

Gerard KOSMAN

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

WPLYW POCZĄTKOWEGO STANU TERMICZNEGO TURBINY I PRĘDKOŚCI NAGRZEWANIA NA NAPRĘŻENIA W WIRNIKU

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę stanu wytrzymałościowego wirnika w czasie rozruchu turbiny. Wyznaczono naprężenia dla różnych początkowych stanów termicznych turbiny i różnych prędkości nagrzewania. Punktem wyjścia do rozważań szczegółowych były charakterystyki rozruchowe podawane w instrukcjach eksploatacji turbin.

1. Wstęp

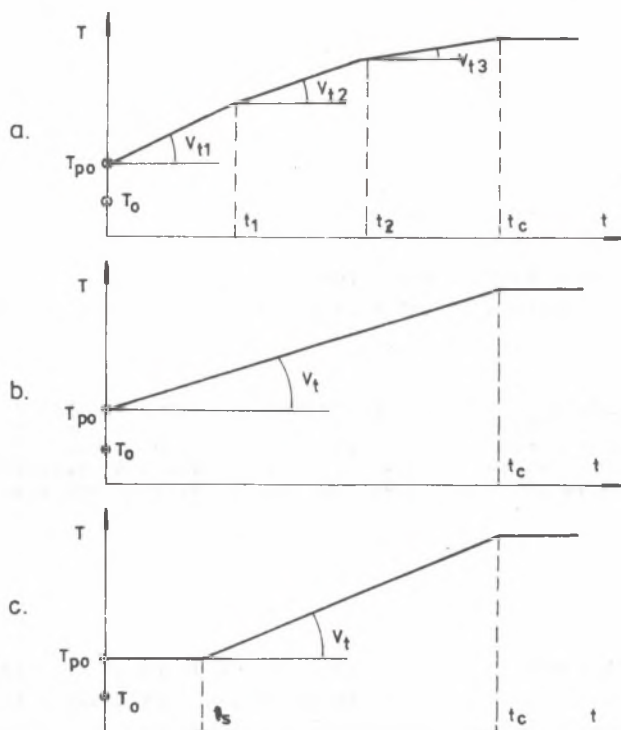
O warunkach początkowych rozruchu turbiny decyduje w głównej mierze czas trwania procesu stygnięcia. Im okres ten jest dłuższy tym istotniejsze muszą nastąpić zmiany parametrów pary i temperatury metalu w czasie rozruchu. Najgorsza sytuacja występuje w czasie rozruchu ze stanu zimnego. Temperatura pary na wlocie do turbiny dużej mocy zmienia się wtedy od 150°C (250°C) do ponad 500°C . W czasie rozruchu ze stanu gorącego lub ciepłego zakres zmian parametrów jest mniejszy.

Typowy przebieg czasowy temperatury pary świeżej przedstawia rys. 1a. Temperatura pary zmienia się liniowo, przy czym prędkości zmian tej temperatury są różne na poszczególnych odcinkach. Wprowadzając średnią prędkość wzrostu temperatury pary v_t (rys. 1b i 1c) uzyskujemy przebiegi uproszczone.

Zgodnie z podanymi przebiegami w czasie $t = 0$ następuje skok temperatury pary do wartości T_{po} , a następnie liniowy wzrost z prędkością v_t (rys. 1b). Dla przebiegu pokazanego na rys. 1c uwzględniono, że wzrost temperatury odbywa się dopiero po czasie t_s .

Dla danego początkowego stanu termicznego turbiny T_0 , charakteryzowanego temperaturą kadłuba wewnętrznego w okolicy stopnia regulacyjnego, należy dobrać wartości liczbowe T_{po} , v_t i t_s tak, by całkowity czas nagrzewania turbiny t_c był minimalny przy równoczesnym spełnieniu kryteriów bezpiecznej pracy wszystkich elementów turbiny.

Z tego względu ważną sprawą jest analiza wpływu wymienionych wielkości na naprężenia i odkształcenia elementów turbiny.



Rys. 1. Przebieg czasowy temperatury pary świeżej

W niniejszej pracy przeprowadzono taką analizę dla wirnika tarczowego turbiny akcyjnej. W rozważaniach szczegółowych wykorzystano wyniki uzyskane w pracy [1].

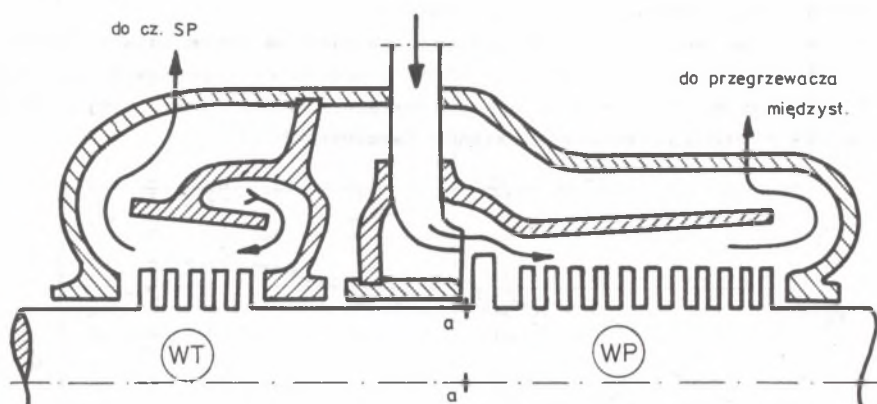
2. Sformułowanie badanych zagadnień

Analizujemy stan wytrzymałościowy wirnika w czasie rozruchu z różnych początkowych stanów cieplnych. Zakładamy, że rozruch jest prowadzony według krzywych rozruchowych podawanych w instrukcjach eksploatacji turbin.

