ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996

Seria: ENERGETYKA z. 127 Nr kol. 1350

Andrzej RUSIN

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

PROPAGACJA PĘKNIĘĆ W USTALONYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI

Streszczenie. W pracy przedstawiono zagadnienie oceny trwałości pękniętych elementów turbin cieplnych w ustalonych warunkach eksploatacji. Wykonano szczegółowe obliczenia tempa propagacji szczelin oraz prawdopodobieństwa pęknięcia katastroficznego łopatek.

CRACK PROPAGATION UNDER STEADY OPERATING CONDITIONS

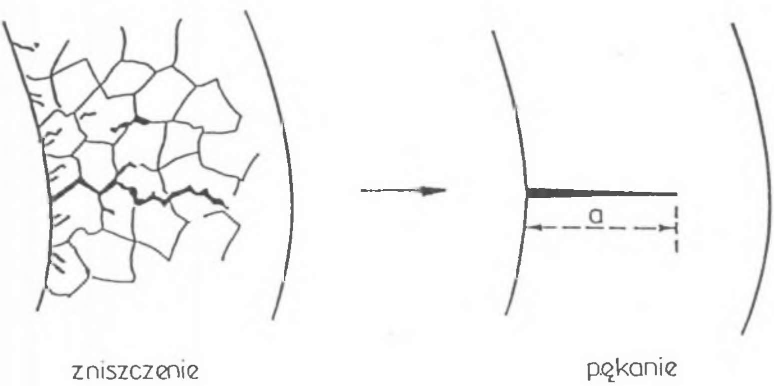
Summary. The paper presents the problem of the assessment of the life of the cracked components of heat turbines running under stable operating conditions. The detailed calculations of the crack propagation rate have been performed together with the probability of a catastrophic cracking of a blade.

AUSBREITUNG DER RISSEN IN STATIONÄREN BETRIEBSZUSTÄNDEM

Zusammenfassung. Im Aufsatz wird das Problem der Lebensdauerauswertung von geschädigten Turbinenbauteilen in stationären Betriebszuständen gegeben. Es wird eine detailierte Berechnung der Ausbreitung von Rissen und die Wahrscheinlichkeit einer Havarie von Turbinenschauffeln gemacht.

1. Wstęp

Długotrwała eksploatacja elementów maszyn energetycznych prowadzona w warunkach wysokich temperatur i pełzania powoduje stopniową degradację materiału [1, 2]. Przejawem tych procesów jest pojawienie się w pewnej fazie eksploatacji pojedynczych mikroszczelin, które następnie zaczynają się łączyć doprowadzając zazwyczaj do jednego makropęknięcia. Analizę procesów pełzania we wspomnianym zakresie prowadzi się zazwyczaj opierając się na kontynualnej mechanice uszkodzeń wykorzystującą parametr zniszczenia Rabotnonowa–Kaczanowa [3]. Pojawienie się makropęknięcia nie musi oznaczać definitywnego końca pracy elementu. Możliwa jest dalsza eksploatacja, acz-



Rys. 1. Procesy zniszczenia i propagacji pęknięć

Fig. 1. Damage and crack propagation

kolwiek z rozwijającym się dalej pęknięciem (rys. 1).

W podobny sposób możemy również opisać zachowanie się wad istniejących w materiale od początku eksploatacji. Wady te mogą być pochodzenia odlewniczego, mogą też powstawać w wyniku innych procesów technologicznych, np. spawalniczych. Początkowy wymiar tych wad określa się za pomocą badań nieniszczących, a w przypadku niewykrycia takich wad, wymiar ich przyjmuje się na poziomie czułości aparatury pomiarowej.

W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie zachowania się w eksploatacji pękniętej łopatki turbinowej. Ocena tempa propagacji oraz prawdopodobieństwa pęknięcia katastroficznego stanowią podstawę do określenia możliwości i czasu bezpiecznej pracy.

W dalszej części artykułu omówiono wielkości charakteryzujące stan naprężenia w obrębie pęknięcia, inkubacje i propagacje pęknięć, a także sposób oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia. Rozważania teoretyczne zilustrowano obliczeniami tempa propagacji i prawdopodobieństwa zniszczenia łopatki turbinowej.

