

Gerard KOSMAN, Andrzej RUSIN, Henryk ŁUKOWICZ

MODELOWANIE NADZWYCZAJNYCH STANÓW TERMICZNYCH TURBIN PAROWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki modelowania rozkładów temperatury i naprężeń w elementach turbiny w czasie intensywnego chłodzenia. Szczegółowo rozpatrzono proces chłodzenia po skokowym obniżeniu temperatury pary. Analizowano stan cieplny i wytrzymałościowy wirnika i kadłuba. Drugi przykład dotyczy zalania turbiny wodą. Wyznaczono naprężenia w kadłubie wewnętrznym i zewnętrznym zalanej części turbiny. Ze względu na bardzo intensywne chłodzenie kadłubów wyznaczone naprężenia szybko osiągają granicę plastyczności materiału, a kadłuby odkształcają się trwale.

MODELLING OF EXTRAORDINARY THERMAL STATES OF STEAM TURBINES

Summary. In this paper the results of temperature and stress distribution modelling of steam turbine elements at the condition of an intensive cooling has been presented. Detail was a cooling process after the step steam temperature decreasing considered. Thermal and strength state of turbine rotor and cylinder was analysed. The second example describes water flooding of a turbine. The stresses in the flooded part of the inner and outer turbine cylinder was calculated. In regard to a great cooling rate of turbine cylinders the determined stresses has been fast achieved the yield point and turbine cylinders was durable deformed.

SIMULATION AUßERORDENTLICHER TERMISCHEN ZUSTÜNDEN VON DAMPFTURBINEN

Zusammenfassung. In der Arbeit ist Ergebnisse der Simulation von Temperatur- und Spannungsverteilungen in Turbinenbauelementen während einer intensiven Kühlung dargestellt worden. Speziell wurde ein Kühlungsvorgang bei der Sprungartigen Dampftemperaturverminderung betrachtet. Es wurde eine Analyse des Warmzustands und auch Festigkeitsanalyse des Rotors und des Gehäuse durchgeführt. Zweites Beispiel beschreibt die Werkstoffbeanspruchung während

Überflutung der Dampfturbine durch Wasser. Es wurden Spannungen in äußerer und innerer Gehäuse im Bereich des Wasser ermittelt. Aus dem Grund einer sehr raschen Kühlung von Gehäuse die berechnete Spannungen schnell erreichen die Streckgrenze des Werkstoffs und entsteht eine stabile Verformung der Gehäuse.

1. WPROWADZENIE

Chłodzenie elementów turbiny następuje zazwyczaj w sposób naturalny. Po zdjęciu obciążenia i odcięciu dopływu pary do turbiny rozpoczyna się proces powolnego stygnięcia. Proces ten odbywa się płynnie z prędkością maksymalną rzędu 0,08 K/min.

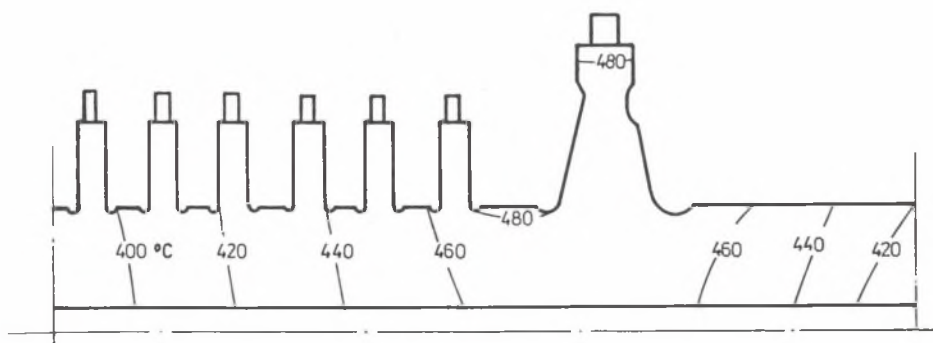
Znane sposoby wymuszonego (przyśpieszonego) chłodzenia turbiny zwiększają prędkość stygnięcia głównych elementów. Przy odpowiednio dobranej metodzie chłodzenia można uzyskać prędkość maksymalną w granicach 0,7 – 1,0 K/min.

W obu wymienionych przypadkach chłodzenia elementów turbiny rozkład temperatury jest bardzo wyrównany, a różnice temperatury w wybranych punktach np. kadłuba mają wartości podobne do omawianych różnic w stanie równowagi cieplnej (w stanie ustalonym). Prowadzi to do pojawienia się naprężeń znacznie mniejszych od dopuszczalnych. Bardziej niekorzystny stan termiczny i wytrzymałościowy elementów turbiny występuje w przypadku szybkiego, bardzo intensywnego schłodzenia elementów, które może wystąpić w trakcie nadzwyczajnych stanów ruchowych. Występuje to np. po obniżeniu parametrów pary (temperatury pary) omywającej badane elementy lub jeszcze dobitniej po zalaniu turbiny wodą. Tak sformułowane zadania są przedmiotem analizy niniejszego opracowania.

