Seria: ENERGETYKA z. 123

Nr kol. 1277

Gerard KOSMAN, Andrzej RUSIN

# OCENA TEMPA PROPAGACJI PĘKNIĘĆ W WIRNIKACH TURBIN WYWOŁANEGO ROZRUCHAMI ZE STANU ZIMNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę analizy tempa propagacji pęknięć w elementach turbin cieplnych. Omówiono wielkości charakteryzujące pola naprężeń i odkształceń w obszarze szczeliny oraz zależności opisujące propagację pęknięć. Podano przykład analizy tempa propagowania pęknięcia w wirniku turbiny wywołanego rozruchem ze stanu zimnego.

# THE EVALUATION OF THE CRACK PROPAGATION RATE IN TURBINE ROTORS DUE TO THE COLD START-UP

**Summary.** A method of analysis of the crack propagation rate in the heat turbine components is presented in the paper. The parameters characterizing the stress and strain fields around the crack and the relationships describing the crack propagation are discussed. An example is given of a crack propagation analysis in a turbine rotor under the cold start up conditions.

# AUSWERTUNG DES TEMPOS VON BRÜCHEN IN TURBINENLÄUFERN, DIE DURCH KALTANFAHREN AUS KALTEM ZUSTAND HERVORGERUFEN SIND

**Zusammenfassung.** Im Aufsatz wurde eine Methode der Analyse des Tempos von Bruchentwicklung in thermischen Turbinenbauteilen dargestellt. Größen die Spannungs- und Verformungsfelder im Bereich eines Schlitzes kennzeichen, sowie Abhängigkeiten die eine Propagation von Rißen beschreiben, erörtert worden sind. Ein Beispiel der Auswertung des Tempos einer Rißpropagation im Turbinenläufer, die durch einen Kaltstart hervorgerufen ist, gegeben wurde.

#### 1. WSTĘP

Ogólny algorytm kompleksowej oceny stanu technicznego elementów turbin pokazano na rys. 1. [1]. Bardzo ważną częścią tych analiz jest ocena niebezpieczeństwa wystąpienia kruchego pękania oraz tempa propagacji pęknięć. Analizy te powinny dotyczyć zarówno wad i pęknięć, które zostały wykryte w trakcie przeprowadzonych badań nieniszczących, jak i wad domniemanych, które nie zostały wykryte, a które mogą istnieć w rozmiarach nie przekraczających poziomu czułości detektorów pęknięć. Analizy te są szczególnie ważne w odniesieniu do wirników posiadających otwór centralny, który często jest zalążkiem pęknięć. Można je również przeprowadzać dla elementów ciśnieniowych takich, jak zawory i kadłuby.

Poniżej przedstawiono metodę analizy tempa propagacji pęknięć oraz podano przykład takiej oceny dla wirników turbin dużej mocy.

#### 2. DANE DO OBLICZEŃ

Ogólny schemat postępowania w analizie pęknięć pokazano na rys. 2.

Niezbędne dane konieczne do prowadzenie obliczeń propagacji pęknięć w elementach turbin są następujące:

- dane geometryczne zawarte w dokumentacji technicznej, czasem uzupełnione dodatkowymi pomiarami,
- dane materiałowe własności wytrzymałościowe materiałów, z których wykonano elementy turbiny ze szczególnym uwzględnieniem własności opisujących odporność na pękanie np. K<sub>IC</sub>.
- dane o obciążeniach opisujące sposób prowadzenia rozruchu, częstotliwość i typ uruchamiania turbiny, nadzwyczajne stany pracy itd. Po analizie ekspansji pary w układzie przepływowym dane te pozwalają określić termiczne i mechaniczne warunki brzegowe.
- dane o wykrytych wadach, pęknięciach uzyskane z badań nieniszczących (np. badań endoskopowych otworu centralnego) lub też dane o poziomie czułości aparatury pomiarowej (jeżeli nie wykryto wad).

# 3. STAN TERMICZNY I WYTRZYMAŁOŚCIOWY

Podane powyżej obciążenia elementów turbin spowodują wystąpienie w nich nieustalonych pól temperatur i naprężeń. W zależności od przyjętych założeń uproszczających w obliczeniach stosuje się różne modele, np. jednowymiarowe, płaskie, osiowo-symetryczne itd.

