

Влияние неравномерности механических свойств материала в окружном направлении на деформирование роторов энергетических агрегатов

Н. Г. Шульженко¹, П. П. Гонтаровский, Т. В. Протасова

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

¹ shulzh@ipmach.kharkov.ua

Рассматривается необратимая деформация роторов паровых турбин вследствие неравномерности механических свойств материала в окружном направлении на основе численного анализа их трехмерного напряженно-деформированного состояния. Показано, что такая неравномерность может быть одной из причин появления и развития прогрессирующего прогиба при ползучести длительно эксплуатирующихся высокотемпературных роторов, а также их искривления в случае превышения номинальной частоты вращения.

Ключевые слова: ротор паровой турбины, неравномерность механических свойств материала в окружном направлении, неосесимметричное деформирование, прогиб ротора, полуаналитический метод конечных элементов.

Введение. Вопросы обеспечения надежной эксплуатации турбомашин и предотвращения аварийных ситуаций являются актуальными в современной энергетике, особенно с учетом старения основного оборудования тепловых электростанций и отсутствия возможности его одновременного обновления. При этом надежность работы турбомашин во многом определяется состоянием роторов как наиболее термонагруженных элементов.

В ходе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и напряжений в роторах паровых турбин накапливаются повреждения, вызванные ползучестью и усталостью при изменении структуры и механических свойств материала. Это приводит к появлению остаточных деформаций или прогибов, в результате чего часто повышается уровень вибрации турбоагрегатов. В соответствии с общепринятыми рекомендациями для турбин с частотой вращения 3000 об/мин остаточный прогиб вала в любом его сечении не должен превышать 0,02–0,03 мм [1].

Результаты ремонтных обследований роторов турбин мощностью 200...800 МВт подтверждают возможность их прогрессирующего искривления [2–5]. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты обследований роторов среднего давления (РСД) и высокого давления (РВД). Видно, что прогибы роторов в некоторых случаях могут быть значительно выше допустимых значений $u_{\text{доп}}$.

В мировой практике известны случаи повреждения роторов вследствие необратимого прогиба вала при превышении частоты вращения. По причине угона ротора из-за несвоевременного срабатывания системы защиты агрегата произошли аварии на Ермаковской станции (1972 г.) [6], при разгонных испытаниях – на Омской ТЭЦ-2 (1995 г.), Барнаульской ТЭЦ-3 (1996 г.) и Назаровской ГРЭС (1996 г.), хотя срок эксплуатации машин был далек от исчерпания ресурса [7]. Это указывает на зарождение дефектов в предшествующий период эксплуатации и быстрое их развитие в случае превышения частоты вращения [8].

Основные причины появления остаточных прогибов роторов условно можно разделить на конструкционные, связанные с механическими свойствами материалов, и технологические, обусловленные нарушениями эксплуатационного характера. В соответствии с первой группой причин прогибы вызваны ползучестью или превышением в ряде случаев эксплуатационными напряжениями предела пропорциональ-

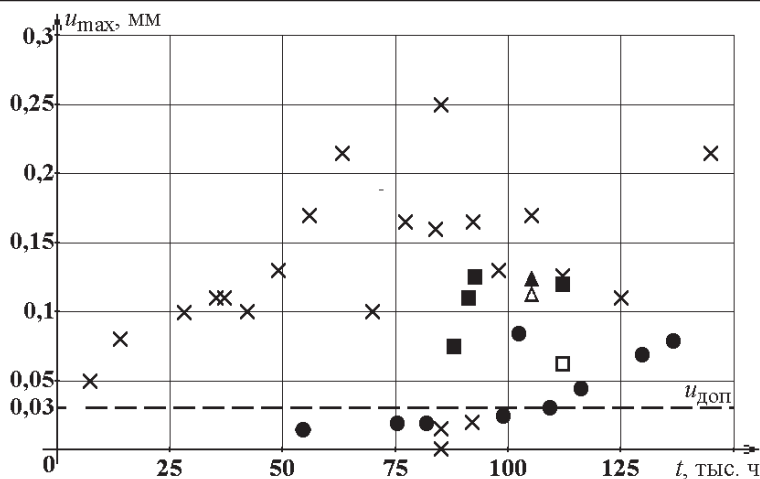


Рис. 1. Результаты обследования прогибов роторов паровых турбин при ремонтах: ● – РСД турбины Т-250/300-240 [2], × – то же турбины К-800-240-3 [2], ■, □ – соответственно РСД и РВД турбины К-210-130 [3], ▲, △ – то же турбины К-1200-240-3 [4].