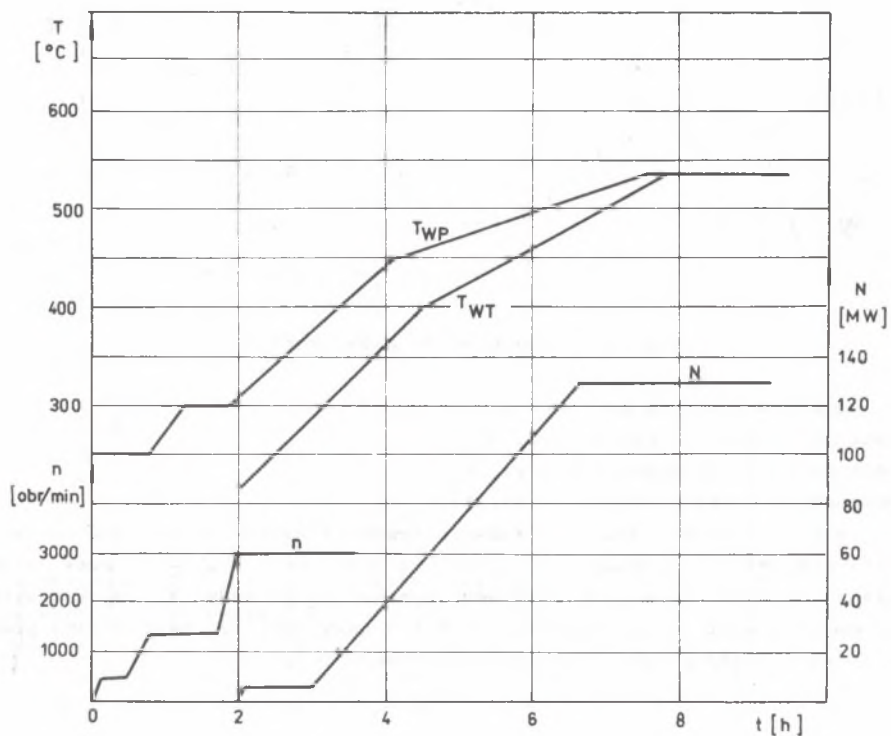
Obliczenia szczegółowe dotyczą turbiny o mocy 130 MW. Schemat układu przepływowego części wysokoprężnej WP i wysokotemperaturowej WT pokazano na rys. 2.

Przedmiotem rozważań jest fragment wirnika obejmujący uszczelnienie labiryntowe pomiędzy częściami WP i WT.

Jest to miejsce najbardziej obciążone cieplnie.



Rys. 2. Schemat układu przepływowego

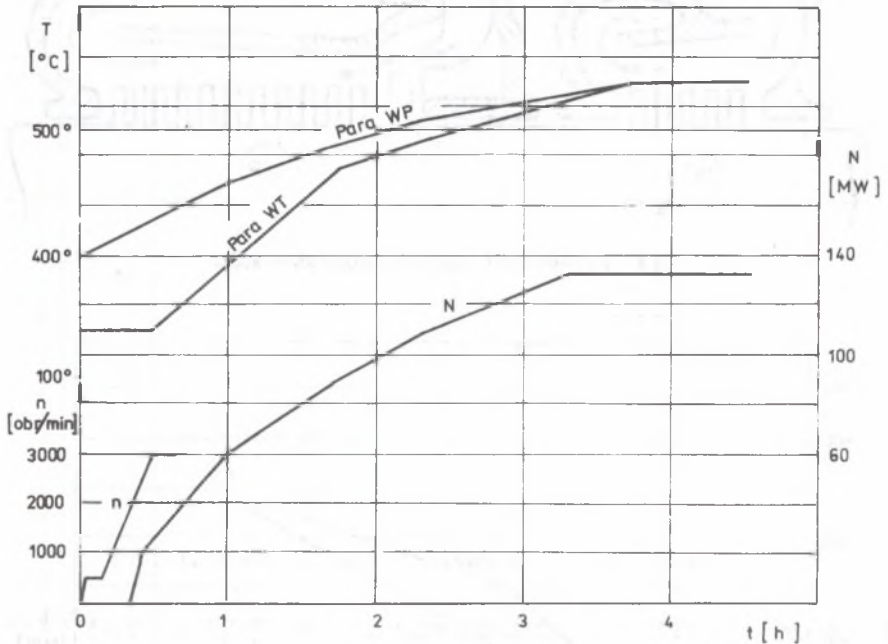


Rys. 3. Rozruch ze stanu zimnego

Zakres badań obejmuje dwa zagadnienia:

- Wpływ początkowego stanu termicznego turbiny na naprężenia w wirniku.
- Analiza naprężeń w wirniku dla różnych prędkości nagrzewania turbiny.

Punktem wyjścia do rozwiązania pierwszego zadania były krzywe rozruchowe dla różnych początkowych stanów termicznych [2].



Rys. 4. Rozruch po 36 godz. postoju

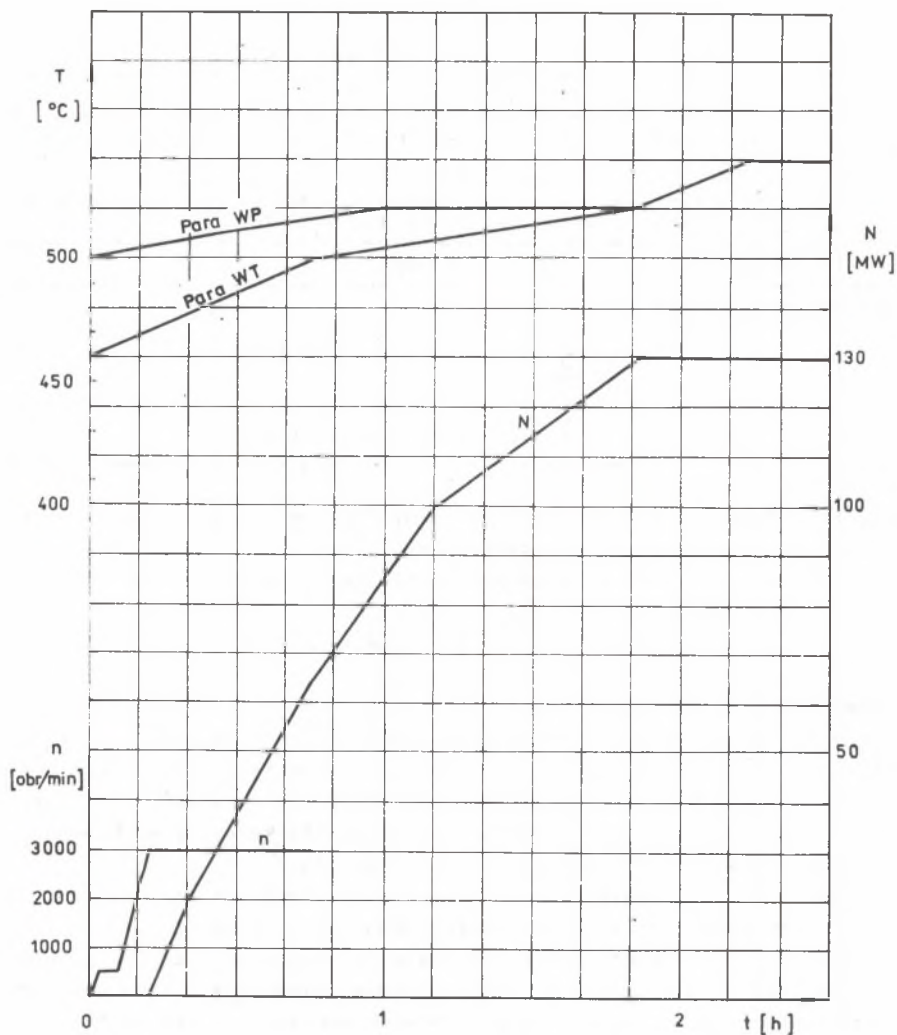
W szczególności rozpatrzono:

- rozruch ze stanu zimnego (rys. 3),
- rozruch po 36 godz postoju (rys. 4),
- rozruch po 8 godz. postoju (rys. 5).

W celu rozwiązania drugiego zadania przeanalizowano naprężenia dla warunków nagrzewania opisanych krzywymi rozruchowymi (rys. 3-5) przy czym zmniejszono skalę czasu, tzn. oprócz nagrzewania prowadzonego wg krzywych rozruchowych analizowano nagrzewanie 2 i 4 razy szybsze (zmniejszono proporcjonalnie cały przebieg krzywych rozruchowych).

3. Założenia do oceny stanu wytrzymałościowego wirnika

Cechy geometryczne wirnika przyjęto w oparciu o rysunek złożeniowy układu przepływowego i rysunek wykonawczy wirnika. Wirnik nie jest drążony.



Rys. 5. Rozruch po 8 godz postoju

W obszarze między tarczą wirnikową stopnia regulacyjnego części WP, a tarczą wirnikową pierwszego stopnia części WT promień zewnętrzny wału $r_z = 0,25$ m.

Do obliczeń rozkładu temperatury w wirniku przyjęto średnie wartości c , ϱ , λ w badanym zakresie temperatur

$$c = 550 \text{ J/kg K}$$

$$\varrho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 27,4 \text{ W/mK}$$

Tablica 1

Materiałowe cechy konstrukcyjne wirnika

T	°C	0	100	200	300	400	500	600
$E \cdot 10^5$	MPa	2,0	1,92	1,84	1,72	1,60	1,46	1,32
ν	-	0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
Re	MPa	400	384	368	344	320	292	264
β	K ⁻¹	0,000022						
Aproksymacja liniowa								
$E = E_0 + a_E T = 213000 - 167,7 T$								
$\nu = \nu_0 + a_\nu T = 0,3 + 0,0001 T$								
$Re = Re_0 + a_{Re} T = 415 - 0,2645 T$								

Niektóre własności wytrzymałościowe przyjętego materiału wirnika w różnych temperaturach zestawiono w tablicy 1.

W obliczeniach korzystano z liniowych aproksymacji funkcji

$$E = E(T), \quad \nu = \nu(T), \quad Re = Re(T).$$

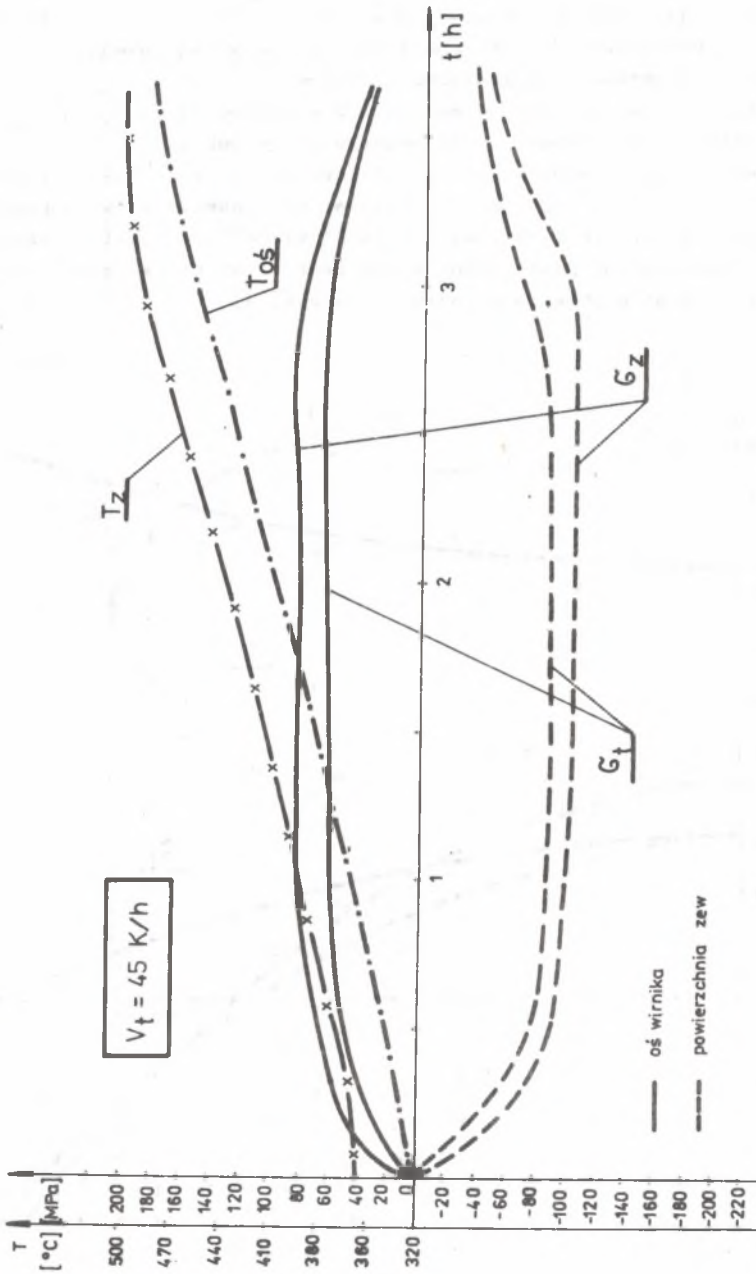
Aproksymacje te podano również w tablicy 1.

