

Gerard KOSMAN

OBLICZENIOWA OCENA WYTRZYMAŁOŚCI ELEMENTÓW TURBIN PAROWYCH

Streszczenie. Przedstawiono przegląd własnych publikacji i prac naukowo-badawczych w dziedzinie modelowania obciążeń cieplnych i termowytrzymałości elementów turbin parowych. Przedmiotem rozważań są elementy poddane działaniu wysokich i zmiennych temperatur. Główną uwagę zwrócono na tematykę i zakres prowadzonych badań.

COMPUTATIONAL EVALUATION OF THE STRENGTH OF STEAM TURBINE COMPONENTS

Summary. An overview of the authors publications and research reports on the modelling of thermal loads and thermal strength of the steam turbine componets is presented. The components subjected to high and variable temperatures are the main object of interest. The scope and subjects of the research carried out are discussed in detail.

RECHNERISCHE AUSWERTUNG DER FESTIGKEIT VON DAMPFTURBINENBAUTEILEN

Zusammenfassung. Ein Kurzübersicht von eigenen Aufsätzen und wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung thermischen Beanspruchungen sowie Thermischer Festigkeits von Dampfturbinenbauteilen wurde dargestellt. Als Basis der Erwagungen gelten verschiedene Bauteile, die durch hohen und veränderlichen Temperaturen beansprucht sind. Große Aufmerksamkeit wurde auf die Thematik und der Bereich durchgeführten Forschungen gelegt.

1. WSTĘP

W opracowanej w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych (IMiUE) metodyce kompleksowej oceny turbin parowych wyróżniono:

- ocenę charakterystyk energetycznych turbin,
- ocenę stanu technicznego i warunków pracy głównych elementów,
- ocenę stanu dynamicznego.

Jako główne kryteria oceny przyjęto trwałość elementów i efektywność pracy turbiny. Podstawą opracowania wymienionych wyżej ocen są:

- wyniki pomiarów cieplnych (bilansowych i ruchowych),
- modelowanie pracy obiegu ciepłego turbiny,
- **analiza stanów wytrzymałościowych elementów turbiny**,
- obliczenie stopnia zużycia eksploatacyjnego,
- wyniki badań nieniszczących,
- wyniki pomiarów drgań.

W niniejszej pracy omówione zostaną problemy związane z oceną stanów wytrzymałościowych głównych elementów turbin parowych na tle własnych wyników badań. W związku z tym:

- a) przedstawiono przegląd własnych publikacji i opracowań wewnętrznych (niepublikowanych) w dziedzinie analizy obciążeń cieplnych i termowytrzymałości elementów turbin parowych,
- b) omówiono wybrane wyniki najnowszych badań w zakresie modelowania temperatury, naprężeń i odkształceń elementów turbin i ich trwałości,
- c) scharakteryzowano możliwości obliczeniowe opracowanych procedur numerycznych oraz ich zastosowanie do oceny wytrzymałości elementów turbin parowych.

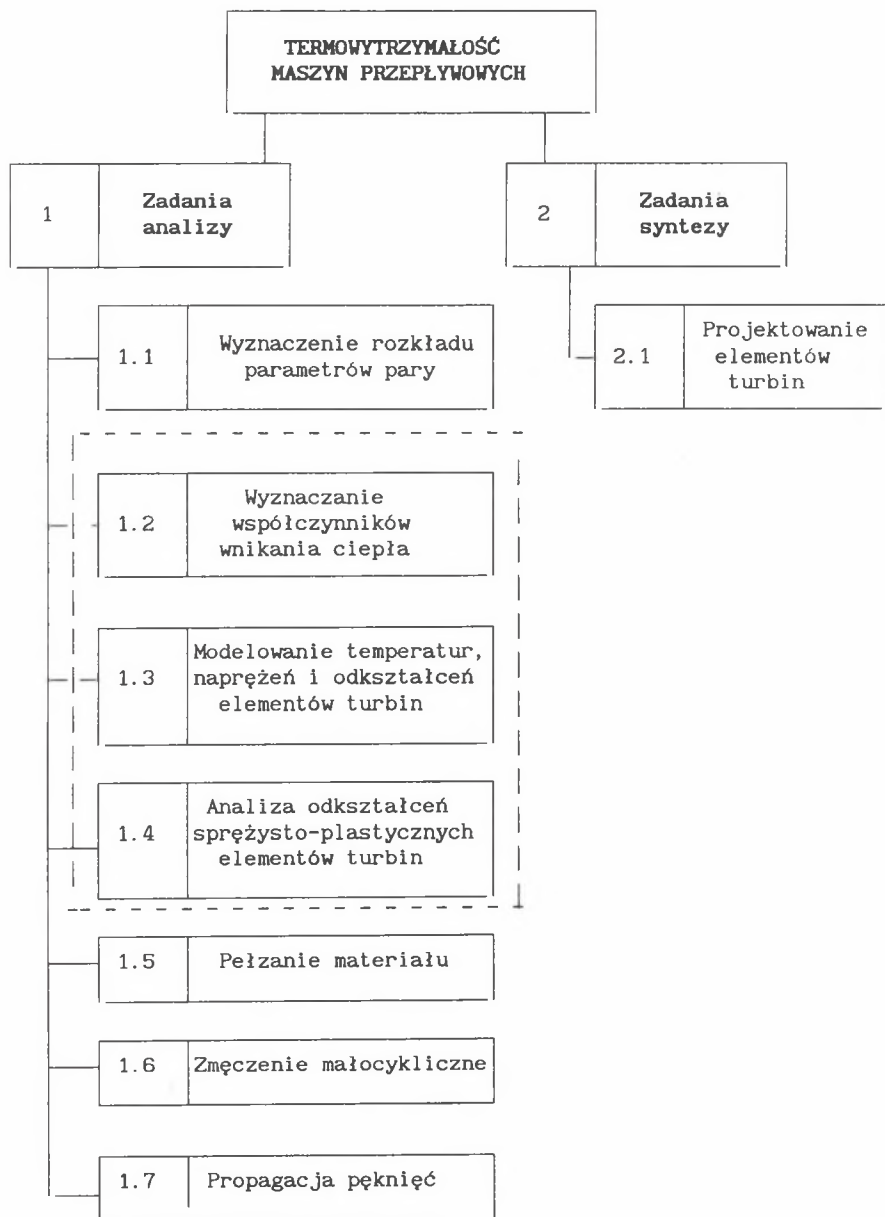
2. ZAKRES BADAŃ

Na rys. 1 wyszczególniono tematy badawcze analizowane w ramach termowytrzymałości maszyn przepływowych (głównie turbin parowych).

Przedmiotem szerszej analizy będą tylko punkty 1.2, 1.3 i 1.4 podanego wykazu. Pod pojęciem termowytrzymałości rozumie się wytrzymałość elementów poddanych działaniu obciążeń cieplnych (działających obok obciążeń masowych i powierzchniowych). W związku z tym analizę stanu naprężenia i odkształcenia elementów należy poprzedzić określeniem termicznych warunków brzegowych (głównie współczynników wnikania ciepła) i wyznaczeniem ustalonego lub niustalonego pola temperatury [37].

