

ANDRZEJ RUSIN*

Ocena prawdopodobieństwa uszkodzenia wirników turbin z pęknięciami na podstawie badań diagnostycznych

Słowa kluczowe

Eksploatacja, ryzyko techniczne, turbina, pękanie korozyjne.

Key - words

Operation, technical risk, turbine, stress corrosion cracking.

Streszczenie

Zarządzanie bezpieczeństwem w fazie eksploatacji bloku energetycznego może być realizowane poprzez sterowanie ryzykiem technicznym powodowanym tą eksploatacją. Proces sterowania ryzykiem może odbywać się zarówno poprzez bezpośrednią ingerencję w istotne parametry procesowe decydujące o warunkach pracy elementów bloku, jak i poprzez odpowiednio zaprogramowane ich obsługi.

W pracy przeanalizowano możliwości oceny ryzyka dalszej eksploatacji wirników turbin parowych zawierających pęknięcia. Szczegółowe rozważania skupiono na pęknięciach powodowanych pękaniem korozyjnym. Warunki takiego pęknięcia występują w niskoprężnych częściach turbin, a sprzyjają temu wysokie naprężenia występujące w niektórych wrębach łopatkowych. W pracy zaproponowano metodę oszacowania prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika w czasie dalszej eksploatacji. Podstawą tego szacowania jest pomiar wymiarów pęknięcia, a w szczególności jego głębokość i położenie.

* Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska, 44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18, tel. (032) 237 23 26, e-mail:andrzej.rusin@polsl.pl

1. Wprowadzenie

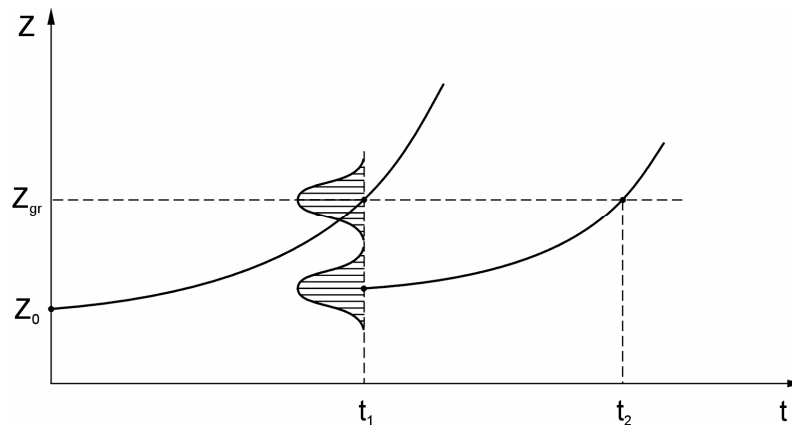
Ocena poziomu ryzyka związanego z istnieniem złożonych systemów technicznych, do jakich należą niewątpliwie bloki energetyczne, a także poszukiwania racjonalnych możliwości oddziaływania na poziom tego ryzyka są istotnym elementem zarządzania majątkiem elektrowni [1, 2].

Zarządzanie bezpieczeństwem w fazie eksploatacji bloku energetycznego może być realizowane poprzez sterowanie ryzykiem technicznym powodowanym tą eksploatacją. Proces sterowania ryzykiem może odbywać się zarówno poprzez bezpośrednią ingerencję w istotne parametry procesowe decydujące o warunkach pracy elementów bloku [3, 4], jak i poprzez odpowiednio zaprogramowane ich obsługi. W czasie eksploatacji sterowanie ryzykiem realizowane jest przez różnego rodzaju układy zabezpieczające, monitorujące i sterujące [5]. W czasie przeprowadzenia obsługi istotne są przeprowadzone badania, ich zakres i wyniki, a także dalsze działania będące rezultatem oceny stanu technicznego danego urządzenia.

Współczesne strategie badań diagnostycznych coraz częściej opierają się o ilościowe oceny ryzyka zarówno poszczególnych elementów, jak i całego bloku. Prawidłowy dobór zakresu i jakości badań oraz czasu ich przeprowadzania powinien zapewnić utrzymanie potencjalnego ryzyka eksploatacyjnego poniżej założonego i akceptowalnego poziomu.

Obserwacje symptomów aktualnego stopnia zużycia otrzymane na drodze badań diagnostycznych mogą być uwzględnione w ogólnym modelu zużycia i mogą w sposób zasadniczy poprawić jego dokładność. Statystyczna ocena tempa postępu degradacji materiału jest podstawą wiarygodnej oceny przyszłego stanu elementu i jego dalszej bezpiecznej eksploatacji. Badania diagnostyczne mogą być użyte jako narzędzie redukcji niepewności w ocenie stanu technicznego, a także jako narzędzie identyfikacji stanu krytycznego. Na rys. 1 pokazano, jak zmienia się prognoza postępu zużycia elementu, jeżeli w modelu probabilistycznym wykorzystana jest wynik obserwacji stanu aktualnego w chwili t_1 . Jeżeli Z_0 opisuje początkowy stan elementu, a Z_{gr} oznacza graniczną wartość symptomu stanu, to badania diagnostyczne muszą być zaplanowane przed osiągnięciem przez dany element tego stanu. Wyniki badań pozwalają zaktualizować ocenę stanu. Należy jednak pamiętać, że same badania diagnostyczne, jak i działania obsługowe są również obarczone różnymi błędami.

