

WOJCIECH KOSMAN*

Politechnika Śląska
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Gliwice

Analiza obciążeń cieplnych podczas rozruchu nadkrytycznych turbin parowych z chłodzeniem zewnętrznym

Rozruch turbiny parowej wiąże się ze wzrostem obciążeń cieplnych, tym większym, im wyższa jest temperatura czynnika roboczego. Wysokie temperatury wymusiły zastosowanie w turbinach systemów chłodzenia, których zadaniem jest niedopuszczenie do nadmiernego nagrzewania elementów maszyny. Rozpatrywane jest zagadnienie działania systemu chłodzenia podczas rozruchu. Wprowadzenie dodatkowego strumienia zmienia warunki wymiany ciepła na powierzchni chłodzonych elementów i prowadzi do uzyskania pola temperatury innego, niż w turbinie bez chłodzenia. W pracy przedstawiono wyniki badań umożliwiające ocenę stanu cieplnego i wytrzymałościowego głównych elementów turbiny.

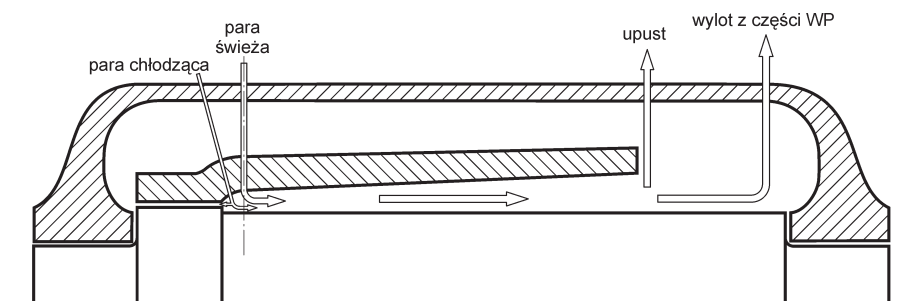
1 Wprowadzenie

Rozwój turbin parowych i związany z nim wzrost temperatury pary świeżej wymusił zastosowanie rozwiązań stosowanych dotychczas w turbinach gazowych [1]. Rozwiązania te są ukierunkowane na ochronę głównych elementów turbin przed nadmiernym nagrzewaniem [2]. Możliwe rozwiązania konstrukcyjne obejmują ekrany oddzielające powierzchnie głównych elementów od gorącego strumienia pary, osłony wykonane z materiałów o podwyższonej odporności cieplnej [3] i systemy chłodzenia strumieniem dostarczonym z zewnątrz turbiny. Czynnikiem chłodzącym jest para o temperaturze niższej, od temperatury pary świeżej. Chłodzący strumień pary jest pobierany spomiędzy stopni przegrzewacza w kotle parowym i kierowany do przedniej części turbiny, gdzie panuje najwyższa temperatura.

*E-mail: wojciech.kosman@polsl.pl

Schemat wysokoprężnej części nadkrytycznej turbiny parowej z systemem chłodzenia pokazano na rys. 1. Dla uproszczenia na schemacie pokazano jedynie główne elementy turbiny, tj. wirnik oraz kadłub zewnętrzny i wewnętrzny.

Wprowadzenie do turbiny strumienia dodatkowego pozwala na sterowanie w pewnym zakresie stanem cieplnym elementów maszyny [4]. Zmiana ilości dostarczanej pary, a także jej temperatury wpływa na warunki wymiany ciepła na powierzchni elementów i w rezultacie na rozkład temperatury w samych elementach. Stosowanie chłodzenia w ustalonych warunkach eksploatacji generalnie prowadzi do obniżenia temperatury elementów i polepszenia pełzaniowych warunków pracy. Jednakże system chłodzenia funkcjonuje także w stanach nieustalonych, a jego praca w warunkach przejściowych jest stosunkowo słabo rozpoznana.



Rysunek 1. Wysokoprężna część turbiny nadkrytycznej z dodatkowymi przepływami pary

Głównym celem badań była ocena wpływu chłodzenia na główne elementy turbiny nadkrytycznej podczas rozruchu. Proces rozruchu stanowi naturalny okres eksploatacji maszyn, zaś w trakcie jego przebiegu elementy są narażone na największą amplitudę naprężeń, stąd potrzeba oceny możliwości zmniejszenia naprężenia poprzez wykorzystanie dodatkowych strumieni pary.