Zakres obliczeń w każdym przykładzie jest taki sam. Najpierw w oparciu o krzywe rozruchowe wyznaczamy parametry pary w punktach charakterystycznych turbiny (wlot i wylot z części WP, wlot i wylot z części WT). Następnie obliczamy parametry pary omywającej wirnik. Wielkości te są niezbędne do określenia warunków brzegowych przepływu ciepła.

Kolejny etap dotyczy modelowania pół temperatur. Wyniki obliczeń tego etapu stanowiły bazę wyjściową do analizy naprężeń w wirniku.

Do obliczenia rozkładu temperatury zastosowano metodę różnicową. Pole temperatury traktowano jako osiowo-symetryczne. Płaszczyzny symetrii tarczy wirnikowej stopnia regulacyjnego i pierwszego stopnia części WT przyjęto jako powierzchnie adiabatyczne. Pełniejsze informacje o modelowaniu stanu termicznego wirnika podano w [1].

Do obliczenia naprężeń wykorzystano model quasi-dwuwymiarowy. Działanie tarcz wirnikowych zastępujemy obciążeniem powierzchniowym. Naprężenia zmieniają się wzdłuż promienia i osi wirnika. Ponieważ E i ν zależą od temperatury a tym samym są funkcjami miejsca (ośrodek niejednorodny) rozwiązanie szukano na drodze numerycznej. Do obliczeń szczegółowych zastosowano metodę różnic skończonych. W ogólnym algorytmie obliczeniowym uwzględniono możliwość wystąpienia małych odkształceń plastycznych [3].



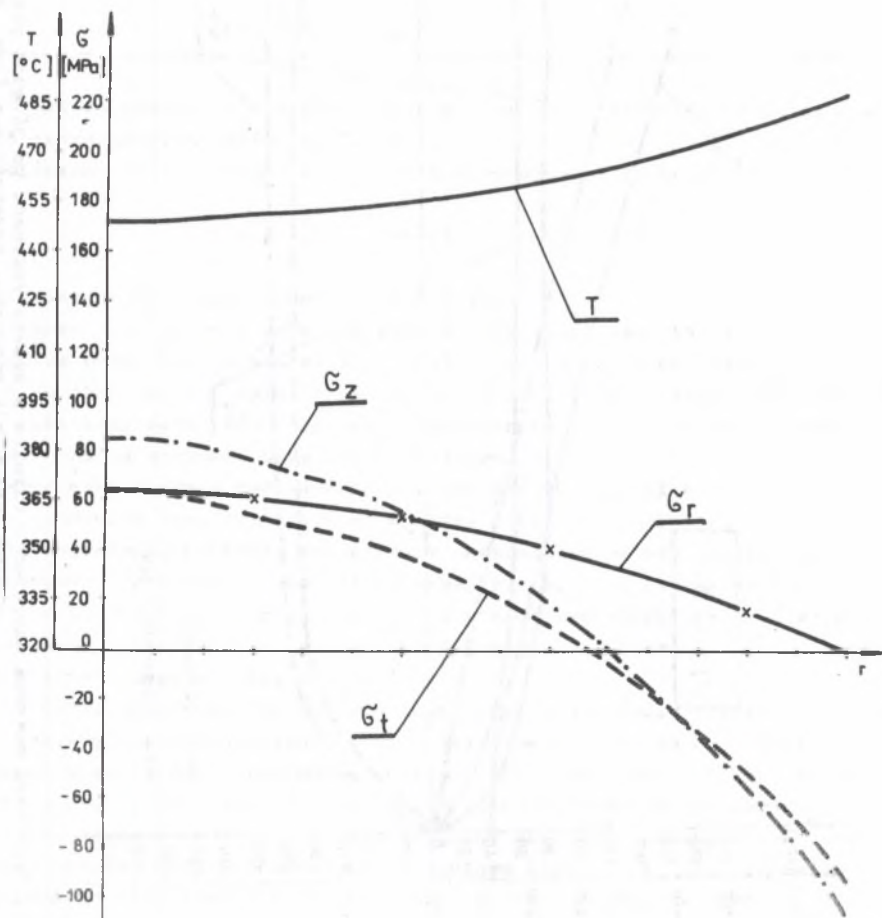
Rys. 6. Przebiegi czasowe naprężeń w wirniku w czasie rozruchu po 36 godz postoju, nagrzewanie prowadzone według instrukcji rozruchu, przekrój a-a (rys. 2)

4. Naprężenia w wirniku w czasie rozruchu po 36 godz postoju

Obliczenia naprężeń powstających w wirniku w czasie rozruchu po 36 godz postoju prowadzono dla następujących warunków nagrzewania:

- nagrzewanie prowadzone wg instrukcji rozruchu,
- nagrzewanie 2 razy szybsze od zalecanego w instrukcji,
- nagrzewanie 4 razy szybsze od zalecanego w instrukcji.