Jakość badań elementów, które mogą zawierać wady, identyfikowana jest zdolnością wykrycia i zwymiarowania tych wad. Różne metody badań należy stosować do wykrycia symptomów różnych procesów zużycia. Strategie badawcze powinny zatem ustalać metody badań oraz ich częstotliwość i zakres. Jeżeli zaobserwowany stan techniczny elementu i tempo procesów degradacyjnych będą pociągać za sobą przedsięwzięcia naprawcze, to bezpieczeństwo będące rezultatem tych działań będzie pośrednio uzależnione od jakości badań diagnostycznych.



Rys. 1. Zastosowanie badań w prognozowaniu przyszłego zużycia
 Fig. 1. Application of inspections in prediction of future deterioration

Planowanie badań oparte o strategię analizy ryzyka polega na rozstrzygnięciu następujących problemów:

- gdzie przeprowadzić badania,
- co i jak badać,
- kiedy badać.

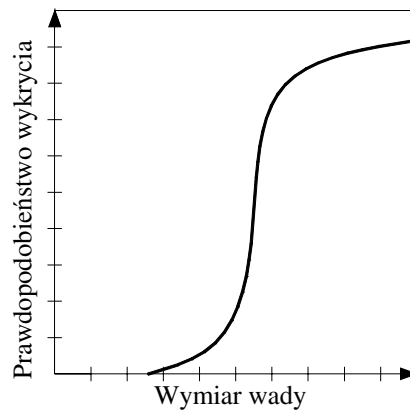
Tradycyjne podejście do planowania badań opiera się zazwyczaj na różnego rodzaju przepisach i zaleceniach i nie bierze w pełni pod uwagę stanu danego elementu jak i jego znaczenia dla poprawnej eksploatacji całego systemu. Planowanie oparte o analizę ryzyka jest podejściem warunkowym i dostarcza racjonalnych podstaw do odpowiedniego doboru zakresu badań zgodnego ze stanem elementu, mechanizmami zużycia i jego znaczenia w całym systemie. Jest zatem ważnym elementem strategii zarządzania bezpieczeństwem.

W dalszej części artykułu omówiono czynniki wpływające na jakość badań diagnostycznych, opisano mechanizm pęknięcia korozyjnego oraz podano przykład oszacowania prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika turbiny zawierającego pęknięcia spowodowane pękaniem korozyjnym. Oszacowane prawdopodobieństwo stanowi główny element oceny ryzyka.

2. Czynniki wpływające na jakość wyników badań diagnostycznych

Jak już wspomniano przeprowadzenie i zakres badań nieniszczących powinien zmniejszyć niepewności oceny stanu materiału, a tym samym obniżyć poziom prawdopodobieństwa uszkodzenia danego elementu. Efekt ten można uzyskać zarówno w przypadku stwierdzenia faktu, że stan materiału jest lepszy od spodziewanego (np. brak pęknięć) lub też po stwierdzeniu obecności symptomów świadczących o znacznym zużyciu (np. makropęknięć). W tym przypadku przeprowadzenie odpowiednich działań naprawczych lub wymiana elementu

również podnieść niezawodność. Takie jednoznaczne wnioski z przeprowadzonych badań można jednak wyciągać tylko wówczas, jeżeli ich wyniki uznamy za pewne. W rzeczywistości należy brać pod uwagę fakt, że mogą być one obciążone błędami, których źródłem może być zarówno sama procedura badawcza, wykorzystywany sprzęt pomiarowy, jak również personel wykonujący te badania. Stąd też istotną sprawą jest określenie dla danej techniki diagnostycznej prawdopodobieństwa wykrycia symptomu zmiany stanu. W przypadku badań nieciągłości i pęknięć w materiale prawdopodobieństwo ich wykrycia zależy od ich wymiarów w sposób schematycznie pokazany na rys. 2 [6]. Po stwierdzeniu obecności wady istotna jest dokładność, a raczej błąd w wymiarowaniu wykrytej wady. Wielkość wady opisana jest kilkoma parametrami, m.in. głębokością, położeniem, kształtem, orientacją w stosunku do działających sił itp. Bardzo istotnym parametrem jest głębokość wady mająca największy wpływ na jej dalsze zachowanie, w tym m.in. na zagrożenie pęknięciem katastroficznym. Drugim często mierzonym parametrem jest długość pęknięcia określana przede wszystkim dla wad powierzchniowych. Długość ta najczęściej znacznie przewyższa głębokość wady, ale wymiar ten ma zazwyczaj mniej istotny wpływ na bezpieczeństwo elementu w porównaniu z głębokością.