2 Zakres analizy

Przeprowadzane badania miały na celu określenie wpływu chłodzenia na stan cieplny i wytrzymałościowy głównych elementów turbiny podczas rozruchu. Temperatura i naprężenia w elementach zależą od szeregu czynników, spośród których należy wymienić przede wszystkim:

- parametry pary świeżej i wtórnej (temperatura, ciśnienie),
- parametry pary chłodzącej (temperatura, ciśnienie jest dostosowane do ciśnienia pary świeżej),

- ilość pary chłodzącej i zakres chłodzenia,
- temperaturę i ilość dodatkowej pary w przestrzeni międzykadłubowej,
- geometrię elementów turbiny,
- sposób prowadzenia rozruchu.

Temperaturę i ciśnienie pary świeżej przyjęto na stałym poziomie 650 °C i 30 MPa, który odpowiada rozwijanemu obecnie segmentowi turbin parowych. Rozpatrywany problem sprowadza się zatem do określenia wpływu pozostałych czynników z przedstawionej powyżej listy na stan cieplno-wytrzymałościowy turbiny. Założono, że analiza powinna pokrywać możliwie szeroki zakres zmian.

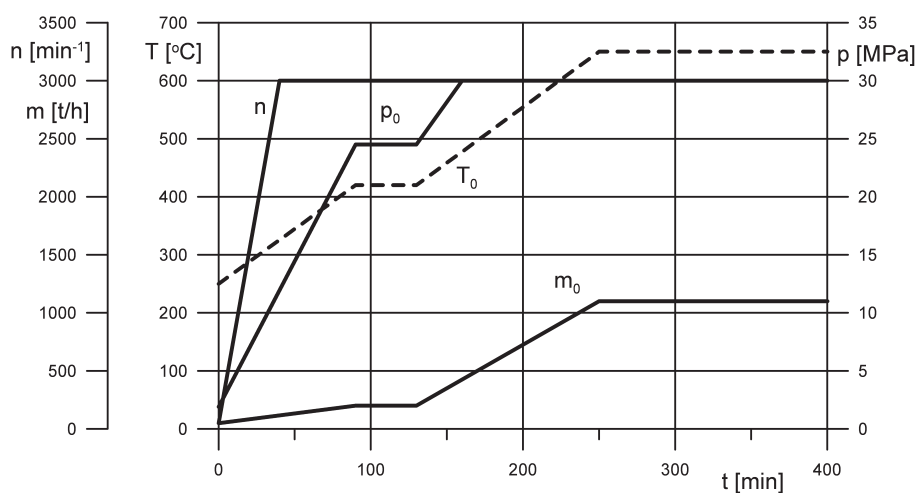
Rozpatrywano wysokopiętną część turbiny z reakcyjnym układem przepływowym i jednym nieregulowanym upustem pary. Oprócz pary świeżej do turbiny wpływają jeszcze dwa strumienie: para chłodząca przednią część turbiny i para do przestrzeni międzykadłubowej. W przedniej części turbiny, to jest w obszarze wlotu pary świeżej, panuje najwyższa temperatura – stąd konieczność zastosowania systemu chłodzenia. Założono, że system chłodzenia przeznaczony jest przede wszystkim do obniżenia temperatury metalu wirnika, a kadłub wewnętrzny jest chłodzony wyłącznie w obszarze wlotu pary świeżej.

Ocenę wpływu chłodzenia przeprowadzono w oparciu o wielowariantowe numeryczne symulacje rozruchu turbiny w różnych warunkach chłodzenia. Dla każdego wariantu prowadzenia rozruchu przeprowadzono pełną analizę cieplno-wytrzymałościową (wyznaczono nieustalony rozkład temperatury i naprężenia) obejmującą trzy główne elementy turbiny: kadłub wewnętrzny i zewnętrzny oraz wirnik. Ponadto wyznaczano przebiegi wydłużeń względnych, które pozwalają ocenić bezpieczeństwo procesu rozruchowego [5].

