

Struktura materiału

Niezależnie od miejsca pobrania wycinków do badań, struktura materiału obydwu kolan jest (w zakresie powiększeń optycznych do 1000×) bardzo podobna, tzn. ferrytyczno-bainityczna ze skoagulowanymi węglkami w bainicie. Struktura materiału w stanie wyjściowym nie jest znana, toteż trudno dokładnie ustalić, jakiego rodzaju zmiany w strukturze zależą wyłącznie od czasu i warunków eksploatacji. Nie wykryto oznak pełzania w postaci mikropustek pełzaniowych na zewnętrznych łukach kolan.

Własności mechaniczne

Materiał spełnia wymagania PN-75/H-84024 w zakresie R_e , R_m , A_5 , Z oraz twardości (w HB). Nieco zanizone wartości R_e i R_m można uznać za pomijalnie małe (własności te i tak nie są uwzględniane przy obliczeniach rurociągu). Jedynie udarność Charpy V materiału kolna A przy temperaturach $+20^\circ\text{C}$ — $+60^\circ\text{C}$ jest niższa od wymaganej. Praktycznie nie ma istotnych różnic między własnościami materiału na łukach kolan i na odcinkach prostych. Odnośnie do udarności stwierdzono anizotropię własności próbek wyciętych osiowo w porównaniu z próbkami pobranymi obwodowo. Cechę tę należy traktować jako naturalną konsekwencję procesu wytwarzania rur. W celu wyjaśnienia znacznych różnic odnośnie do udarności materiału z odcinka prostego i łuku kolana wykonano obróbkę cieplną zalecaną dla stali 13HMF. Specjalne badania metalograficzne przed i po wymienionej obróbce cieplnej ujawniły znaczną, ale jednakową dla obydwu kolan segregację fosforu po granicach ziarn w stanie poeksploatacyjnym i brak segregacji po zastosowanej obróbce cieplnej. Badania udarności po obróbce cieplnej wykazały sześciokrotny jej wzrost w przypadku materiału kolana A i dwukrotny dla materiału kolana B.

Podsumowanie

Badania wykazały, że po przepracowaniu przez kolana ok. 240 000 h w warunkach typowych dla wysokoprężnych rurociągów parowych ($t_r = 530^\circ\text{C}$ oraz $p_r = 13,9$ MPa) własności określone w próbie statycznego rozciągania spełniają wymagania PN-75/H-84024.

Zdecydowanie niższa udarność materiału z kolana A niż z kolana B jest rezultatem procesu wytwórczego. Relacja ta występowała od początku eksploatacji, o czym świadczą m.in.: zbliżone własności materiału na łukach i odcinkach prostych, prawie identyczna struktura oraz jednakowy stopień segregacji fosforu i zdecydowanie różne zmiany udarności po jej usunięciu.

Wymienione spostrzeżenia prowadzą do wniosków podanych poniżej.

1. Badania niszczące kolan, prowadzące się do wyznaczenia R_e , R_m , A_5 , Z i twardości (w HB) nie wnoszą istotnych informacji o zmianach własności podczas eksploatacji. Własności te wydają się nieczułe na wpływ warunków eksploatacji.

Badania struktury na zglądach metalograficznych także nie wnoszą wiele nowego w porównaniu z wynikami badań metodą replik.

2. Pewne korzyści mogą wynikać z pomiarów udarności, zwłaszcza z wyznaczenia temperatury przejścia w stan kruchy. Informacja taka może mieć sens praktyczny, jeśli chodzi o warunki wykonywania prób ciśnieniowych.

Stwierdzenie niskiej udarności przy temperaturze otoczenia jeszcze o niczym nie świadczy. W typowych warunkach pracy rurociągu pary świeżej lub wtórnie przegrzanej nie ma to żadnego, praktycznego znaczenia. Dowodem, jednym z wielu, może być bezawaryjna praca przez 240 000 h kolektora będącego przedmiotem omawianych badań.