Rys. 2. Krzywe prawdopodobieństwa wykrycia wady
Fig. 2. Curve of a probability of flaw detection

Wady mające podobne wymiary, ale różne źródła pochodzenia, mogą być wykrywane z różną dokładnością. Wady objętościowe typu wtrącenia, pustki są zazwyczaj łatwiej wykrywalne niż pęknięcia. Same zaś pęknięcia w zależności od przyczyn ich powstania (np. jako efekt procesów zmęczeniowych bądź też pęknięcia korozyjnego) rzutują na możliwość ich detekcji. Położenie wady w elemencie (wada powierzchniowa, wada wewnętrzna) w sposób zasadniczy rzutuje na dobór techniki badawczej, jak również na dokładność wyników bada-

nia. Bardzo pomocna w tej sytuacji jest wiedza o mechanizmach i procesach degradacyjnych, na jakie narażony jest dany element [7, 8].

Kolejnym czynnikiem decydującym o możliwości wykrycia i opisanie wady jest jej orientacja zwłaszcza w stosunku do powierzchni elementu. Z punktu widzenia zaś bezpieczeństwa elementu istotne jest położenie wady w stosunku do działających w elemencie naprężeń normalnych. Mogą one powodować dalszą propagację wady i doprowadzić do pęknięcia całego elementu.

Do innych czynników rzutujących na dokładność lokalizacji potencjalnych wad należy rodzaj materiału, zwłaszcza struktura, a także stan powierzchni badanego elementu. Zanieczyszczenia powierzchni, rodzaj obróbki wykańczającej, chropowatość itp. mogą w znacznym stopniu zredukować jakość i efektywność badania. Nie bez znaczenia są również istniejące w danym elemencie otwory, nacięcia, spawy zaburzające sygnały wielu technik badawczych lub powodujące błędne wskazania. Przy badaniu niektórych elementów, zwłaszcza wielkogabarytowych, problemem rzutującym na dokładność wykrywanych wad jest dostępność do badań różnych powierzchni, a w zasadzie brak takiej dostępności z jednej strony (np. w rurociągach). Często warunkiem prowadzenia badań lub poprawy jego dokładności jest rozmontowanie danego elementu, np. rozłopatkowanie wirników turbin. Zabieg taki może jednak okazać się bardzo trudny lub wręcz niemożliwy do zrealizowania.

Ostatnim czynnikiem, ale wcale nie mniej ważnym od pozostałych, jest czynnik ludzki. Jakość badań jest w sposób oczywisty uzależniona od kwalifikacji osób przeprowadzających te badania. Należy jednak pamiętać, że nawet najwyższe kwalifikacje potwierdzone certyfikatami i badaniami porównawczymi przeprowadzanymi w laboratoriach nie zawsze gwarantują taki sam poziom wykrywalności wad na obiektach rzeczywistych. W tych przypadkach duże znaczenie mają czynniki środowiskowe, np. oświetlenie, temperatura otoczenia, zapylenie, ubrania ochronne, ograniczona powierzchnia, a tym samym wymuszona i często niewygodna pozycja do prowadzenia badań. Nie bez znaczenia jest zazwyczaj ograniczony czas badań implikujący często podwyższony poziom stresu. Wszystkie wymienione powyżej czynniki skłaniają do jednego wniosku, że zarówno wykrycie, jak i niewykrycie nieciągłości w danym elemencie należy traktować z dużą ostrożnością.

Wszystkie charakterystyki ilościowe opisujące wadę należy traktować jako wielkości losowe i jako takie powinny być one wykorzystane w ocenie ryzyka stwarzanego przez dany element.

3. Pęknięcie korozyjne

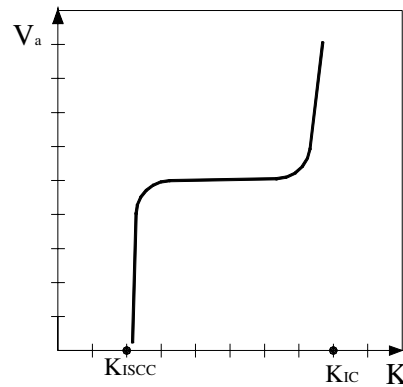
Jednym z procesów degradacyjnych, prowadzących do powstawania pęknięć elementów turbin parowych, jest pęknięcie korozyjne [9–12]. Jest ono defi-

niowane jako pęknięcie pod wpływem równoczesnego działania środowiska korozyjnego i naprężeń rozciągających [9]. Naprężenia mogą być efektem obciążeń zewnętrznych, jak również mogą to być wewnętrzne naprężenia resztkowe. Naprężenia zewnętrzne mogą być generowane przez połączenia wciskowe elementów, zginanie czy też skręcanie. Naprężenia resztkowe często są rezultatem spawania. Poziom naprężenie wywołujących zjawisko pęknięcia korozyjnego nie musi być bardzo wysoki. Istotnym warunkiem jest to, aby były to naprężenia rozciągające, działające na powierzchni metalu w obszarze oddziaływania odpowiedniego dla tego metalu środowiska.

