprężeniami skręcającymi, które podczas normalnej eksploatacji w najmniejszym przekroju wirnika rzadko przekraczają 30 MPa. Naprężenia od skręcania wzrastają jednak istotnie podczas zwarcia generatora. Można przypuszczać, że naprężenia te wzrastają z taką samą szybkością jak prąd zwarcia. Zakłada się, że przy zwarciu na zaciskach maszyny moment na wale generatora od strony turbiny zwiększa się — w stosunku do normalnego — dziesięciokrotnie.

Przy założeniu, że momenty bezwładności wirników turbiny i generatora są w przybliżeniu równe, w warunkach zwarcia:

$$M_s = \frac{M_z - M_n}{2} + M_n = 5,5M_n,$$

M_n — moment podczas normalnej pracy, M_z — $10 \cdot M_n$ — moment w czasie zwarcia.

Moment ten działa na czopie wału od strony turbiny i powoduje pięciokrotny wzrost naprężeń. Wobec nagłego, udarowego charakteru mogą one w razie zmniejszonej plastyczności wału spowodować powstanie mikronieciągłości w materiale.

Podczas przechodzenia wirnika przez krytyczną prędkość obrotową amplituda drgań zginających znacznie wzrasta. Wielu autorów przypuszcza, że w tym czasie dynamiczne naprężenia od zginania wzrastają 5- lub 6-krotnie (w idealnie wyważonym wirniku), w porównaniu z naprężeniami przy statycznym ugięciu. Może to mieć istotny wpływ na rozwijanie się uszkodzeń w tych miejscach, w których zostanie przekroczona granica plastyczności materiału, tj. w okolicy karbów konstrukcyjnych lub strukturalnych.

Istotnymi elementami konstrukcji, ujemnie wpływającymi na warunki pracy wału, są karby konstrukcyjne. Powodują one wzrost współczynnika koncentracji naprężeń, który zwiększa

naprężenia miejscowe (zwłaszcza zginające), co w połączeniu ze wzrostem bezwzględnych wartości tych naprężeń (podczas przechodzenia przez krytyczne prędkości obrotowe) prowadzi do zjawisk bardzo niepożądanych.

Współczynnik koncentracji — jak wiadomo — zależy od charakteru odkształcenia (rozciąganie, ściskanie), granicy plastyczności i pewnych wymiarów geometrycznych. I tak, np.:

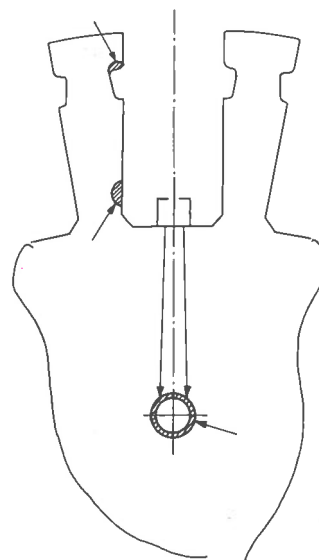
- tuleja założona skurczowo na wał (pierścienie centrujące) daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 2,8 - 3,2$;
- kołpak nałożony na powierzchnię osadczą w okolicy dużych zębów, wskutek przemieszczenia się daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 3,8 - 5,0$;
- wytoczenie obwodowe, w zależności od stosunku średnicy wytoczenia do średnicy pierwotnej daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 2,5 - 3,0$, a w kanałach mających na celu uelastycznienie bezki — do 8,0;
- gwintowany otwór w wale, wywiercony w kierunku promieniowym daje współczynnik koncentracji $\beta_k = 5,0 - 6,0$;
- zmiana średnicy (stopniowanie wału) w zależności od stosunku średnic daje $\beta_k = 1,5 - 4,0$.

Warto zwrócić uwagę, że ze wzrostem granicy plastyczności stali (ulepszone ciepnie stale stopowe) współczynnik koncentracji znacznie wzrasta.

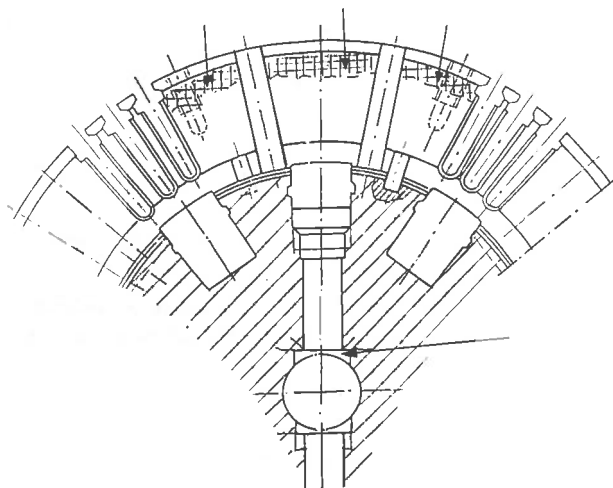
Okresowe przeglądy i badania

Okresowe przeglądy i badania eksploatowanych wałów oprócz zapobiegania totalnym awariom mają na celu rozpoznanie przyczyn uszkodzeń i umożliwienie podjęcia środków zaradczych. Obszary podlegające przeglądom i badaniom powinny objąć miejsca, w których podczas pracy występują maksymalne naprężenia lub jego koncentracja; są to:

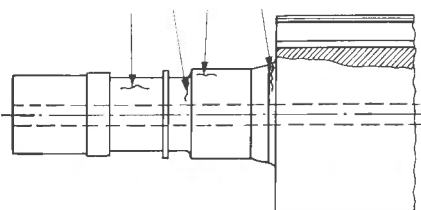
- otwór centralny (rys. 3),
- rowki obwodowe na bezce,
- żłobki podłużne (rys. 3),
- osadzenie kołpaków pierścieni mocujących (rys. 4),
- przejścia zmiany średnic (rys. 5),



Rys. 3. Miejsca występowania pęknięć w żłobkach i na otworze centralnym oraz sposób badania ultradźwiękowego objętości metalu w okolicy otworu centralnego



Rys. 4. Miejsca występowania pęknięć na dużych zębach pod osadzeniem kołpaków oraz na różnego rodzaju otworach



Rys. 5. Miejsca występowania pęknięć na nagłych zmianach średnic oraz na powierzchniach czopów łożyskowych i uszczelnieniach

- wpusty, otwory przewodowe, otwory gwintowane (rys. 4),
- miejsca współpracy elementów wirujących z nieruchomymi (czopy, uszczelnianie itp. — rys. 5).

Badania otworu centralnego

Należy je wykonywać po 100 000–150 000 h pracy lub po przekroczeniu 500 uruchomień. Badanie musi odpowiadać aktualnej wiedzy technicznej i ma za zadanie:

- stwierdzenie pęknięć spowodowanych pracą urządzeń,
- znalezienie wad, które nie mogły być stwierdzone w czasie produkcji z powodu ówczesnego poziomu wiedzy i obowiązujących wtedy norm badawczych.

Do badania otwór powinien być odpowiednio przygotowany, najlepiej przez honowanie. Badania wykonuje się metodą kompleksową, która polega na:

- przeglądzie całej powierzchni otworu przy użyciu endoskopu,
- sprawdzeniu powierzchni otworu na obecność pęknięć metodami defektoskopii barwnej lub prądami wirowymi,
- sprawdzeniu objętości metalu przynajmniej w rejonie otworu centralnego metodą ultradźwiękową „borosonic” lub przy wywojonym wirniku (poprzez dna rowków uzwojeniowych) czujnikami emitującymi fale podłużne i poprzeczne; jest to metoda tańsza od metody „borosonic”; ocenę wielkości wad należy wykonać metodą „OWR”.