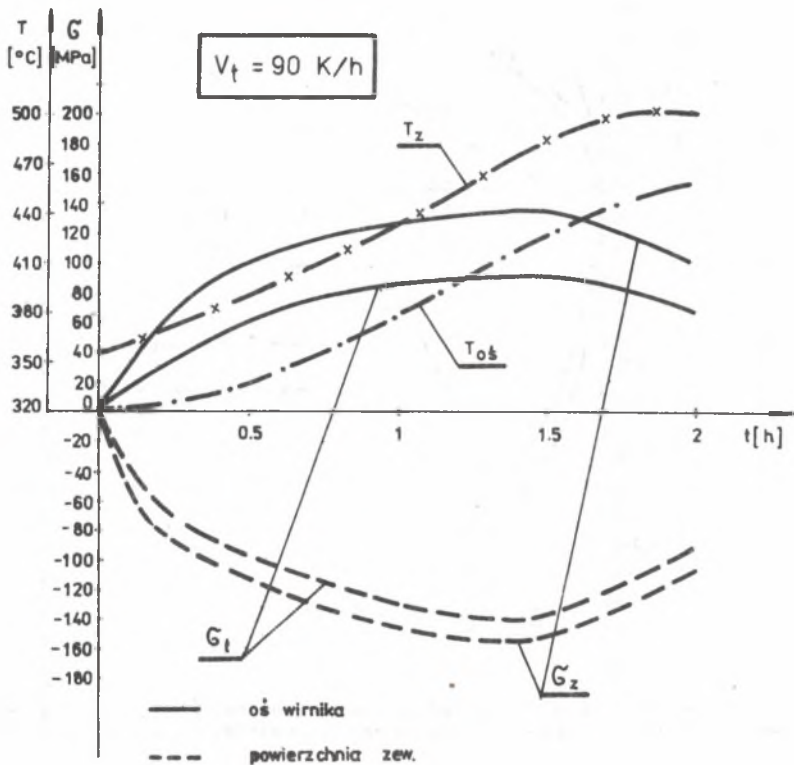
Przykładowe wyniki modelowania przedstawione na rys. 6-9. W pierwszej kolejności analizowano naprężenia w czasie nagrzewania prowadzonego według instrukcji rozruchu. Na rys. 6 przedstawiono przebiegi czasowe temperatury i naprężeń na powierzchni zewnętrznej i w osi wirnika dla przekroju a-a. Położenie przekroju pokazano na rys. 2.



Rys. 7. Rozkład maksymalnych naprężeń w wirniku w czasie rozruchu po 36 godz. postoj, nagrzewanie prowadzone według instrukcji, przekrój a-a

Przebiegi czasowe naprężeń wykazują, że poza początkowym okresem nagrzewania naprężenia powoli rosną i osiągają wartości maksymalne mniej więcej w czasie, gdy parametry pary osiągają wartości końcowe równe wartościom dla stanu ustalonego.

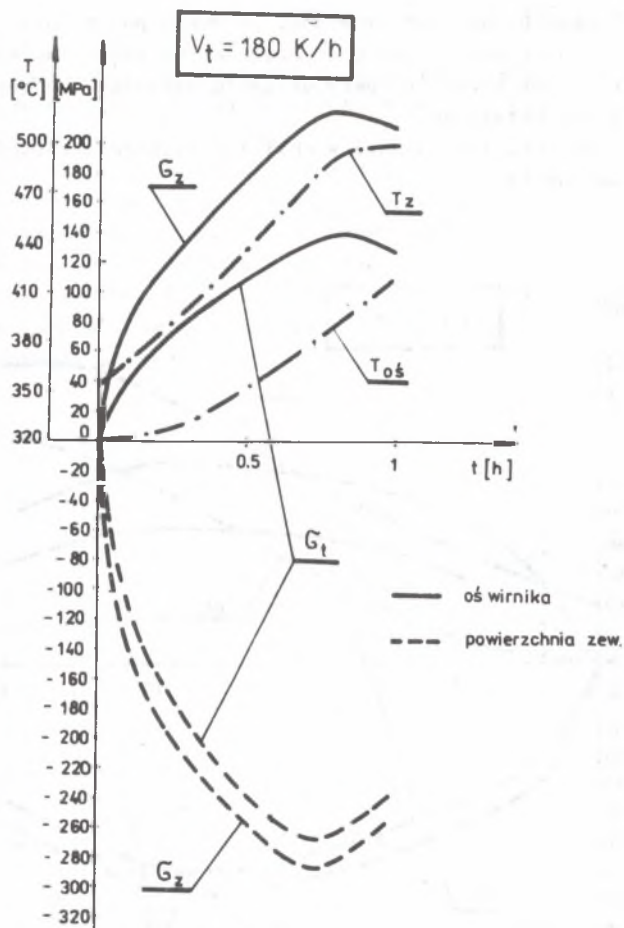
Rozkład naprężeń wzdłuż promienia w chwili osiągnięcia wartości maksymalnych przedstawiono na rys. 7.



Rys. 8. Przebiegi czasowe naprężeń w wirniku w czasie rozruchu po 36 godz postoju, nagrzewanie 2 razy szybsze od zalecanego w instrukcji, przekrój a-a (rys. 2)

Początkowa temperatura pary była zbliżona do początkowej temperatury powierzchni zewnętrznej wirnika. Z tego względu naprężenia w początkowym okresie nagrzewania nie wykazują gwałtownego maksimum.

Na rys. 8 i 9 pokazano przebiegi naprężeń jeżeli nagrzewanie jest prowadzone dwa i cztery razy szybciej od zalecanego w instrukcji rozruchu. Charakter poszczególnych przebiegów jest podobny do poprzednio opisanego. Wartości naprężeń są większe i rosną wraz z wzrostem prędkości nagrzewania.



Rys. 9. Przebiegi czasowe naprężeń w czasie rozruchu po 36 godz postoju, nagrzewanie 4 razy szybsze od zalecanego w instrukcji, przekrój a-a (rys.2).