ности. Это предположение основывается на существовании неравномерности физико-механических свойств поковки ротора [9], что проявляется в различных значениях условного предела текучести по сечению вала и приводит к прогибу ротора. С учетом вышеизложенного приобретают актуальность вопросы установления вклада отдельных факторов в деформирование роторов и возможности его снижения до допустимых значений.

Цель работы заключается в исследовании деформирования роторов турбин при неравномерности механических свойств материала в окружном направлении на основе использования трехмерных расчетных моделей, которое включает:

разработку методики и ее программную реализацию для определения термонапряженного и деформированного состояний элементов энергомашин при наличии пластичности и ползучести на основе трехмерной модели с использованием полуаналитического метода конечных элементов (ПМКЭ) с учетом анизотропии и зависимости свойств материала от температуры;

расчетную оценку влияния рассматриваемой неравномерности механических свойств материала на деформирование роторов турбомашин.

Методическое обеспечение решения задач. Для определения прогибов роторов с помощью трехмерной модели в цилиндрической системе координат с учетом неравномерности механических свойств материала разработана методика [10], основанная на совместном решении нестационарных задач теплопроводности и термомеханики. При решении задачи механики сплошной среды используется информация о температурном поле, которое учитывается при определении температурных деформаций и свойств материала, зависящих от температуры. Распределения температур и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) определяются на единой конечноэлементной сетке, что исключает возможные неточности аппроксимации температурного поля при вычислении температурных деформаций.

Ротор турбины моделируется с помощью цилиндрических элементов в виде неосесимметрично нагруженных или неоднородных тел вращения в цилиндрической системе координат (рис. 2,а). Учитываются упругие, температурные и пластические деформации, а также деформации ползучести. Поведение материала описывается соотношениями теории упругости, теории пластичности типа течения с изотропным упрочнением и теории ползучести с анизотропным упрочнением.

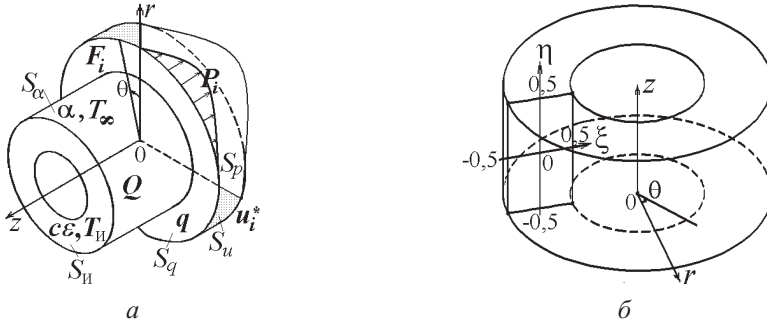


Рис. 2. Схема элемента конструкции (а) и конечный элемент в глобальной и местной системах координат (б).

Процедура решения начальной задачи сочетается с конечноэлементным решением краевой задачи на шаге по времени. На каждом шаге путем решения системы разрешающих уравнений определяются амплитудные значения приращения перемещений Δu_{iv}^k для всех гармоник в узлах конечных элементов (КЭ), затем – амплитудные значения приращения деформаций в узлах КЭ. Далее на основании закона Гука определяются амплитудные значения компонент приращения напряжений в узлах КЭ. При этом используются амплитудные значения компонент приращения остаточных деформаций из предыдущей итерации или предыдущего шага, с учетом которых формировались правые части систем уравнений. На первой итерации первого шага в приращения неупругих деформаций входят только температурные компоненты.

Краевая задача решается с использованием ПМКЭ. При этом меридиональное сечение конструкции разбивается на конечные элементы, а в окружном направлении решение описывается отрезком ряда Фурье. Последнее позволяет значительно сократить время выполнения расчетов по сравнению с решением трехмерной задачи на основе применения классического метода конечных элементов [11]. Выражения для температур и перемещений представляются в виде

$$T(\xi, \eta, \theta, t) = T_{ik}(t) \varphi_i(\xi, \eta) \varphi_k(\theta); \tag{1}$$

$$\Delta u_\nu(\xi, \eta, \theta, t) = \Delta u_{vik}(t) \varphi_i(\xi, \eta) \varphi_k(\theta); \tag{2}$$

$$\Delta u_\theta(\xi, \eta, \theta, t) = \Delta u_{\theta ik}(t) \varphi_i(\xi, \eta) \bar{\varphi}_k(\theta),$$

где T_{ik} , Δu_{vik} , $\Delta u_{\theta ik}$ – амплитудные значения распределения температур и приращения перемещений в узлах КЭ; $\varphi_i(\xi, \eta)$ – координатные функции КЭ; $\varphi_k(\theta)$, $\bar{\varphi}_k(\theta)$ – координатные функции в окружном направлении; $\nu = r, z$; $i = 1, 2, 3, 4$; $k = 0, \dots, n$; n – количество удерживаемых слагаемых ряда Фурье.