Wszelkie pęknięcia wykryte na powierzchni otworu powinny być usunięte przez wytoczenie. Wymiary wad technologicznych mogące pozostać bez usuwania ustala się na pod-

stawie dokonanych dla danego wału obliczeń (mechanika pęknięcia kruchego). W przypadku usuwania wad lub pęknięć zwiększona średnica otworu centralnego w miejscu wytoczenia d' powinna spełniać warunek $d' \leq 1,4d$ (d — pierwotna średnica otworu).

Badania rowków obwodowych

Rowki obwodowe znajdujące się na beczce powinny być przeglądane po każdym wyjęciu wirnika i po oczyszczeniu papierem ściernym poddane badaniom za pomocą defektoskopii barwnej. W celu łatwiejszego wykrycia pęknięć obwodowych z reguły rozpoczynających się na dnie rowka wirnik należy ustawić na kozłach tak, aby płaszczyzna dużych zębów znalazła się w położeniu pionowym. Miejsca podejrzane należy oglądać i badać od dołu. Następnie wirnik należy obracać o 90° i powtarzać operację. Wykryte pęknięcia należy usunąć przez przetoczenie wirnika. W tym celu niestety należy usunąć z niego uzwojenie. Głębokość przetoczenia nie powinna przekraczać ok. 3% średnicy beczki wirnika. Podczas przetoczenia rowek należy poszerzyć w taki sposób, aby dno rowka można było zaokrąglić promieniem $r = 10$ mm.

Badania żłobków podłużnych

Należy je wykonać w czasie przewijania wirnika. Pęknięcia występują z reguły na dnie żłobka w miejscu przejścia zębów w wał oraz w górnej części zębów we wrębie służącym do mocowania klinów. Badanie wykonuje się metodą defektoskopii barwnej, ze względu jednak na trudny dostęp i głębokość rowka oględziny należy wykonać za pomocą endoskopu. W zasadzie niedopuszcza się obecności pęknięć na zębach. O przydatności do eksploatacji tak uszkodzonego wirnika powinien wypowiedzieć się dostawca.

Osadzenia kołpaków pierścieni centrujących

Miejsca osadzeń powinny być badane po każdym 100 000 h pracy wirnika. Do badań należy zdjąć kołpaki. Pęknięcia występują w miejscu osadzenia kołpaków na beczce w rejonie dużych zębów. Mają one charakter obwodowy i niekiedy są bardzo głębokie, tj. sięgają kilkadziesiątu milimetrów. Pęknięcia widać już w czasie oględzin wirnika. W celu dokładniejszej oceny wymiarów pęknięć należy wykonać badania penetracyjne; podobnie w miejscu osadzenia pierścienia centrującego. W przypadku wykrycia pęknięć wirnik można dopuścić do dalszej eksploatacji pod warunkiem usunięcia przyczyny uszkodzenia, powiększenia osadzenia przez przetoczenie i przesunięcia kołpaka w kierunku beczki oraz przetoczenia osadzenia pierścienia centrującego.

Badanie przejścia zmiany średnic

W przejściach z jednej średnicy wału w drugą występują pęknięcia obwodowe po ok. 100 000 h pracy. Najczęściej pęknięcia te umiejscawiają się w przejściu beczki w wał. Po zdjęciu kołpaka i dokonaniu oględzin miejsca występowania

pęknięć podaje się badaniom magnetycznym. W przypadku wykrycia pęknięć zaleca się ich usuwanie przez przetoczenie. Dopuszczalna głębokość przetoczenia nie powinna przekraczać głębokości równej 2% średnicy wału w tym miejscu.

Badania wpustów otworów przewodowych i gwintowanych

Poddaje się je przeglądowi po zdjęciu kołpaków, wentylatorów i wyjęciu przewodów. W miejscach tych pęknięcia występują na krawędziach i dnach otworów. Badania polegają na zastosowaniu metody defektoskopii barwnej i obserwacji za pomocą endoskopu. Wykryte pęknięcia usuwa się przez rozwiercanie otworów. Dopuszczalne powiększenia rozwiercanej średnicy są zazwyczaj bardzo duże, zależą jednak od jej wymiarów początkowych. Na przykład otwory o średnicy rzędu 100 mm mogą być powiększone o ok. 10% na stronę; mniejsze średnice otworów można powiększyć jeszcze bardziej.

Badania czopów łożyskowych i miejsc pod uszczelnieniami

Podczas każdego remontu turbosespołu związanego z wyjęciem wirnika generatora należy dokonać przeglądu czopów i miejsc współpracujących z uszczelnieniami. W miejscach tych bardzo często występują pęknięcia obwodowe lub promieniowe, zwłaszcza na czopach utwardzonych przez zgniot (śrutowanie, rolkowanie itp.). Po oględzinach miejsca te należy poddać badaniom przy użyciu defektoskopii barwnej lub fluorescencyjnej. Wykryte pęknięcia można usunąć przez przeszlifowanie lub w przypadku większej głębokości — przez przetoczenie. Dopuszczalne zmniejszenie średnicy po przetoczeniu nie powinno przekraczać 1–2 mm na stronę. W przypadku większych głębokości należy zasięgnąć opinii dostawcy.

Należy pamiętać, że ze względu na kształt i konstrukcję badanie wirnika jest operacją bardzo trudną i powinno być wykonywane przez ekipę o dużym doświadczeniu. Wirnika, w którym wykryto pęknięcia nie wolno dopuszczać do dalszej eksploatacji. O ewentualnej naprawie i dalszej przydatności wału do pracy decydować może tylko zespół specjalistów, w skład którego powinni wejść: technolog, konstruktor, użytkownik oraz specjaliści z dziedziny badań nieniszczących i inżynierii materiałowej.

Z każdego badania należy sporządzać protokół, który powinien być przechowywany u użytkownika.

Należy podkreślić, że badania profilaktyczne dają pozytywne wyniki tylko wtedy, gdy są wykonywane systematycznie i — oczywiście — odpowiednio opracowanymi i sprawdzonymi metodami. Każdy nowy rodzaj badania powinien być opracowywany na podstawie głębokiej analizy zaistniałego lub mogącego wystąpić uszkodzenia.

Tabela 1

Okresy i metody badań wałów wirników generatorów

Miejsca badań	Metoda badań				
	„borosonic”	endoskopowa	defektoskopia barwna	ultradźwiękowa	prądami wirowymi
Otwór centralny	po przekroczeniu 100 000—150 000 h				
Rowki centralne	—	—	po każdym wyjęciu wirnika	—	—
Żłobki podłużne	—	—	podczas przewijania wirnika	—	—
Osadzenia kołpaków i pierścieni mocujących	—	—	nie rzadziej niż po każdym 100 000 h	—	—
Przejścia średnic	—	—	nie rzadziej niż po 100 000 h	—	—
Wpusty, otwory	—	—	nie rzadziej niż po 100 000 h	—	—
Czopy i miejsca pod uszczelnieniami	—	—	po każdym wyjęciu wirnika	—	—

Wnioski

1. Konstrukcja i warunki pracy wałów wirników generatorów sprzyjają powstawaniu pęknięć. Pęknięcia te — jeżeli nie zostaną wykryte — mogą spowodować niebezpieczną awarię turbosespołu.

2. W celu zwiększenia niezawodności pracy wałów wirników generatorów należy poddawać je badaniom okresowym, a ponadto — w razie powstania nie wyjaśnionych, nadmiernych drgań — badaniom nadzwyczajnym.