3. W celu stwierdzenia możliwości przedłużenia eksploatacji rurociągów ponad trwałość dopuszczalną (powyżej ok. 250 000 h) bez uciekania się do wzmoczonego nadzoru diagnostycznego należałoby poszerzyć badania niszczące (udarność, temperatura przejścia w stan kruchy) o przyspieszoną próbę pełzania. Takie postępowanie powinno dotyczyć kolan o największym toretycznym stopniu wyczerpania trwałości (rurociągi pary świeżej i wtórnie przegrzanej). Wszystkie elementy odlewane, tj. kadłuby zasuw i zaworów, trójniki i czwórniki należy badać i oceniać ich stan techniczny na podstawie odrębnych procedur (m.in. ostatnie doświadczenia wskazują, że bezpieczny czas eksploatacji odlewanych czwórników na rurociągach pary świeżej i wtórnie przegrzanej nie przekracza 150 000—180 000 h).

panovum

Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz, mgr inż. Ewald Grzesiczek

UKD 621.165:620.19

Pro Novum — Katowice

Rafako-Energ — Katowice

Odporność na kruche pękanie wirników generatorów

Kruchym pękaniem nazywa się zjawisko niestatecznego samoczynnego pękania materiału, które w końcowej fazie rozwija się z prędkością zbliżoną do prędkości rozchodzenia się dźwięku w tym materiale. Takie zjawisko może wystąpić również w obracającym się wirniku, powodując jego rozerwanie przez siły odśrodkowe, co niekiedy jest nazywane eksplozją wirnika.

Kruche pękanie wirnika zaczyna się najczęściej od wady materiałowej w postaci szczeliny lub wtrącenia niemetalicznego o ostrych krawędziach. Jeżeli wada jest mała, a naprężenia w jej otoczeniu są niewielkie, to taka wada materiałowa nie powiększa się; przy dużych naprężeniach od największej wady zaczyna się pękanie, które powiększa się skokowo po każdym uruchomieniu wirnika. Po określonej liczbie uruchomień wada osiąga

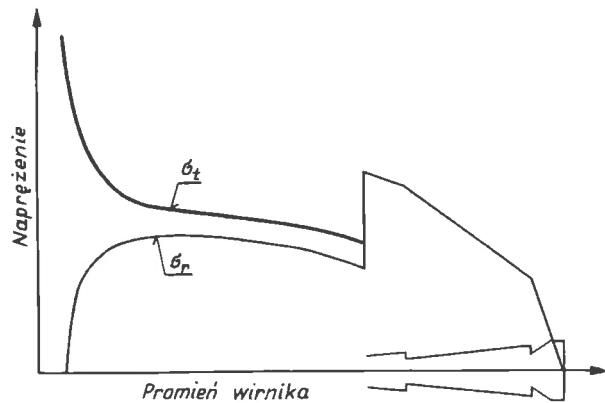
wymiary krytyczne i następnie rozprzestrzenia się błyskawicznie powodując rozerwanie wirnika. Mimo że w takim wirniku największe naprężenia kinetostatyczne nie przekraczają granicy plastyczności materiału, to jednak powierzchnie przełomów części rozerwanych mają postać krystaliczną, a ich odkształcenia trwałe są nieznaczne. Takie cechy są charakterystyczne dla tzw. przełomu kruchego [1].

Wytrzymałość wirników generatorów zależy przede wszystkim od dwóch rodzajów obciążeń:

- obciążenia skręcającego wał wirnika, przy czym ten rodzaj obciążenia wywołuje naprężenia styczne, które są największe na powierzchni wału i praktycznie równe zeru w pobliżu osi wirnika;
- obciążenia kinetostatycznego od sił odśrodkowych wirujących mas wirnika, które wywołują naprężenia normalne, osiągające największe wartości w środku wału.

Tylko duże naprężenia normalne mogą wywołać pęknięcie wirnika, natomiast nie mają na to wpływu naprężenia styczne wywołane skręcaniem. Dlatego też w analizie zjawiska kruchego pęknięcia w obracającym się wirniku pomija się wpływ jego skręcania i uwzględnia tylko naprężenia kinetostatyczne, które są określone dwoma naprężeniami głównymi (rys. 1):

- σ_r — naprężeniem promieniowym skierowanym wzdłuż promienia r ,
- σ_t — naprężeniem obwodowym skierowanym stycznie do obwodu okręgu o promieniu r .