Pęknięcie korozyjne może mieć charakter pęknięcia śródkrystalicznego, międzykrystalicznego lub mieszanego, w zależności od metalu i środowiska agresywnego. Przybiera zazwyczaj charakter pęknięcia kruchego. Pęknięcia są prostopadłe do naprężeń rozciągających. Wizualnie nie stwierdza się również ewidentnych oznak korozji.

Jak już wspomniano, zjawisko pęknięcia korozyjnego zachodzi w specyficznym dla danego metalu lub stopu środowisku. Stale węglowe narażone są na to zjawisko w obecności wodorotlenku sodowego lub amoniaku czy też wody morskiej. Stale stopowe mogą ulegać temu zjawisku w obecności par i roztworów zawierających chlorki. Chlorki mogą być również przyczyną tego zjawiska w stopach aluminium, natomiast wodorotlenek sodu w stopach niklu. Tlenki azotu są niebezpieczne dla stopów tytanu, a roztwory amoniaku dla stopów miedzi. W każdym przypadku wzrost temperatury i wzrost naprężeń przyspiesza proces pęknięcia korozyjnego. Czyste metale są mniej podatne na zjawisko pęknięcia. Uzależnione jest ono również od struktury metalograficznej i składu chemicznego stopów. Mechanizm synergistycznego działania naprężeń i środowiska polega na rozciąganiu szczeliny przez naprężenia i ułatwianiu dostępu środowiska korozyjnego do wierzchołka pęknięcia. Środowisko to z kolei rozpuszcza i osłabia metal w wierzchołku pęknięcia powodując jego wzrost. Jednocześnie rozwarście wierzchołka ułatwia usuwanie produktów korozji. Spotykany w praktyce zakres możliwych prędkości wzrostu pęknięcia mieści się w dość szerokim przedziale od 10^{-8} mm/s do 10^{-2} mm/s.

Pęknięcie korozyjne wymaga działania naprężeń rozciągających, przy czym do wzrostu pęknięć wymagany jest poziom naprężeń większy od pewnego poziomu naprężenia progowego. Poniżej tego poziomu propagacja pęknięć nie zachodzi, chociaż należy pamiętać, że w rzeczywistych elementach zawierających defekty, nieciągłości czy też inne koncentratory naprężenia lokalne mogą rosnąć. W praktyce prędkość propagacji pęknięć V_a przedstawia się w funkcji współczynnika intensywności naprężeń K_I . Zależność ta ma postać pokazaną na rys. 3.



Rys. 3. Zależność prędkości propagacji pęknięć V_a od współczynnika intensywności naprężeń K_I
Fig. 3. Relation between crack propagation rate V_a and stress intensity factor K_I

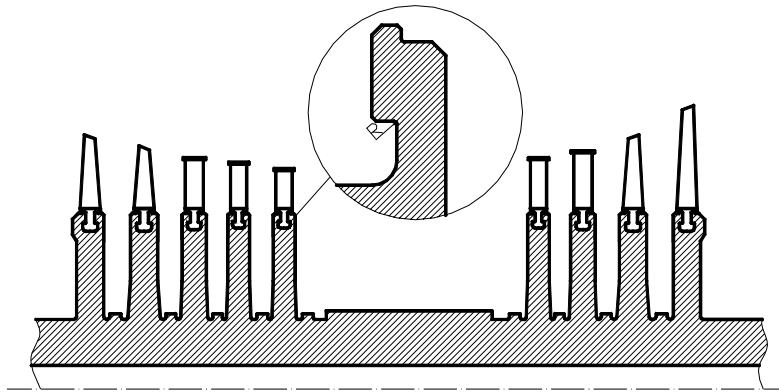
Poniżej pewnej progowej wartości współczynnika oznaczonej jako K_{ISCC} pęknięcie nie rozprzestrzenia się. Po jej przekroczeniu prędkość ta gwałtownie rośnie osiągając pewien poziom graniczny. W tym zakresie zmian współczynnika K_I prędkość propagacji pęknięcia jest mniej więcej stała. Przy wartościach K_I zbliżonych do wartości równej odporności materiału na pękanie K_{IC} prędkość propagacji zaczyna gwałtownie rosnać doprowadzając do całkowitego pęknięcia elementu. Należy wspomnieć, że wartość K_{ISCC} zależy nie tylko od rodzaju materiału, ale również od rodzaju środowiska korozyjnego. Te dwa czynniki wpływają również na wartości ustalonej prędkości propagacji pęknięć. Zapobieganie pękaniu korozyjnemu polega albo na eliminacji naprężeń rozciągających, albo na eliminacji środowiska powodującego to zjawisko. Zmianę charakteru naprężeń na powierzchni elementu na naprężenia ściskające można czasem uzyskać na drodze odpowiedniej obróbki mechanicznej takiej jak nagniatanie, walcowanie czy też odpuszczającej obróbki cieplnej. Pękaniu korozyjnemu zapobiega także obniżenie wartości naprężenia rozciągającego, aby współczynnik intensywności naprężeń dla istniejącej potencjalnej wady był mniejszy niż K_{ISCC} .

