

УДК 539.3

Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО, П.П. ГОНТАРОВСКИЙ, Ю.И. МАТЮХИН, Т.В. ПРОТАСОВА*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина***ОЦЕНКА ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ИСКРИВЛЕНИЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РОТОРОВ
ПРИ ОКРУЖНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ИХ СВОЙСТВ**

Оценена возможность появления прогрессирующего искривления высокотемпературного ротора среднего давления паровой турбины Т-250/300, работающей на стационарном режиме, из-за окружной неравномерности свойств ползучести материала. Показано, что при относительно невысокой неравномерности свойств в окружном направлении прогибы ротора за 300 тысяч часов могут достигать недопустимых размеров.

ротор, окружная неравномерность свойств, ползучесть, прогрессирующий прогиб

В турбоагрегатах, эксплуатирующихся, в основном, при температуре острого пара 565 °С, наблюдается так называемый прогрессирующий прогиб роторов [1]. Его появление нельзя объяснить большими термонапряжениями или механическими воздействиями, вызванными забросом воды или задеванием ротора о статорные элементы.

Время появления этого прогиба и скорость его нарастания в различных случаях существенно различны [1]. Одной из наиболее вероятных причин возникновения и увеличения искривления ротора объясняется в [2] окружной неравномерностью физико-механических свойств поковки. В Великобритании подобные искривления наблюдались только в одном из 200 исследуемых роторов, для которых оценивался остаточный ресурс после 100 тысяч часов эксплуатации [3]. При изготовлении этот ротор подвергался термообработке в горизонтальном положении, что и могло стать причиной неравномерности свойств в окружном направлении. Если у высококачественных роторов японских турбостроительных фирм неравномерность механических свойств металла, характеризующих упругопластическое деформирование, достигает 2 – 3%, то в отношении свойств ползучести эта неравномерность может быть существенно выше.

Предотвратить прогрессирующий прогиб роторов путем балансировки не представляется возможным [2], так как окружные напряжения, ответственные за процесс ползучести, более чем на порядок превышают напряжения, вызываемые балансировочными грузами. Для продления срока эксплуатации таких роторов было предложено снизить температуру острого пара до 540 °С или использовать систему принудительного охлаждения высокотемпературной части ротора [4].

Для численного моделирования роста прогиба роторов во времени под действием относительно высоких осесимметричных в начальный момент времени окружных напряжениях и окружной неравномерности физико-механических свойств использовано специальное математическое обеспечение, базирующееся на трехмерных расчетных схемах [5]. Ротор рассматривается в цилиндрической системе координат r, z, θ . Его меридиональное сечение разбивается на простейшие четырехугольные конечные элементы с полилинейной аппроксимацией перемещений. В окружном направлении решение представляется рядами Фурье. При окружной неравномерности свойств задача не распадается на ряд задач для отдельных гармоник. Математическое обеспечение позволяет моделировать стационарные и не-

стационарные неосесимметричные температурные поля и термонапряженное состояние с учетом деформаций пластичности и ползучести, а также анизотропии и зависимости свойств материала от температуры. Наряду с осесимметричными могут задаваться произвольные неосесимметричные граничные условия, внешние воздействия и свойства материала, как плавно, так и скачкообразно изменяющиеся в окружном направлении.

Возможность разбаланса ротора из-за окружной неравномерности свойств ползучести материала рассмотрим на примере высокотемпературного ротора среднего давления турбины Т-250/300 (РСД-1), который содержит 10 ступеней (с 13 по 22). Ротор вращается с частотой $314,16 \text{ с}^{-1}$ и испытывает воздействие центробежных сил инерции от лопаток и замковых соединений, которые при расчете учитываются путем задания эквивалентной поверхностной радиальной нагрузки, равномерно распределенной по ободу дисков на радиусе, равном 0,4355 м. Интенсивность этой нагрузки по ступеням распределялась следующим образом: 30,8; 31,4; 34,6; 36,1; 37,6; 39,2; 40,7; 46,6; 49,1; 51,7 МПа. Расчетная схема, кроме РСД-1, включала участок ротора высокого давления от фланцевого соединения до центра подшипника ($-0,55 < z(\text{м}) < 0$, рис. 1).