При решении задачи используется тороидальный КЭ с поперечным сечением в виде выпуклого косоугольного четырехугольника с узлами в вершинах (рис. 2,б). Координатные функции в окружном направлении представляются через тригонометрические функции:

$$\varphi_0(\theta) = \bar{\varphi}_0(\theta) = 1; \quad \varphi_k(\theta) = \begin{cases} \cos\left(\frac{k+1}{2}\theta\right), & k = 1, 3, 5, \dots \\ \sin\left(\frac{k}{2}\theta\right), & k = 2, 4, 6, \dots \end{cases}; \tag{3a}$$

$$\bar{\varphi}_k(\theta) = \begin{cases} \sin\left(\frac{k+1}{2}\theta\right), & k = 2, 4, 6, \dots \\ \cos\left(\frac{k}{2}\theta\right), & k = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (36)$$

Если модель рассматриваемой конструкции имеет одну или более меридиональных плоскостей симметрии, при разложении в ряды Фурье радиальных и осевых компонент решения, а также внешнего нагружения учитываются только члены ряда, содержащие косинусы, при разложении окружных компонент – только синусы.

На базе разработанной методики создано программное обеспечение для пошагового решения сформулированных задач. Вначале обрабатывается исходная информация, выполняются дискретизация на конечные элементы и предварительные вспомогательные вычисления, затем решается начально-краевая задача с визуализацией полученных результатов.

Формализация неравномерности механических свойств материала в окружном направлении. Условия изготовления роторов (или поковок) не позволяют обеспечить абсолютную равномерность их физико-механических свойств, допустимая неравномерность оговаривается техническими условиями. У высококачественных роторов японских турбостроительных фирм неравномерность свойств металла, характеризующих упругопластическое деформирование, достигает 2%, в отношении свойств ползучести эта неравномерность может быть выше. Согласно данным контрольно-приемочных испытаний периферии дисков первой ступени [12] максимальное расхождение между условными пределами текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ для двух диаметрально противоположных образцов достигает 20 МПа, в некоторых случаях – 30 МПа. Указанная неравномерность свойств материала с достаточной степенью приближения может быть распространена на весь объем поковки.

Изменение характеристик материала в окружном направлении, не теряя общности решения, можно представить двумя слагаемыми ряда Фурье. Они вычисляются по максимальному и минимальному значениям предела текучести, которые наблюдаются на диаметрально противоположных сторонах ротора. В соответствии с этим изменение пластических свойств материала в окружном направлении задается в виде

$$\sigma_i(\varepsilon_{ip}, \theta) = \sigma_i(\varepsilon_{ip})(1 + k \cos \theta), \quad (4)$$

где σ_i – интенсивность напряжений согласно диаграмме деформирования материала при отсутствии неравномерности механических свойств, которая характеризуется коэффициентом k .

На основе экспериментальных данных [13] о зависимости величины условного предела текучести, полученной при термообработке стали, от сопротивления ползучести при высоких температурах определены скорости деформаций ползучести $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и их разность для стали 20ХЗМВФ, которые можно использовать также для других роторных сталей, в частности 25Х1М1ФА. Изменение скорости деформации ползучести $\dot{\varepsilon}_{ij}$ в окружном направлении при $k = 0$ задается формулой

$$\dot{\varepsilon}_{ij}(\theta) = \dot{\varepsilon}_{ij}(1 + k \cos \theta). \quad (5)$$

Искривление высокотемпературных роторов паровых турбин при ползучести. Появление и развитие неосесимметричного деформирования роторов при неравномерности ползучести материала в окружном направлении оценивалось на примере высокотемпературных РВД и РСД-1 турбин Т-250/300 и К-300-240 (рис. 3), работавших на стационарном режиме в течение 300 тыс. ч.