LITERATURA

- [1] Mirenburg Ł. A.: Remont rotorów turbiniowych generatorów w stacjonarnych ustojach. Gosudarstwennoje Energeticzeskije Izdatielstwo, Moskwa 1959
- [2] Spencer R. C., Timo D. P.: Starting at loading of large steam turbines. Pace Am. Power Conf., Vpl. 36, Chicago III, 1974
- [3] *Energy International* V. 14, No 13, 1977
- [4] *Electrical Times* No 4443, 1977
- [5] *The Enginner* V. 246, No 6378, 1978
- [6] Kudriawcew I. W., Szokow N. A.: Analiz szluczajew rozruszenia wałów rotorów krupnych turbogeneratorów. *Energomaszynostrojienije* nr 11, 1980



10 lat Pro Novum



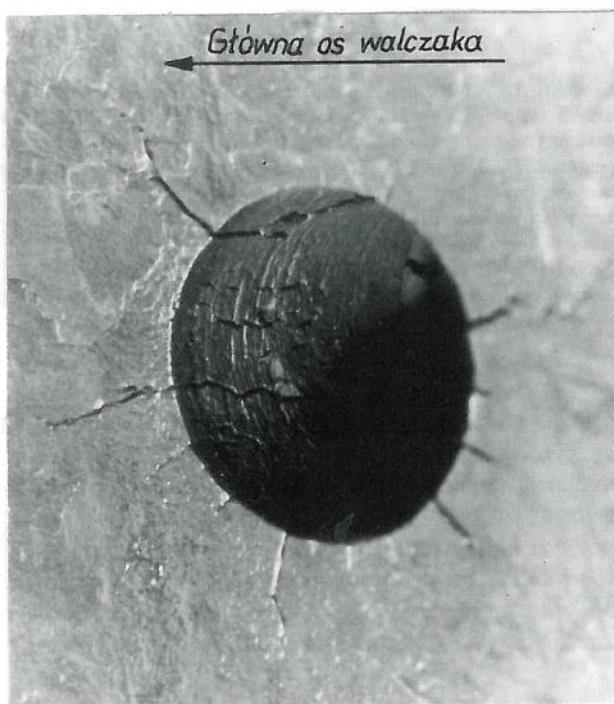
Mgr inż. Ewa Zbroińska-Szczuchura

Pro Novum — Katowice

UKD 621.182:620.179.1

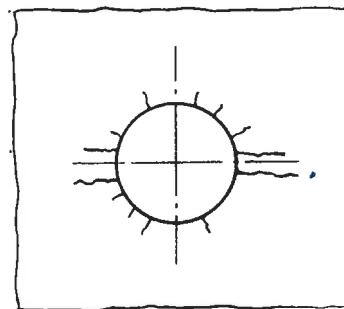
Pęknięcia „termoszokowe” niektórych otworów walczaków kotłów wysokoprężnych

Nieniszczące badania wewnętrznej powierzchni walczaków ujawniły bardzo częste występowanie pęknięć na krawędziach otworów pod króćce armatury (odwodnienia, odpowietrzenia, wodowskazy, odsalania, dozowania fosforanów, zrzut awaryjny, pomiar ciśnienia, recyrkulacja itp.). Pęknięcia te mają tzw. słoneczkowy charakter, tzn. na wewnętrznej powierzchni walczaka są umiejscowione promieniście w stosunku do obwodu otworu (rys. 1), a na tworzącej otworu przebiegają równoległe do jego osi. Długość pęknięć na ściance walczaka w jego osi głównej bywa często większa od długości pęknięć pozostałych (rys. 2). Z reguły pęknięcia na tworzącej otworu są dłuższe od pęknięć na ściance walczaka, a ponadto sporadycznie mogą one występować w postaci siatki. Badania metalograficzne próbek metalu wyciętych z krawędzi porażonych otworów wykazują, że tego typu uszkodzenia rozprzestrzeniają się wewnątrz ziarna i mają postać klinokształtnych ubytków (rys. 3) wypełnionych produktami korozji i wysepkami zdrowego metalu.



Rys. 1. Uszkodzenie otworu do pomiaru ciśnienia (pow. 5x)

Bezpośrednią przyczyną tego rodzaju uszkodzeń jest zmęczenie korozyjne [1] wywołane udarem cieplnym, tj. zjawiskiem nagrzewania (schładzania) przy skokowej zmianie temperatury czynnika. Udar cieplny (termoszok) występuje wówczas, gdy współczynnik przejmowania ciepła między czynnikiem a elementem $\alpha \rightarrow \infty$. Wtedy ogrzewane (schładzane) włókna metalu ścianki osiągną temperaturę czynnika zanim kolejne warstwy zdążą zmienić swą temperaturę. Z upływem czasu temperatura w ściance wyrównuje się. Przy idealnym udarze cieplnym różnica temperatury między warstwą schładzaną a resztą materiału elementu osiąga wartość $\Delta \Theta = \Delta t$ (Θ — temperatura ścianki, t — temperatura czynnika).



Rys. 2. Typowy rozkład pęknięć przyotworowych (pęknięcia dłuższe — równoległe do głównej osi walczaka)

Mechanizm udaru cieplnego na otworach armatury walczaka można wytłumaczyć następująco:

- rurociągi armatury pracują z reguły okresowo i posiadają odcięcia od pozostałych urządzeń (rozprężacze, manometry, zbiorniki fosforanów itp.) w miejscach oddalonych od walczaka;
- w okresach, kiedy nie ma przepływu występuje znaczne schłodzenie zawartego w nich czynnika (wody kotłowej);
- na skutek spadku ciśnienia w walczaku lub rozpoczęcia dozowania chemikaliów chłodny czynnik przedostaje się do walczaka; podobnie na skutek zaburzeń w stacjonarnych warunkach pracy kotła woda z rurociągów urządzeń pomocniczych — o temperaturze niższej od temperatury nasycenia — wypływając z otworu schładza ściankę walczaka wzdłuż tworzącej otworu i na krawędzi; powstają w tym czasie znacz-



Rys. 3. Typowe pęknięcia w postaci klina wypełnionego produktami korozji (pow. 100x)

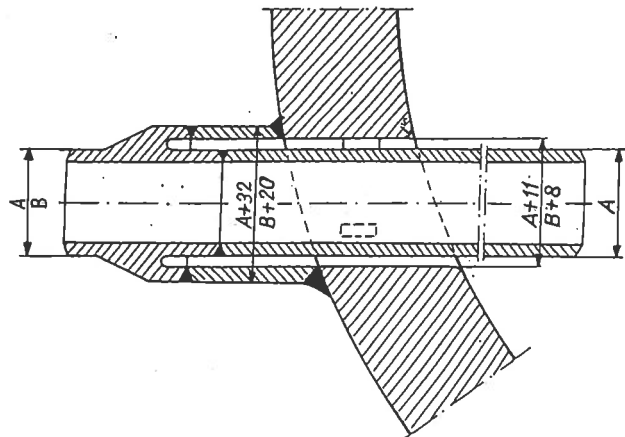
ne naprężenia zmienne przekraczające niekiedy wielokrotnie granicę plastyczności metalu;

- powstawaniu i rozwojowi uszkodzeń towarzyszą procesy korozyjne; również ważnym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu tego rodzaju pęknięć jest obecność koncentratora, jakim jest karb geometryczny (krawędź otworu).

Usuwanie objawów przez szlifowanie i naprawa przez spawanie wykrytych uszkodzeń nie zapobiegają ponownemu pojawieniu się pęknięć. W przypadku wykrycia tego rodzaju

uszkodzeń jedynym skutecznym środkiem jest stosowanie króćców o odpowiedniej konstrukcji z koszulką ochronną, chroniącą ściankę walczaka przed uderzeniem cieplnym (rys. 4).

Podobne uszkodzenia mogą wystąpić na komorach przegrzewaczy, kadłubach turbin i rurociągach parowych w rejonie otworów odpowietrzeń, odwodnień oraz innych elementów pracujących okresowo.