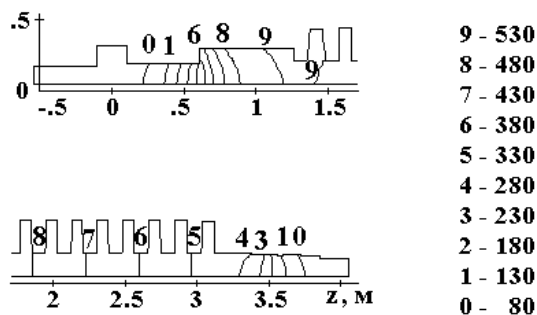


Рис. 1. Распределение изолиний температуры в меридиональном сечении ротора на стационарном режиме

Меридиональное сечение ротора было разбито на 1328 элементов. При решении задачи механики удерживалось четыре гармоники. Температурное

поле определялось из решения осесимметричной задачи теплопроводности с граничными условиями, соответствующими стационарному режиму работы турбины. Распределение линий равных уровней температуры в градусах Цельсия ($T \text{ } ^\circ\text{C}$) в меридиональном сечении ротора показано на рис. 1.

Физические и теплофизические свойства стали 25X1M1Ф (P2M) при некоторых значениях температуры приведены соответственно в табл. 1 и 2. Здесь E – модуль упругости; α – коэффициент линейного температурного расширения; λ – коэффициент теплопроводности; ρC – теплоемкость единицы объема. Плотность материала ρ и коэффициент Пуассона ν приняты независимыми от температуры и соответственно равными $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,3$.

Таблица 1
Физические свойства стали 25X1M1Ф (P2M)

T °C	20	400	500	525	550
$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,16	1,97	1,86	1,835	1,8
$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	10,6	11,8	12,6	12,7	12,8

Таблица 2
Теплофизические свойства стали 25X1M1Ф (P2M)

T °C	100	200	300	400	500	600
λ , Вт/(м·К)	40,6	39,5	38,8	37,7	35,9	33,7
$\rho C \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³	3,85	3,98	4,15	4,30	4,46	4,52

Ползучесть материала описывается теорией типа течения с анизотропным упрочнением [6].

Константы β , a , b , γ , входящие в уравнения ползучести при сложном напряженном состоянии,

$$\dot{\epsilon}_{11} = \mu_1 [2s'_{11} - s'_{22} - s'_{33}]; \quad \dot{\epsilon}_{13} = 3\mu_1 s'_{13};$$

$$\dot{\rho}'_{11} = \frac{2}{3} A(\sigma_i) \dot{\epsilon}_{11} - \mu_2 [2\rho'_{11} - \rho'_{22} - \rho'_{33}];$$

$$\dot{\rho}'_{13} = \frac{2}{3} A(\sigma_i) \dot{\epsilon}_{13} - 3\mu_2 \rho'_{13}; \quad (1 \leftrightarrow 3),$$

$$\text{где } \mu_1 = \frac{a}{2s_i} \exp(\gamma s_i) \exp(\beta T);$$

$$\mu_2 = \frac{b}{2\rho_i} \exp(\gamma \rho_i) \exp(\beta T);$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформаций ползучести;

s'_{ij}, ρ'_{ij} – девиаторы активных и добавочных напряжений, которые в сумме дают девиатор полных напряжений σ'_{ij} ($\sigma'_{ij} = s'_{ij} + \rho'_{ij}$);

σ_i, s_i, ρ_i – интенсивности полных, активных и добавочных напряжений, имели следующие значения: $\beta = 4,075 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $a = 7,035 \cdot 10^{-19} \text{ ч}^{-1}$; $b = 1,284 \cdot 10^{-14} \text{ МПа} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\gamma = 6,344 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$.

Функция $A(\sigma_i)$ задавалась таблично. При σ_i : 0, 40, 60, 80, 100, 140 МПа ее значения соответственно равнялись $A(\sigma) \cdot 10^{-4}$: 10; 8; 4,5; 3,3; 3; 4,95 МПа.