2. Wielkości charakteryzujące stan naprężenia w obrębie pęknięcia

Problematyka rozwoju pęknięć w warunkach ustalonych naprężeń jest tematem wielu prac prowadzonych od około 20 lat. We wcześniejszych pracach próbowano powiązać tempo propagacji pęknięcia ze współczynnikiem intensywności naprężeń K, analogicznie do przypadku obciążeń cyklicznych. Zależność tempa propagacji przedstawiano zazwyczaj w postaci:

$$\frac{da}{dt} = DK^S \tag{1}$$

gdzie: D, S – stałe materiałowe.

Z uwagi na fakt, że zależność (1) dobrze opisywała propagacje tylko przy małych wartościach wykładnika pełzania (n = 1), a także wykazywała dużą zależność od geometrii badanej próbki, opracowano inną zależność dla analizowanego procesu, wiążącą tempo propagacji z naprężeniem nominalnym σ_{net}

$$\frac{da}{dt} = H\sigma_{net}^{p} \tag{2}$$

gdzie: H, p – stałe materiałowe.

Naprężenie σ_{net} jest naprężeniem w nie objętym pęknięciem przekroju próbki. Szczegółowe badania [5] nie potwierdziły jednak poprawności stosowania zależności (2) w dużym zakresie naprężeń i geometrii próbek. Niezależność taką wykazuje natomiast parametr C^* wprowadzony na zasadzie analogii z całką Rice'a J m.in. przez I.D. Landesa i J.A. Bagleya. Koncepcja ta została następnie rozwinięta i szczegółowo opracowana dla różnych wariantów równań konstytutywnych opisujących zachowanie się materiału w wysokich temperaturach [4].

W zależności od stanu materiału w obszarze pęknięcia, a w szczególności od wzajemnego położenia obszarów sprężystych, obszarów pełzania pierwotnego oraz obszarów pełzania ustalonego wyróżnia się różne postacie parametru charakteryzującego stan naprężenia w obrębie wierzchołka pęknięcia.

Jeżeli obszar pęknięcia objęty jest pełzaniem ustalonym, to zachowanie się materiału w takim stanie można opisać następująco:

$$\varepsilon_{ij}^{c} = 3/2B\sigma_{e}^{n-1} s_{ij} \tag{3}$$

gdzie: B, n – stałe materiałowe.

Wtedy parametr C^* jest całką liniową określającą prędkość zmiany energii w obrębie pęknięcia definiowaną jako [4]:

$$C^* = \int_{\Gamma} \left[W^* dy - \sigma_{ij} n_i \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} ds \right] \tag{4}$$

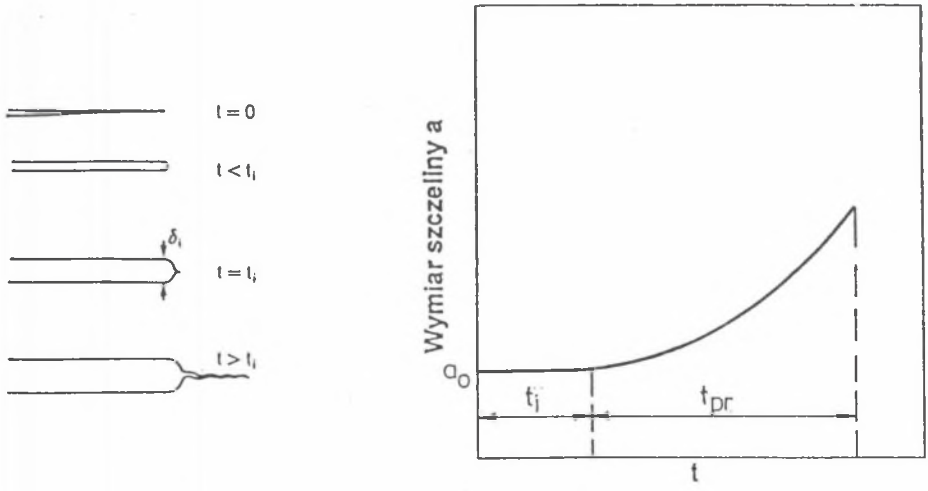
gdzie:

$$W^*(\varepsilon_{mn}) = \int_0^{\varepsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \tag{5}$$