Rozpatrywano następujące warianty chłodzenia:

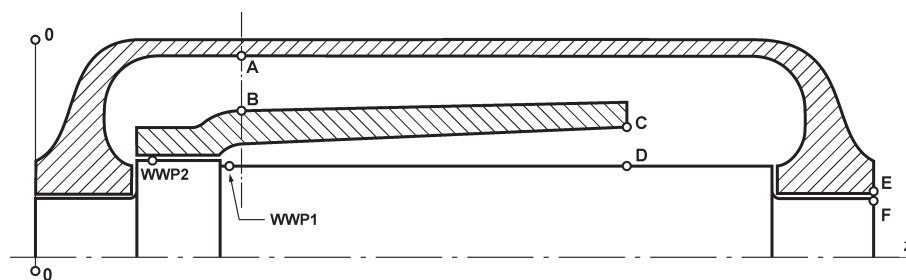
- wariant 1 – chłodzenie obejmujące wyłącznie odcinek wirnika przy wlocie pary świeżej,
- wariant 2 – chłodzenie obejmujące odcinek wirnika przy wlocie pary świeżej i pierwszy stopień turbiny,
- wariant 3 – chłodzenie obejmujące odcinek wirnika przy wlocie pary świeżej i pierwsze dwa stopnie turbiny.

Pracę systemu chłodzenia wyznaczono dla różnych wartości temperatury pary chłodzącej, przy czym ustalono zakres zmian tej temperatury w granicach 450–550 °C dla stanu nominalnego. Przyjęto, że w stanach nieustalonych temperatura pary chłodzącej jest proporcjonalna do temperatury pary świeżej. Proces



Rysunek 2. Charakterystyka rozruchowa turbiny nadkrytycznej: p_0 – ciśnienie pary świeżej, T_0 – temperatura pary świeżej, m_0 – strumień masy pary świeżej, n – prędkość obrotowa wirnika

rozruchowy prowadzono zgodnie z charakterystyką pokazaną na rys. 2. Wykres przedstawia przebiegi czasowe głównych wielkości opisujących pracę turbiny. Wstępne obliczenia pozwoliły stwierdzić, że dla rozpatrywanego wirnika koncentracja naprężeń występuje w miejscach oznaczonych na rys. 3. jako WWP1 i WWP2. Przedstawione w dalszej części prace przebiegi naprężenia dotyczą tych właśnie charakterystycznych punktów.



Rysunek 3. Oznaczenia charakterystycznych punktów elementów turbiny na przekroju: WWP1, WWP2 – punkty maksymalnej koncentracji naprężenia

Wspomniane wcześniej wydłużenia względne (Δw) są obliczane na podstawie przemieszczeń osiowych charakterystycznych punktów wirnika i kadłubów (patrz

rys. 3.) zgodnie z formułami:

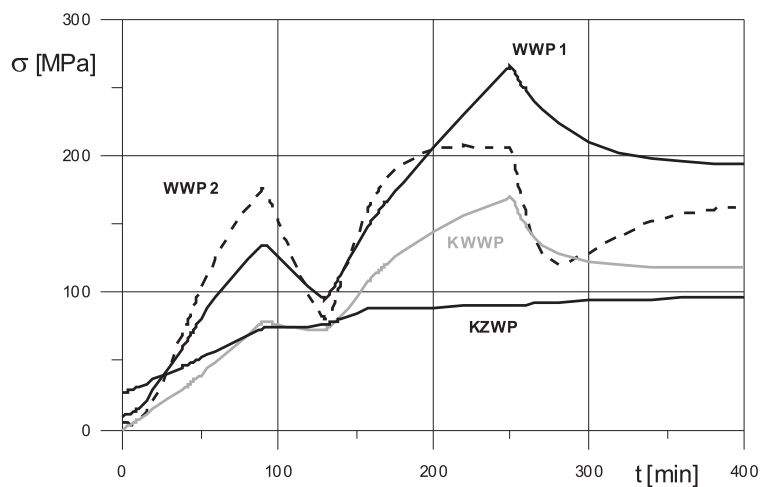
$$\Delta w_{WWP-KZWP} = z_F - z_E , \quad (1)$$

$$\Delta w_{WWP-KWWP} = z_D - (z_C + z_A) , \quad (2)$$

gdzie: WWP – wirnik wysokoprężnej części turbiny, $KWWP$ – kadłub wysokoprężnej części turbiny, Δw – wydłużenie względne, z_i – przemieszczenie punktu i ($i = A, B, C$ itd. wg rys. 3).