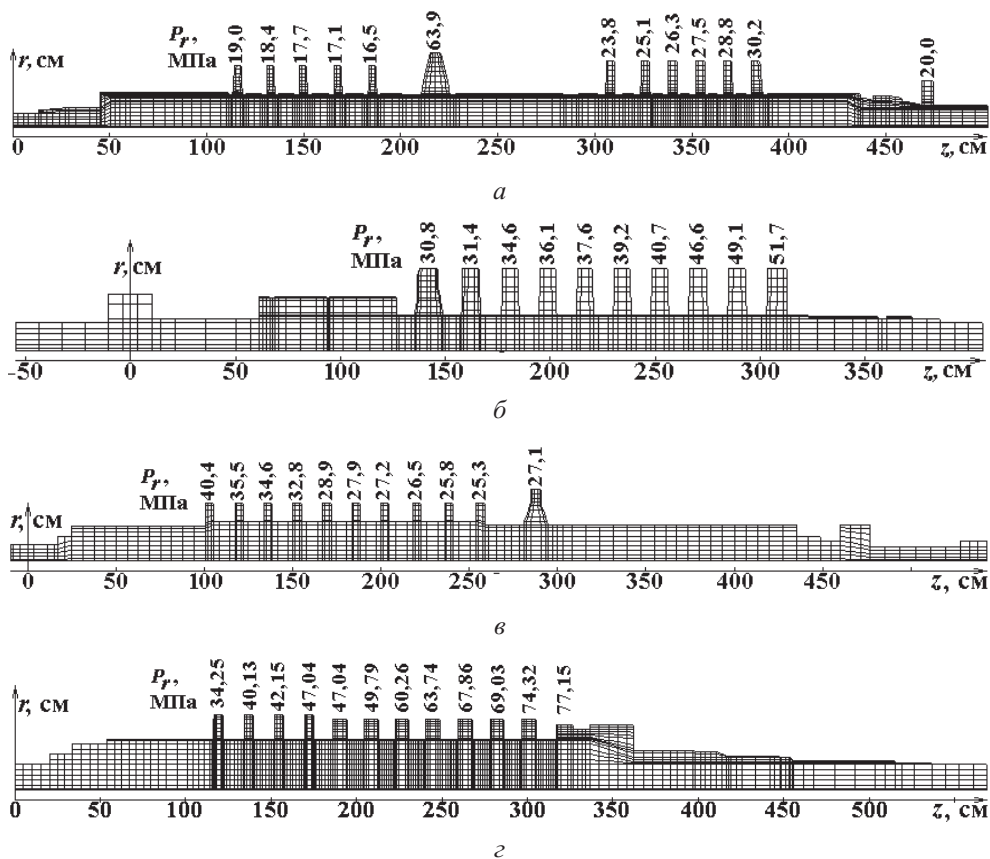


Рис. 3. Меридиональные сечения РВД (а, в) и РСД (б, г) турбин К-250/300 (а, б) и К-300-240 (в, г). (P_r – интенсивность лопаточной нагрузки по ступеням ротора.)

Основу методики решения задачи составляет пошаговая процедура. От шага к шагу изменяются время и (или) внешнее воздействие. При решении задачи ползучести в условиях стационарного теплового режима после одного шага решения задачи теплопроводности следуют несколько шагов решения задачи механики сплошной среды. Температурное поле рассматриваемых роторов определяется из решения осесимметричной задачи теплопроводности с граничными условиями, соответствующими стационарному режиму работы турбин. При решении задачи механики сплошной среды используются данные решения задачи теплопроводности в виде температурного поля, через которое вычисляются температурные деформации и свойства материала, зависящие от температуры [10].

При анализе ползучести используется теория ползучести с анизотропным упрочнением, которая учитывает направленный характер упрочнения материала и обратную ползучесть и дополнена кинетическими уравнениями внутри- и межзеренной повреждаемости материала, что позволяет рассчитывать не только ротор турбины, но и другие элементы и узлы энергомашин. Определяющие соотношения ползучести, описывающие все три стадии, и кинетические уравнения повреждаемости материала имеют следующий вид [10]:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda(s_i, \omega, T)s'_{ij}; \quad \dot{\rho}'_{ij} = \frac{2}{3}H(\sigma_i)\dot{\epsilon}_{ij} - \mu(\rho_i, \omega, T)\rho'_{ij}; \quad (6a)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}{A_* (\sigma_i, T)} \quad (0 \leq \omega \leq 1); \quad \dot{\psi}_\nu = \frac{Q(\sigma_e)}{(1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(k\sigma_e) \exp(\delta T) \quad (0 \leq \psi_\nu \leq 1), \quad (66)$$