Tematy badawcze podzielono na zadania analizy i zadania syntezy. Zadania analizy formułuje się następująco: dla danych cech konstrukcyjnych (**Ck**) i warunków eksploatacji (**E**) należy określić rozkłady temperatury, naprężeń i odkształceń elementu turbiny (**T**, σ , ϵ)

$$(\mathbf{Ck}) + (\mathbf{E}) \rightarrow (\mathbf{T}, \sigma, \epsilon)$$



Rys. 1. Tematy badawcze w zakresie termowytrzymałości maszyn przepływowych (głównie turbin parowych)

Fig. 1. Research projects on thermal strength of flow turbines (mainly steam turbines)

Do tej grupy zadań zaliczyć należy również ocenę wpływu wybranych cech konstrukcyjnych i różnych warunków eksploatacji na stan wytrzymałościowy elementu turbiny

$$(\mathbf{Ck})_i + (\mathbf{E})_j \rightarrow (\mathbf{T}, \sigma, \varepsilon)_{ij}$$

Do zadań syntezy należą zadania konstrukcyjne. Prace naukowo-badawcze prowadzone w tym zakresie dotyczą projektowania elementów turbin parowych z uwzględnieniem wymaganej trwałości^{*)}.

3. PRZEGLĄD PRAC Z ZAKRESU TERMOWYTRZYMAŁOŚCI ELEMENTÓW TURBIN

Rezultaty badań zawarto między innymi w pracach [1–36]. Pewną syntezę uzyskanych wyników przedstawiono w skryptach [37, 38 i 39] oraz monografiach [40 i 41]. Wszystkie rozpatrywane dalej prace z zakresu zadań analizy, zgodnie z rys. 1, podzielono na 3 części (punkty 1.2, 1.3 i 1.4) obejmujące wyznaczenie współczynników wnikania ciepła, modelowanie temperatur, naprężeń i odkształceń sprężystych oraz analizę odkształceń sprężysto–plastycznych.

O intensywności przepływu ciepła między parą wodną a poszczególnymi elementami turbiny decyduje konwekcja. W pierwszym etapie uruchomienia turbiny istotne znaczenie może mieć również zjawisko kondensacji. Intensywność przepływu ciepła jest uzależniona od bardzo wielu czynników. Jednym z częściej stosowanych sposobów postępowania jest wykorzystanie w obliczeniach formuł ważnych dla opływu prostych geometrii [38]. W związku z tym w pierwszym etapie badań własnych przeanalizowano możliwość wykorzystania dostępnych formuł do wyznaczenia współczynników wnikania ciepła dla typowych geometrii turbinowych [2, 3]. Porównano wyniki obliczeń uzyskane za pomocą różnych formuł dla różnych danych wejściowych. Tak opracowany katalog formuł zweryfikowano na podstawie badań analogowych [4, 5, 6 i 7] oraz wyników pomiarów temperatury w wybranych punktach elementów turbin i rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła [1, 7, 38].

W dalszych badaniach opracowano procedury umożliwiające obliczenia współczynników wnikania ciepła dla poszczególnych elementów turbin [8, 9]. W każdym elemencie wyróżniono szereg charakterystycznych powierzchni, dla których opracowano wspomniane procedury [10].

Modelowanie pól temperatur, naprężeń i odkształceń omówiono w pracach [11–30]. W pierwszym okresie badań preferowano metody różnicowe [np. 11, 14,

^{*)} Zob. np. artykuły nr 6, 7 i 8 w niniejszym Zeszytcie Naukowym.

21, 24]. Dzięki zdobytemu doświadczeniu w zakresie organizacji procedur obliczeniowych metody te nadają się do rozwiązania większości zadań spotykanych w technice turbinowej. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza modelowania pól temperatury.

W dalszych badaniach podjęto sprawę pełniejszego uwzględnienia rzeczywistych warunków pracy elementów, rzeczywistych kształtów i stanu obciążenia. W związku z tym w algorytmach obliczeń cieplnych i wytrzymałościowych zrezygnowano w zasadzie z metod różnicowych i stosuje się powszechnie metodę elementów skończonych, wykorzystując siatkę osmio- lub dwunastowęzłową w układach dwuwymiarowych płaskich i osiowo-symetrycznych oraz siatkę przestrzenną. Rozszerzono termiczny warunek brzegowy i uwzględniono efekt nagrzewania elementów. Prowadzi to do tzw. sprzężonych procesów wymiany ciepła i traktowania przepływów pary jako nieadiabatywnych [29, 30]. Najwięcej trudności sprawia modelowanie naprężeń poza obszarem odkształceń sprężystych, uwzględnienie cykliczności obciążeń i kumulowanie uszkodzeń. Wyniki własnych prac w zakresie analizy odkształceń sprężysto-plastycznych elementów turbin podano w [31 – 39]. W opracowanych procedurach numerycznych wykorzystano dwie metody:

- metodę zmiennych parametrów materiałowych,
- metodę dodatkowych odkształceń.

Pierwsza metoda, zwana też metodą kolejnych stanów sprężystych, sprowadza zależności dla stanu sprężysto-plastycznego do postaci równań sprężystości, w których parametry materiałowe zależą od stanu naprężenia i dlatego są różne w różnych punktach ciała.

W metodzie dodatkowych odkształceń odkształcenia plastyczne (trwałe) rozpatruje się jako dodatkowy stan odkształcenia, typu anizotropowej deformacji cieplnej. Podstawą w tym przypadku jest proste zadanie sprężystości ze stałymi parametrami materiałowymi.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych prac opracowano szereg procedur numerycznych. W nawiązaniu do klasyfikacji zadań badawczych podanej na rys. 1 procedury te można podzielić na następujące grupy:

- a. Wyznaczenie parametrów pary w układzie przepływowym turbiny (modelowanie procesu rozprężania).
- b. Modelowanie intensywności nagrzewania elementów.
- c. Wyznaczenie ustalonych i nieustalonych pól temperatury.
- d. Analiza sprężystego stanu naprężenia i odkształcenia
 - zagadnienie płaskie,
 - zagadnienie osiowo-symetryczne,
 - zagadnienie przestrzenne.
- e. Wyznaczenie odkształceń sprężysto-plastycznych.

f. Modelowanie pełzania materiału.

g. Propagacja pęknięć.

W innym podziale można wyróżnić procedury:

- ogólne,
- specjalne.

Pod pojęciem procedur ogólnych rozumiemy np. typowe (gotowe) procedury MES, których zastosowanie do obliczeń wytrzymałościowych turbin wymaga przygotowania danych dotyczących stanu obciążenia elementu i warunków brzegowych. Są to w zasadzie wszystkie procedury z grupy c i d.

Procedury specjalne dotyczą – ogólnie rzecz biorąc – opisu warunków pracy elementów turbin i wynikających z tego opisu termicznych i mechanicznych warunków brzegowych.

Procedury ogólne są powszechnie dostępne w różnych wersjach i różnym zakresie obliczeniowym. Są jednak tylko warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym obliczeniowej oceny wytrzymałości elementów turbin. Niezbędne są procedury specjalne do opisu rzeczywistych procesów eksploatacyjnych turbin parowych i warunków pracy ich elementów.

4. OPIS WYBRANYCH „SPECJALNYCH” PROCEDUR NUMERYCZNYCH

Do procedur specjalnych należą np. wspomniane już procedury dla określenia współczynników wnikania ciepła oraz procedury modelujące stan obciążenia elementów.

W przypadku ogólnym na dowolny element turbiny mogą działać obciążenia masowe, powierzchniowe i cieplne. Dla każdego typu obciążenia opracowano odpowiednie procedury obliczeniowe. Na podstawie danych geometrycznych i warunków pracy (rozkład parametrów pary, liczba obrotów) określa się wartość sił działających na badany element.