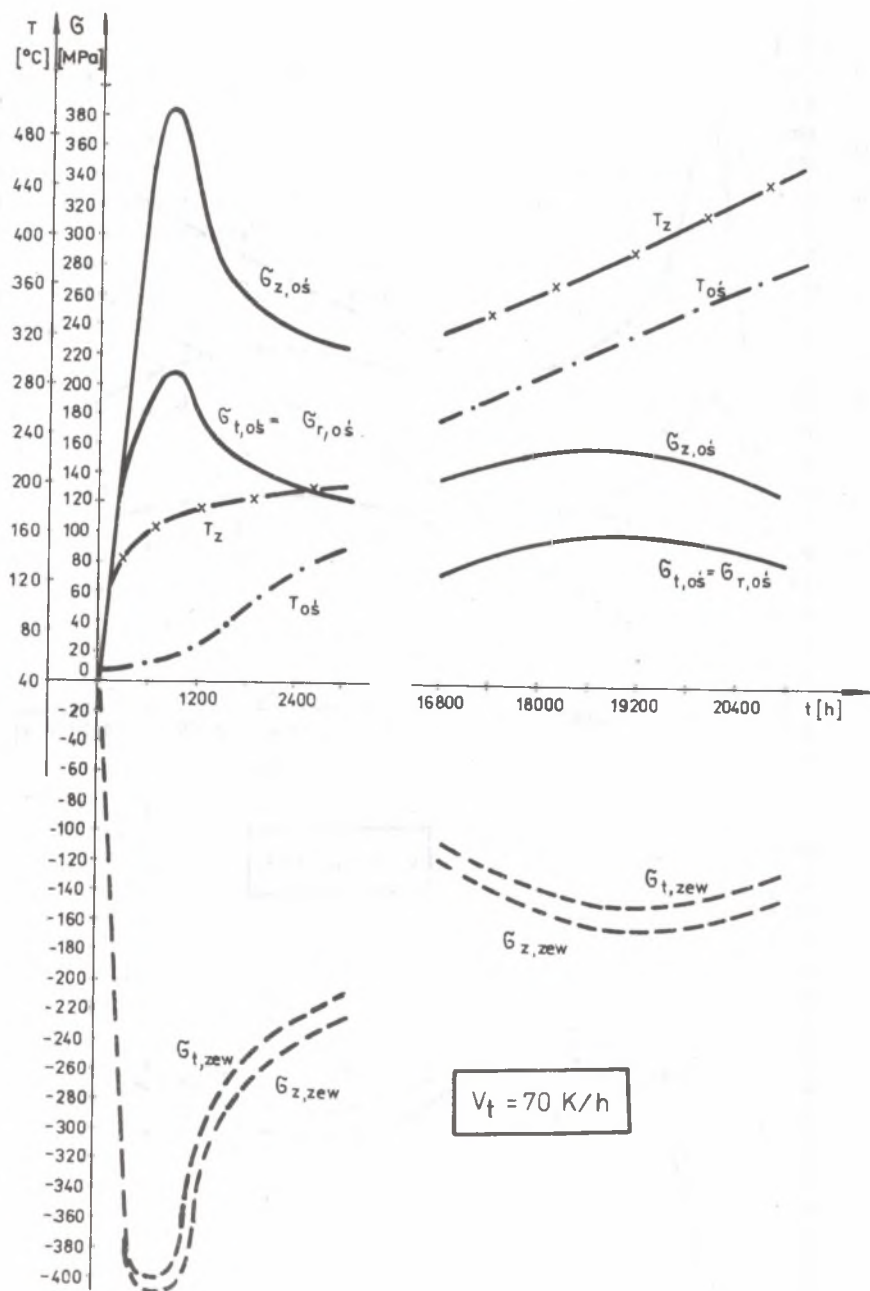
We wszystkich omawianych przypadkach naprężenia nie przekraczają granicy plastyczności, tzn. materiał odkształca się tylko sprężysto.

5. Naprężenia w wirniku w czasie rozruchu ze stanu zimnego

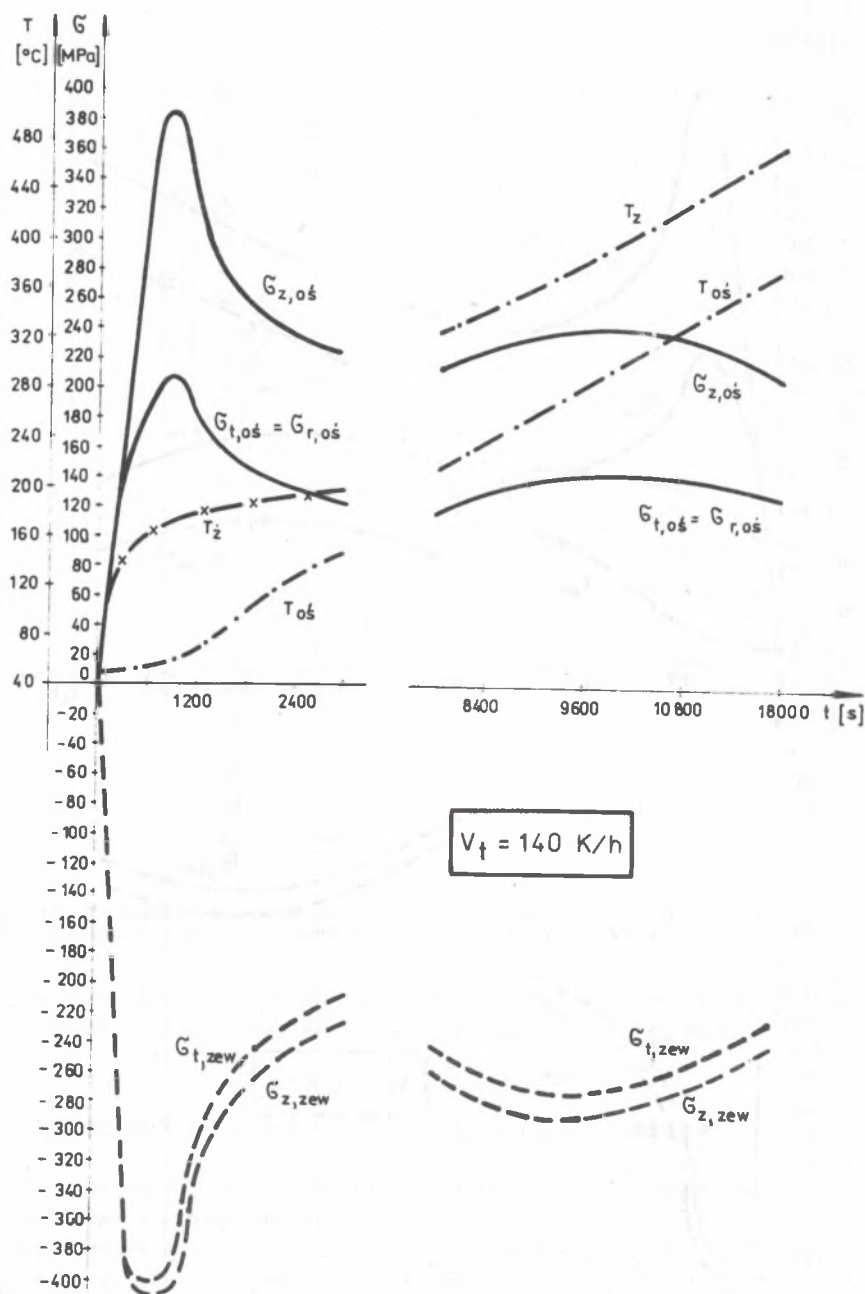
Naprężenia obliczono dla następujących warunków nagrzewania:

- nagrzewanie prowadzone wg instrukcji rozruchu,
- nagrzewanie 2 razy szybsze od zalecanego w instrukcji.

W pierwszym przypadku średnia prędkość nagrzewania była równa 70 K/h, w drugim 140 K/h.



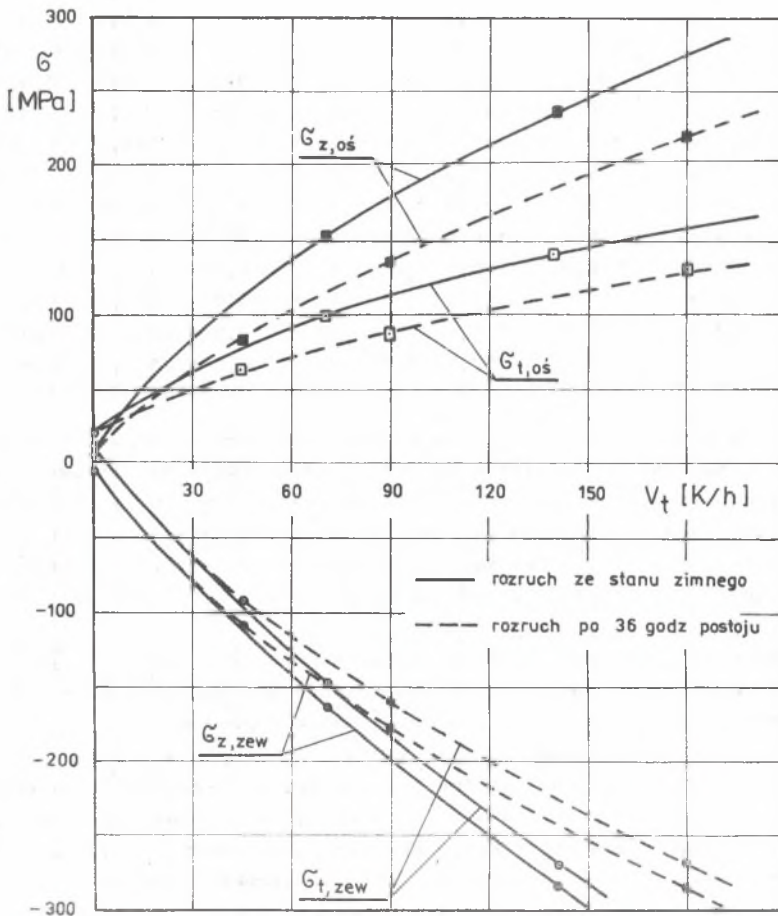
Rys. 10. Przebiegi czasowe naprężeń w czasie rozruchu ze stanu zimnego, nagrzewanie prowadzone według instrukcji



Rys. 11. Przebiegi czasowe naprężeń w czasie rozruchu ze stanu zimnego, nagrzewanie 2 razy szybsze od zalecanego w instrukcji

W oparciu o otrzymane wyniki obliczeń nakreślono przebiegi czasowe naprężeń na powierzchni zewnętrznej i w osi wirnika (rys. 10 i 11). Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że niebezpieczne naprężenia pojawiają się w wirniku w początkowym okresie nagrzewania. Maksymalne naprężenia na powierzchni zewnętrznej wirnika, obliczone za pomocą przedstawionej metody bez uwzględnienia wytoczeń są równe: $\sigma_t = 438$ MPa i $\sigma_z = 447$ MPa. Naprężenia te powstają na skutek dużej różnicy pomiędzy początkową temperaturą pary i początkową wirnika. Po krótkim okresie początkowym naprężenia maleją. Po synchronizacji maszyny naprężenia ponownie wzrastają.

Drugie maksimum naprężeń występuje w czasie, gdy parametry pary osiągną stan ustalony. Wartość drugiego maksimum naprężeń zależy od prędkości nagrzewania wirnika (rys. 10 i 11).



Rys. 12. Zależność naprężeń maksymalnych od prędkości nagrzewania

Tablica 2

Naprężenia w wirniku w czasie rozruchu ze stanu zimnego
($t = 900 \text{ s}$)

Lp.	r	Naprężenia sprężyste			Naprężenia sprężysto-plastyczne		
		σ_r	σ_t	σ_z	σ_r	σ_t	σ_z
		m	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
1	0	208,3	208,3	385,5	216,4	216,4	382,6
2	0,0166	199,4	177,7	345,5	207,5	185,8	342,7
3	0,0332	185,8	158,2	312,3	193,9	166,3	309,5
4	0,0498	174,1	136,7	279,2	182,3	144,8	276,4
5	0,0664	162,6	114,9	246,2	170,7	123,0	243,4
6	0,0830	151,6	98,8	219,8	159,7	106,9	217,1
7	0,0996	141,2	82,0	193,4	149,3	90,1	190,7
8	0,1167	130,9	64,7	161,1	139,0	72,8	164,4
9	0,1328	120,7	40,9	134,4	128,8	49,0	131,8
10	0,1494	109,8	17,7	101,8	117,9	25,8	99,2
11	0,1660	98,0	-17,2	56,8	106,1	-9,1	54,2
12	0,1826	84,6	-62,9	-0,3	92,7	-54,9	-2,8
13	0,1992	69,0	-124,5	-75,2	77,1	-116,5	-77,7
14	0,2158	50,2	-200,3	-167,1	58,3	-192,3	-169,4
15	0,2324	27,6	-306,1	-292,1	35,7	-298,2	-294,2
16	0,2402	14,5	-370,5	-367,5	20,7	-356,1	-360,7
17	0,2500	0,0	-437,9	-447,0	0,0	-397,3	-406,6