2. MODELOWANIE PROCESU CHŁODZENIA ELEMENTÓW TURBINY PO OBNIŻENIU TEMPERATURY PARY

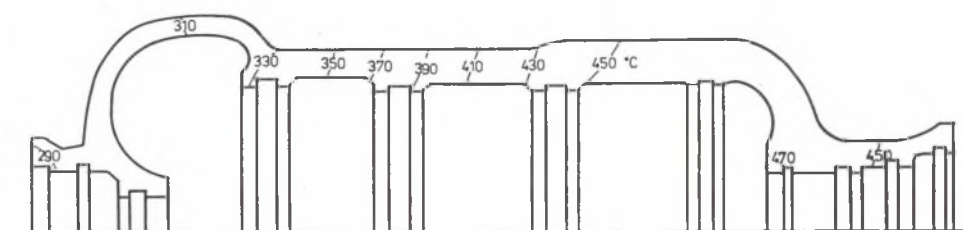
2.1. Stan wyjściowy elementów turbiny

Punktem wyjścia do modelowania procesu chłodzenia części WP turbiny jest stan ustalony przy obciążeniu nominalnym turbiny. Wyjściowe rozkłady temperatury w wirniku i kadłubie części WP przedstawiono na rys. 1 i 2. Temperatura jest bardzo wyrównana wzdłuż grubości elementów. Zmiana temperatury wzdłuż osi wynika z rozkładu parametrów pary w układzie przepływowym turbiny. Dla tak określonego stanu cieplnego naprężenia w wirniku i kadłubie są niewielkie. Maksymalne naprężenie zredukowane w wirniku występuje w obszarze dławnicy przedniej i wynosi ok. 157 MPa. Dla kadłuba naprężenie to wynosi ok. 64 MPa i występuje w obrębie stopnia regulacyjnego.



Rys. 1. Wyjściowy rozkład temperatury w wirniku

Fig. 1. Initial rotor temperature distribution



Rys. 2. Wyjściowy rozkład temperatury w kadłubie

Fig. 2. Initial casing temperature distribution

2.2. Opis procesu chłodzenia

Proces chłodzenia wirnika i kadłuba części WP turbiny następuje po szybkim obniżeniu temperatury pary omywającej badane elementy.

Symulację procesu chłodzenia przeprowadzono dla następujących założeń:

- w stanie wyjściowym istnieje ustalone pole temperatury wirnika i kadłuba odpowiadające obciążeniu nominalnemu,
- wirnik i kadłub w pewnej chwili omywany jest parą o temperaturze o ΔT niższą od **maksymalnej temperatury kadłuba części WP**,
- parametry pary po obniżeniu są stałe, tzn. nie zmieniają się w czasie chłodzenia,

- przyjęta w obliczeniach różnica temperatury metalu i pary ΔT jest różnicą między maksymalną temperaturą kadłuba $T_{k, \max}$ a temperaturą pary w komorze stopnia regulacyjnego $T_{p, r}$ (nie pary świeżej).

$$\Delta T = T_{k, \max} - T_{p, r}$$

Ponieważ intensywność wymiany ciepła na powierzchniach elementów istotnie zależy od strumienia pary, analizowane zagadnienie należy rozwiązać dla różnego częściowego obciążenia turbiny. W obliczeniach numerycznych strumień pary zmieniano w pełnym zakresie (od strumienia przy biegu luzem do obciążenia nominalnego).

2.3. Analiza wpływu temperatury i strumienia pary na naprężenia w elementach turbiny w czasie chłodzenia

Zasadniczym celem przeprowadzonej symulacji procesu chłodzenia było określenie wpływu wybranych czynników na stan wytrzymałościowy głównych elementów turbiny. W obliczeniach szczegółowych analizowano wpływ temperatury pary (a właściwie różnicy $\Delta T = T_{k, \max} - T_{p, r}$) oraz strumienia pary na przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych w wirniku i kadłubie części WP turbiny.

Różnicę temperatur ΔT zmieniano w granicach od 0 do 100 K, natomiast strumień pary od 10 do 100% strumienia nominalnego