3. Inkubacja i propagacja pęknięć

Jeżeli pęknięcie pojawia się w elemencie jako skutek kumulacji procesów zniszczenia wywołanych pełzaniem lub zmęczeniem niskocyklicznym, to czas inkubacji takiego pęknięcia jest czasem, w którym parametr zniszczenia osiągnie swą wartość graniczną.

W przypadku elementów zawierających rysy lub szczeliny od początku eksploatacji, wzrost takich pęknięć może być poprzedzony wstępnym okresem inkubacji, w którym nie następuje zauważalny przyrost długości pęknięcia (rys. 2b).



Rys. 2. a. Inicjacja pęknięcia; b. Okres inkubacji propagacji pęknięć.

Fig. 2. a. Crack initiation. b. Periods of incubation and crack growth

W okresie tym następuje kumulacja procesów degradacyjnych zachodząca w obrębie wierzchołków pęknięcia. Jako efekt tego zjawiska następuje zaokrąglenie początkowo ostrego wierzchołka pęknięcia.

Wyniki badań doświadczalnych wskazują, że proces propagacji pęknięcia przy obciążeniu ustalonym może być opisany ogólną zależnością typu [6]

$$\frac{da}{dt} = DC^{*\varphi} \tag{6}$$

gdzie: D, φ – stałe materiałowe.

W warunkach obciążeń cyklicznych wywołanych rozruchami lub zmiana mocy turbiny propagacje pęknięć opisuje równanie Parisa lub jego modyfikacje

$$\frac{da}{dN|_N} = A\Delta K_{\varphi}| \tag{7}$$

gdzie:

A, φ – stałe,

ΔK – zakres zmian współczynnika intensywności naprężeń.

Całkowity przyrost pęknięcia w danym cyklu pracy możemy obliczyć jako sumę przyrostów wywołanych obciążeniem cyklicznym oraz przyrostów powodowanych pełzaniem materiału

$$\frac{da}{dN} = \frac{da}{dN|_N} + \int_0^{t_h} \frac{da}{dt}\,dt \tag{8}$$

gdzie: t_h jest czasem pracy ustalonej w danym cyklu.

W równaniu (8) człon $\frac{da}{dN|_N}$ reprezentuje przyrost pęknięcia wywołany wszystkimi zmianami obciążeń występującymi w danym cyklu pracy.

Bezpieczna liczba cykli pracy limitowana jest osiągnięciem przez propagującą szczelinę jej wymiarów krytycznych a_f. Wymiar krytyczny pęknięcia a_f będący funkcją temperatury, położenia pęknięcia, obciążenia, może być obliczony na podstawie odporności na pękanie K_{IC}. Krytyczny wymiar pęknięcia może też być limitowany zmniejszającym się czynnym przekrojem w obszarze propagacji. Dopuszczalny przekrój, a więc i dopuszczalny maksymalny wymiar pęknięcia a_f może być wyznaczony doświadczalnie lub na drodze analiz teoretycznych.

4. Prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu

Szereg wielkości wykorzystywanych w analizie procesu propagacji pęknięć wyznacza się na drodze pomiarowej. Są to przede wszystkim: początkowy wymiar szczeliny a_o, krytyczny wymiar szczeliny a_f, stałe materiałowe. Inne, jak np. maksymalne naprężenia w łopatce, otrzymuje się na podstawie analizy teoretycznej. Wielkości te mogą być obarczone błędami pomiarowymi, a zatem można je traktować jako wielkości losowe, a pęknięcie elementu rozpatrywać w kategoriach prawdopodobieństwa.