Modele jednowymiarowe ograniczają się do analizy tylko jednego poprzecznego przekroju elementu. W przypadku wirnika analizuje się obszar wału

# METODY DOŚWIADCZALNE





Rys. 1. Ogólny algorytm kompleksowej oceny stanu technicznego elementów turbin

Fig. 1. General algorithm of the turbine components technical state appraisol



Rys. 2. Schemat analizy propagacji pęknięć

Fig. 2. Scheme of the crack propagation analysis

w obrębie najwyższych temperatur. Przy analizie rozkładu temperatur często stosuje się jedną z jednowymiarowych metod numerycznych (np. metoda różnic skończonych, metoda bilansów elementarnych) oraz warunki trzeciego rodzaju, tzn. współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  oraz temperaturę płynu. Rozkład składowych naprężeń termicznych w modelu jednowymiarowym oblicza się z zależności:

$$\sigma_{\rm r} = \frac{E}{1 - \nu} \left[ \frac{({\rm r}^2 - {\rm r}_{\rm w}^2)\beta}{({\rm r}_{\rm z}^2 - {\rm r}_{\rm w}^2){\rm r}^2} \int_{{\rm r}_{\rm w}}^{{\rm r}_{\rm z}} {\rm r} \, {\rm T}({\rm r}) \, {\rm d}{\rm r} - \frac{\beta}{{\rm r}_{\rm z}^2} \int_{{\rm r}_{\rm w}}^{{\rm r}} {\rm r} \, {\rm T}({\rm r}) \, {\rm d}{\rm r} \right]$$
(1)

$$\sigma_{t} = \frac{E}{1 - \nu} \left[ \frac{(r^{2} - r_{w}^{2})\beta}{(r_{z}^{2} - r_{w}^{2})r^{2}} \int_{r_{w}}^{r_{z}} r T(r) dr + \frac{\beta}{r^{2}} \int_{r_{w}}^{r} r T(r) dr - \beta T(r) \right]$$
(2)

$$\sigma_z = \frac{E}{1 - \nu} \left[ \frac{2\beta}{r_z^2 - r_w^2} \int_{r_w}^{r_z} r T(r) dr - \beta T(r) \right]$$
(3)

Do powyższych składowych należy dodać jeszcze naprężenia wywołane działaniem siły odśrodkowej przy wirowaniu wału.

Dokładniejszy obraz pól naprężeń i temperatur uzyskuje się przy zastosowaniu modeli dwuwymiarowych płaskich (tzn. płaski stan naprężenia, płaski stan odkształcenia) lub osiowo-symetrycznych. Ten ostatni w przypadku wirników jest modelem dokładnym. W analizie kadłubów korzysta się zazwyczaj z modelu quasi-przestrzennego polegającego na złożeniu modelu płaskiego i osiowo-symetrycznego. W praktyce obliczeniowej zazwyczaj stosuje się modele oparte na metodzie elementów skończonych, która umożliwia uwzględnienie zarówno specyfiki geometrii danego elementu, jak i różne rodzaje obciążenia. Metodę tę stosowano w dalszej analizie.

# 4. WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCE POLE NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ W OBSZARZE SZCZELINY

Znając geometrię elementu, wartość naprężeń oraz wymiary i usytuowanie pęknięcia wyznacza się pewne wielkości charakteryzujące stan naprężenia w bezpośrednim sąsiedztwie wierzchołka pęknięcia. Wielkościami tymi mogą być [2-5]:

- współczynnik intensywności naprężeń K,
- całka Rice'a J,
- rozwarcie szczeliny δ.

#### 4.1. Współczynnik intensywności naprężeń K

Współczynnik intensywności naprężeń definiowany jest jako granica, do której zmierza iloczyn naprężenia normalnego do powierzchni szczeliny i pierwiastka kwadratowego z odległości mierzonej od czoła szczeliny pomnożonej przez stały czynnik. Współczynnik ten zależy od rozmiarów szczeliny, od przyłożonego obciążenia, od konfiguracji szczelin – obciążenie zewnętrzne. W ogólności współczynnik ten przyjmuje postać:

$$\mathbf{K} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma}\sqrt{\pi \mathbf{a}} \tag{4}$$

gdzie:

M – współczynnik korekcyjny zależny od geometrii elementu i wymiarów szczeliny.

#### 4.2. Całka Rice'a J

Pojęcie całki J zostało wprowadzone przez Rice'a i Siha na podstawie rozważań bilansu energetycznego dwu identycznych brył różniących się jedynie wielkością wady wewnętrznej. W przypadku dwuwymiarowego pola odkształceń całkę J definiujemy:

$$J = \int_{\Gamma} \left[ W \, dx_2 - T \, \frac{du}{dx_1} \right] ds \tag{5}$$

gdzie:

$$W = \int_{0}^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

 $\Gamma - krzywa$  otaczająca pęknięcie,

s – długość łuku,

 $T = \sigma n - wektor sił działających na \Gamma$ ,

n – wektor jednostkowy normalny do Γ.