$$0 \leq \Delta T \leq 100 \text{ K}$$

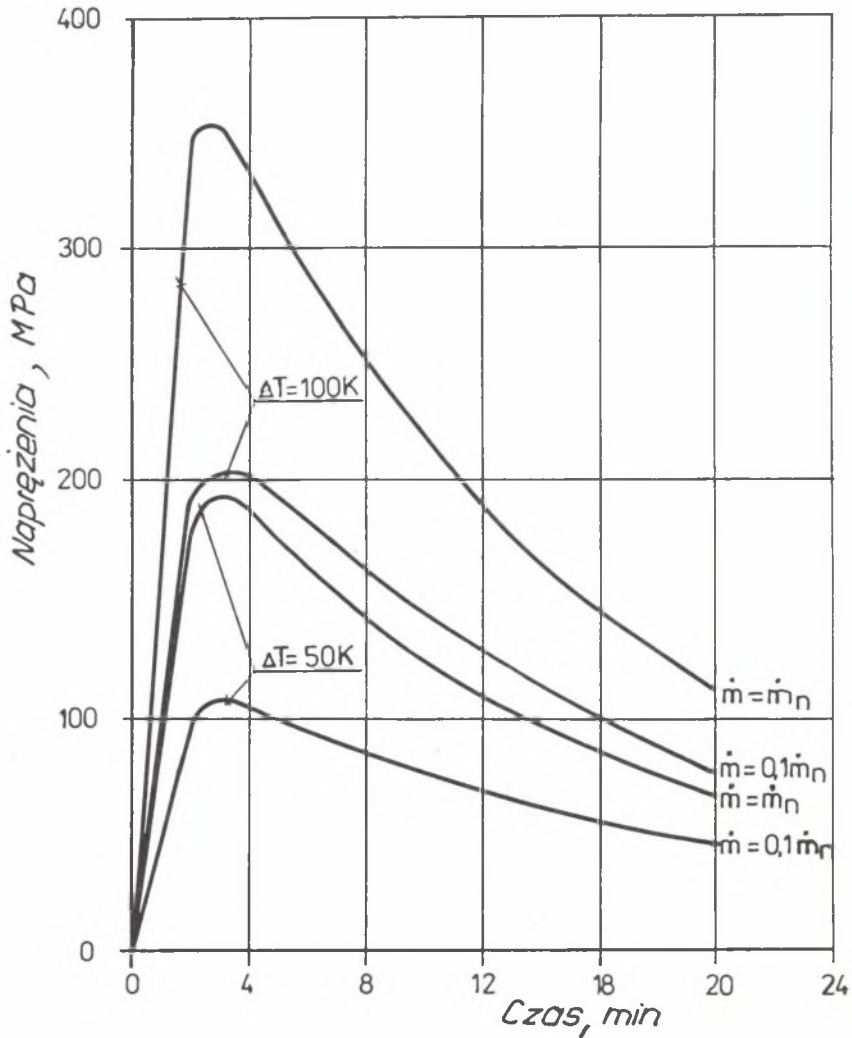
$$0,1m_{\text{nom}} \leq m \leq m_{\text{nom}}$$

Przykładowe przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych podano na rys. 3 dla wirnika oraz rys. 4 dla kadłuba. Podane przebiegi dotyczą skrajnych wartości strumienia pary oraz dwóch wartości różnicy temperatury ΔT ($\Delta T = 50 \text{ K}$ i $\Delta T = 100 \text{ K}$).

Przedstawione przebiegi czasowe naprężeń dla wirnika i kadłuba różnią się zdecydowanie. Naprężenia w wirniku osiągają szybko wartość maksymalną (po kilku minutach chłodzenia), a następnie monotonicznie spadają. Naprężenia w kadłubie rosną zdecydowanie wolniej i osiągają maksimum po dłuższym okresie chłodzenia. Przyczyną takiego stanu jest zdecydowanie różna intensywność wymiany ciepła pomiędzy parą i wirnikiem oraz parą i kadłubem. Wirnik jest omywany bezpośrednio parą i w związku z tym współczynniki wnikania ciepła są wysokie. Kadłub nie jest omywany bezpośrednio parą ze względu na występowanie owiewki w komorze stopnia regulacyjnego oraz tarcz kierowniczych. Powoduje to znaczne obniżenie (w stosunku do wirnika)

współczynników wnikania. Na podstawie rys. 3 i 4 oraz podobnych obliczeń dla innych wartości ΔT wykreślono zależność maksymalnych naprężeń zredukowanych w kadłubie i wirniku w funkcji ΔT dla dwóch wartości strumienia pary. Tę zależność pokazano na rys. 5.

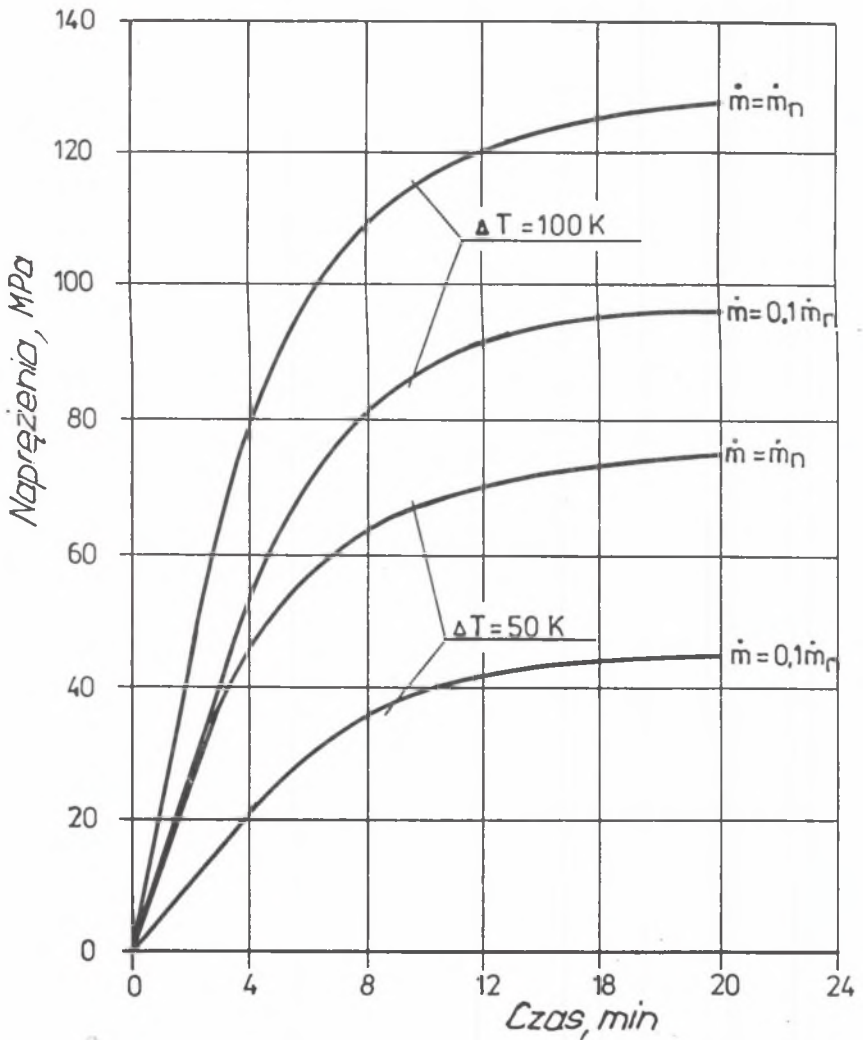
Na rys. 3 i 4 przedstawiono jedynie przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń w wirniku i kadłubie w czasie chłodzenia. Chodziło o pokazanie