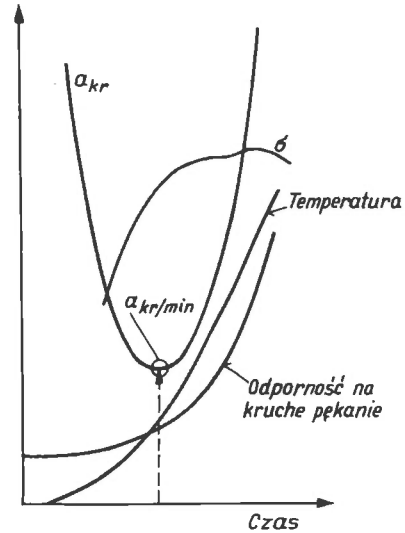


Rys. 1. Rozkład naprężeń kinetostatycznych w wale wirnika generatora [2]

δ_t — naprężenie obwodowe, δ_r — naprężenie promieniowe

Kruche uszkodzenie wirnika może wystąpić w przypadku, gdy wewnętrzne wady o ostrych kształtach osiągną wymiary zbliżone do krytycznych, zależnych od naprężeń i plastyczności materiału. Ustalenie niezawodności pracy wirnika polega na porównaniu wymiarów wykrytych wad z obliczonymi wymiarami wad krytycznych.

Na rysunku 2 pokazano schematyczny szkic określający zmianę minimalnych wymiarów wad krytycznych podczas uruchamiania wirnika generatora ze stanu zimnego. W początkowym okresie uruchamiania, gdy temperatura metalu jest niska, a wraz z prędkością obrotową wzrasta naprężenie krytyczne — wymiary wad maleją. W tym okresie wady o niewielkich wymiarach mogą spowodować zniszczenie wirnika. Następnie, gdy ze wzrostem temperatury wału rośnie



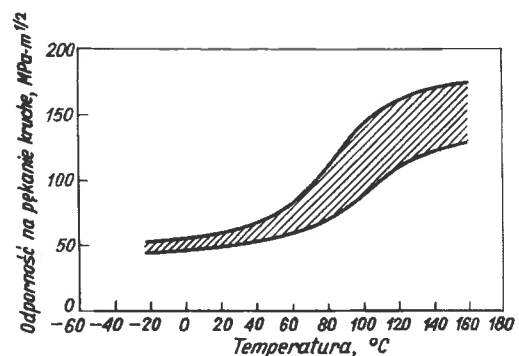
Rys. 2. Schemat zmian krytycznego wymiaru wady podczas uruchamiania wirnika [3]

odporność metalu na kruche uszkodzenia, rosną również wymiary wady krytycznej. W stanach ustalonych praktycznie nie może wystąpić kruche uszkodzenie wirnika, albowiem wada krytyczna musiałaby mieć znaczne rozmiary.

Należy podkreślić, że odporność wirnika na kruche pęknięcie zależy nie tylko od liczby, lokalizacji, kształtu oraz wymiarów wad lub pęknięć, lecz również od własności materiału i warunków pracy, a zwłaszcza temperatury (rys. 3). Ze wzrostem temperatury rośnie wyraźnie odporność metalu na uszkodzenia kruche.

W celu ustalenia możliwości kruchego uszkodzenia naprężenie występujące w wirniku w czasie uruchomienia oblicza się różnymi sposobami, np. metodą elementów skończonych, metodą elementów brzegowych itp. W analizowanym przypadku zastosowano metodę elementów brzegowych. Wynikiem obliczeń są wymiary wad krytycznych. Podczas badań ultradźwiękowych aparat należy wyskalować posługując się wadą równoważną, której wymiary są zbliżone do wymiarów wady krytycznej.