Pierwszy człon pod całką wyraża gęstość energii odkształcenia, natomiast drugi – energię przepływającą przez układ. Ponadto całkę J możemy zdefiniować jako zmniejszenie energii potencjalnej U na skutek przyrostu długości pęknięcia o da:

$$J = -\frac{dU}{da}$$
(6)

W zakresie obowiązywania liniowo-sprężystej mechaniki pękania wymienione wielkości są ze sobą powiązane w sposób jednoznaczny. Obliczone maksymalne – w danym cyklu pracy – wartości tych współczynników porównuje się z ich wartościami krytycznymi  $K_{IC}$  lub  $J_C$  wyznaczonymi w sposób doświadczalny. Stwierdzenie zależności:

$$K_{Imax} > K_{IC}$$
 lub  $J > J_C$  (7)

oznacza niebezpieczeństwo pęknięcia katastroficznego. Jeżeli podana realacja nie zachodzi, analizuje się propagację pęknięć obliczając dla danego cyklu zakres zmian  $\Delta K=K_{max}-K_{min}.$ 

#### 4.3. Propagacja pęknięć

Prędkość propagacji pękania opisują wzory uzależniające ją od naprężenia σ, długości pęknięcia a oraz stałych materiałowych C, m, [2, 3]:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathbf{f}(\sigma, \, \mathbf{a}, \, \mathbf{C}, \, \mathbf{m}, \, ...) \tag{8}$$

Najczęściej używa się wzoru zaproponowanego przez P. Parisa:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathrm{C}(\Delta \mathrm{K})^{\mathrm{m}} \tag{9}$$

gdzie:

$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{K}_{\max} - \mathbf{K}_{\min} \tag{10}$$

Do obliczeń często stosujemy rozszerzone postacie wzoru (9) obejmujące pełniejszy zakres prędkości pękania. Chodzi przede wszystkim o uwzględnienie progowego współczynnika intensywności naprężeń K<sub>TH</sub>, wówczas:

$$\frac{da}{dN} = C(K^m - K^m_{TH}) \tag{11}$$

Istotny wpływ na prędkość pękania wywiera asymetria cyklu obciążenia wyrażona współczynnikiem R. Wpływ ten zależy od wielkości R, od zakresu prędkości i od rodzaju materiału.

Wpływ asymetrii cyklu ujmuje wzór R.G. Formana:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \frac{\mathrm{C}(\Delta \mathrm{K})^{\mathrm{m}}}{(1-\mathrm{R}) \mathrm{K_{c}} - \Delta \mathrm{K}}$$
(12)

Jest to rozszerzony wzór (9). Wielkość  $K_{\rm c}$ w tym wzorze odpowiada w ogólności odporności na pękanie.

Oprócz omawianych już zależności Parisa i Formana istnieją inne wzory, które uwzględniają bardzo wiele czynników wpływających na tempo propagacji pękania.

Opierając się na powyższych wzorach oblicza się wymiar pęknięcia po N cyklach pracy. W momencie osiągnięcia przez szczelinę jej wymiarów krytycznych a =  $a_{kr}$ , grozi wystąpienie zniszczenia.

Powyższy algorytm przedstawiony na rys. 2 prowadzi się dla różnych cykli pracy (różne rozruchy, zmiany mocy itd.), aby określić, jak wpływają one na zachowanie się pęknięcia.

Dokładność prowadzonej analizy zależy od dokładności przeprowadzenia szeregu obliczeń pośrednich, w tym m.in.:

- wartości naprężeń w elemencie, których dokładność zależy od zastosowanego modelu (np. model jednowymiarowy lub osiowo-symetryczny itd.), przyjętych warunków brzegowych, rozważanych obciążeniach itd.,
- przyjętych formuł opisujących współczynnik intensywności naprężeń K<sub>I</sub> lub całkę Rice'a J,
- przyjętego wzoru opisującego propagację pęknięć oraz sposobu jego całkowania (stałe lub zmienne ΔK),
- dokładności wyznaczenia początkowego wymiaru szczeliny,
- dokładności wyznaczenia charakterystyk materiału (np. odporności na pękanie  $K_{\rm IC}$  itd.).