Rys. 3. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych w wirniku WP

Fig. 3. Time variation of the effective stresses in HP rotor

wpływu temperatury i strumienia pary na stan wytrzymałościowy elementów. W czasie obliczeń analizowano jednak rozkłady temperatury i naprężeń w całych przekrojach wirnika i kadłuba. Na tej podstawie wyznaczono wspomniane wyżej przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych.

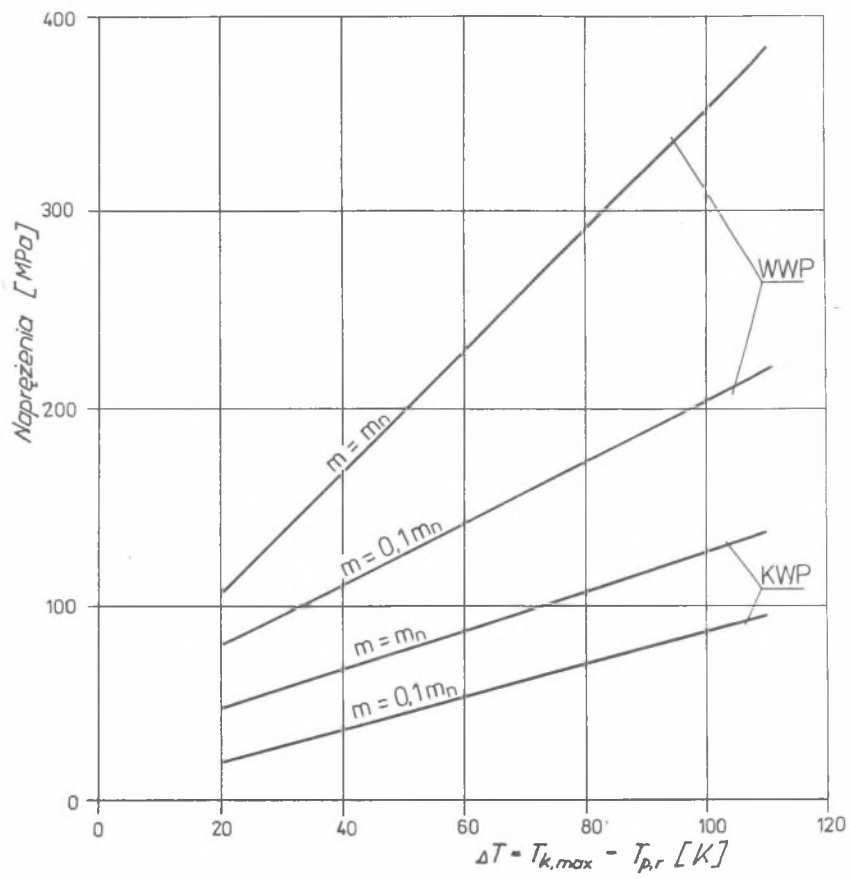


Rys. 4. Przebiegi czasowe maksymalnych naprężeń zredukowanych w kadłubie WP

Rys. 4. Time variation of the effective stresses in HP casing

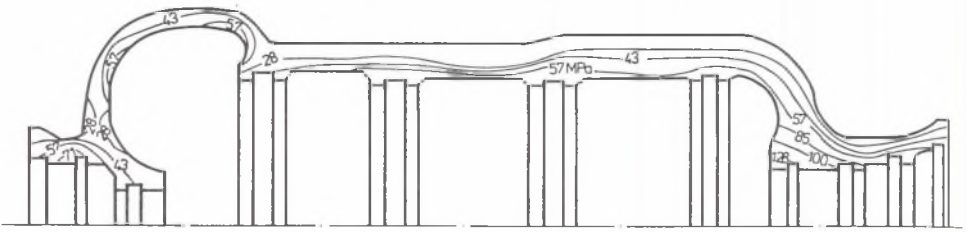
Przykładowe rozkłady naprężeń zredukowanych w wirniku i kadłubie w czasie chłodzenia przedstawiono na rys. 6 i 7. Odpowiadają one następującym danym:

- różnica temperatury $\Delta T = T_{k,max} - T_{p,r} = 100 \text{ K}$,
- strumień pary $m = m_{nom}$,
- czas od chwili obniżenia temperatury pary $t = 2 \text{ min}$ dla wirnika oraz $t = 20 \text{ min}$ dla kadłuba. Dla tych czasów naprężenia w wirniku i kadłubie osiągają wartości maksymalne (rys. 3 i 4).