Rys. 4. Właściwa konstrukcja króćca kielichowego z osłoną antyszokową

LITERATURA

- [1] Zbroińska-Szczechura E.: Uszkodzenia wsporników urządzeń separacyjnych walczaków. *Energetyka* 1997, nr 3
- [2] Cwynar L.: Rozruch kotłów parowych. WNT, Warszawa 1989
- [3] Dobosiewicz J.: Uszkodzenia rurociągów odprowadzających parę do zaworów bezpieczeństwa. *Energetyka* 1980, nr 10

proNovum



Dr Wojciech Brunné

Pro Novum — Katowice

UKD 621.644:621.182

Propozycje zmian zamocowań rurociągów wysokopięnych kotłów OP-650

Wysokopięne rurociągi pary i wody w elektrowniach i elektrociepłowniach, z racji parametrów transportowanego czynnika oraz obszaru zabudowy, stanowią poważne, poten-

cjalne zagrożenie dla obsługi [1]. Na bezpieczną pracę rurociągów ma wpływ kilka głównych czynników, które można podzielić na dwie grupy:

1) odpowiedni projekt i jego realizacja (budowa):

- właściwy dobór średnicy rury, grubości jej ścianki i materiału,
- optymalny dobór trasy rurociągu,
- określenie wartości przemieszczeń cieplnych rurociągu w miejscach zabudowy zamocowań,
- dobór zamocowań do warunków pracy rurociągu: udźwig, zakres przemieszczeń roboczych, możliwość regulacji podczas eksploatacji;

2) właściwa eksploatacja:

- funkcjonujący (sprawny) układ odwodnień,
- okresowe przeglądy stanu zamocowań,
- konserwacja zamocowań.

W artykule omówiono wymienione zagadnienia, ze szczególnym uwzględnieniem poprawności doboru zamocowań do warunków przyszłej eksploatacji rurociągu, co w konsekwencji określa warunki pracy zamocowań.

Główne zasady doboru zamocowań

Poprawnie dobrany system zamocowań rurociągów wysokoprężnych powinien spełniać następujące wymagania:

- ▶ nie może wprowadzać dodatkowych naprężeń,
- ▶ nie może ograniczać przemieszczeń cieplnych,
- ▶ musi przenosić pełen zakres obciążeń roboczych.

Na drodze obliczeń konstrukcyjnych określa się zarówno zakres przemieszczeń cieplnych rurociągów, jak i optymalne miejsca zabudowy zamocowań i ich reakcje. Spełnienie powyższych wymagań w całej rozciągłości jest trudne, a często wręcz niemożliwe, gdyż system zamocowań musi współpracować z istniejącą konstrukcją kotłowni i maszynowni.

Niektóre nieprawidłowości w pracy eksploatowanych systemów zawieszonych rurociągów wysokoprężnych

W projektowanych u schyłku lat sześćdziesiątych, a budowanych sukcesywnie w latach siedemdziesiątych blokach 200 MW zaobserwowano nieprawidłowości w pracy zamocowań rurociągów [2 i 3]:

- pary świeżej (rejon czwórników),
- pary wtórnie przegrzanej (rejon czwórników),
- wody zasilającej.

W przypadku rurociągów parowych nieprawidłowości w pracy zamocowań polegały na ograniczeniu przemieszczeń cieplnych rurociągów na skutek:

- blokady zamocowań stałosiłowych-sprężynowych, które pracowały jak ciągną stałe;
- niewystarczającego przystosowania zawieszonych dźwigniowo-ciężarkowych do przenoszenia przemieszczeń poziomych, co prowadziło do przekrzywiania się ramion dźwigni i częściowej lub całkowitej blokady zawieszonych (rys. 1).

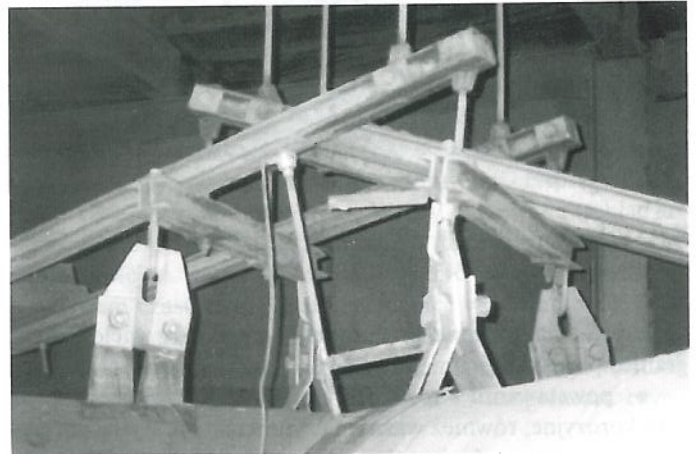
W przypadku rurociągów wody zasilającej niewłaściwa praca zamocowań polegała na:

- bardzo znacznych drganiach rurociągów, prowadzących do zmęczeniowego pęknięcia cięgien — gdy zastosowano zawieszania sprężynowe o czterech sprężynach w kolumnie (rys. 2 i 3);

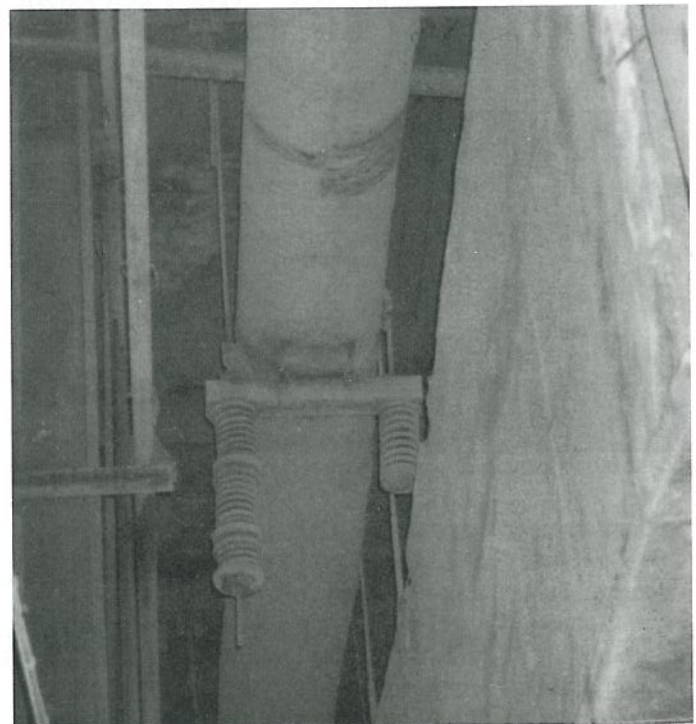
- częściowym blokowaniu przemieszczeń cieplnych rurociągu — gdy zastosowano zawieszania dźwigniowo-ciężarkowe (blokowanie ramion zawieszonych o strop).

Omówione nieprawidłowości wynikają najczęściej z niepełnego uwzględnienia przy doborze zamocowania warunków pracy rurociągów, a ściślej pełnego zakresu przemieszczeń cieplnych rurociągów. Zastosowane zamocowania mają wymagany udźwig, ale ich zakres przemieszczeń pionowych bądź poziomych jest niższy od występujących na rurociągach.

Rurociąg wody zasilającej kotła OP-650 o rozbudowanej formie przestrzennej zaprojektowano jako rurociąg latający. Zabudowanie (zgodnie z projektem) bardzo wysokich kolumn sprężynowych (po cztery długie sprężyny w kolumnie) dodatkowo sprzyja obserwowanemu efektowi silnych drgań rurociągu. Ponieważ częstotliwość drgań całego rurociągu jest bliska



Rys. 1. Zawieszania dźwigniowo-ciężarkowe czwórnika rurociągu pary wtórnie przegrzanej bloku 200 MW



Rys. 2. Zerwane cięgna dwukolumnowe zawieszania sprężynowego rurociągu wody zasilającej kotła OP-650



Rys. 3. Zawieszenie dwukolumnowe sprężynowe (trójników przed komorą wlotową podgrzewacza wody kotła OP-650) rurociągu wody zasilającej

częstotliwości drgań własnych kolumn sprężynowych niektórych zawiesznień, wyeliminowanie drgań rurociągu bez zmian konstrukcyjnych (samiych zawiesznień) jest niemożliwa [4].