Do obciążeń powierzchniowych zalicza się również oddziaływanie elementów współpracujących, np. oddziaływanie łopatek roboczych na tarczę wirnikową i pierścieni skurczowych na kadłub wewnętrzny. W niniejszym rozdziale opisano niektóre procedury obliczeniowe opracowane w celu łatwiejszego uwzględnienia wymienionych obciążeń.

Ze względu na złożony stan obciążenia elementów i warunków wymiany ciepła w wielu przypadkach korzysta się z odpowiednich modeli zastępczych.

4.1. Modelowanie intensywności nagrzewania elementów

Istota opracowanych procedur numerycznych modelujących intensywność nagrzewania elementów turbin polega na wyróżnieniu w każdym elemencie szeregu charakterystycznych powierzchni, dla których określa się współczynniki wnikania ciepła [8, 9]. Wyróżniono przykładowo następujące charaktery-

styczne powierzchnie [10]: powierzchnia wewnętrzna i zewnętrzna kadłuba, powierzchnia styku tarczy kierowniczej i kadłuba, powierzchnia kadłuba ograniczająca wirujący kanał łopatkowy, powierzchnia kadłuba ograniczająca kierowniczy kanał łopatkowy, powierzchnie tarcz kierowniczych i wirnikowych, powierzchnia wału, powierzchnia wału w obszarze uszczelnień labiryntowych, powierzchnia kadłuba w komorze stopnia regulacyjnego (osłonięta i nieosłonięta), powierzchnie wewnętrzne kadłuba zaworu.

4.2. Zastępczy model wirnika tarczowego całokutego

Najbardziej obciążoną cieplnie częścią wirnika jest fragment obejmujący stopień regulacyjny, dławnicę oraz kilka pierwszych stopni wysokoprężnych. Obliczenia wytrzymałościowe, tzn. wyznaczenie naprężeń i odkształceń musimy jednak prowadzić dla całego elementu. W celu uproszczenia siatki obliczeniowej (stosowanej w metodzie MES) proponuje się zastępczy model wirnika. Istotą tego modelu jest zastąpienie tarcz wirnikowych cz. NP odpowiednio dobranym rozkładem obciążeń powierzchniowych. W analizie rozkładu temperatury w miejsce odciętych tarcz stosuje się zastępcze współczynniki wnikańia ciepła [10]. Procedurę modelującą obciążenia powierzchniowe, wywołane tarczami opisano w [28]. Podstawową częścią tej procedury jest program wyznaczenia naprężeń w tarczy wirnikowej o zmiennej grubości.

4.3. Zastępczy model wirnika tarczowego z tarczami nasadzonymi

Istota modelu jest taka sama jak poprzednio. Tarczę wirnikową zastępujemy odpowiednio dobranym rozkładem obciążeń powierzchniowych. Do analizy rozkładu temperatury w wale stosujemy również zastępcze współczynniki wnikańia ciepła.

Podstawowym zadaniem jest określenie wzajemnego nacisku p między powierzchniami styku wału i tarczy. Wartość tego nacisku dla prawidłowo działającego połączenia musi być większa od pewnej granicznej wartości p_g zależnej od wartości momentu obrotowego przekazywanego przez to połączenie i musi być zapewniona odpowiednią różnicą promieni wału i tarczy $\Delta = R_w - R_t$. Po osadzeniu tarczy na wale pod działaniem naprężeń wywołanych wciskiem promień wewnętrzny tarczy powiększa się o δ_t , natomiast promień zewnętrzny wału maleje o δ_w . Zachodzi wówczas

$$R_w - \delta_w = R_t + \delta_t \quad (1)$$

czyli

$$\Delta = \delta_t + \delta_w \quad (2)$$

Wzajemny nacisk p określamy metodą kolejnych przybliżeń [28].

4.4. Oddziaływanie pierścieni skurczowych na kadłub wewnętrzny

Kadłuby wewnętrzne turbin są czasem łączone za pomocą pierścieni skurczowych. Szczelność połączenia uzyskuje się na skutek różnicy wymiarów i temperatury kadłuba oraz pierścienia.

Wstępnie (przed montażem) promień zewnętrzny kadłuba jest większy od promienia wewnętrznego pierścienia i segmentu pośredniego o Δr_m . Po montażu promień wewnętrzny pierścienia i segmentu pośredniego zwiększy się o Δr_p , natomiast promień zewnętrzny kadłuba zmniejszy się o Δr_k , przy czym zachodzi związek

$$\Delta r_m = \Delta r_p + (\Delta r_k) \quad (3)$$

Odształcenie Δr_p zależy od ciśnienia p_p panującego pomiędzy kadłubem i segmentem, temperatury pierścienia T_p i temperatury segmentu T_m . Z warunku równowagi pierścienia mamy

$$\sigma = \frac{p_p r_z \Delta z}{F_p} \quad (4)$$

gdzie σ – naprężenie w pierścieniu (przyjmujemy jednoosiowy stan naprężenia). Pozostałe oznaczenia podano na rys. 2.

Jeżeli odształcenia pierścienia pozostają w zakresie sprężystym, to

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

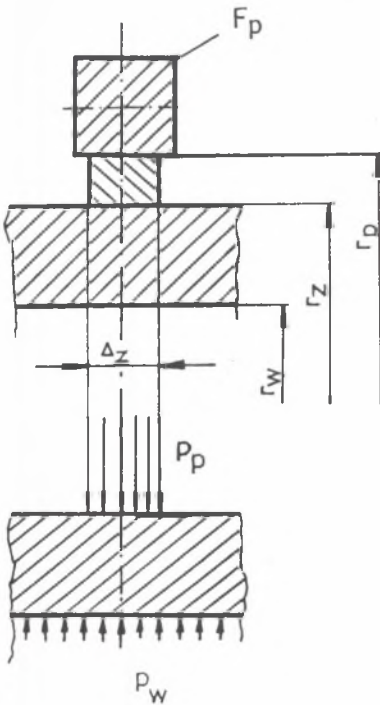
oraz

$$\Delta r_p = r_p \epsilon_p + r_p \beta_p T_p - m \beta_m T_m$$

i ostatecznie

$$\Delta r_p = \frac{r_p r_z p_p \Delta z}{F_p E_p} + r_p \beta_p T_p - m \beta_m T_m \quad (5)$$

Wyznaczenie odształcenia kadłuba Δr_k jest znacznie bardziej skomplikowane, ponieważ stan naprężenia i odształcenia nie jest jednoosiowy (jak przyjęto dla pierścienia).



Rys. 2. Pierścień skurczowy – stosowane oznaczenia

Fig. 2. Shrink ring – symbols used

W czasie eksploatacji turbiny kadłub jest obciążony ciśnieniem pary, nierównomiernym nagrzeniem oraz miejscowymi obciążeniami powierzchniowymi wywołanymi obecnością pierścieni skurczowych (rys. 2). Jeżeli

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(p_w, p_p, T); \quad (i, j = r, t, z) \quad (6)$$

są składowymi stanu naprężenia wywołanego wymienionymi obciążeniami, to przyrost promienia zewnętrznego kadłuba jest równy

$$\Delta r_k = \varepsilon_{t,z} r_z = \frac{r_z}{E} [\sigma_{t,z} - \nu(\sigma_{r,z} + \sigma_{z,z})] + \beta T_z r_z \quad (7)$$

Tok obliczeń można uprościć przyjmując wstępnie, że w obrębie pierścienia stan naprężeń kadłuba jest zbliżony do stanu występującego w powłoce walcowej.