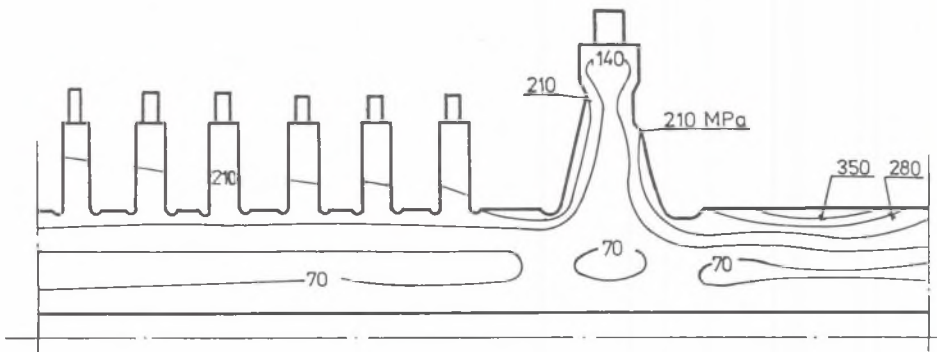
Rys. 5. Zależność maksymalnych naprężeń zredukowanych w kadłubie i wirniku w funkcji ΔT i strumienia pary

Fig. 5. Maximal effective stresses in the rotor and casing as a function of ΔT and steam flow



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych w kadłubie WP po 20 min chłodzenia dla $m = m_{nom}$ i $\Delta T = 100$ K

Fig. 6. Effective stresses distribution in HP casing after 20 min of cooling for $m = m_{nom}$ and $\Delta t = 100$ K



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych w wirniku WP po 2 min chłodzenia dla $m = m_{nom}$ i $\Delta T = 100$ K

Fig. 7. Effective stresses distribution in HP rotor after 20 min of cooling for $m = m_{nom}$ and $\Delta T = 100$ K

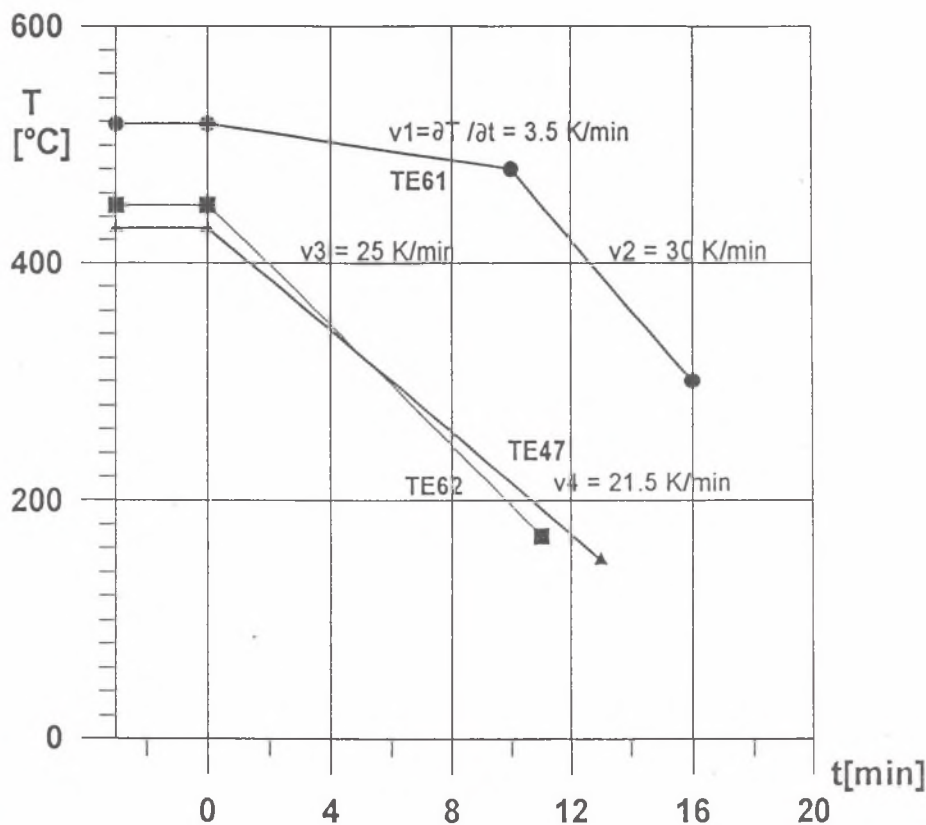
3. MODELOWANIE ROZKŁADU TEMPERATUR I NAPRĘŻEŃ W KADŁUBACH CZĘŚCI SP TURBINY PO AWARYJNYM ZALANIU WODĄ

W czasie eksploatacji turbin parowych dochodzi czasem do bardzo intensywnego schłodzenia kadłubów turbiny na skutek uderzenia wodnego. Zmierzony prędkości spadku temperatury metalu przekraczają wtedy wartości dopuszczalne.