Propozycje zmian zawiesznień rurociągów wysokoprężnych kotła OP-650

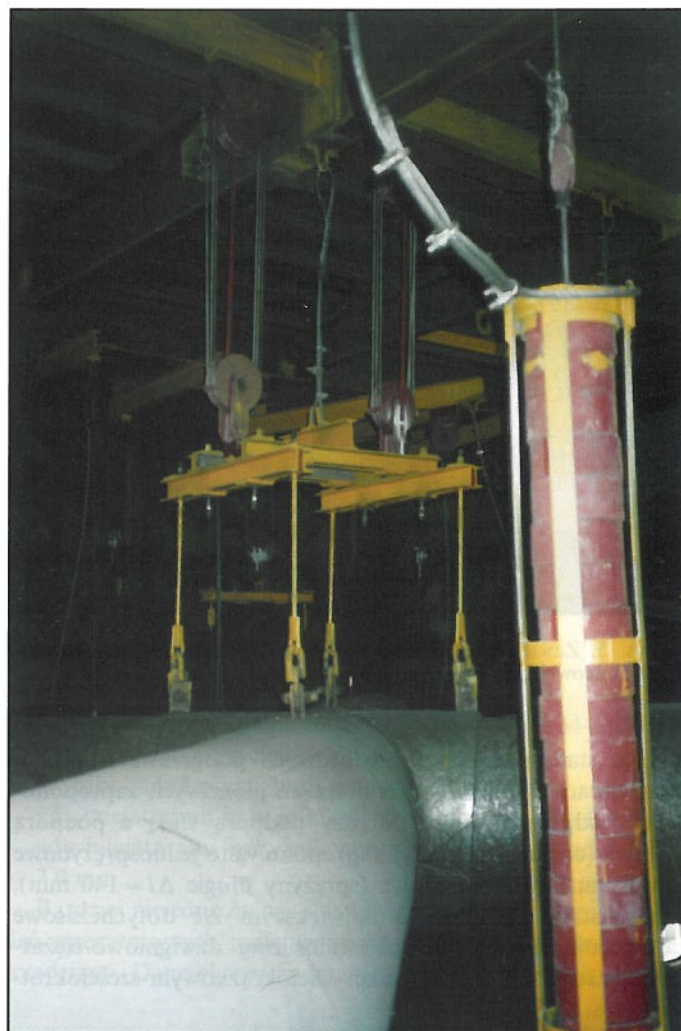
Pełne obliczenia konstrukcyjne rurociągów wysokoprężnych kotłów OP-650 pozwoliły określić wartość przemieszczeń cieplnych rurociągów w miejscach zabudowy zamocowań oraz reakcję zamocowań w stanie zimnym i gorącym. Analizując dane katalogowe zamocowań różnych typów i porównując je z wynikami obliczeń zaproponowano dwa systemy zamocowań dla rurociągów pary świeżej i wtórnie przegrzanej w rejonie czwórników oraz dla rurociągu wody zasilającej.

Nowy system zamocowań głównych rurociągów parowych kotła OP-650 w rejonie czwórników

Na podstawie doświadczeń wynikających z dotychczasowych ocen stanu głównych rurociągów parowych bloków 200 MW w elektrowniach zawodowych, obliczeń konstrukcyjnych oraz regulacji trasy i zamocowań określono cechy, jakie muszą charakteryzować zawieszenie właściwie pracujące w rejonie czwórnika, [5].

Podstawowe dwie cechy, czyli niezbędny udźwieg i przemieszczenia robocze w osi z i w płaszczyźnie $x-y$ mają:

A — stałościłowe sprężynowo-krzywkowe zawieszenie — produkcji *Chemaru-Kielce*,



Rys. 4. Nowy system zamocowań głównych rurociągów parowych kotła OP-650 w rejonie czwórników, zabudowany przy wykorzystaniu zawiesznień wielokrążkowych sześciokrotnych

B — stałościłowe zawieszenie rolkowo-ciężarkowe — wg projektu *Energoprojektu-Katowice*

C — stałościłowe zawieszenie wielokrążkowe-sześciokrotne.

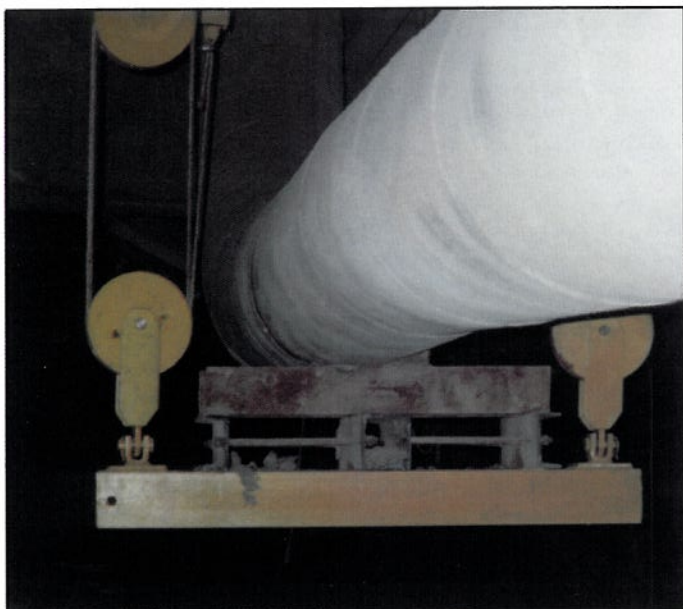
Dość prosta i niezawodna konstrukcja oraz możliwość regulacji na obiekcie to cechy charakterystyczne zawiesznień B i C. Dodatkowo, zastosowanie zamocowań B lub C nie wymaga skomplikowanych zabiegów adaptacyjnych.

Zawieszenie B jest praktycznie nieosiągalne na rynku, natomiast producentem zawieszenia C jest między innymi kielecki *Chemar*.

Biorąc pod uwagę wymienione cechy zaproponowano wymianę istniejących zawiesznień stałościłowych-ciężarkowych lub stałościłowych-sprężynowych na zawiesznienia wielokrążkowe-sześciokrotne (rys. 4).

Nowy system zamocowań rurociągu wody zasilającej kotła OP-650

Na podstawie wyników obliczeń konstrukcyjnych stwierdzono, że tylko trzy ostatnie zawiesznienia sprężynowe muszą przenosić znaczne przemieszczenia pionowe ($\Delta z \geq 350$ mm); przemieszczenia pozostałych punktów zabudowy zamocowań są mniejsze ($\Delta z \cong 100$ mm) lub wręcz zerowe. W związku z tym zaproponowano zmianę całego systemu zamocowań od



Rys. 5. Zawieszenie wielokrażkowe-sześciokrotne zabudowane w końcowej części rurociągu wody zasilającej bloku 200 MW

punktu stałego do komór wlotowych podgrzewacza wody. W miejscach zerowych przemieszczeń pionowych zaproponowano podporę suwliwą. Między podporą stałą a podporą suwliwą (odcinek poziomy) zaproponowano jednosprężynowe zawieszenia dwukolumnowe (sprężyny długie $\Delta l = 140$ mm), natomiast w punktach o największym Δz dotychczasowe zawieszenia sprężynowe lub stałosiłowe dźwigniowo-ciężarkowe zastąpiono zawieszeniem wielokrażkowym-sześciokrotnym (rys. 5) [4].