Po podstawieniu (5) i (7) do (3) otrzymujemy równanie, w którym jedyną niewiadomą jest ciśnienie p_p . Procedurę modelującą oddziaływanie pierścieni skurczowych na kadłub opisano w [28]. Wielkością wyjściową z procedury jest wartość obciążenia $p_p(k)$ wywołanego na powierzchni zewnętrznej kadłuba obecnością pierścienia skurczowego w kolejnym kroku czasowym k .

5. MOŻLIWOŚCI OBLICZENIOWE OPRACOWANYCH PROCEDUR NUMERYCZNYCH

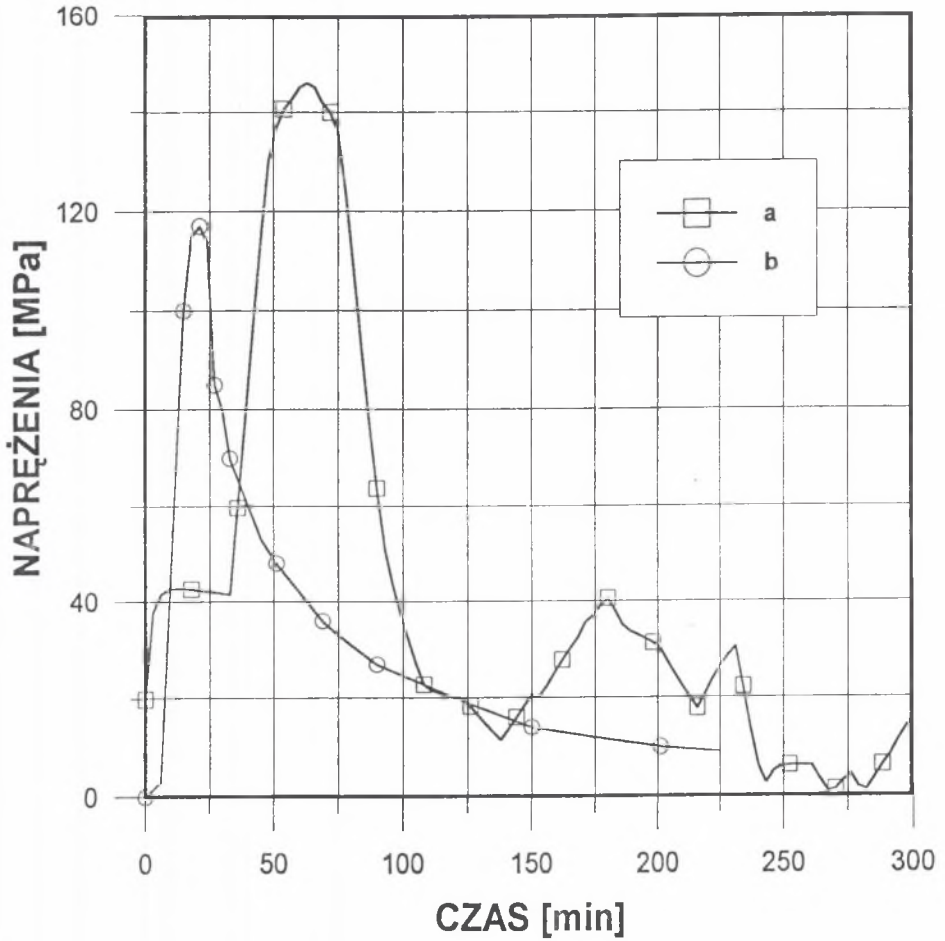
5.1. Uwzględnienie historii eksploatacji turbiny i rzeczywistych warunków pracy turbiny

Informacje o warunkach pracy turbiny powinny obejmować wszystkie istotne z punktu widzenia trwałości procesy zachodzące w tych maszynach. W związku z tym bardzo ważną sprawą jest odpowiednie dokumentowanie historii eksploatacji turbiny.

Wiarygodne informacje zapewnia jedynie centralna rejestracja danych (CRD) oraz współpracujący z nią system nadzoru diagnostycznego, np. opracowany w Instytucie MiUE system monitorowania turbiny (SYMO).

Jeżeli turbina nie posiada systemów CRD i SYMO, to źródłem informacji są zdarzenia ruchowe zaistniałe w czasie użytkowania turbin. Materiał źródłowy w tym przypadku stanowią:

- dokumentacja techniczno–eksploatacyjna turbiny i jej podzespołów,
- informacje o zdarzeniach rejestrowane w trakcie obsługi ruchowych urządzeń – raporty dobowe i inne,
- dokumentacja odzwierciedlająca działalność konserwacyjno–remontową
- protokoły i raporty z badań i pomiarów diagnostycznych,
- informacje o zdarzeniach wyjątkowych (awariach itp.).



Rys. 3. Przebieg czasowy maksymalnych naprężeń w kadłubie turbiny dla rozruchu ze stanu zimnego (b – rozruchu wg charakterystyki, a – rozruch rzeczywisty)

Fig. 3. Time variation of maximum stress in a turbine cylinder for a cool start case (b – start up by the characteristic curve, a – real startup)

Podstawowymi danymi są:

- czas pracy turbiny i liczba uruchomień z różnych stanów cieplnych,
- przebiegi czasowe parametrów pary w czasie rozruchów i zmiany mocy,
- przebiegi czasowe temperatury metalu w wybranych punktach turbiny, prędkości nagrzewania, wydłużenia cieplne (względne i bezwzględne),
- początkowy stan techniczny głównych elementów turbiny,
- wyniki systematycznie wykonywanych pomiarów i badań,
- przyczyny zatrzymania i odstawiania turbiny,
- okoliczności wymiany lub naprawy elementów.

Rzeczywiste warunki pracy z reguły odbiegają od warunków opisanych charakterystykami rozruchowymi. W związku z tym w obliczeniowej ocenie wytrzymałości elementów turbin wskazane jest wyznaczenie rozkładu temperatur i naprężeń dla rozruchów wg danych rzeczywistych. Na rys. 3 podano przebieg czasowy maksymalnych naprężeń zredukowanych w kadłubie turbiny dla rozruchu ze stanu zimnego. Porównano naprężenia dla rozruchu rzeczywistego i prowadzonego wg charakterystyki rozruchowej.

5.2. Szczegółowy opis warunków pracy głównych elementów (kadłuby, wirniki, komory zaworów)

O dokładności modelowania decyduje dokładność opisu warunków pracy elementów turbiny i wynikające z tego opisu termiczne i mechaniczne warunki brzegowe. Szczególnie ważne są tutaj trzy sprawy:

- a) modelowanie intensywności nagrzewania elementów,
- b) współpraca z innymi elementami (np. tarcze osadzone na wale, pierścienie skurczowe kadłubów),
- c) określenie sił działających na badany element, a szczególnie uwzględnienie obciążeń dodatkowych.