Badania wału wirnika na obecność wad wykonuje się metodą ultradźwiękową, a ich wymiar ocenia za pomocą skali



Rys. 3. Zależność odporności wirnika na pęknięcie kruche od temperatury otworu centralnego [3]

(OWR), w wyniku czego otrzymuje się tzw. wartości równoważne. Dopuszczalna wartość równoważna powinna być mniejsza od wymiaru wady krytycznej, tj. pęknięć krytycznych, a nawet progowych. Dopuszczalne wymiary krytyczne wad są obliczane ze współczynnikiem bezpieczeństwa, a sposób eksploatacji (czas, liczba uruchomień) powinien być tak ustalony, aby po określonym czasie i określonej liczbie uruchomień (cykle naprężeń) dopuszczalne wymiary wad nie osiągnęły wartości krytycznych.

Obliczenia odporności wirnika generatora o mocy 120 MW

Wady materiałowe w postaci pęknięć, szczelin i wtrąceń niemetalicznych o ostrych krawędziach wpływają istotnie na mechanizm pęknięcia wirników. Podstawowym parametrem określającym wrażliwość elementu na pęknięcie kruche jest współczynnik intensywności naprężeń. Dla wirnika generatora najbardziej niebezpieczne są wady lub pęknięcia w pobliżu otworu centralnego.

Posługując się wzorem Griffitha:

$$K_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2} a}$$

K_I — współczynnik intensywności naprężeń (parametr materiałowy),

σ — naprężenie kinetostatyczne,

a — głębokość pęknięcia,

można obliczyć rozmiary wad progowych a_{kth} (takich, które nie rozwijają się), wad rozwijających się skokowo przy każdym uruchomieniu (zwłaszcza ze stanu zimnego) oraz wad krytycznych, mogących spowodować totalne uszkodzenie wirnika.

Stosując równanie Parisa:

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K_I m_p$$

da/dN — przyrost głębokości pęknięcia na jeden cykl (uruchomienie),

ΔK_I — zmiana współczynnika intensywności naprężeń na jeden cykl,

C_p i m_p — współczynniki zależne określające własności metalu,

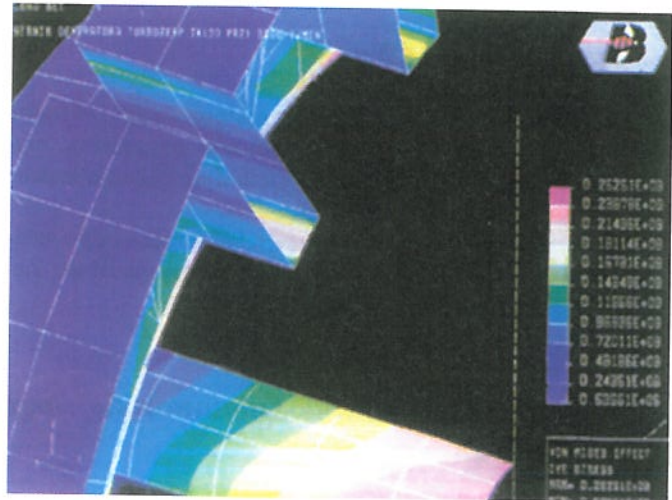
w przypadku obecności wady rozwijającej się można obliczyć bezpieczną liczbę uruchomień (jeżeli znanymi metodami wykryje się w wirniku odpowiedniej wielkości wadę). W zakresie jednego gatunku materiału odporność na kruche pęknięcie zależy od poziomu naprężenia i pewnych własności plastycznych materiału (K_I).

Wytrzymałość materiałów kruchych zależy od największego naprężenia głównego, natomiast o zniszczeniu materiałów plastycznych decydują naprężenia zredukowane.

Ponieważ materiał omawianego wirnika (sprawdzony na próbkach) należy do materiałów plastycznych, do obliczeń odporności wirnika na kruche pęknięcia wzięto naprężenia zredukowane, obliczone dla rejonu otworu centralnego dla prędkości obrotowej $n = 3600$ obr./min (rys. 4). Znając wartość naprężeń oraz współczynnik intensywności naprężeń K_I (ustalone przez porównanie gatunku stali, struktury i twardości z danymi uzyskanymi na drodze doświadczalnej) obliczono wymiary progowe a_{kth} i krytyczne a_{kr} wad o płaskim dnie, umiejscowionych prostopadle do działających naprężeń.