# 5. PROPAGACJA PĘKNIĘĆ W WIRNIKU TURBINY

Poniżej rozpatrzono przykład analizy tempa propagacji pęknięcia w wirniku turbiny dużej mocy wywołanego rozruchem ze stanu zimnego. Zgodnie z przedstawioną metodologią przeprowadzono obliczenia rozkładów temperatur i naprężeń w wirniku w czasie rozruchu. Przyjęto, że rozruch odbywa się wg rzeczywistych charakterystyk podanych na rys. 3 i 4. Założono, że rozruch ten poprzedzony jest grzaniem wstępnym przez okres 90 min. Obliczenia prowadzono metodą elementów skończonych. Z uwagi na fakt, że najbardziej niebezpieczne są pęknięcia usytuowane poosiowo, należy wyznaczyć maksymalne naprężenia obwodowe powodujące propagacje takich właśnie peknieć. Przykładowy rozkład temperatury i naprężeń obwodowych w analizowanym wirniku pokazano na rys. 5. Rozkłady te odpowiadają stanom termicznym i wytrzymałościowym wirnika po 36 min rozruchu zasadniczego. Jest to moment, w którym w stosunkowo jeszcze mało wygrzanym wirniku napreżenia obwodowe osiągają bardzo duże wartości. Opierając się na tak wyznaczonych naprężeniach obliczono maksymalny współczynnik intensywności naprężeń K<sub>max</sub>, a następnie analizowano tempo propagacji pęknięcia o początkowej długości 1 mm. Wynik analizy pokazano na rys. 6. Podane na tym rysunku krzywe a i b obejmują możliwy zakres propagacji z uwagi na rozrzut własności stali

wirnikowych, a w szczególności stałych materiałowych we wzorze Parisa. W obliczeniach przyjęto również minimalne wartości odporności na pękanie  $K_{IC}$ .



Rys. 3. Zmiana temperatury pary w czasie rzeczywistego rozruchu ze stanu zimnego Fig. 3. Time variations of steam temperature during real start–up



Rys. 4. Zmiana mocy, obrotów i ciśnienia pary w czasie rzeczywistego rozruchu ze stanu zimnego

Fig. 4. Time variations of power, rotational speed and steam pressure during real start– up from the cold state

#### 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- w sytuacji prowadzenia rozruchu ze stanu zimnego bez prawidłowego wygrzania wstępnego wielkości krytyczne wad są niewielkie,
- im wyższy stopień wygrzania wirnika, tym mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia kruchego pękania. Wysoka temperatura wirnika powoduje



Rys. 5. Rozkład temperatury i naprężeń obwodowych w wirniku po 36 min rozruchu Fig. 5. Temperature and circumferential stress distributions in the rotor after 36 min of a start--up



Rys. 6. Tempo propagacji szczeliny 1-mm w otworze centralnym wirnika Fig. 6. Crack propagation rate of the 1-mm crack in the central bore of the rotor

znaczne podwyższenie odporności na pękanie, a tym samym zwiększa się wymiar krytyczny wad,

- rozruchy ze stanu ciepłego i gorącego są znacznie mniej niebezpieczne ze względu na możliwość wystąpienia kruchych pęknięć niż rozruch ze stanu zimnego,
- stwierdzone ewentualne pęknięcia w otworach centralnych wirników powinny być eliminowane. Przy pojawieniu się pęknięć bliskich pęknięciom krytycznym, wirnik należy wycofać z eksploatacji,
- rzeczywisty przyrost pęknięcia w danym okresie można ocenić na podstawie szczegółowej analizy ilości i typów rozruchów, jakie w tym okresie wystąpiły. Ponadto należy wziąć pod uwagę fakt, że propagacja szczelin położonych w obszarach wysokich temperatur może być również wywołana procesem pełzania,
- analiza pęknia elementów turbin jest częścią algorytmu oceny stanu technicznego. Oprócz niej należy ocenić procesy zużycia wywołane pełzaniem oraz zmęczeniem niskocyklicznym [6].

# LITERATURA

- [1] Kosman G., Rusin A.: Kompleksowa ocena stanu technicznego turbin. Energetyka nr 9, 1994, s. 305–310.
- [2] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT, Warszawa 1991.
- [3] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN, Warszawa 1985.
- [4] Theilig H., Nickel J.: Spanaungsintensitäs-faktoren. VEB, Leipzig 1987.
- [5] Murakami Y (ed.): Stress Intensity Factors Handbook. Pergamon Press, London 1987.
- [6] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Pełzanie elementów turbin cieplnych. WNT, Warszawa 1991.

# Abstract

The analysis of the crack propagation rate in the turbine rotors is presented in the paper. Basing on the geometric, material and loading data, the temperature and stress distributions in the rotor are determined. The stress distributions, alongside with the information on the dimensions and the situations of cracks and defects can be used to determine the parameters characterizing the stress state in the vicinity of the crack. The parameters are, for example, the stress intensity coefficient K, the Rice integral J. By determining the variations of these parameters in a work cycle one can calculate the crack propagation rate and the critical defect size, basing on the Paris or Forman formulae. The algorithm has been illustrated with the calculations of the crack propagation rate in a rotor of a large output turbine during a cold start up. Basing on the real start up data the temperature and stress distributions have been calculated using the finite element method. The stress intensity coefficient  $K_{max}$  has been calculated then. From the material data the possible range of propagation rates was calculated for a 1 mm crack in the central bore of the rotor. The allowable number of such work cycles has been given.