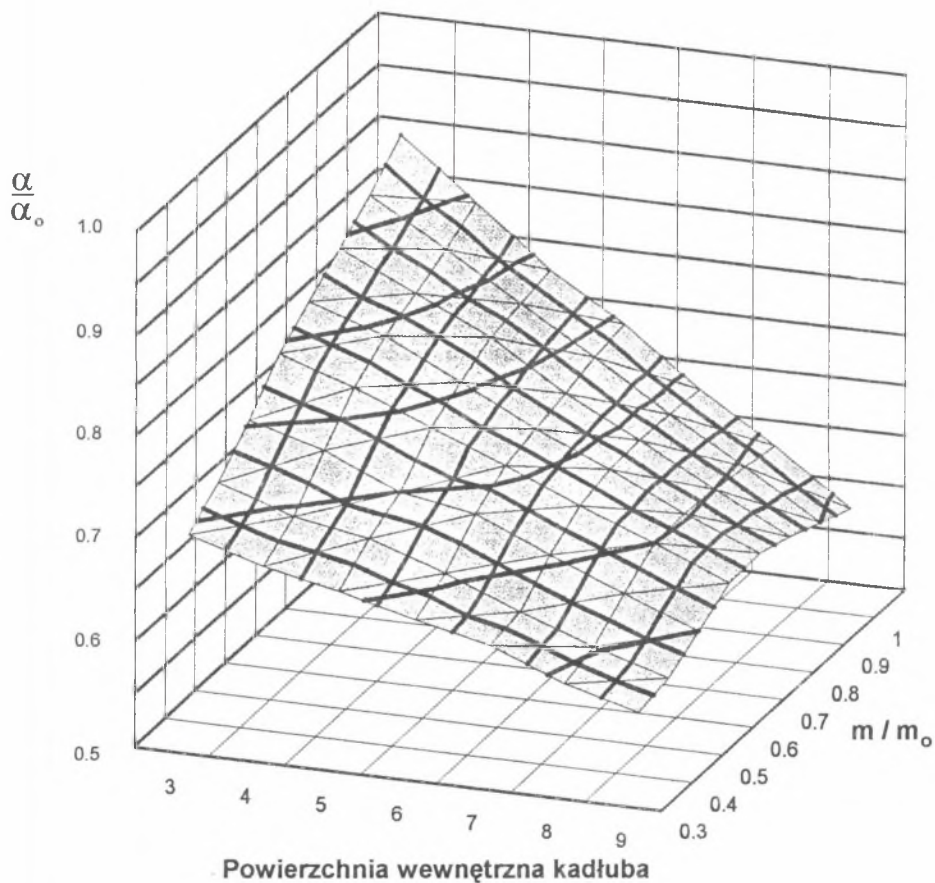
Ad a.

Rozwiązanie pierwszego zagadnienia wymaga wyznaczenia rozkładu parametrów pary (ciśnienia i temperatury) w układzie przepływowym turbiny oraz współczynników wnikania ciepła. Ponieważ z reguły rozpatruje się stany nieustalone, współczynniki te dla danego elementu są funkcjami miejsca i czasu. Tak dokładne traktowanie zagadnienia umożliwiają opracowane procedury numeryczne (punkt 4.1). Przykładowe wyniki modelowania podano na rys. 4.

Ad b.

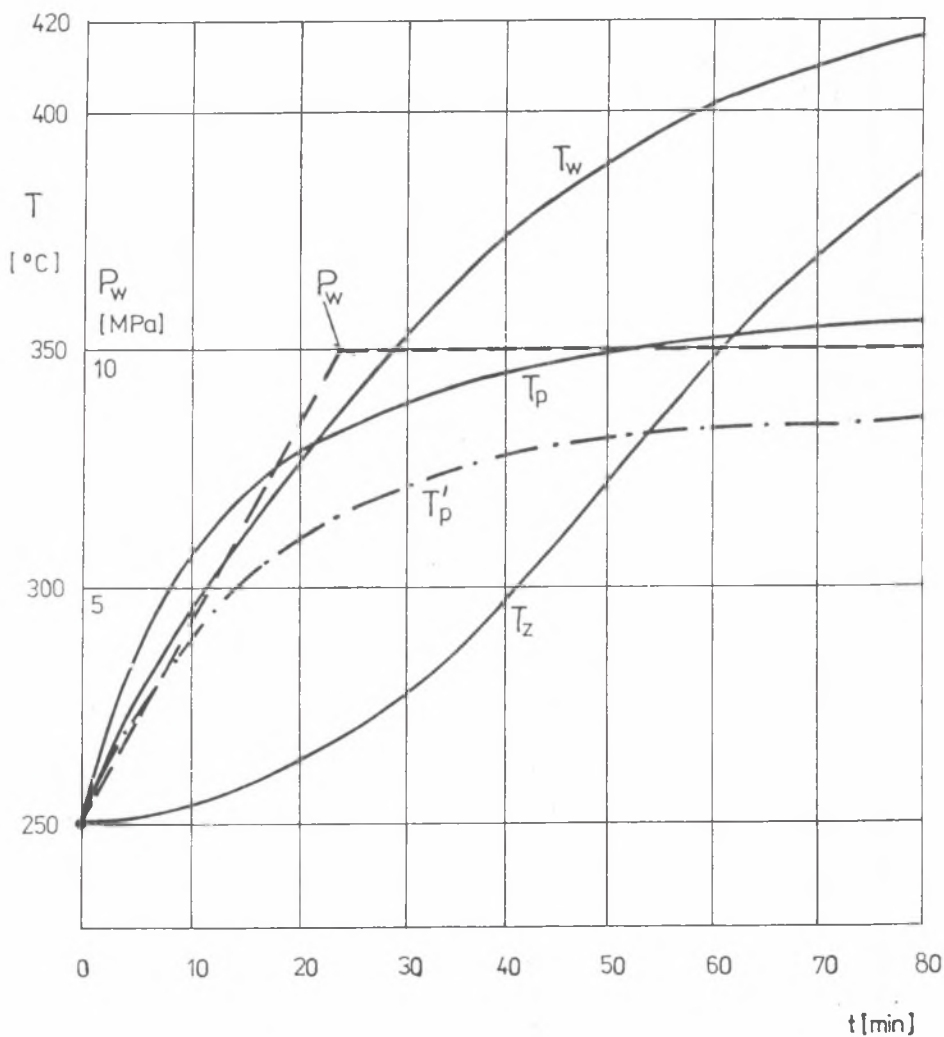
Zagadnienie to omówiono w punkcie 4. Opisano wybrane procedury modelujące współpracę różnych elementów.

Rozpatrzmy dla przykładu pierścień skurczowy kadłuba wewnętrznego (rys. 2) o następujących wymiarach geometrycznych: $r_w = 0,575$ m, $r_z = 0,715$ m, $r_p = 0,85$, $m = 0,06$ m, $\Delta z = 0,27$ m, $F_p = 0,0225$ m².



Rys. 4. Współczynniki wnikania ciepła wzdłuż powierzchni wewnętrznej kadłuba dla różnego obciążenia turbiny

Fig. 4. Heat transfer coefficients along the inner surface of the cylinder for different turbine load levels



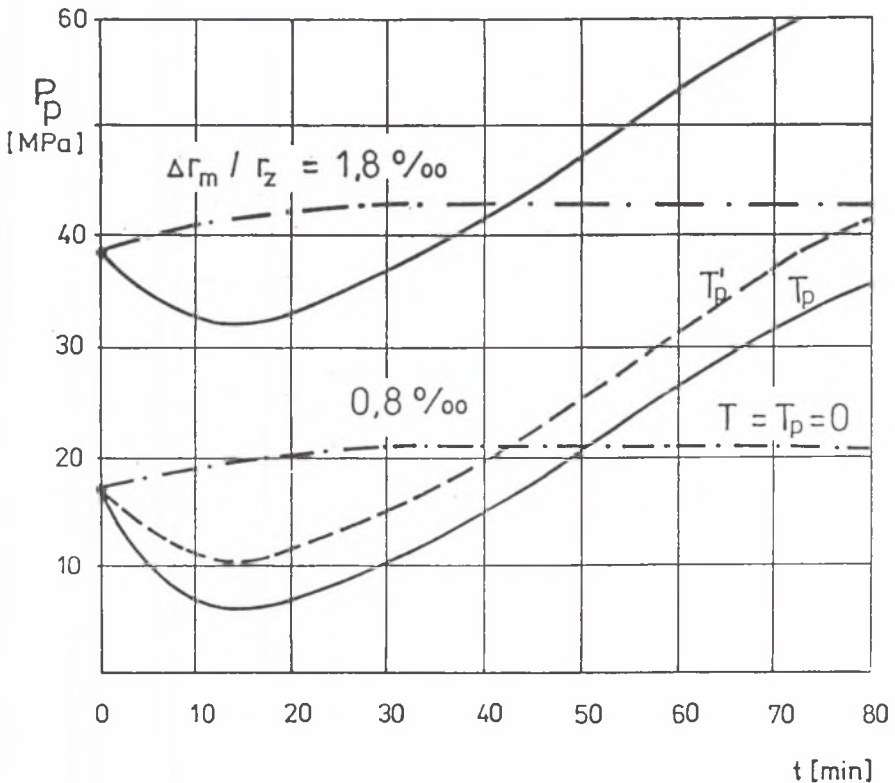
Rys. 5. Przebieg czasowy ciśnienia pary, temperatury na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej kadłuba oraz temperatury pierścienia