Czas pracy takiego elementu ograniczony jest zatem czasem propagacji pęknięcia t_{pr} do wymiarów krytycznych. Z uwagi na wymienione powyżej czynniki, czas ten jest wielkością losową. Funkcje zachowania możemy zatem zapisać w postaci [4]:

$$g = t_{pr} - t \tag{9}$$

Niezawodność w danym czasie t będzie definiowana prawdopodobieństwem

$$R(t) = P(t_{pr} > t) \tag{10}$$

lub

$$R(t) = P(g > 0) \tag{11}$$

Prawdopodobieństwo uszkodzenia określa zatem relacja przeciwna

$$p_f = P(g < 0) \tag{12}$$

Wykorzystując indeks Hasofera–Linde'a β [4], przybliżenie pierwszego rzędu prawdopodobieństwa zniszczenia określimy jako

$$p_p = \phi(-\beta) \tag{13}$$

gdzie:

$$\beta = \frac{\mu_g}{s_g} \tag{14}$$

ϕ – dystrybuanta rozkładu normalnego,
μ_g – wartość oczekiwana funkcji g,
s_g – odchylenie standardowe funkcji g.

5. Trwałość pękniętej łopatki

5.1. Propagacja pęknięcia w łopatce

Opierając się na przedstawionych zależnościach przeprowadzono analizę zachowania się łopatki zawierającej na jednej z krawędzi w okolicy stopki pęknięcie (rys. 3). Przyjęto, że łopatka pracuje w warunkach pełzania. Propagacja pęknięć będzie więc opisana zależnością (6). Jeśli przyjmie się model łopatki jak na rys. 4, wielkości niezbędne do analizy propagacji mają postać:
– współczynnik intensywności naprężeń:

$$K = \sigma\sqrt{2w\tan\left(\frac{\pi a}{2w}\right)}\left[0{,}752 + 2{,}02 + 0{,}37\left(1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2w}\right)\right)^3\right] / \cos\left(\frac{\pi a}{2w}\right) \tag{15}$$

– parametr C^*

$$C^* = \sigma_R \dot{\varepsilon}_R^c R$$

$$R' = \left(\frac{K}{\sigma_R}\right)^2$$

$$\sigma_R = \frac{R_e P}{P_l}$$

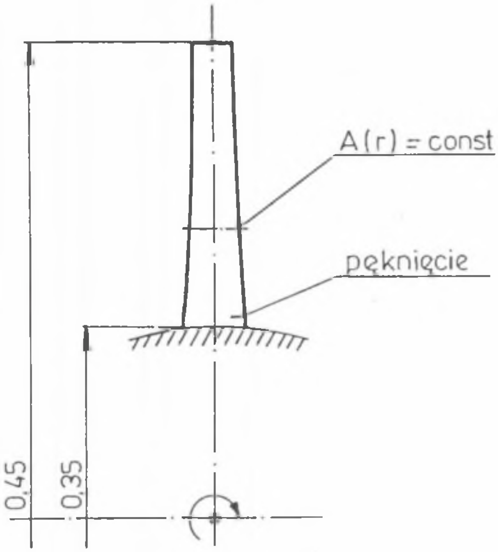
$$P_l = 1{,}5 R_e F\left[1 - \frac{a}{w} - 1{,}232\left(\frac{a}{w}\right)^2 + \left(\frac{a}{w}\right)^3\right]$$

$$\dot{\varepsilon}_R^c = B\sigma_R^n$$

Przyjęto, że analiza dotyczy łopatki cylindrycznej o wymiarach podanych na rys. 3 i wirującej z prędkością n = 6000 obr/min. Łopatka wykonana jest ze stali 316L i pracuje w temperaturze 600°C. W tej temperaturze stałe materiałowe – współczynniki powyższych funkcji są następujące [6]: D = 9,5, ϕ = 0,89, n = 8,4, B = $1{,}94 \cdot 10^{-24}$.