Dr inż. Jerzy Trzeszczyński

Pro Novum — Katowice

UKD 62-135:620.19

pro.novum

Uwagi końcowe

Zaproponowane w 1994 roku nowe rozwiązanie systemu zamocowań głównych rurociągów wysokoprężnych kotła OP-650 zastosowano najpierw na dwóch kotłach. Po dwóch latach poprawnej pracy [6] nowe rozwiązanie zawieszono czwórników wprowadzono na siedmiu kotłach, a zmian zawieszono na rurociągach wody zasilającej dokonano dotychczas na ośmiu blokach.

Kontrolne pomiary geodezyjne przemieszczeń cieplnych głównych rurociągów parowych i rurociągów wody zasilającej w pełni potwierdzają wyniki obliczeń konstrukcyjnych, co oznacza, że nowy system zamocowań kotła OP-650 pracuje poprawnie.

LITERATURA

- [1] Dobosiewicz J., Brunné W.: Ocena stanu technicznego głównych rurociągów parowych bloków energetycznych. *Energetyka* 1993, nr 3
- [2] Kuśmierski P., Szczygielski M.: Stan zamocowań głównych rurociągów parowych bloków 200 MW. *Energetyka* 1996, nr 5
- [3] Brunné W.: Wybrane problemy związane z prawidłowym działaniem zamocowań wysokoprężnych rurociągów energetycznych. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu*, nr 218 *Elektryka* zeszyt nr 43. Opole, 1996
- [4] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 104.423/94 (praca nie publikowana)
- [5] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 24.343/94 (praca nie publikowana)
- [6] Brunné W.: Wytyczne nadzoru głównych rurociągów elektrowni. *Energetyka* 1996, nr 5

Uszkodzenia kadłubów turbin i komór zaworowych wywołane przez wady odlewnicze

Badania defektoskopowe oraz pomiary ujawniają pęknięcia oraz deformacje kadłubów turbin parowych. Oprócz czynników eksploatacyjnych (zmęczenie cieplne, termoszoki) najczęstszą przyczyną pęknięć są wady odlewnicze. Ze względu na dużą masę oraz skomplikowany kształt odlewów wykrywa

się w nich prawie wszystkie rodzaje wad sklasyfikowanych w PN-85/H-83105 [1]. Większość wad powierzchni i kształtu usuwa i koryguje producent odlewów, ponieważ w sposób ewidentny ograniczają one lub wykluczają użytkowe cechy tych wyrobów.

Niektóre z wad, w tym przede wszystkim:

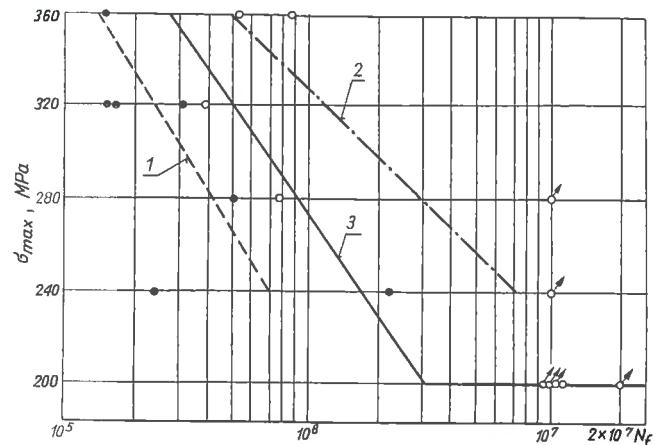
- rzadziny wewnętrzne,
- zimne krople,
- niejednorodność struktury, jako skutek kierunkowej krystalizacji grubościennych przekrojów,
- struktury niekorzystne (np.: gruboziarniste, z ferrytem Widmannstättena), jako rezultat niewłaściwie wykonanej obróbki cieplnej,

pozostają w odlewach i w zależności od ich lokalizacji oraz warunków pracy ujawniają się po różnym czasie eksploatacji.

Wpływ wad technologicznych na inicjację i propagację pęknięć

Wady odlewnicze w postaci nieciągłości materiałowych (rzadziny, makro- i mikroporowatości) można traktować jako karby wywołujące spiętrzenia naprężeń, o wielkości zależnej od ich lokalizacji w stosunku do powierzchni oraz obszarów najbardziej wyężonych. Najmniejszy, w praktyce pomijalny wpływ na inicjację i propagację pęknięć wywierają wady technologiczne w obecności naprężeń statycznych, gdyż w konstrukcyjnie przewymiarowanych ściankach kadłubów i komór zaworowych statyczne naprężenia są względnie niskie, i to nawet w strefach najwyższych temperatur.

Na etapie inicjacji w największym stopniu powstawanie pęknięć przyspieszają wady powierzchniowe, zwłaszcza te, które są zlokalizowane w obszarze dużych, zmiennych naprężeń cieplnych. Wpływ makroporowatości na tempo inicjacji pęknięć zmęczeniowych w badaniach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wytrzymałość zmęczeniowa (wykresy Wöhlera) staliwa niskowęglowego

1 — wytrzymałość staliwa zawierającego mikropory < 0,5 mm, 2 — wytrzymałość staliwa zawierającego mikropory o wymiarach od 0,5 do 3 mm, 3 — średnia wytrzymałość staliwa zawierającego mikropory < 3 mm

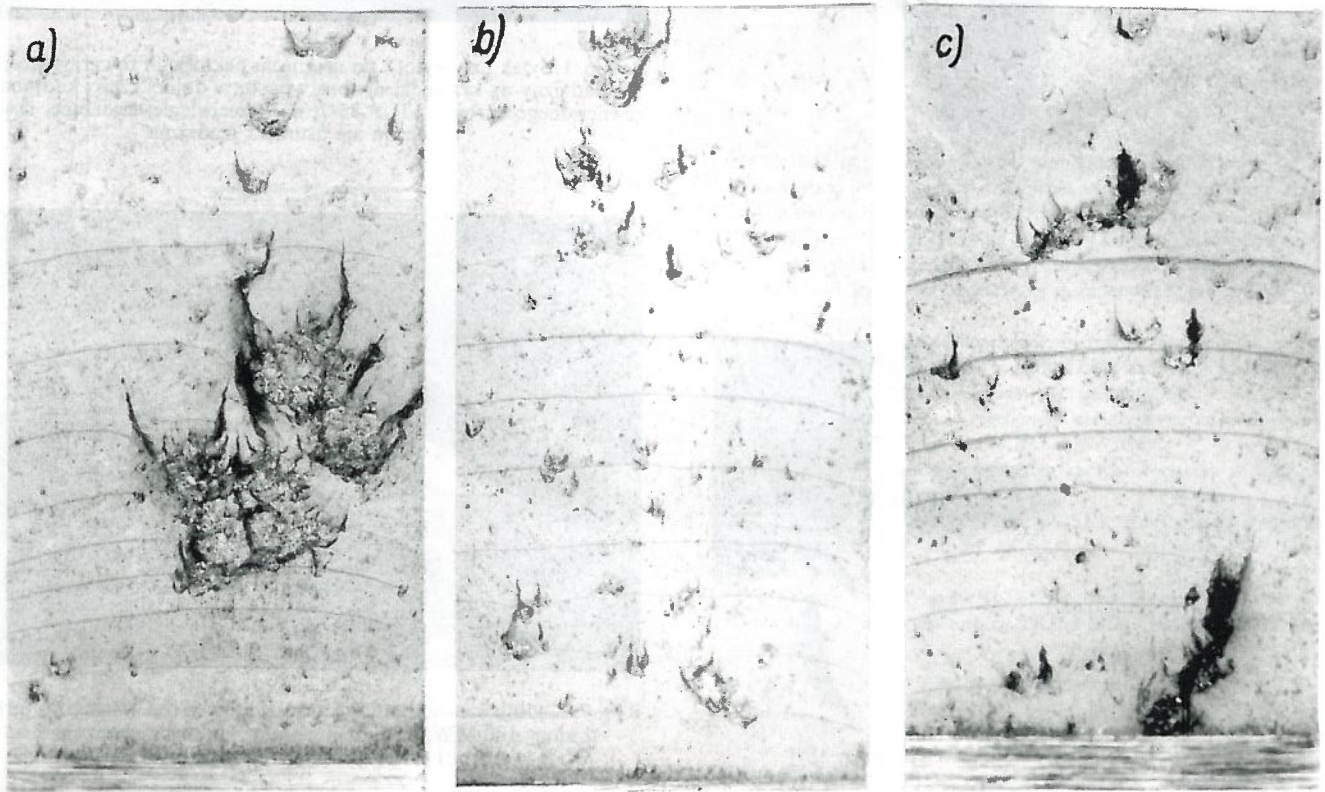
Parametrami badań były:

- ▶ temperatura otoczenia,
- ▶ naprężenia sinusoidalne zmienne (częstotliwość 34—55 Hz, współczynnik asymetrii cyklu $R=0$).