Fig. 5. Time variation of steam pressure, temperature at the inner and outer cylinder surface and ring temperature

Przebieg czasowy ciśnienia i temperatury pary oraz temperatury kadłuba podano na rys. 5. Przyjęto dwie wartości wcisku montażowego: $\Delta\Gamma_m/r_z = 1,8$ i $0,8\%$. Przebieg czasowy obciążenia wywołanego na powierzchni zewnętrznej kadłuba obecnością pierścienia skurczowego przedstawiono na rys. 6. Analizowano 3 warianty stanu termicznego kadłuba i pierścienia:

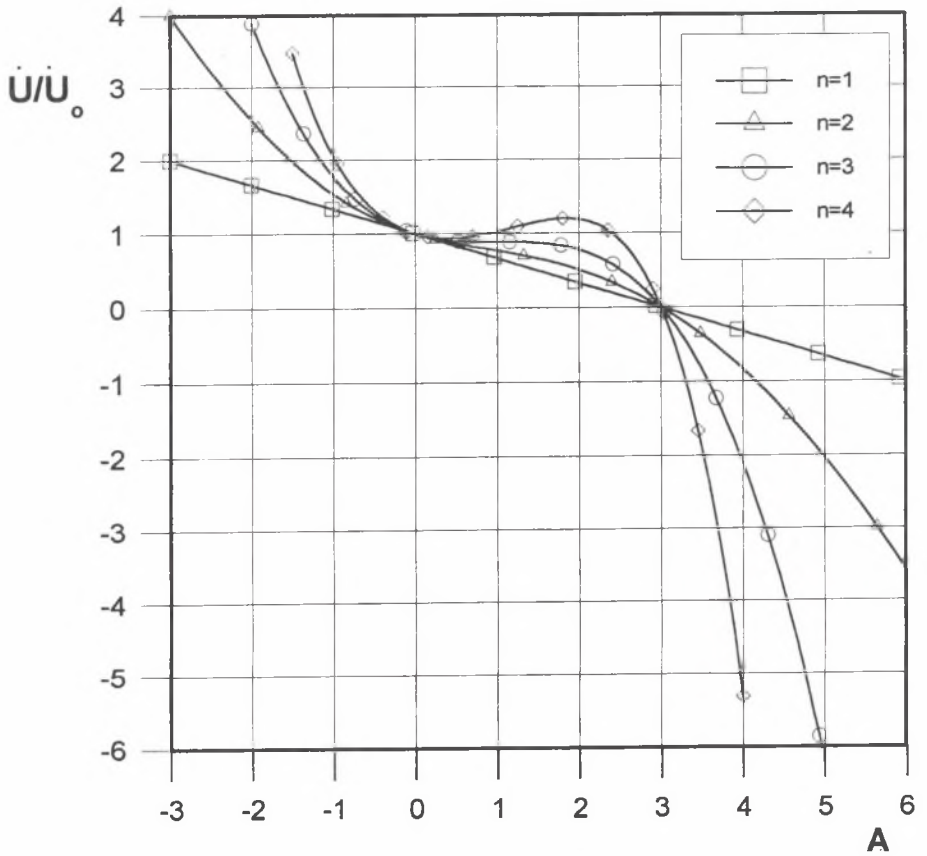
- 1 – temperatury wg rys. 5,
- 2 – temperatura pierścienia jest niższa (krzywa T' na rys. 5),
- 3 – temperatura kadłuba i pierścienia są równe zero ($T = T_p = 0$).

Tak uzyskane wyniki ilustrują wpływ stanu termicznego na wartość ciśnienia p_p . Po wyznaczeniu ciśnienia p_p można określić naprężenia w kadłubie i pierścieniu.



Rys. 6. Przebieg czasowy ciśnienia p_p pomiędzy kadłubem i segmentem

Fig. 6. Time variation of pressure (p_p) between the cylinder and the segment



Rys. 7. Wpływ dodatkowej siły wzdłużnej na odkształcenia rurociągu

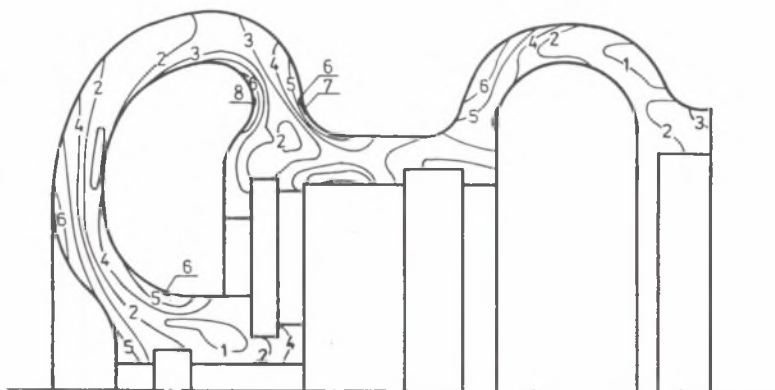
Fig. 7. Influence of an additional longitudinal force on the pipeline strains

Ad c.

W pracy [42] analizowano wpływ dodatkowych obciążeń (siły, momenty gnące) na kształtowania trwałe rurociągów. Okazuje się, że obciążenia te zdecydowanie zmieniają warunki pracy elementu, a były dotychczas w obliczeniach pomijane. Na rys. 7 przedstawiono wpływ dodatkowej siły wzdłużnej na odkształcenia rurociągu. Stosowano następujące oznaczenia: \dot{u} – prędkości zmiany promienia rurociągu, F – siła osiowa, p – ciśnienie pary w rurociągu, a – promień rurociągu, $A = F/\pi a^2 p$ – bezwymiarowa siła wzdłużna, n – wykładnik pełzania. Indeks „o” oznacza warunki pracy rurociągu bez siły osiowej.

5.3. Uwzględnienie rzeczywistych kształtów elementów

Na rys. 8 pokazano rozkład naprężeń zredukowanych w kadłubie wewnętrznym części średnioprężnej turbiny w czasie rozruchu ze stanu zimnego (200 min. rozruchu). Koncentracja naprężeń pojawia się w kilku punktach kadłuba i jest związana z skomplikowanym kształtem i występowaniem w związku z tym dodatkowych momentów gnących. Prosty model kadłuba, np. w postaci grubościennej rury nie uwzględni opisanego wyżej faktu.