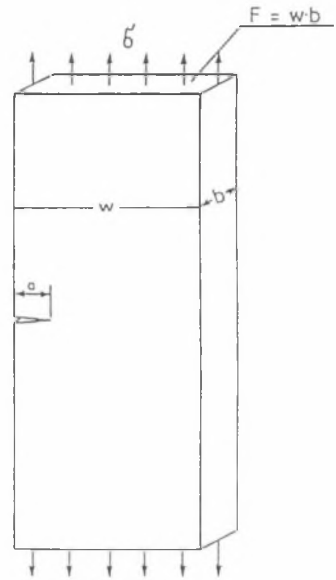
Jednostki powyższych danych przyjęto tak, aby uzyskać K wyrażony w MPa , C* w MPamh^{-1}, prędkość propagacji w mm/h. Gęstość materiału przyjęto równą ρ = 6500 kg/m^3. Czas inkubacji pęknięcia t_i przyjęto równy zero. Tempo propagacji szczelin o różnych wymiarach początkowych pokazano na rys. 5.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji łopatka pracuje w sposób cykliczny, tzn. poddawana jest procesom obciążania i odciążania, pomiędzy którymi



Rys. 3. Wirująca łopatka

Fig. 3. Rotating blade



Rys. 4. Model łopatki z pęknięciem

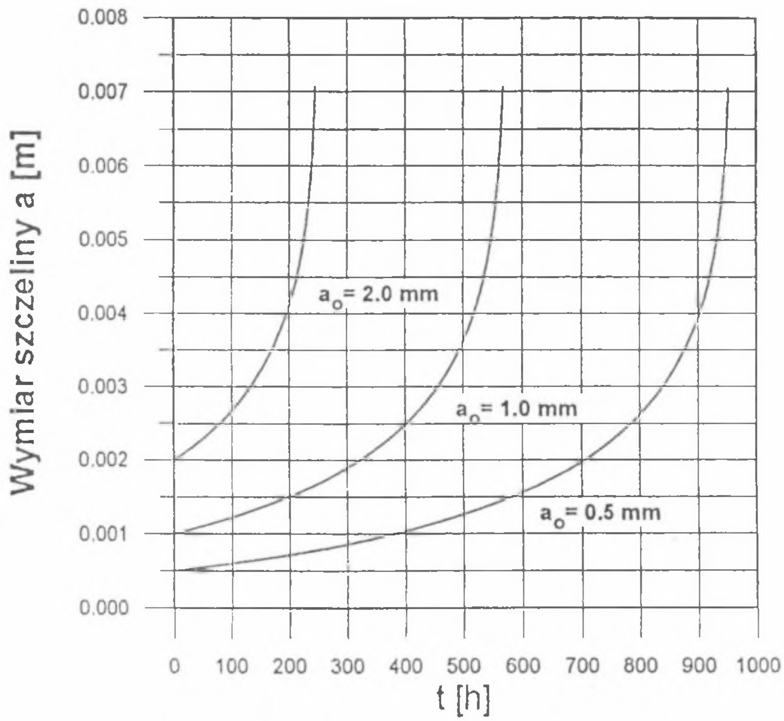
Fig. 4. Model of cracked blade

pracuje w warunkach obciążenia ustalonego. Tym razem propagacja pęknięć będzie wywołana zarówno pełzaniem przy obciążeniu stałym i cyklicznym

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^{\varphi} + \int_{0}^{t_h} DC^{*\phi}\, dt \tag{16}$$

Dla analizowanej stali współczynniki równania Parisa mają wartości: $A = 3 \cdot 10^{-8}$, $\varphi = 3$.

W analizie przyjęto, że cykl pracy łopatki składa się z rozruchu, tzn. wzrostu obrotów od zera do wartości nominalnej, pracy ustalonej przez okres t_h oraz odstawienia. Tempo propagacji szczeliny 1 mm dla tak zdefiniowanych cykli pokazano na rys. 6. Kolejne krzywe przedstawiają tempo propagacji dla $t_h > 600$ h, $t_h = 20$ h, $t_h = 10$ h. Uzyskane rezultaty wskazują, że dla analizowanego materiału i przyjętego obciążenia tempo propagacji wywołane pełzaniem jest porównywalne z przyrostami szczeliny na skutek działania obciążeń zmiennych.