Wyniki badań podzielono na dwa podzbiory:

- gdy inicjatorami były mikropory o wymiarach do 0,5 mm,
- gdy inicjatorami były mikropory o wymiarach od 0,5 do 3,0 mm.

Bardziej niejednoznaczny wpływ na tempo propagacji pęknięć zmęczeniowych mają wewnętrzne mikropory skurczowe i rzadziny. Dane eksperymentalne (rys. 2) dostarczają dowo-



Rys. 2. Kształt frontów pęknięć zmęczeniowych na przelomach próbek compact ze staliwa niskowęglowego, badanych przy współczynniku asymetrii cyklu $R=0,02$ (a) oraz $R=0,2$ (b i c); pow. $\sim 3x$

dów zarówno na przyspieszanie propagacji pęknięć w obecności mikropor, jak również ich opóźnianie oraz brak wpływu [2].

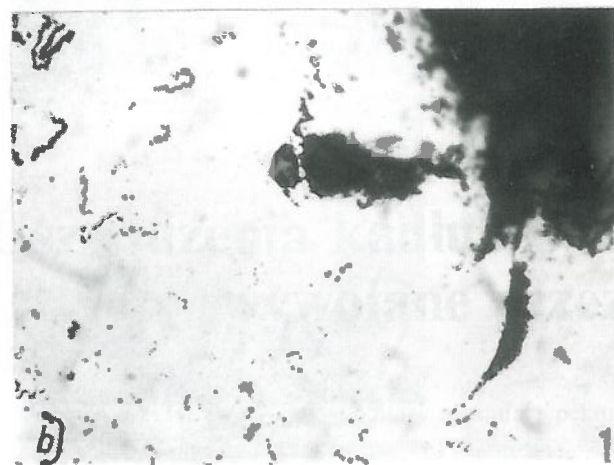
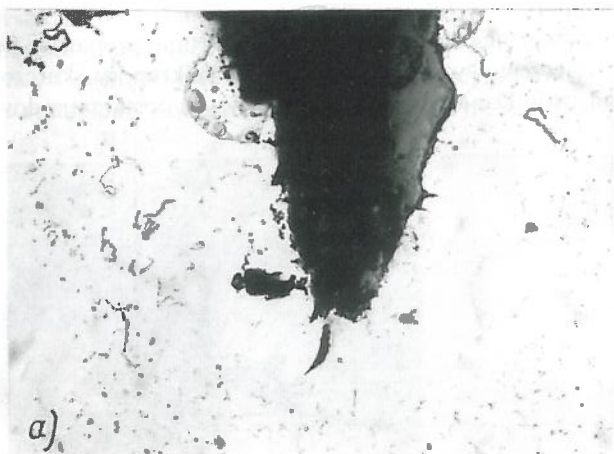
Skutki obecności wad odlewniczych

W największym zakresie wady odlewnicze są wykrywane podczas kompleksowych badań kadłubów turbin i komór zaworowych oraz w trakcie naprawy.

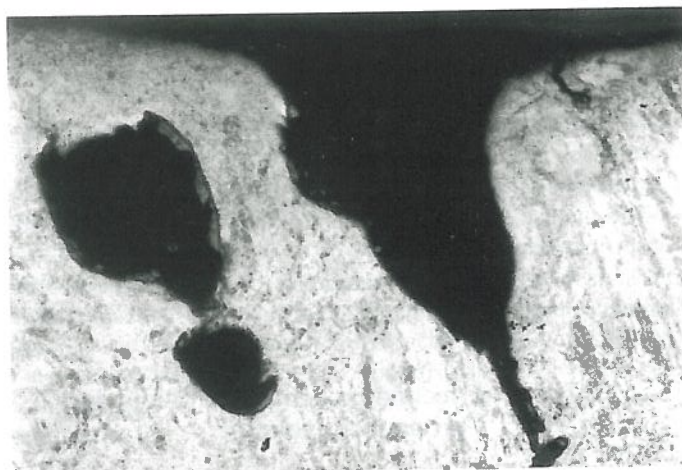
Podczas badań nieniszczących ujawnia się usunięte przez producenta rzadziny powierzchniowe oraz pęknięcia, będące skutkiem powierzchniowych lub podpowierzchniowych porowatości.



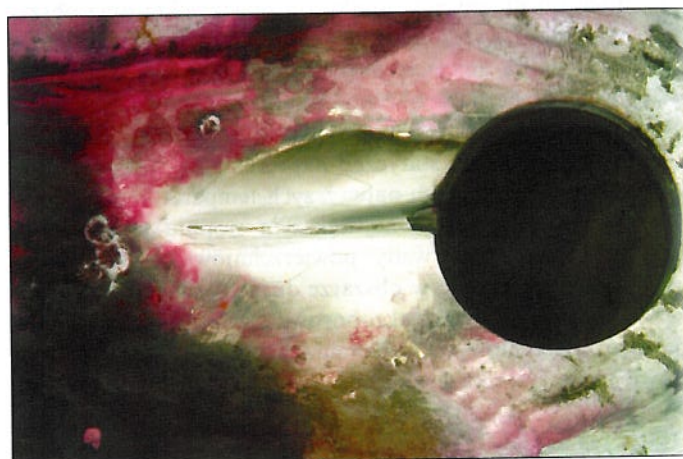
Rys. 3. Makrostruktura materiału pod siedliskiem grzyba zaworu szybkozamkającego; widoczne: struktura dendrytyczna, pory skurczowe oraz pęknięcia odlewnicze i eksploatacyjne; trawiono odczynnikami Jacewicza (na gorąco)



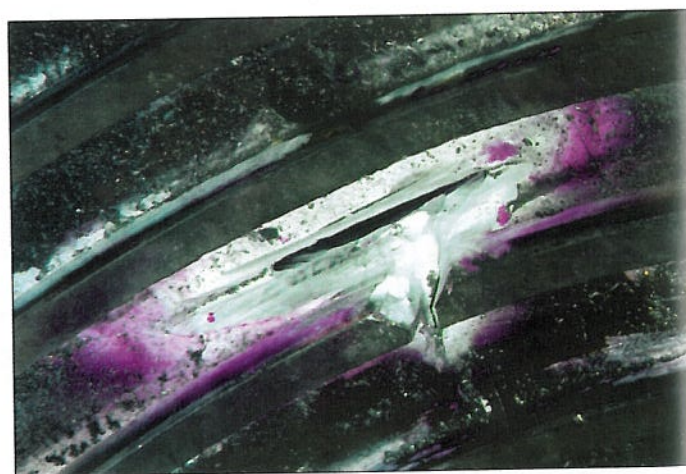
Rys. 4. Mikropory w otoczeniu pęknięcia technologicznego, zgląd nie trawiony; pow. 200x (a) oraz 500x (b)



Rys. 5. Mikropory w korpusie zaworu regulacyjnego; pow. 16x



Rys. 6. Ubytek „na wylot” po usunięciu pęknięcia i towarzyszącej mu rzadziny na krawędzi otworu wpustu w dolnej części kadłuba zewnętrznej turbiny 13UP-55-7; na przeciwległej tworzącej otworu widoczna nie usunięta rzadzina



Rys. 7. Kadłub wewnętrzny WP (część dolna — od wewnątrz) turbiny o mocy 120 MW; ubytek „na wylot” po usunięciu pęknięcia i towarzyszącej mu rzadziny

Badania niszczące (wycinki materiału odlewu pobierane mechanicznie w strefie wlotu i wylotu pary) ujawniają:

- niekorzystną strukturę (grube ziarno, gruboigłasty bainit, ferryt w układzie Widmannstättena),
- bardzo niską udarność, często nie przekraczającą $1,0 \text{ daJ/cm}^2$, a prawie zawsze niższą od wymaganej ($3,5 \text{ daJ/cm}^2$).