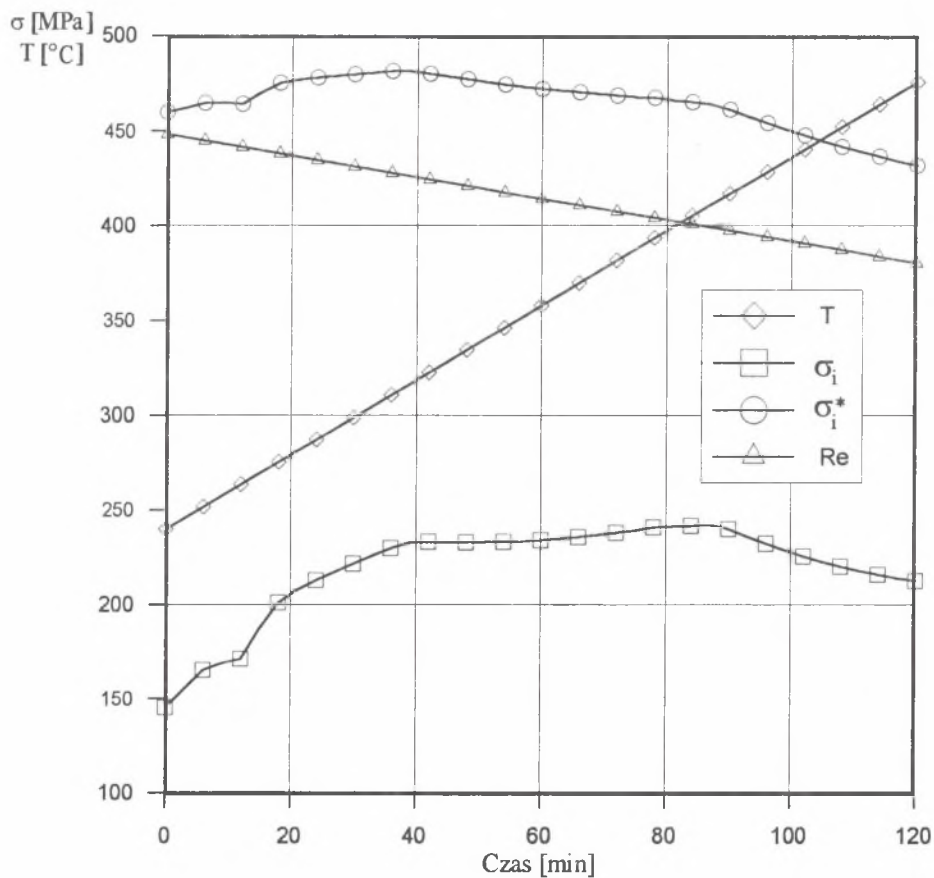
Rys. 8. Rozkład naprężeń w fragmencie kadłuba po 200 min. rozruchu ze stanu zimnego

Fig. 8. Stress distribution in a cylinder after 200 mins of a cold start up

5.4. Modelowanie koncentracji naprężeń

Opisaną w punkcie 3, a zwłaszcza w publikacjach [31 – 39] metodę modelowania naprężeń sprężysto–plastycznych zastosowano do wyznaczenia naprężeń w miejscach ich koncentracji. Typowym przykładem są rowki cieplne w okolicy dławnicy przedniej wirników turbin o mocy 200 MW.

Na rys. 9 porównano przebiegi naprężeń w wale gładkim i rowku cieplnym. Naprężenia w wale gładkim odpowiadają rozruchowi ze stanu zimnego po zakończeniu wstępnego nagrzewania. Temperatura powierzchni zewnętrznej



Rys. 9. Porównanie naprężeń w wale gładkim i rowku cieplnym (σ_i – naprężenia w wale gładkim, σ_i^* – naprężenia w rowku, T – temperatura, R_e – granica plastyczności materiału)

Fig. 9. A comparison of stresses in a smooth shaft and a thermal groove σ_i – stress in a smooth shaft, σ_i^* – stresses in a groove T – temperature, R_e – yield point of the material

wału zmienia się, w rozpatrywanym odcinku rozruchu, od wartości 240°C do 476°C, tzn. wał nagrzewa się z prędkością 2 K/min.

Wartość naprężeń w rowku nie jest prostym iloczynem naprężenia w wale gładkim i współczynnika koncentracji naprężeń (w rozpatrywanym przykładzie przyjęto $k = 4$). Takie podejście prowadzi często do wartości przekraczających granicę wytrzymałości materiału R_m , co jest oczywistym błędem.

W opracowanym algorytmie i programie numerycznym przyjęto model ciała sprężysto–plastycznego z umocnieniem liniowym. Zależność intensywności naprężeń (σ_i) od intensywności odkształceń (ε_i) opisują następujące równania

$$\sigma_i = \begin{cases} E\varepsilon_i & \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ R_e + E_1(\varepsilon_i - \varepsilon_e) & \varepsilon \geq \varepsilon_e \end{cases}$$

gdzie:

$$\varepsilon_e = \frac{R_e}{E}$$

Granica plastyczności $R_e(T)$, moduł Younga $E(T)$ i współczynnik umocnienia liniowego $E_1(T)$ są liniowymi funkcjami temperatury T (w rozpatrywanym zakresie zmian temperatury).

Do wyznaczenia naprężeń w miejscu koncentracji przyjęto zależność Neubergera, która wiąże intensywności naprężeń i odkształceń dla wału gładkiego z podobnymi wielkościami w miejscu ich koncentracji.

6. UWAGI KOŃCOWE

W obliczeniowej ocenie trwałości elementów turbin należy uwzględnić następujące zjawiska – procesy decydujące o zużyciu eksploatacyjnym elementów:

- zmęczenie niskocykliczne,
- pełzanie materiału,
- propagację pęknięć.

Wszystkie wymienione zagadnienia są przedmiotem badań prowadzonych w IMiUE. Zgodnie z przyjętym założeniem (rys. 1), w niniejszej pracy omówiono jedynie fragment tych badań dotyczący modelowania temperatur, naprężeń i odkształceń.

LITERATURA

A. Wyznaczenie współczynników wnikania ciepła

- [1] Kosman G.: Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła w turbinach drogą rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 54, Gliwice 1975.
- [2] Chmielniak T., Kosman G.: The investigations of the heat transfer coefficient in turbine elementes. Proceedings of Sixth Conference Steam Turbines of Large Output. Plzeń 1975.
- [3] Chmielniak T., Kosman G.: Modelowanie intensywności nagrzewania elementów układu przepływowego turbin parowych. Sympozjon PTMTS „Modelowanie w mechanice” Beskid Śląski, 1976.
- [4] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Badania stanu termicznego zaworów turbin parowych. XI Zjazd Termodynamików. Szczecin 1991, s. 71–74.
- [5] Kosman G., Chmielniak T.: Measurement of the heat transfer coefficient in rotating system. First Symposium on Thermotechnical Measurements. Budapest 1982, s. 119–123.
- [6] Kosman G.: Przepływ ciepła na powierzchniach bocznych tarczy wirnikowej w czasie wymuszonego chłodzenia turbiny. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 82, s. 53–66, Gliwice.
- [7] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Badania średnich współczynników wnikania ciepła w kadłubach zaworów turbin parowych. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych nr 87, Gdańsk 1984.
- [8] Chmielniak T.: Zastępcze współczynniki wnikania dla wirnika turbiny akcyjnej. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 60, Gliwice 1977.
- [9] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Zastępcze współczynniki wnikania ciepła dla złożonych geometrii, algorytmy i programy obliczeniowe. Oprac. IMiUE Pol. Śl., nr 65/K, Gliwice 1986.
- [10] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: System programów obliczeniowych dla analizy warunków brzegowych wymiany ciepła w turbinie. Oprac. IMiUE Pol. Śl., nr 87/K, Gliwice 1988.