Rys. 5. Propagacja szczelin w warunkach pełzania

Fig. 5. Creep cracks propagation

5.2. Prawdopodobieństwo pęknięcia łopatki

Opierając się na założeniach podanych w pkt. 4 wykonano obliczenia prawdopodobieństwa pęknięcia łopatki przyjmując, że niektóre z wielkości, a mianowicie: początkowy wymiar szczeliny a_o, krytyczny wymiar szczeliny a_f, maksymalne naprężenie w łopatce sigma są wielkościami losowymi. W kolejnych wariantach obliczeń przyjęto następujące wartości oczekiwane μ oraz odchylenia standardowe s zmiennych losowych:

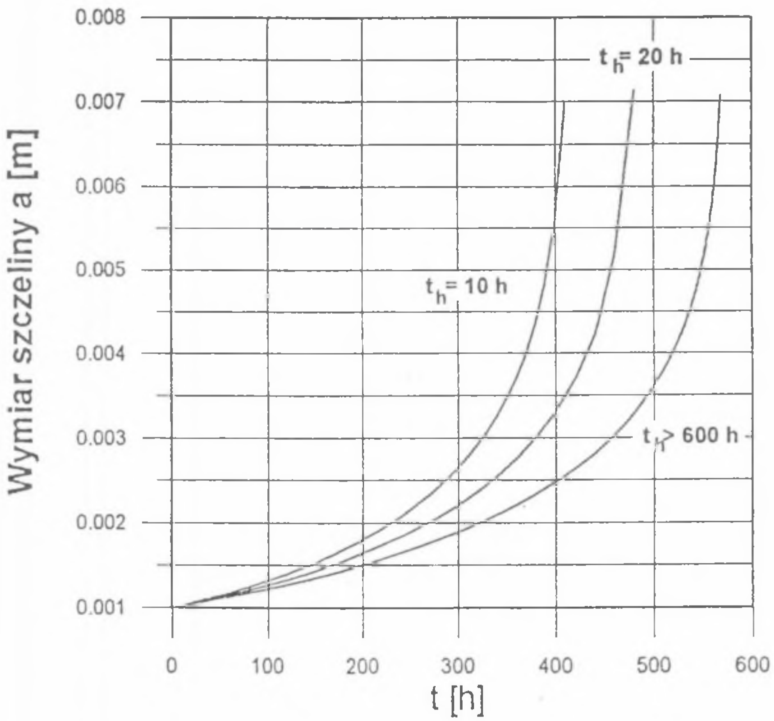
1 – μ_{ao} = 0,001 m, s_{ao} = 0,0001 m, μ_{af} = 0,007 m, s_{af} = 0,0001 m,

2 – μ_{ao} = 0,001 m, s_{ao} = 0,0001 m, μ_{af} = 0,007 m, s_{af} = 0,0007 m,

3 – μ_{ao} = 0,001 m, s_{ao} = 0,0002 m, μ_{af} = 0,007 m, s_{af} = 0,0001 m,

4 – μ_{ao} = 0,001 m, s_{ao} = 0,0001 m, μ_{af} = 0,007 m, s_{af} = 0,0001 m,

μ_{ao} = 102,5 MPa, s_{σ} = 2,5 MPa.