Stosując powyższe rozumowanie i korzystając z danych doświadczalnych obliczono:

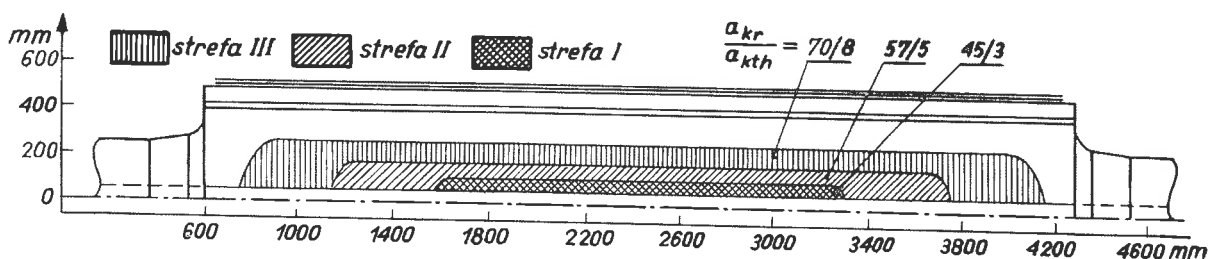
- długości progowe wady dla trzech stref $a_{kth} = 3, 5$ i 8 mm (rys. 5); wielkość ta posłużyła do ustalenia minimalnej równoważnej wady ($\varnothing 2$ mm), jaką powinno się wykryć podczas badań ultradźwiękowych;
- krytyczne długości wad dla wymienionych stref wynoszące 45, 57 i 70 mm.



Rys. 4. Rozkład naprężeń na otworze centralnym [Pa]

Ponadto obliczono szybkość rozprzestrzeniania się wad dla strefy pierwszej (da/dN) w milimetrach na cykl (uruchomienie ze stanu zimnego).

Z obliczeń wynika, że jeżeli wada będzie większa od progowej (strefa pierwsza $a_{kth} = 3$ mm), to będzie się ona rozprzestrzeniała z szybkością 0,038 mm/cykl i osiągnie wartość krytyczną $a_{kr} = 45$ mm po 1184 cyklach (cykl = uruchomienie ze stanu zimnego). W pozostałych strefach wyniki są bardziej korzystne.



Rys. 5. Krytyczne i progowe pęknięcia, ich wymiary oraz umiejscowienie (skala 1:15)

- Obliczenia odporności na kruche pękanie wykazały (rys. 5), że:
- głębokość wady progowej (nie rozwijającej się) wynosi:
 - 3 mm — w strefie I
 - 5 mm — w strefie II
 - 8 mm — w strefie III
 - głębokość wady krytycznej wynosi:
 - 45 mm — w strefie I
 - 57 mm — w strefie II
 - 70 mm — w strefie III.

Najbardziej niebezpiecznym obszarem jest rejon wirnika w pobliżu otworu centralnego (strefa I). W obszarze tym dopuszczalna wada odpowiedniego kształtu (oś dłuższa równoległa do osi wirnika) nie może mieć głębokości większej niż 3 mm. W przeciwnym wypadku będzie się ona przy każdym uruchomieniu powiększała i gdy osiągnie głębokość 45 mm może spowodować zniszczenie wirnika. Głębokość tę wada osiągnie dopiero po 1184 uruchomieniach ze stanu zimnego. W pozostałych strefach wartości krytyczne i przyrosty są bardziej korzystne. Należy zaznaczyć, że obliczenia zostały wykonane dla prędkości obrotowej 3600 obr./min, z dużymi współczynnikami bezpieczeństwa.

Wnioski

1. Kruche uszkodzenie wirnika generatora może wystąpić w przypadku jednoczesnego zaistnienia: naprężenia, wady-inicjatora i małej odporności metalu na pękanie kruche (temperatura poniżej 100°C).
2. Inicjatorem może być wada o ostrych kształtach i odpowiednich wymiarach, której płaszczyzny są prostopadłe do kierunku działania naprężenia.