Mikropory, mikropęknięcia i niejednorodności struktury, ujawnione podczas badań korpusu zaworu szybkozamykającego ze staliwa L17HMF, pokazano na rysunkach 3 i 4 [3]. Przykład porowatości w węźle cieplnym odlewu korpusu zaworu regulacyjnego przedstawiono na rysunku 5.

Największą ilość rzadzisz oraz mikro- i makroporowatości — w tym także towarzyszących im pęknięć — wykrywa się podczas naprawy kadłubów.

Ujawnia się je wtedy podczas:

- usuwania pęknięć (rys. 6 i 7),
- wyżarzania — podczas odprężania powstają pęknięcia w sąsiedztwie podpowierzchniowych nieciągłości materiałowych,
- obróbki mechanicznej — wówczas są ujawniane rzadziszny podpowierzchniowe (rys. 8).

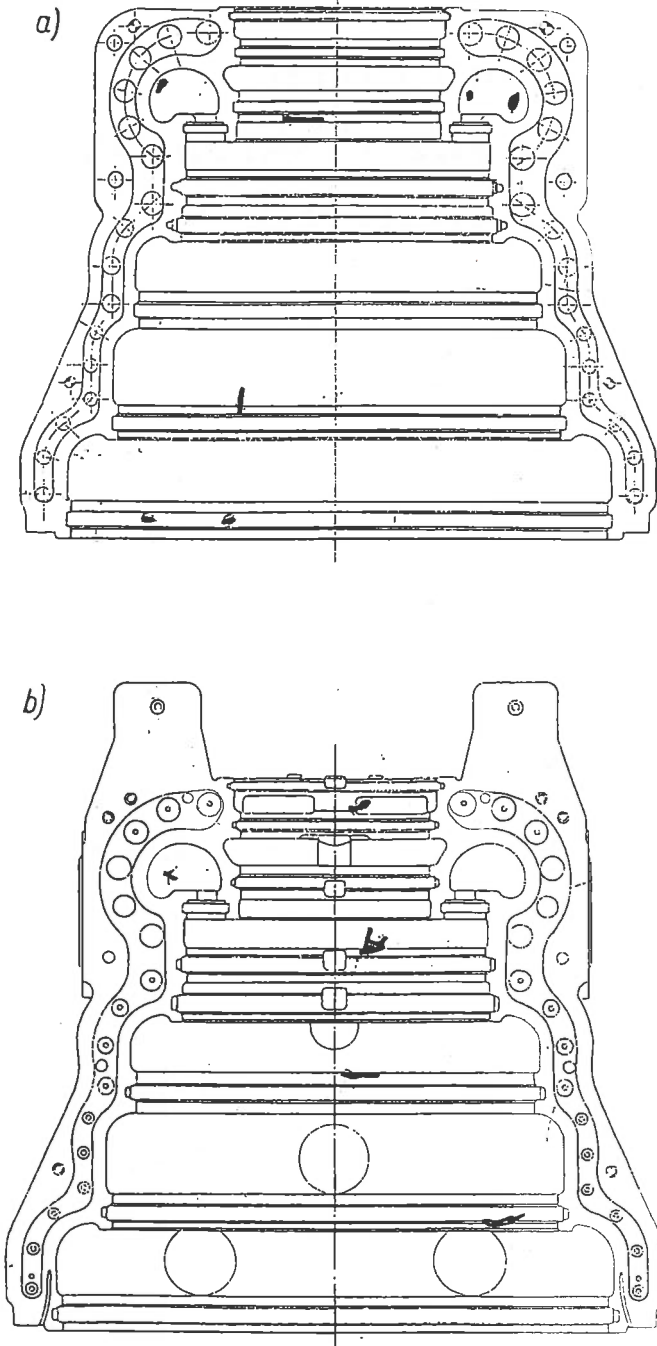
Podsumowanie

Obecność wad technologicznych w postaci rzadzisz oraz niekorzystny stan struktury (grube ziarno, gruboigłasty bainit, ferryt w układzie Widmannstättena) prowadzi do pęknięć już w pierwszych latach eksploatacji kadłubów, utrudnia klasyczną ich naprawę ze względu na skłonność do pęknięcia podczas spawania oraz sprzyja powstawaniu, stosunkowo szybko, pęknięć podczas dalszej eksploatacji.

Uwzględniając szkodliwy wpływ wymienionych wad technologicznych oraz mając na uwadze konieczność zapewnienia stabilności kształtu, wdrożono [5—8] technologię regeneracji kadłubów, która oprócz ich naprawy w odniesieniu do usunięcia pęknięć i napawania ubytków zapewnia także poprawę struktury, korektę geometrii i stabilizację kształtu, dzięki odpowiedniej obróbce cieplnej w piecu. Dotychczasowa praktyka eksploatacyjna wskazuje, że tak naprawione i obrobione cieplnie kadłuby pracują bez pęknięć (do chwili obecnej) ponad 50 000 godzin.

LITERATURA

- [1] PN-85/H-83105: Odlewy. Podział i terminologia wad
- [2] Trzecznyński J.: Inicjacja i rozwój pęknięć zmęczeniowych w niskowęglowych staliwach konstrukcyjnych (rozprawa doktorska)
- [3] Trzecznyński J.: Analiza zmian struktury i własności cieplno-mechanicznych materiału korpusu zaworu szybkozamykającego WP turbiny 200 MW w Elektrowni Turów po długotrwałej eksploatacji. Sprawozdanie SIMPEX R-391/86
- [4] Trzecznyński J., Dobosiewicz J., Grzeszczek E., Stachura S.: Dotychczasowe doświadczenia związane z rewitalizacją kadłubów turbin parowych. *Energetyka* 1996, nr 1 (Biuletyn *Pro Novum* Nr 1/96)
- [5] Dobosiewicz J.: Zasadność regeneracji kadłubów turbin parowych. *Energetyka* 1996, nr 11 (Biuletyn *Pro Novum* Nr 3/96)
- [6] Patent P-315641: Sposób prostowania kadłubów maszyn wirujących podczas obróbki cieplnej
- [7] Sprawozdanie *Pro Novum* Nr 101. 646/96: Rewitalizacja kadłubów zewnętrznych WP i SP turbiny 13 K215 nr 7. Katowice 1996 (nie publikowane)
- [8] Sprawozdanie *Pro Novum* Nr 112.657/96. Rewitalizacja kadłubów WP i SP oraz komór zaworowych turbiny TK200 nr 11. Katowice, 1996 (nie publikowane)



Rys. 8. Rzadziszny podpowierzchniowe ujawnione podczas obróbki mechanicznej; powierzchnie wewnętrzne górnej (a) i dolnej (b) części kadłuba SP turbiny TK-200