Inną możliwością uniknięcia zagrożenia pęknięcia korozyjnego jest odpowiedni dobór materiału, tzn. takiego, który nie jest podatny na ten proces w danym środowisku. Można również kontrolować środowisko w celu eliminacji z niego związków, które powodują korozyjne pękanie. Podobny efekt uzyskuje się przez zastosowanie inhibitorów korozji, czy też różnego rodzaju powłok. W wielu przypadkach nie można jednak uniknąć tego zjawiska. Pozostaje wtedy kontrola propagacji tak powstałych pęknięć oraz wycofanie elementu z eksploatacji, zanim pęknięcie osiągnie wymiar krytyczny.

4. Oszacowanie ryzyka eksploatacji wirnika z pęknięciem

Przykładową analizę prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu spowodowanego propagacją pęknięć korozyjnych przeprowadzono dla wirnika turbiny parowej [13]. Analiza ta na podstawie wyników badań diagnostycznych pozwoli podjąć decyzję o czasie dalszej pracy wirnika bądź też o jego wycofaniu z eksploatacji.

Schematyczną postać fragmentu wirnika pokazano na rys. 4. Przedstawione stopnie wirnikowe części niskoprężnej pracują w zakresie pary mokrej, co może stanowić przyczynę rozwoju pęknięć korozyjnych. Szczególnie narażone na to zjawisko są obszary o dużym poziomie naprężeń rozciągających, w których równocześnie mogą wytrącać się chlorki zawarte w parze. Obszarami takimi są wręby łopatkowe schematycznie pokazane na rys. 4.



Rys. 4. Niskoprężna część wirnika turbiny
Fig. 4. LP part of turbine rotor

Z punktu widzenia poziomu naprężeń, jakie występują we wrębie łopatkowym, istotna jest wartość promienia krzywizny R . Mała wartość tego promienia powoduje silną koncentrację naprężeń, zwłaszcza mechanicznych, wywołanych wirowaniem łopatek oraz samego wirnika. Naprężenia termiczne mają tutaj mniejsze znaczenie, ponieważ w chwili osiągnięcia przez wirnik maksymalnych obrotów równych 3000 obr/min, czyli w chwili wystąpienia maksymalnych naprężeń mechanicznych stopnie wirnikowe są już wygrzane i występują w nich niewielkie różnice temperatur. Wysoki poziom naprężeń występuje zatem w całym ustalonym okresie eksploatacji turbiny, co może sprzyjać rozwojowi pęknięć korozyjnych. Praktyka eksploatacyjna wskazuje, że we wrębach łopatkowych omawianych wirników znajdują się pęknięcia, co powoduje, że dalsza ich eksploatacja obarczona jest dużym ryzykiem. Oszacowanie tego ryzyka wymaga przeprowadzenia analizy zachowania się takich pęknięć i obliczenia prawdopodobieństwa pęknięcia. Ważnym elementem takiej analizy są badania nieniszczące metodą ultradźwięków przeprowadzane na załopatkowym wirniku,

które pozwalają oszacować wymiary i położenie wady. Zgodnie jednak z uwagami podanymi w pkt 2 w obliczeniach uwzględnic należy czynniki wpływające na jakość badań, co w konsekwencji prowadzi do wniosku, że uzyskane wartości pomiarów traktować należy jako wartości losowe.

Obliczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia wirnika wymaga zdefiniowania tzw. funkcji stanu, czyli funkcji określającej kryterium zniszczenia. Jeżeli założymy, że głównym czynnikiem decydującym o możliwości zniszczenia jest proces pęknięcia korozyjnego, to korzystając z zasad liniowej mechaniki pęknięcia funkcję stanu g możemy zapisać jako:

$$g = K_{IC} - K_{I\max} \quad (1)$$

gdzie: K_{IC} – odporność materiału na pęknięcie,
 $K_{I\max}$ – maksymalny współczynnik intensywności naprężeń.

Wyrażając współczynnik $K_{I\max}$ przez naprężenie dostajemy:

$$g = K_{IC} - M\sigma\sqrt{a} \quad (2)$$

gdzie: σ – maksymalne naprężenie rozciągające,
 M – współczynnik kształtu i położenia pęknięcia,
 a – głębokość pęknięcia.

Bieżący wymiar pęknięcia ustalić można na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów oraz własności procesu propagacji pęknięć w warunkach pęknięcia korozyjnego. Jak wynika z wykresu przedstawionego na rys. 3, po osiągnięciu przez współczynnik intensywności naprężeń K_I progowej wartości K_{ISCC} wada zaczyna propagować w skali makro, przy czym prędkość tej propagacji pozostaje prawie stała bez względu na wzrost współczynnika K_I . Jeżeli zatem stan wytrzymałościowy, warunki otoczenia oraz wymiar wady powodują, że współczynnik intensywności naprężeń K_I mieści się pomiędzy K_{ISCC} oraz K_{IC} (rys. 3), to mierząc wielkość wady w zadanym przedziale czasu Δt możemy oszacować prędkość jej propagacji jako:

$$V_a = \frac{a_2 - a_1}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie a_1 oraz a_2 oznaczają odpowiednio wymiar pęknięcia na początku i końcu przedziału czasu Δt .