3 Rozruch referencyjny

W celu porównania różnych warunków prowadzenia rozruchu jako stan odniesienia przyjęto rozruch bez dodatkowych strumieni pary. Na rys. 4. przedstawiono przebiegi czasowe naprężenia zredukowanego σ w głównych elementach wysokoprężnej części turbiny dla rozruchu prowadzonego zgodnie z charakterystyką z rys. 2.

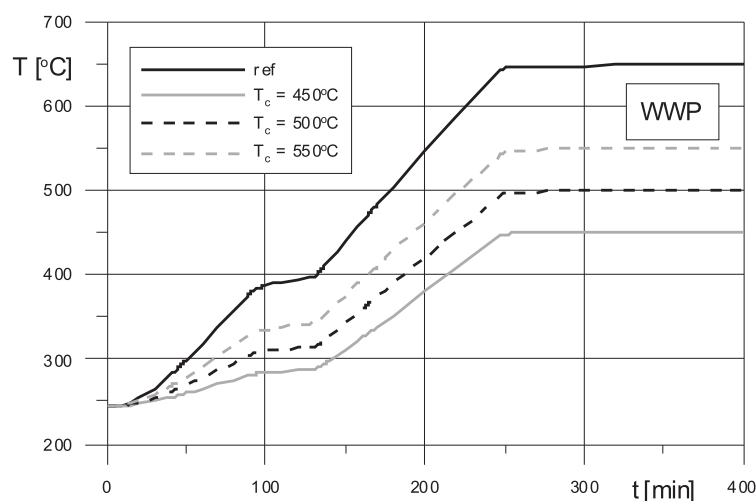


Rysunek 4. Przebiegi naprężeń zredukowanych w głównych elementach turbiny podczas rozruchu

Przedstawione przebiegi odnoszą się do punktów, w których panowało najwyższe napięcie w elementach podczas całego rozruchu. Dla wirnika przedstawiono dwa przebiegi dla punktów WWP1 i WWP2.

4 Rozruch z chłodzeniem

Zastosowanie systemu chłodzenia zmienia przede wszystkim maksymalną temperaturę elementów turbiny. Obrazuje to chociażby wykres zbiorczy na rys. 5. Na wykresie zebrano przebiegi czasowe temperatury w tym punkcie wirnika, w którym po zakończeniu rozruchu panuje najwyższa temperatura. Poszczególne charakterystyki odpowiadają różnej temperaturze pary chłodzącej (T_c).

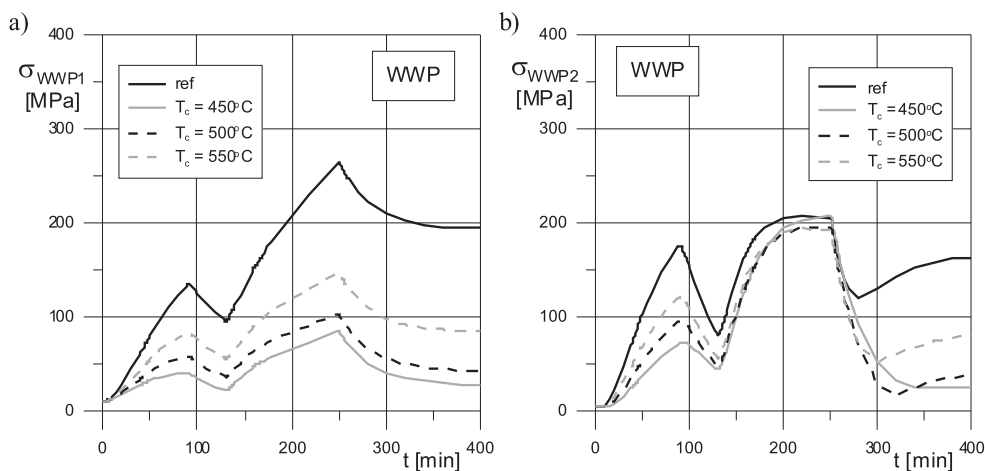


Rysunek 5. Porównanie przebiegów (ref) temperatury wirnika dla rozruchu referencyjnego i rozruchów z chłodzeniem T_c

Wyraźnie zauważalna jest zmiana prędkości nagrzewania elementów (różne nachylenie linii z rys. 5). Mniejsze prędkości nagrzewania oznaczają w danym przypadku rozruchu większy zapas bezpieczeństwa jeśli uwzględnić kryterium dopuszczalnych prędkości nagrzewania metalu.