W rozpatrywanym niżej przykładzie przyczyną schłodzenia była woda, która z wymiennika CT2 poprzez uszczelnienia przedostała się do przestrzeni

międzykadłubowej części SP turbiny. Nastąpiło wtedy schłodzenie kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego. Pomierzone spadki temperatury metalu kadłubów były następujące:

- kadłub wewnętrzny SP (termopara TE61)
 - spadek temperatury z 515 do 480°C w czasie 10 min,
 - spadek temperatury z 480 do 300°C w czasie 6 min,
- kadłub wewnętrzny SP (termopara TE62)
- spadek temperatury z 450 do 350°C w czasie 4 min,
- kadłub zewnętrzny SP (termopara TE47)
 - spadek temperatury z 430 do 150°C w czasie 13 min.



Rys. 8. Przebieg intensywnego schłodzenia kadłubów turbiny

Fig. 8. Time variation of the intense casing cooling

Przybliżony przebieg chłodzenia pokazano na rys. 8. Prędkości chłodzenia dolnych połówek kadłubów wewnętrznego i zewnętrznego SP są równe (rys. 8):

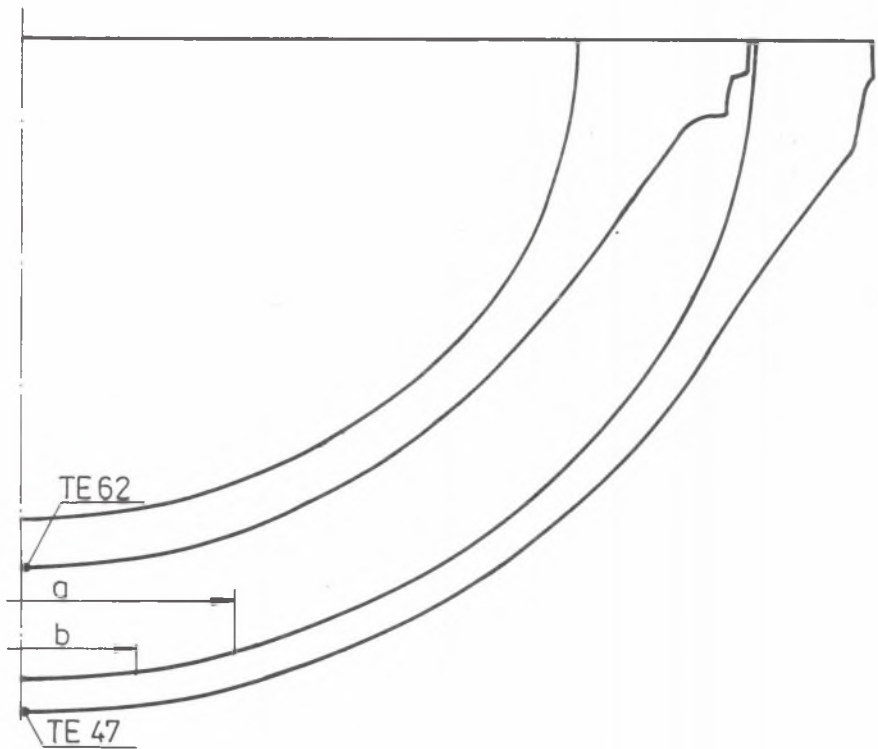
$$V1 = 3,5 \text{ K/min,}$$

$$V2 = 30,0 \text{ K/min,}$$

$$V3 = 25,0 \text{ K/min,}$$

$$V4 = 21,5 \text{ K/min.}$$

Oznaczenie punktów pomiarowych TE61, TE62 i TE47 (termopar) podano na rys. 9.



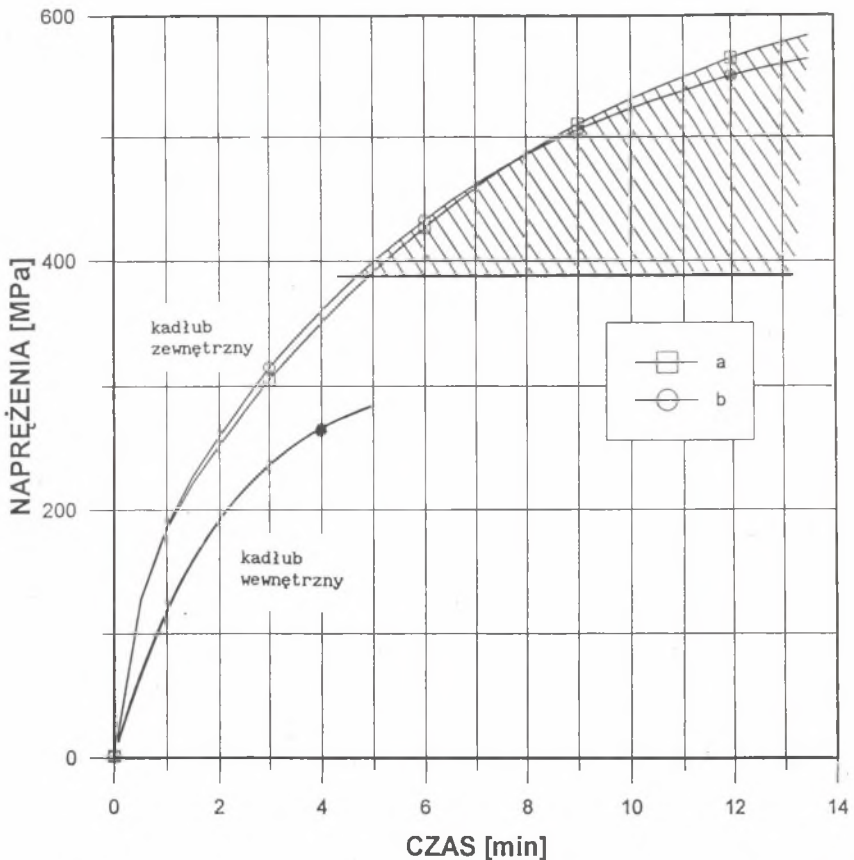
Rys. 9. Punkty pomiaru temperatury kadłubów