Bieżący wymiar pęknięcia a obliczymy jako:

$$a = a_0 + V_a t \quad (4)$$

gdzie a_0 jest początkową głębokością pęknięcia.

Możliwe jest teraz określenie prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika w funkcji czasu dalszej eksploatacji. Funkcja stanu ma zatem postać:

$$g(t) = K_{IC} - M\sigma\sqrt{a_0 + V_a t} \quad (5)$$

Wszystkie wielkości występujące we wzorach (4) i (5), a więc K_{IC} , σ , M , a_0 , a_1 , a_2 mają charakter wielkości losowych, a cztery ostatnie są wynikiem przeprowadzonych pomiarów wady. Prawdopodobieństwo uszkodzenia określa zatem relacja

$$P_f = P(g(t) < 0) \quad (6)$$

Przybliżenie pierwszego rzędu tego prawdopodobieństwa oszacujemy jako [6,14]

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\mu_g}{s_g} \quad (8)$$

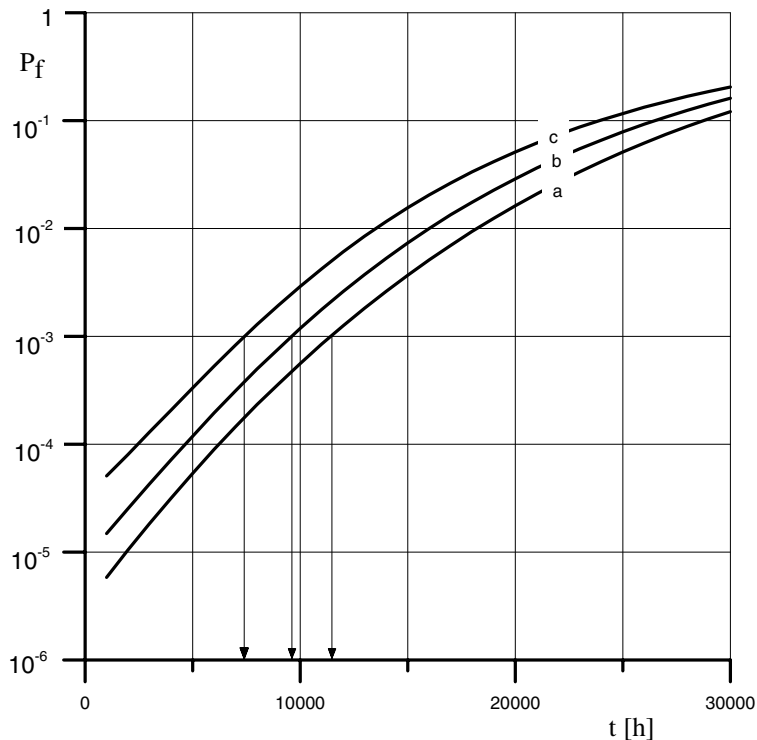
gdzie: Φ – dystrybuanta rozkładu normalnego,
 μ_g – wartość oczekiwana funkcji g ,
 s_g – odchylenie standardowe funkcji g .

Przykładowe wartości tego prawdopodobieństwa dla danych zamieszczonych w tabelicy 1 podano na rys. 5. Równocześnie na rysunku 5 pokazano wpływ dokładności pomiaru głębokości pęknięcia na wielkości szacowanego prawdopodobieństwa uszkodzenia.

Tabela 1. Wartości średnie i odchylenia standardowe zmiennych losowych
 Table 1. Mean values and standard deviations of random variables

Wielkość	a_0 [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	M [-]	K_{IC} [MPa \sqrt{m}]	σ [MPa]
Wartość średnia	2,5	1,5	2,5	1,75	75	580
Odchylenie standardowe	0,2	0,2	0,2	0,05	5	10

Krzywa a odpowiada odchyleniu standardowemu zmierzonego pęknięcia wynoszącemu 0,1 mm, krzywa b odchyleniu 0,2 mm, a krzywa c odchyleniu 0,3 mm.



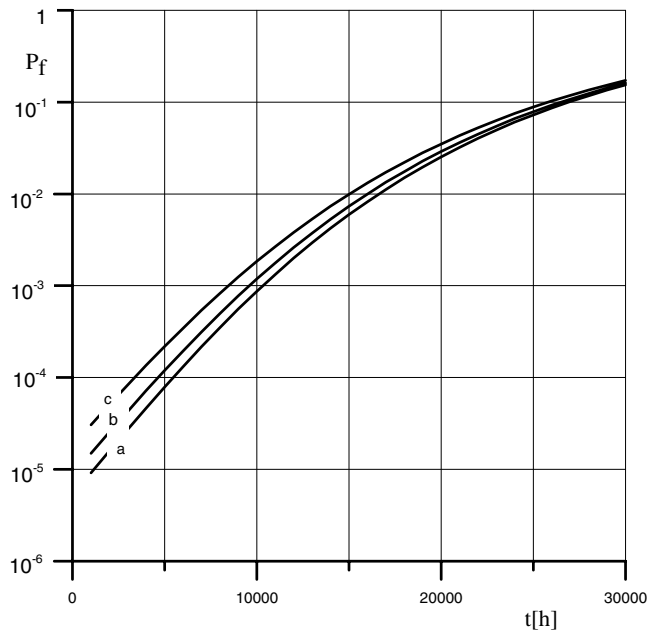
Rys. 5. Zależność prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika od odchylenia standardowego pomiaru głębokości pęknięcia