Для получения характеристик ползучести были совместно обработаны два семейства экспериментальных кривых простого последействия стали Р2М при температурах 525 и 500 °С (рис. 2, а, б).

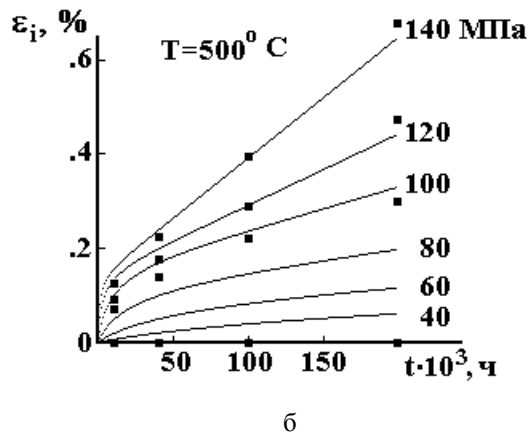
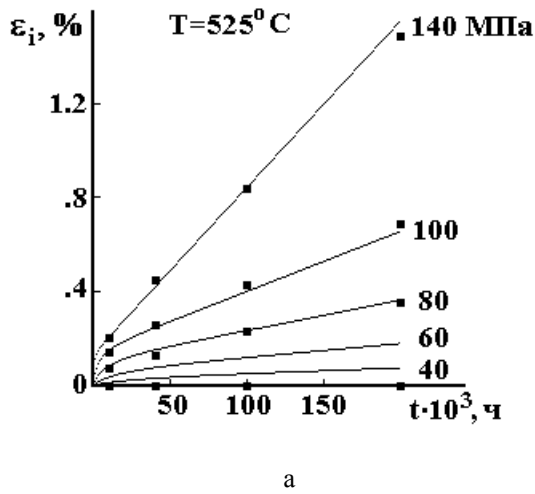


Рис. 2. Кривые простого последействия стали Р2М

На рисунке сплошными линиями показаны теоретические кривые простого последействия, квадра-

тиками обозначены опытные данные. Для напряжений, меньших чем 80 МПа при $T = 525 \text{ } ^\circ\text{C}$ и 100 МПа при $T = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$, экспериментальные данные по ползучести образцов из стали Р2М отсутствовали.

Были выполнены расчетные исследования кинетики напряженно-деформированного состояния ротора в течение 300 тысяч часов для двух вариантов окружной неравномерности свойств ползучести. Зависимость скорости ползучести от окружной координаты задавалась по формуле

$$\dot{\epsilon}_{ij}(\theta) = \dot{\epsilon}_{ij}(1 + k \cos \theta),$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформаций ползучести при отсутствии окружной неравномерности свойств.

В первом случае коэффициент k принимался равным 0,2, что соответствовало отношению максимальной скорости ползучести к минимальной $\dot{\epsilon}(0)/\dot{\epsilon}(\pi)$, равному 1,5. Во втором случае $k = 0,1$; $\dot{\epsilon}(0)/\dot{\epsilon}(\pi) = 1,22$.

Для интегрирования уравнений ползучести использовалась явная схема Эйлера. При этом шаг по времени выбирался автоматически, исходя из условия, что максимальное значение интенсивности приращений деформаций ползучести за шаг не должно превышать 20% от интенсивности упругих деформаций.

Расчеты показали, что наиболее интенсивно процесс ползучести протекает на поверхности расточки ротора в районе 13 ступени, где температура достигает 539 °С. Интенсивность напряжений за 300 тысяч часов при $k = 0,2$ здесь релаксирует с 135 МПа до 70 МПа (на 48%) при $\theta = 0$ и до 76,7 МПа (на 43%) при $\theta = \pi$ (рис. 3).

Основная доля падения σ_i приходится на первую тысячу часов работы (рис. 4). Процесс релаксации напряжений не заканчивается и при $t = 300$ тысяч часов, хотя и сильно замедляется. Графики роста интенсивности деформаций ползучести ϵ_i в контрольных точках практически подобны кривым простого последействия. К концу рассматриваемого

периода времени значения ε_i здесь отличаются всего лишь на 14%, хотя в начальный момент скорости ползучести отличались в 1,5 раза. Это связано с максимальным падением напряжений при $\theta = 0$, где ползучесть протекала наиболее интенсивно.