W świetle podanych faktów proces nagrzewania wirnika z punktu widzenia stanu naprężenia można podzielić na dwie fazy. W fazie początkowej o wartości naprężeń decyduje początkowo różnica temperatury pary i wirnika. W drugiej fazie proces nagrzewania jest bardziej równomierny i prowadzony z prawie stałą prędkością. Stan termowyttrzymałościowy wirnika zbliżony jest do stanu quasi-ustalonego. Wartość naprężeń zależy od prędkości nagrzewania (rys. 12).

Z porównania przebiegów naprężeń pokazanych na rys. 10 i 11 wynika, że skrócenia czasu nagrzewania nie zmienia pierwszego maksimum naprężeń. Rośnie natomiast wartość naprężeń w drugiej fazie nagrzewania.

Z analizy stanu cieplnego wirnika wynika, że w pierwszym okresie nagrzewania występuje większa różnica temperatury w kierunku promieniowym a znacznie mniejsza w kierunku osi. Później sytuacja ulega odwróceniu. Wynika stąd wniosek, że w początkowym okresie nagrzewania strumień ciepła wnikaający do wału i przewodzony przez wał ma kierunek promieniowy a następnie osiowy. Wniosek ten częściowo uzasadnia często przyjmowany uproszczony, jednowymiarowy model cieplny wirnika.

W czasie rozruchu ze stanu zimnego w pierwszej fazie nagrzewania naprężenia przekraczają granicę plastyczności i materiał odkształca się plastycznie. Odkształcenia plastyczne powstają na powierzchni zewnętrznej wirnika.

Odkształcenia plastyczne wzrastają i osiągają maksymalną wartość dla czasu nagrzewania $t = 900$ s. W tym czasie naprężenia również osiągają największą wartość i następnie rozpoczyna się proces odciążania.

W tablicy 2 porównano rozkład naprężeń sprężystych i sprężysto-plastycznych. Z podanych rezultatów wynika, że w obszarze odkształceń plastycznych (w pobliżu powierzchni zewnętrznej) naprężenia zmniejszają się o około 10%. W pozostałym obszarze zmiana naprężeń jest znacznie mniejsza.

6. Uwagi końcowe

Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika szereg wniosków ogólnych i szczegółowych, które częściowo podawano już przy omawianiu uzyskanych rezultatów (punkty 4 i 5).

Podsumowaniem wykonanych badań jest rys. 12, ilustrujący zależność maksymalnych naprężeń od prędkości nagrzewania dla dwóch charakterystycznych, początkowych stanów termicznych turbiny. Są to: rozruch ze stanu zimnego i rozruch po 36 godz postoju.

Wartości podane na rys. 12 dla rozruchu po 36 godz postoju, dotyczą drugiego maksimum występującego na przebiegach pokazanych na rys. 10 i 11. Pierwsze maksimum naprężeń, występujące w początkowym okresie nagrzewania nie zależy od prędkości v_t a jedynie od temperatur T_0 i T_{po} (rys. 1c).

Analiza wyników przedstawionych na rys. 12 wskazuje, że zależność naprężeń od prędkości nagrzewania nie jest liniowa. Występuje więc tutaj różnica w stosunku do często stosowanego opisu quasi-ustalonego (zob. np. [4] i [5]). Oprócz tego naprężenia zależą istotnie od początkowego stanu termicznego turbiny. Dla rozruchu ze stanu zimnego naprężenia są wyższe w stosunku do rozruchu ze stanu ciepłego. W klasycznym już ujęciu quasi-ustalonym naprężenia nie zależą od stanu początkowego.

Uszczelnienie labiryntowe między częścią wysokoprężną i wysokotemperaturową zostało zaprojektowane tak, że w czasie rozruchu nie doprowadza się pary uszczelniającej, tzn. wirnik nie jest omywany parą dodatkową.

W związku z powyższym w okresie rozruchu wirnik nie jest chłodzony i nie występują charakterystyczne dla innych rozwiązań wirnika naprężenia rozciągające. Ma to istotny wpływ na żywotność wirnika.

LITERATURA

- [1] Kosman G.: Doskonalenie opisu stanów przejściowych turbin ciepłych, etap I, problem PR-8, Gliwice 1982.
- [2] Instrukcja eksploatacji turbiny 130 MW wraz z urządzeniami pomocniczymi, 1975.
- [3] Kosman G., Dobkiewicz A.: Algorytm i program obliczeń naprężeń w wirniku z uwzględnieniem wstępnych odkształceń trwałych, Gliwice 1981.
- [4] Pich R.: Die Berechnung der elastischen, instationären Wärmespannungen in Platten, Hohlzylindern und Hohlkugeln mit quasistationären Temperaturfeldern, VGB - Mitteilungen H. 87/1963 i H. 88/1964.
- [5] Ulrich E.: Berechnung und graphische Ermittlung der zulässigen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten von Hohlzylindern unter Innendruck bei quasistationären Temperaturfeld in der Wand, BWK nr 1, 1966.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Roszkowski

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТУРБИНЫ
И СКОРОСТИ НАГРЕВАНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ В РОТОРЕ

Р е з ю м е

В работе проведено анализ напряжений в роторе во время запуска турбины. Определены напряжения для различных начальных состояний турбины и различных скоростей нагревания. Анализ проведен исходя из характеристик запуска данных в инструкции по эксплуатации.

THE EFFECT OF THE INITIAL THERMAL STATE OF TURBINE
AND THE SPEED OF HEATING UPON THE STRESSES IN ROTOR

S u m m a r y

The straight state of a rotor during a turbine starting is analyzed. Stresses for different initial thermal states and different velocities of heating are found. Starting characteristics given in exploitation instructions are essential.