Fig. 5. Variation of rotor failure probability with standard deviation of crack depth measurement

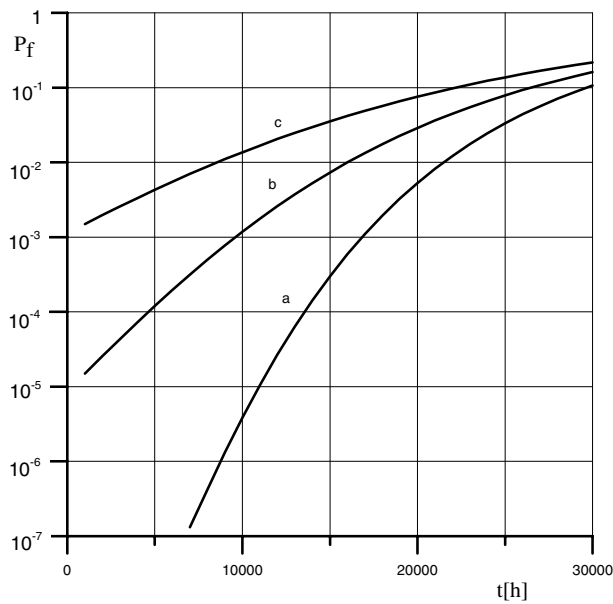
Jeżeli przyjąć dopuszczalny poziom prawdopodobieństwa uszkodzenia wynoszący 0,001, to okres przyszłej eksploatacji – w zależności od dokładności pomiaru – wynosić będzie od ok. 6200 do 12000 h.

Duży wpływ na oszacowane prawdopodobieństwo zniszczenia ma również dokładność określenia położenia wady reprezentowana tutaj przez odchylenie standardowe współczynnika kształtu M . Wpływ ten pokazano na rys. 6. Kolejne krzywe odpowiadają wartościom odchylenia standardowego M odpowiednio równym $a - 0,025$, $b - 0,050$ oraz $c - 0,075$.

Największy wpływ na szacowane prawdopodobieństwo ma jednak dokładność wyznaczenia odporności materiału na pęknięcia rys. 7. Należy zauważyć, że wyznaczanie tej wartości w odniesieniu do wirników turbin ciepłych o dużym czasie eksploatacji jest szczególnie trudne. W praktyce jedyną możliwą do zastosowania techniką badawczą jest metoda SPT [15,16], chociaż metoda ta również daje wyniki obarczone błędami.



Rys. 6. Zależność prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika od odchylenia standardowego współczynnika położenia pęknięcia
 Fig. 6. Variation of rotor failure probability with standard deviation of coefficient of crack location



Rys. 7. Zależność prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika od odchylenia standardowego pomiaru odporności materiału na pęknięcie
 Fig. 7. Variation of rotor failure probability with standard deviation of material toughness

Kolejne krzywe pokazane na rys. 7 odpowiadają odchyleniom standardowym odporności na pękanie równym a – 2,5 MPa \sqrt{m} , b – 5 MPa \sqrt{m} , c – 7,5 MPa \sqrt{m} . Podane wyniki wskazują, że wyznaczenie odporności na pękanie K_{IC} z odchyleniem większym niż 10% wartości średniej w analizowanym przypadku zmusza do wyeliminowania tego wirnika z eksploatacji.

5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano możliwości oceny ryzyka dalszej eksploatacji wirników turbin parowych zawierających pęknięcia. Szczegółowe rozważania skupiono na pęknięciach powodowanych pękaniem korozyjnym. Warunki takiego pęknięcia występują w niskoprężnych częściach turbin, a sprzyjają temu wysokie naprężenia występujące w niektórych wrębach łopatkowych. W pracy zaproponowano metodę oszacowania prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika w czasie dalszej eksploatacji. Podstawą tego szacowania jest pomiar wymiarów pęknięcia, a w szczególności jego głębokość i położenia.

Pomiary te pozwalają m.in. oszacować tempo propagacji. W połączeniu z obliczonymi naprężeniami rozciągającymi występującymi w strefie pęknięcia jak i własnościami materiałowymi w szczególności odpornością na pękanie możliwe jest oszacowanie krytycznych wymiarów pęknięcia. Traktując wszystkie te wielkości jako wielkości losowe, możliwe jest oszacowanie prawdopodobieństwa zniszczenia wirnika, a także zmiana tego prawdopodobieństwa w czasie.