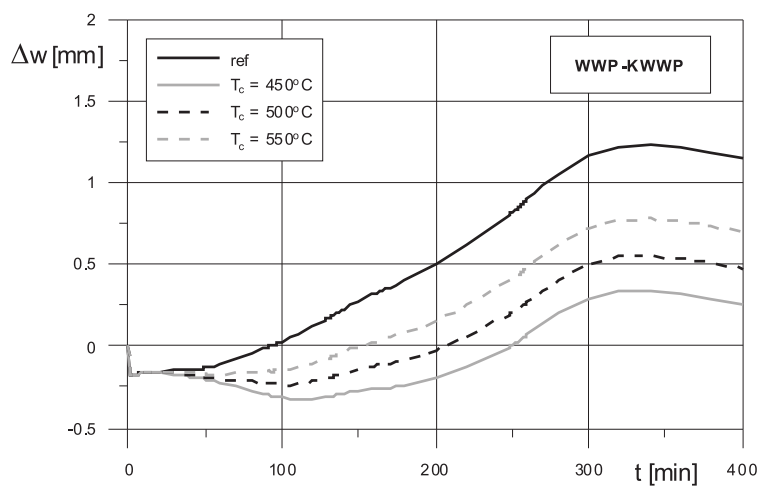
Zastosowanie chłodzenia obniża maksymalne naprężenia w turbinie. Odpowiednie przebiegi naprężeń zestawiono na rys. 6. Zebrane wykresy przedstawiają przebiegi naprężeń odpowiednio w punktach WWP1 (rys. 6a) i WWP2 (rys. 6b). Maksymalne naprężenia w punkcie WWP1 spadają wraz ze zmniejszeniem temperatury pary chłodzącej. Inaczej zachowują się jednak przebiegi naprężeń w punkcie WWP2. Tutaj spadek naprężeń jest niewielki dla temperatury pary chłodzącej 550 °C, zaś przy dalszym zmniejszeniu tej temperatury naprężenia w punkcie WWP2 zaczynają rosnąć. Wciąż jednak pozostają wyraźnie niższe od maksymalnego naprężenia w punkcie WWP1 przy rozruchu bez chłodzenia.

Na rys. 7. porównano wydłużenia względne pomiędzy wirnikiem a kadłubem



Rysunek 6. Porównanie przebiegów naprężeń w wirniku dla rozruchu referencyjnego i rozruchów z chłodzeniem w punktach WWP1 (a) i WWP2 (b)

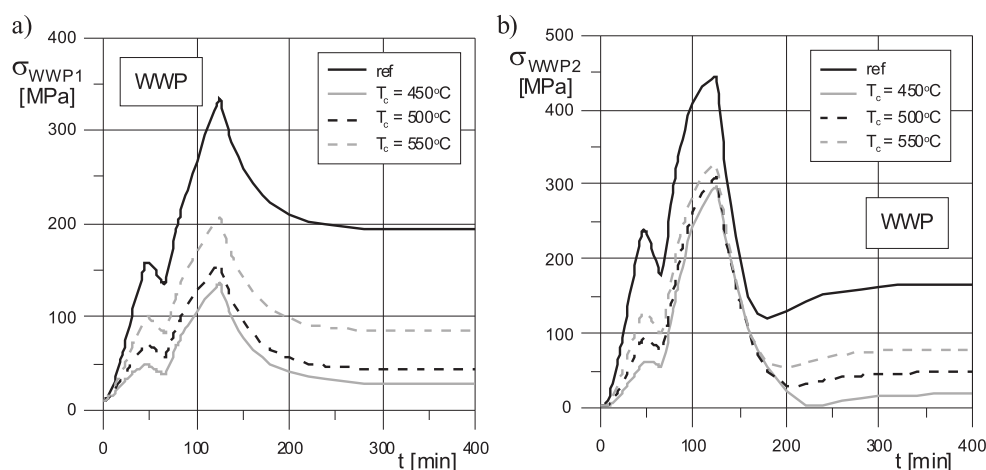
wewnętrzny. Z uzyskanych wyników symulacji wynika, iż bardziej intensywne chłodzenie, to znaczy przy niższej temperaturze pary chłodzącej, pozwala uzyskać mniejsze wydłużenia względne. Dla pary chłodzącej o temperaturze 450°C odchylenia przebiegu wydłużenia względnego od zera stanowią około 30% odchylenia dla rozruchu referencyjnego.