3. Jeżeli wada ma wymiary większe od progowych, to podczas każdego cyklu zmiany naprężenia (uruchomienie ze stanu zimnego) jej głębokość zwiększa się i po osiągnięciu wartości krytycznej wada staje się inicjatorem uszkodzenia.
 4. Najbardziej niebezpieczne są podłużne wady umiejscowione na powierzchni otworu centralnego lub w jego w pobliżu, równoległe do głównej osi wału.
 5. Najbardziej niebezpiecznym okresem eksploatacji z uwagi na kruche uszkodzenie jest „próba wytrząsków” turbiny, w tym stanie wirnik jest zimny, a prędkość obrotowa (3300 obr./min) jest większa od znamionowej.
- Przedstawione wnioski w całej rozciągłości dotyczą również wirników turbin.

LITERATURA

- [1] Łączkowski R.: Odporność wirników turbin parowych na kruche pękanie. *Energetyka* 1988, nr 3
- [2] Dobosiwicz J.: Ocena stanu wałów wirników generatorów. *Energetyka* 1981
- [3] Ewald J., Mühler E.E.: Remaining life evaluation measures on turbines. International Conference Hague 1988. Siemens AG KWU Group Mülheim-Ruhr, West Germany
- [4] Jaric W.: Vijek trajanja sinhronih generatora sa stajalista mehanijskih napreznaja. Sovjetovanje Elektroenergeticara Jugoslavije. Bled 8-13 maja 1979
- [5] Siemens AG Energieerzeugung KWU: Empfehlung für Prüfung betriebsbeanspruchter Läufer von Dampfturbosätzen unter Berücksichtigung der entsprechenden VGB-Richtlinie R512 M. Ausgabe 6.90.
- [6] Kepke M., e.c.: Laboratory Fatigue tests of Metallic Materials. *Skoda Review* 1992, nr 3-4

panovum

Mgr inż. Stanisław Pawlik-Dobrowolski, mgr inż. Andrzej Winnicki

UKD 621.175

Elektrownia Halemba

Obliczenia drgań rurek skraplacza na przykładzie skraplacza turbiny TK-50

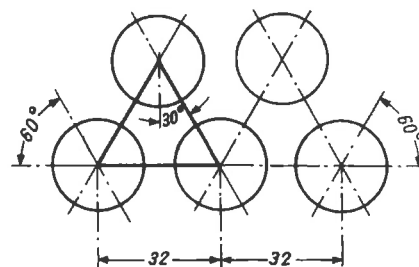
W Elektrowni Halemba pracują dwie turbiny TK-50 (numery zakładowe TG3 i TG4) ze skraplaczami 50KCs8. Ostatni raz rurki w skraplaczu TG4 wymieniano w 1986 roku, pozostawiając bez zmian układ pęczków rurek, dna sitowe, liczbę przegród. Tak jak w wykonaniu fabrycznym skraplacza ten ma zatem:

- 6372 rurki o wymiarach 24 × 1 (górny rząd górnego pęczka ma rurki 25 × 1,5) z materiału MC70;
- 4 przegrody sitowe grubości $B=14$ mm każda;
- podziałkę rurek $T=32$ mm, trójkątną, o kącie 60°C (rys. 1).

Ostatnią wymianę rurek w skraplaczu TG3 w 1989 roku połączono z modernizacją, tj.:

- ▶ zmieniono układ pęczków rurek, tak że obecnie skraplacz ma 7200 rurek o wymiarach 24 × 1 (górny rząd górnego pęczka ma rurki 24 × 1,5) z materiału MA73;

- ▶ zwiększono liczbę przegród sitowych z 4 do 5 (grubości $B=14$ mm każda);
- ▶ zmieniono dna sitowe (grubości 30 mm jak poprzednio). Podziałkę rurek pozostawiono bez zmian (rys. 1).



Rys. 1. Podziałka rurek w skraplaczu