W artykule przeanalizowano również wpływ dokładności pomiaru głębokości pęknięcia, jego położenia, a także odporności materiału na pękanie na szacowane prawdopodobieństwo. Stwierdzono bardzo istotny wpływ odchyleń standardowych tych wielkości na poziom prawdopodobieństwa zniszczenia, a tym samym na szacowany czas dalszej bezpiecznej eksploatacji takiej turbiny.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr 3T10B06929 finansowanego ze środków na naukę.

Praca wpłynęła do Redakcji 13.02.2007 r.

Literatura

- [1] Rusin A.: Ryzyko techniczne w długotrwałej eksploatacji turbin parowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 3 (143), 2005, s. 89–99.
- [2] Jovanovic A.: Risk-based component life management in fossil power plants. OMMI, 1, 1, 2002.
- [3] Rusin A.: Assessment of operational risk of steam turbine valves. Int. J. Pressure Vessels and Piping, 81, 4, 2004, s. 373–379.

- [4] Rusin A., Lipka M.: Operational risk reduction of turbines by optimization of its start-ups. *Advances in safety and Reliability ESREL 2005*, A.A. Balkema Publishers, 2005, s. 1721–1728.
- [5] Rusin A.: Koncepcja układu śledzenia ryzyka eksploatacyjnego turbin. *Archiwum Energetyki*, tom XXXVI, 2006, s. 211–219.
- [6] Sundararajan C. (ed.): *Probabilistic structural mechanics handbook*. Chapman and Hall, New York, 1995.
- [7] Viswanathan R.: An investigation of blade failures in combustion turbines. *Engineering Failure Analysis*, 8, 2001, s. 493–511.
- [8] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: *Pełzanie elementów turbin ciepłych*. WNT, Warszawa, 1991.
- [9] Baszkiewicz J., Kamiński M.: *Podstawy korozji materiałów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1997.
- [10] Turnbull A., Zhou S., Hinds G.: Stress corrosion cracking of steam turbine disc steel – measurement of the crack-tip potential. *Corrosion Science*, 46, 2004, s. 193–211.
- [11] Turnbull A., Zhou S.: Pit to crack transition in stress corrosion cracking of a steam turbine disc steel. *Corrosion Science*, 46, 2004, s. 1239–1264.
- [12] Yu-jinag Xie, Mao-cai Wang, Ge Zhang, Min Chang: Analysis of superalloy turbine blade tip cracking during service. *Engineering Failure Analysis*, 13, 2006, s. 1429–1436.
- [13] Rusin A.: Określenie warunków dalszej bezpiecznej eksploatacji wirników turbin z pęknięciami we wrębach łopatkowych. *Praca naukowo-badawcza IMiUE, Gliwice*, 2006.
- [14] Wong F.S.: First - order, second - moment methods. *Computer and Structures* 20, 4, 1985, s. 779–791.
- [15] Shekhter A., Croker A.B.L., Hellier A.K., Moss C.J., Ringer S.P.: Towards the correlation of fracture toughness in an ex-service power generating rotor. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 77, 2000, s. 113–116.
- [16] Viswanathan R., Jaffee R.I.: Toughness of Cr-Mo-V steels for steam turbine rotors. *Transactions of the ASME*, Vol. 105, 1983, s. 286–294.

Assessment oh the failure probability of turbine rotors with cracks based on diagnostic tests

S u m m a r y

Control of technical risk involved in the operation of power units is a part of their safety management. Risk control may also involve direct intervention in the crucial process parameters that determine the operational conditions of power unit components as well as proper programming of their maintenance. Risk control under operational conditions is accomplished by means of several protection, monitoring and control systems. The essential maintenance activities include tests, their range and results, as well as follow up activities as an outcome of the assessment of the technical condition of a given component.

Modern strategies of diagnostic tests are predominantly based on the quantitative risk assessment of particular components and of the entire power block. Proper selection of the range of tests, their quality and duration should secure the operational risk below the assumed and acceptable level.

The scope of the paper is the analysis of the possibility of assessing the risk involved in further operation of steam turbine rotors with cracks. Detailed examination is focused on the cracks evoked by stress corrosion cracking. Such conditions occur in low pressure turbine parts and are enhanced by high value of stresses in some blade grooves. The proposed method of assessing the

probability of rotor damage in the course of further operation is based on the measurements of the crack, and, in particular, its depth and location.

Such measurements enable the assessment of the rate of crack propagation. By combining the calculated values of tensile stresses in the cracking zone with material properties, especially material toughness, the critical dimensions of cracks may be estimated. As all these quantities may be treated as random variables, it is possible to estimate the probability of rotor damage, as well as the course of its change in time.

Another issue analyzed in the paper is the influence of the accuracy of crack depth measurements, as well as material toughness on the estimated probability. Essential weight of standard deviation of the variables on the rotor damage probability level and estimated time of further safe operation was indicated.