Fig. 9. Measurement points of the temperature in the casing

3.1. Kadłub zewnętrzny

Opisany nadzwyczajny stan ruchowy turbiny miał wpływ na stan techniczny kadłubów (zwłaszcza dolnych części kadłubów zewnętrznych). Ze względu na duże prędkości schłodzenia należy liczyć się z pojawieniem znacznych naprężeń i odkształceń trwałych, a nawet pęknięć.

Do szczegółowej analizy wybrano przede wszystkim przypadek schłodzenia kadłuba zewnętrznego SP. Temperatura kadłuba spadła wtedy z 430 do 150°C w czasie 13 min. Przybliżony przebieg chłodzenia pokazano na rys. 8. Prędkość chłodzenia była równa 21,5 K/min.



Rys. 10. Przebieg czasowy maksymalnych naprężeń zredukowanych w czasie chłodzenia

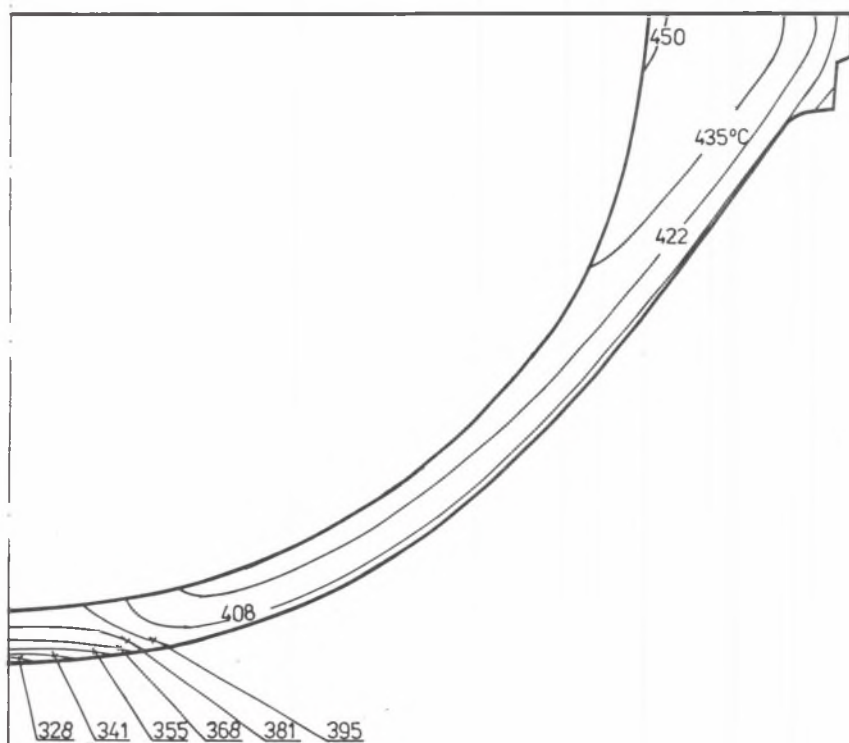
Fig. 10. Time variation of the maximal effective stresses during cooling

Punktem wyjścia do modelowania procesu intensywnego chłodzenia oraz wyznaczenia temperatur i naprężeń był stan ustalony przy obciążeniu nominalnym turbiny. Najważniejszą sprawą było zamodelowanie wymiany ciepła na powierzchni wewnętrznej kadłuba zewnętrznego. Na skutek dużej różnicy temperatury pomiędzy powierzchnią kadłuba i wodą, ulega ona częściowemu odparowaniu. W związku z tym w kadłubie wyróżniono dwie strefy wymiany ciepła:

- styk wody z powierzchnią kadłuba,
- powierzchnię omywaną parą pochodzącą z odparowania wody.

Na tych powierzchniach przyjęto różne wartości współczynników wnikania ciepła wynikające z charakteru zachodzących zjawisk.