B. Modelowanie temperatur, naprężeń i odkształceń elementów turbin

- [11] Kutarba K., Chmielniak T., Kosman G.: Badania nieustalonych pól temperatur w złożonych elementach maszyn. Archiwum Budowy Maszyn T. XVIII, z. 3, 1971, s. 449–461.

- [12] Kosman G.: Nieustalone pole temperatur w powłoce o dowolnym przekroju poprzecznym i podłużnym. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 45, Gliwice 1973, s. 107–125.
- [13] Kosman G.: Wpływ cech konstrukcyjnych na stan cieplny elementów turbin przy stałym obciążeniu. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 63, Gliwice 1977, s. 79–89.
- [14] Chmielniak T., Kosman G.: Modelowanie numeryczne pól temperatur w tarczach wirnikowych. Zbiór prac z IV Konferencji nt. „Technologia przepływowych maszyn wirnikowych”. Rzeszów 1978, s. 181–196.
- [15] Chmielniak T., Kosman G.: Analiza czynników wpływających na stan cieplny elementów turbin parowych. X Zjazd Termodynamików. Wrocław 1978.
- [16] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Modelowanie stanów termicznych turbin w czasie rozruchu, biegu luzem i małych obciążeniach. Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych nr 114, Gdańsk 1981, s. 689–716.
- [17] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Problemy modelowania stanów termicznych turbin parowych. Zbiór prac z V Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia przepływowych maszyn wirnikowych”. Rzeszów 1983, s. 184–193
- [18] Kosman G., Łukowicz H.: Ciepłne warunki pracy wirników w czasie rozruchu turbiny. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 83, Gliwice 1983, s. 253–270.
- [19] Chmielniak T.: Ustalony rozkład temperatur w tarczy wirnikowej z łopatkami. Prace IMP, z. 74, 1977.
- [20] Kosman G.: Stan naprężenia w silnie nagrzanym grubościennych powłokach walcowych i kulistych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 31, Gliwice 1969, s. 135–136.
- [21] Kosman G.: Przybliżona metoda wyznaczania stanu naprężenia w kadłubach turbin cieplnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 34, Gliwice 1970, s. 323–340.
- [22] Kosman G.: Analiza warunków pracy kadłubów turbin cieplnych przy zmiennym obciążeniu. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 47, Gliwice 1973, s. 89–112.
- [23] Kosman G.: Analiza temperatur i naprężeń termicznych w grubościennych elementach turbin cieplnych. Archiwum Energetyki, z. 3, 1975, s. 151–167.
- [24] Kosman G.: Numeryczne modelowanie pola naprężeń i odkształceń w złożonych elementach maszyn cieplnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 53, Gliwice 1975, s. 19–30.

- [25] Chmielniak T., Kosman G.: Ciepłne warunki pracy kadłubów przy częściowym obciążeniu turbiny. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 63, Gliwice 1977, s. 3–15.*
- [26] Chmielniak T., Kosman G.: Some results of investigation of the thermal state of steam turbines for conventional and nuclear power stations. VII Conference on Steam Turbines of Large Output, Skoda, Pilzno 1979, s. 71–83.
- [27] Kosman G.: Przebiegi wydłużeń cieplnych turbin w stanach niustalonych. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 76. Gliwice 1981.*
- [28] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A., Dembiński L.: System programów realizujących obliczenia pól temperatury i naprężeń termicznych w elementach turbin. *Oprac. IMiUE Pol. Śl., nr 88/K, Gliwice 1988.*
- [29] Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Modelowanie procesu rozprężania pary w turbinie z uwzględnieniem nagrzewania wirnika i kadłuba. *Zbiór referatów Konferencji Naukowo-Technicznej „40 lat pracy ITC dla przemysłu energetycznego i energetyki”. Łódź 1988, s. 119–126.*
- [30] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Experimental studies on heat transfer in non – adiabatic flows. *First World Conference on Experimental Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics, Dubrovnik, Yugoslavia, 1988.*

C. Analiza odkształceń sprężysto–plastycznych elementów turbin

- [31] Kosman G. i in.: Opracowanie metody obliczania odkształceń plastycznych kadłubów turbin cieplnych. *Oprac. IMiUE Pol. Śl. nr 25/K, Gliwice 1975.*
- [32] Kosman G.: Analiza warunków powstawania pęknięć zmęczeniowych turbin ALSTHOM 130 MW. Cz. II – Analiza stanu naprężenia wirnika. *Oprac. IMiUE Pol. Śl. nr 39/K, Gliwice 1982.*
- [33] Kosman G.: Modelowanie stanów przejściowych turbin w warunkach cyklicznych obciążeń. Wyznaczenie dopuszczalnej liczby cykli nagrzewania. PR–8, zad. 6.4.9.09, etap a1–a3. *Oprac. IMiUE Pol. Śl., nr 40/K, Gliwice 1982.*
- [34] Kosman G.: Modelowanie odkształceń plastycznych wirników szybkoobrotowych maszyn przepływowych. *Zbiór prac z V Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia przepływowych maszyn wirnikowych”. Rzeszów 1983, s. 151–157.*
- [35] Chmielniak T., Kosman G.: Kontrolle des technischen Zustandes und Voraussicht des Verbrauches von Dampfturbinenelementen. VII Wissenschaftliche Konferenz für Energiewirtschaft der Ingenieurhochschule Zittau, 16/18.04.85. *Kurzreferate, ref. II/15, s. 19*

- [36] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Research results relating to stress problems in pumps and radial flow compressors. Pump Congress, Karlsruhe 1988, Section C5a, s. 1–21.
- [37] Kosman G.: Termowytrzymałość maszyn przepływowych. Skrypt Pol. Śl., Gliwice, wyd. I – 1982, wyd. II – 1985.
- [38] Chmielniak T., Kosman G.: Turbiny parowe. Zagadnienia cieplne i wytrzymałościowe. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1987.
- [39] Kosman G., Rusin A.: Termowytrzymałość maszyn przepływowych cz. II Plastyczność i pełzanie. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1991.
- [40] Chmielniak T., Kosman G.: Obciążenia cieplne turbin parowych, WNT, Warszawa 1991.
- [41] Chmielniak T., Kosman G., Rusin A.: Pełzanie elementów turbin ciepłych, WNT, Warszawa 1991.
- [42] Kosman G., Rusin A.: Wpływ dodatkowych obciążeń na odkształcenia trwale rurociągów parowych. Forum Materiałoznawstwa Energetycznego, Kraków 1993.

Abstract

The problems of the computational evaluation of the strength of the main components of steam turbines are discussed and related to the original research results. An overview of the authors' own publications and unpublished works on the analysis of thermal loading and thermal strength of steam turbine components is given.

The latest research results on modelling the temperature, strains and stresses in turbine components and their durability are discussed. The potential of the developed numerical procedures and their applications to the evaluation of the strength of steam turbines is characterized.

The thermal strength is understood as the strength of a component subjected to thermal loading (acting alongside the mass and surface loads). Therefore, the analysis of strains and stresses in a components has to be preceded by the determination of the thermal boundary conditions (mainly the heat transfer coefficients) and calculation of the steady state or transient temperature field.

From the extensive strength calculation of the components of various types of turbines and from the available literature data, a number of basic necessary conditions for the theoretical thermal and strength analysis of turbine components have been formulated. The conditions are crucial for the accuracy of the obtained results.