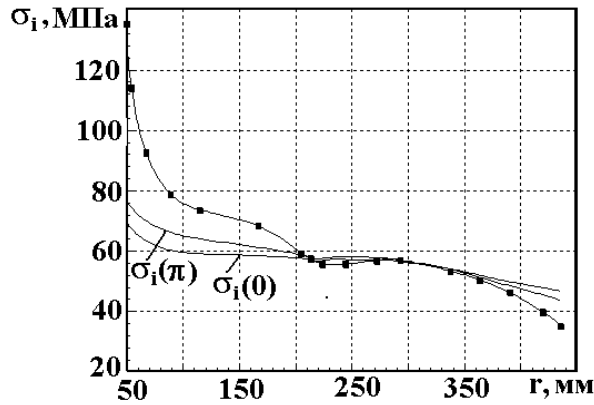


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений в срединной плоскости диска 13 ступени в начальный момент (кривая с точками) и после 300 тысяч часов

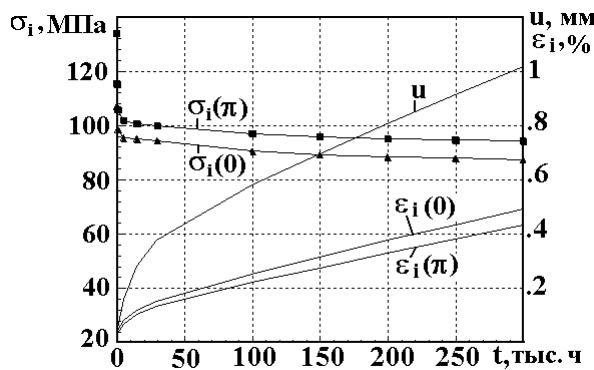


Рис. 4. Поведение во времени интенсивностей напряжений и деформаций, а также прогиба ротора в районе расточки 13 ступени

Основной вклад в значения интенсивностей напряжений и деформаций вносят растягивающие окружные компоненты, которые с течением времени перестают быть осесимметричными. Так как материал несжимаем, то осевые деформации ползучести ε_z являются сжимающими и наибольшими по модулю при $\theta = 0$, где ползучесть максимальна. Из-за разности $\varepsilon_z(0) - \varepsilon_z(\pi)$ ротор прогибается в сторону, противоположную той, где процесс ползучести наи-

более интенсивен. Следует отметить, что поперечное сечение не является строго кольцевым, а слегка деформируется.

Так как воздействию высокой температуры подвергнут относительно небольшой по длине участок ротора вблизи его середины (рис. 1), то он и ползет наиболее активно. Распределение интенсивности деформаций ползучести вдоль оси ротора вблизи расточки ($r = 54,3$ мм) для двух углов ($\theta = 0$ и $\theta = \pi$) показано на рис. 5. Несмотря на их относительно небольшое отличие и малую протяженность зоны вдоль оси ротора, где они значительны, прогрессирующее искривление ротора за 300 тыс. часов достигает более 1 мм (рис. 5). При этом существенная кривизна вала имеет место только в районе интенсивной ползучести, а на остальной части ротор смещается в основном как твердое тело.

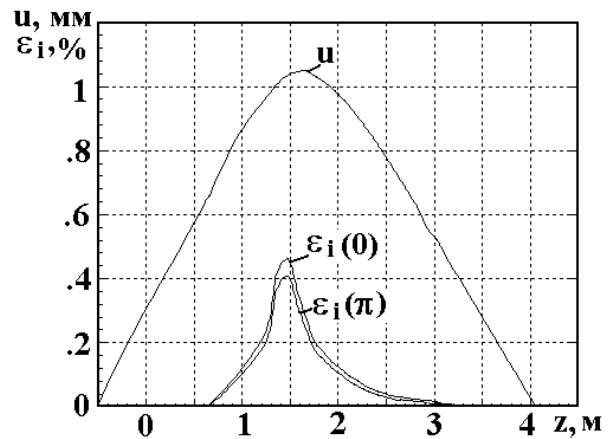


Рис. 5. Распределение интенсивности деформаций ползучести на радиусе 54,3 мм и радиального смещения оси ротора после 300 тысяч часов ($k = 0,2$)