Ponieważ nie jest znana dokładnie powierzchnia styku wody z kadłubem, obliczenia prowadzono dla dwóch wariantów obejmujących dwa różne obsza-



Rys. 11. Rozkład temperatury po 4 min schładzania

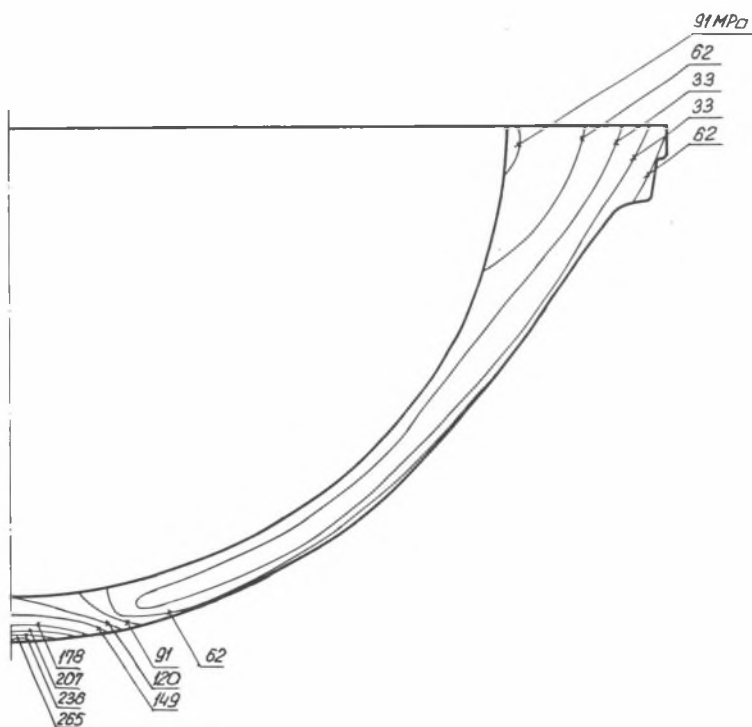
Fig. 11. Temperature distribution after 4 min of cooling

ry: obszar większy (wariant a) i mniejszy (wariant b). Usytuowanie przyjętych obszarów pokazano na rys. 9.

Przebieg czasowy maksymalnych naprężeń zredukowanych dla obu rozpatrywanych wariantów przedstawiono na rys. 10.

3.2. Kadłub wewnętrzny

Woda, która przedostała się w czasie awarii do przestrzeni międzykadłubowej części SP turbiny spowodowała, obok schłodzenia kadłuba zewnętrznego, spadek temperatury kadłuba wewnętrznego. Zgodnie z przebiegiem czasowym pokazanym na rys. 8 (termopara TE62) temperatura kadłuba wewnętrznego obniżyła się z 450 C do 350°C w czasie 4 min. Opisany proces intensywnego schłodzenia kadłuba zamodelowano numerycznie. Przyjęto początkową temperaturę przekroju poprzecznego równą 450°C, a następnie w czasie 4 min



Rys. 12. Rozkład naprężeń zredukowanych po 4 min schładzania

Fig. 12. Effective stresses distribution after 4 min of cooling

schłodzono powierzchnię zewnętrzną dolnej części kadłuba o około 100 K do temperatury 350°C. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym po 4 min schładzania pokazano na rys. 11, natomiast rozkład naprężeń zredukowanych na rys. 12. Przebieg maksymalnych naprężeń zredukowanych w czasie schładzania pokazano na rys. 10.

3.3. Uwagi końcowe

W czasie numerycznego modelowania nadzwyczajnych stanów termicznych kadłubów części SP turbiny wywołanych awaryjnym zalaniem wodą zmierzone temperatury metalu w wybranych punktach kadłuba (punkty TE47, TE61 i TE62 na rys. 8) wykorzystano do weryfikacji wyznaczonych pól temperatury w przekroju poprzecznym kadłubów. Wspomniana weryfikacja polegała na doborze takich warunków brzegowych wymiany ciepła, dla których uzyskuje się zgodność pomierzonych i obliczonych przebiegów czasowych temperatur.

Uzyskane wyniki obliczeń, a przede wszystkim przebieg czasowy maksymalnych naprężeń zredukowanych (rys. 10) wskazują, że w trakcie intensywnego schłodzenia kadłubów mogą pojawić się odkształcenia trwałe. Na rys. 10 zaznaczono skrajnie możliwe przebiegi czasowe naprężeń maksymalnych po przekroczeniu granicy plastyczności materiału. Górne wartości odpowiadają przebiegom naprężeń sprężystych. Dolna wartość charakteryzuje materiał sprężysto-idealnie plastyczny. Rzeczywisty przebieg naprężeń będzie się mieścił w obszarze zakreskowanym.

Abstract

In this paper the results of temperature and stress distribution modelling of steam turbine components at the condition of an intensive cooling has been presented. A cooling process after the step steam temperature decreasing was considered. Thermal and strength state of turbine rotor and cylinder was analysed. The second example describes water flooding of a turbine. The stresses in the flooded part of the inner and outer turbine cylinder was calculated. In regard to a great cooling rate of turbine cylinders the determined stresses has been fast achieved the yield point and turbine cylinders was durable deformed. An extreme time variation of maximal stresses over the yield stress are shown in fig 10. Upper values correspond to elastic stresses. Bottom values correspond to the elastic – ideal plastic material. Real stresses are contained in the shading area. The measured metal temperature in the given casing points has been used to examine numerically calculated temperature distributions in the transversal section of the casing. The verification consisted in selection fo the proper thermal boundary conditions which gave compatibility of the measured and calculated temperature distributions.