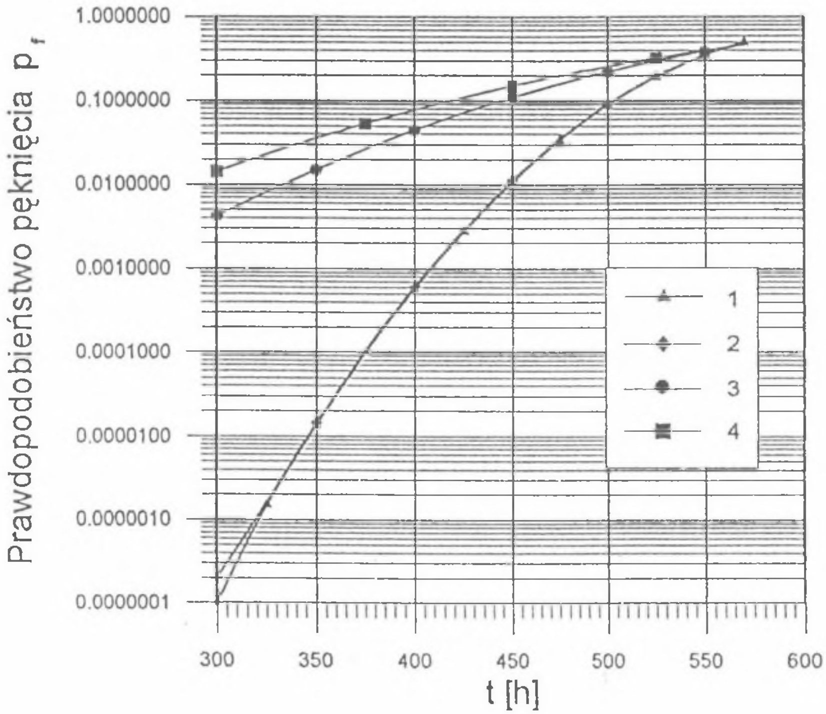
Rys. 6. Propagacja szczeliny 1 mm dla różnych okresow pełzania

Fig. 6. Creep 1 mm crack propagation for different hold times

Pozostałe dane przyjęto jako wielkości zdeterminowane. Wyniki obliczeń pokazano na rys. 7.

Z podanych rezultatów wynika, że wariancja wymiaru krytycznego pęknięcia nie ma istotnego wpływu na prawdopodobieństwo pęknięcia. Duży wpływ ma natomiast naprężenie maksymalne w łopatce będące funkcją geometrii łopatki, gęstości materiału i obciążenia. Najistotniejszym czynnikiem jest jednak początkowy wymiar szczeliny. Wymiar ten określany jest za pomocą pomiarów, a z uwagi na występujące często trudności w dokładnym ustaleniu wymiarów wady pomiar ten może być obarczony znacznymi błędami.

Przedstawiona analiza trwałości i prawdopodobieństwa zniszczenia łopatki pozwala na podejmowanie umotywowanych decyzji co do dalszej pracy elementu. Pozwala także na wskazanie tych wielkości, które decydująco wpływają na wynik końcowy, co stanowi podstawę do działań zmierzających do redukcji wariancji wartości tych wielkości.



Rys. 7. Zależność prawdopodobieństwa pęknięcia od wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego zmiennych losowych

Fig. 7. Dependence of probability of failure on mean values and standard deviations of random parameters

Literatura

1. Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Pełzanie elementów turbin cieplnych. WNT, Warszawa 1991.
2. Rusin A.: Wpływ warunków eksploatacji na pełzania rur spawanych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. vol 28, z. 3, 1993, s. 281–289.
3. Rusin A.: Trwałość wirników turbin w ujęciu kontynualnej mechaniki zniszczenia. ZN Pol. Śl., seria Energetyka z. 123, Gliwice 1995.
4. Rusin A.: Trwałość wysokotemperaturowych elementów turbin cieplnych w ustalonych warunkach eksploatacji. ZN Pol. Śl., seria Energetyka z. 127, Gliwice 1996.

5. Riedel H.: Recent advances in modelling creep crack growth. Int. Conf. on Fracture ICF 7, Houston 1989. vol. 2 s. 1493–1525.
6. Webster G.A, Ainsworth R.A: High Temperature Component Life Assessment. Chapman and Hall, Londyn 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak

Wpłynęło do Redakcji: 10. 10. 1996 r.

Abstract

The paper presents the problem of the assessment of the life of the components of heat turbines runnning under stable operating conditions. A probabilistic model of the life has been worked out, including the definition of both the life and reliability of the turbine components.

Because of the possibility of using the components containing cracks, the performance of such components under creep conditions has been analysed. The factors characterising the state of stress around the crack tip, the crack incubation and propagation under constant and variable load have been discussed. The detailed calculations of the crack propagation rate have been performed together with the probability of a catastrophic craking of a blade.

Also the influence of other factors, as the material constants, on the probability of damage has been indicated.