Rysunek 7. Przebiegi czasowe wydłużenia względnego wirnik – kadłub wewnętrzny dla różnych warunków rozruchu

5 Rozruch przyspieszony

Istotną cechą ze względu na elastyczność eksploatacyjną bloku energetycznego jest możliwość skrócenia czasu rozruchu turbiny. W ramach prowadzonych badań wykonano szereg symulacji rozruchu przyspieszonego. Założono przy tym, że w stosunku do charakterystyki pokazanej na rys. 2. rozruch jest dwukrotnie przyspieszony. Wyniki analizy rozruchu przyspieszonego pokazano na rys. 8. Przebiegi



Rysunek 8. Porównanie przebiegów naprężeń w wirniku dla rozruchu przyspieszonego w punktach WWP1 (a) i WWP2 (b)

czasowe zmiany naprężeń w wirniku porównano z rozruchem przyspieszonym, ale bez chłodzenia (oznaczenie „ref”). Zastosowanie chłodzenia pozwala obniżyć naprężenia w obydwu charakterystycznych punktach wirnika. Oczywiście poziom naprężeń w przypadku rozruchów przyspieszonych jest wyższy, niż dla rozruchów prowadzonych zgodnie z oryginalną charakterystyką.

6 Podsumowanie

Wyniki badań wskazują, że stosowanie układów chłodzenia w turbinach parowych przynosi efekty nie tylko w stanach ustalonych, ale także podczas rozruchów. Dodatkowy strumień pary przyczynia się do obniżenia poziomu temperatury i naprężenia w elementach turbiny. Korzystnym zmianom podlegają także wydłużenia względne.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawione wyniki obliczeń zostały uzyskane

dla rozruchu prowadzonego według narzuconej charakterystyki. W rzeczywistości wahania parametrów pary świeżej mogą znacznie odbiegać od idealnych linii charakterystyki, a to pociąga za sobą zwiększenie naprężeń. W takiej sytuacji obniżenie naprężenia na skutek działania systemu chłodzenia będzie jeszcze bardziej widoczne.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: *Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.*

Praca wpłynęła do redakcji we wrześniu 2012 r.

Literatura

- [1] Cziesla F., Bewerunge J., Senzel A., Luenen B.: *State-of-the-Art Ultra Supercritical Steam Power Plant under Construction*. PowerGen Europe 2009.
- [2] Kosman W. *Thermal analysis of cooled supercritical steam turbine components*. Energy **35**(2010), 2.
- [3] Tortorelli P.F., Brady M.P.: *Concepts for smart protective high-temperature coatings*. Proc. 21st. Ann. Conf., Oak Ridge National Laboratory, 2007.
- [4] Kosman W.: *The influence of the additional steam flows on thermal loads in components of supercritical steam turbines*. P I Mech. Eng. A-J Pow. **225**(2011), 5.
- [5] Kosman W.: *Instrukcja obsługi oprogramowania do oceny rozkładu temperatury i naprężenia w elementach maszyn*. Gliwice 2009.

Analysis of thermal loads during start-up in supercritical steam turbines with external cooling

S u m m a r y

Start-up of a steam turbine incurs in high thermal loads. Their level is proportional to the level of the live steam temperature. High level of the temperature demands application of cooling systems to protect the turbine against overheating. The problem under the analysis here is focused on the operation of the cooling system during start-up. The presence of an additional steam flow changes the conditions of heat transfer at the surfaces of the components and causes the temperature field different from the one found in the uncooled turbine. The paper presents the research that aims to evaluate the thermal and strength state of the main components of a supercritical steam turbine.