Во втором варианте окружной неравномерности свойств ползучести ($k = 0,1$) интенсивность напряжений за 300 тысяч часов в районе расточки 13 ступени снизилась до 71 МПа при $\theta = 0$ и до 75 МПа при $\theta = \pi$. Распределение интенсивности деформаций вдоль оси ротора на радиусе 54,3 мм показано на рис. 6. Как видно, окружная неравномерность ε_i за 300 тысяч часов значительно меньше по сравнению с предыдущим расчетом ($k = 0,2$). Прогиб рото-

ра при этом уменьшился примерно в 2 раза, но и в этом случае, как показывают несложные расчеты, силы небаланса превышают вес ротора.

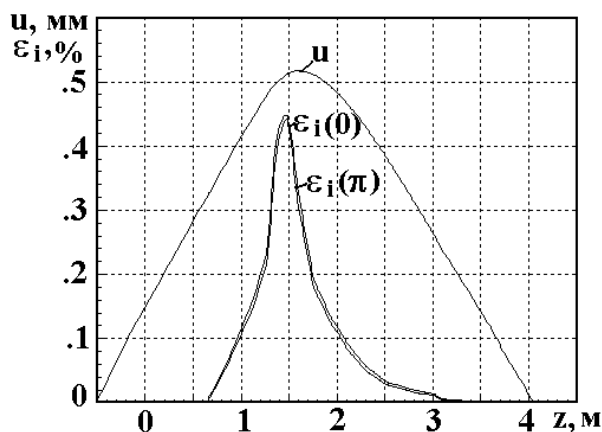


Рис. 6. Распределение интенсивности деформаций ползучести на радиусе 54,3 мм и радиального смещения оси ротора после 300 тыс. часов ($k = 0,1$)

Расчеты с другими значениями неоднородности свойств ползучести в окружном направлении показали, что стрела прогрессирующего изгиба ротора практически пропорциональна величине окружной неравномерности свойств ползучести k .

Движение искривленного ротора в лабиринтовых уплотнениях, где имеют место высокие коэффициенты теплообмена с рабочей средой, из-за переменности зазоров в окружном направлении, а, следовательно, и скоростей потоков, может стать причиной окружной неравномерности теплообмена при пусковых режимах. Это будет приводить к дополнительным искривлениям ротора при пусковых режимах, а следовательно, к большим вибрациям, пока не произойдет выравнивание температуры в окружном направлении на стационарном режиме.

Таким образом, исследования показали, что окружная неравномерность свойств ползучести может быть причиной прогрессирующего искривления высокотемпературных роторов паровых турбин.

При этом даже небольшая неравномерность может привести к недопустимо большим прогибам.

Литература

1. Ковалев И.А. Проблема прогибов роторов паровых турбин и пути ее решения / И.А. Ковалев, Л.А. Хоменюк, Д.В. Елькин // Теплоэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 64 – 67.
2. Розенблюм В.И. Приближенный анализ искривления вращающихся валов, обусловленного ползучестью // Сб. ЛГУ. – 1971. – № 8.
3. Болтон Дж. Опыт определения остаточного ресурса высокотемпературных роторов паровых турбин. Продление ресурса ТЭС. – М.: ВТИ, 1994. – В 2 т. – Т. 2. – С. 1 – 15.
4. Повышение технического уровня паровых турбин при внедрении систем принудительного парового охлаждения роторов / В.С. Шаргородский, Л.А. Хоменюк, С.Ш. Розенберг и др. // Электрические станции. – 1999. – № 1. – С. 30 – 36.
5. Шульженко Н.Г. Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Т.В. Протасова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2004. – № 20. – С. 151 – 160.
6. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций / А.Н.Подгорный, П.П. Гонтаровский П.П., Б.Н. Киркач, Ю.И. Матюхин, Г.Л. Хавин. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.

Поступила в редакцию 31.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.К. Морачковский, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.