где

$$\lambda = \frac{3a}{2s_i (1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta s_i) \exp(\gamma T); \quad \mu = \frac{b}{\rho_i (1-\omega)^{\alpha(\sigma_i)}} \exp(\beta \rho_i) \exp(\gamma T);$$

σ_{ij} , s_{ij} , ρ_{ij} – тензоры соответственно полных, активных и добавочных напряжений, причем $\sigma_{ij} = s_{ij} + \rho_{ij}$; σ_i , s_i , ρ_i – интенсивности соответствующих напряжений; ω , ψ_ν – скалярный и векторный феноменологические структурные параметры, отвечающие соответственно за внутри- и межзеренное накопление повреждений и принимающие значения из интервала $[0, 1]$; A_* – удельная энергия вязкого разрушения; σ_e – эквивалентное положительное напряжение, действующее на площадке с нормалью ν ; T – температура; точкой над символом обозначено дифференцирование по времени t , штрихом – девиаторы напряжений.

Для получения параметров эволюционных уравнений используются экспериментальные данные по ползучести вплоть до разрушения образцов роторной стали 25X1M1ФА. Эти данные используются также для роторной стали 20X3МВФ. Для роторов паровых турбин с наработкой сверхпаркового ресурса характерны процессы необратимых изменений в сталях. Из-за недостаточности или отсутствия экспериментальных данных по характеристикам длительной прочности и ползучести металла после длительной эксплуатации зачастую используются расчетно-экспериментальные данные по механическим свойствам при сверхдлительных сроках эксплуатации [13–15].

Для интегрирования уравнений ползучести по времени применяется неявная схема с заданным и автоматическим выбором шага [16]. На первом временном шаге решается упругая или упругопластическая задача. При наличии пластических деформаций выполняется несколько итераций для сходимости метода переменных параметров упругости. В каждой итерации процесс формирования систем линейных уравнений совмещен с прямым ходом метода квадратного корня. Это существенно снижает количество обменов с внешней памятью [10]. После каждого шага на основе полученного НДС определяются приращения деформаций ползучести и приращения добавочных напряжений. На следующем $(m+1)$ -м шаге проводится уточнение НДС с учетом накопленных деформаций за m предыдущих шагов и новых значений внешних воздействий, если они изменились во времени.

Сходимость результатов при решении задачи термомеханики оценивалась путем сгущения конечноэлементной сетки при разбиении меридионального сечения конструкции и удержания различного количества слагаемых ряда Фурье при разложении компонент решения в окружном направлении. На основании анализа сходимости результатов установлено, что для решения поставленной задачи достаточно ограничиться четырьмя гармоническими составляющими для компонент искомых величин.

Результаты расчетов искривлений роторов, выполненных при варьировании разностью условных пределов текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ на диаметрально противоположных их сторонах, представлены на рис. 4 и в табл. 1. Даже при незначительной неравномерности скорости ползучести, которая соответствует $\Delta\sigma_{0,2} = 5$ МПа, прогибы ротора за 150 тыс. ч эксплуатации превысят 0,03 мм. При большей неравномерности скорости ползучести остаточные прогибы за 300 тыс. ч достигнут 0,08 мм, что может потребовать останова турбоагрегата и проведения дорогостоящих ремонтных работ. Для сравнения на рис. 4,б показаны приведенные в [2] значения прогибов РСД (данные обследований во время ремонтов) эксплуатировавшихся на ТЭЦ-22 Мосэнерго турбин Т-250/300-240. Значения прогибов роторов после длительной эксплуа-

Результаты расчетов искривлений роторов

Ротор	$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	Максимальные прогибы роторов u_{\max} , мм, для времени эксплуатации, тыс. ч					
		30	100	150	200	250	300
РВД Т-250/300	5	0,015	0,028	0,033	0,036	0,037	0,040
	10	0,031	0,056	0,067	0,072	0,074	0,080
	20	0,062	0,111	0,133	0,143	0,148	0,158
РСД-1 Т-250/300	5	0,034	0,053	0,063	0,073	0,083	0,092
	10	0,068	0,106	0,126	0,146	0,166	0,185
	20	0,136	0,210	0,250	0,289	0,328	0,365
РВД К-300-240	5	0,014	0,026	0,032	0,034	0,037	0,038
	10	0,028	0,053	0,064	0,069	0,074	0,077
	20	0,055	0,105	0,126	0,137	0,146	0,154
РСД К-300-240	5	0,015	0,027	0,032	0,037	0,041	0,045
	10	0,031	0,054	0,065	0,074	0,083	0,090
	20	0,061	0,107	0,128	0,147	0,163	0,179

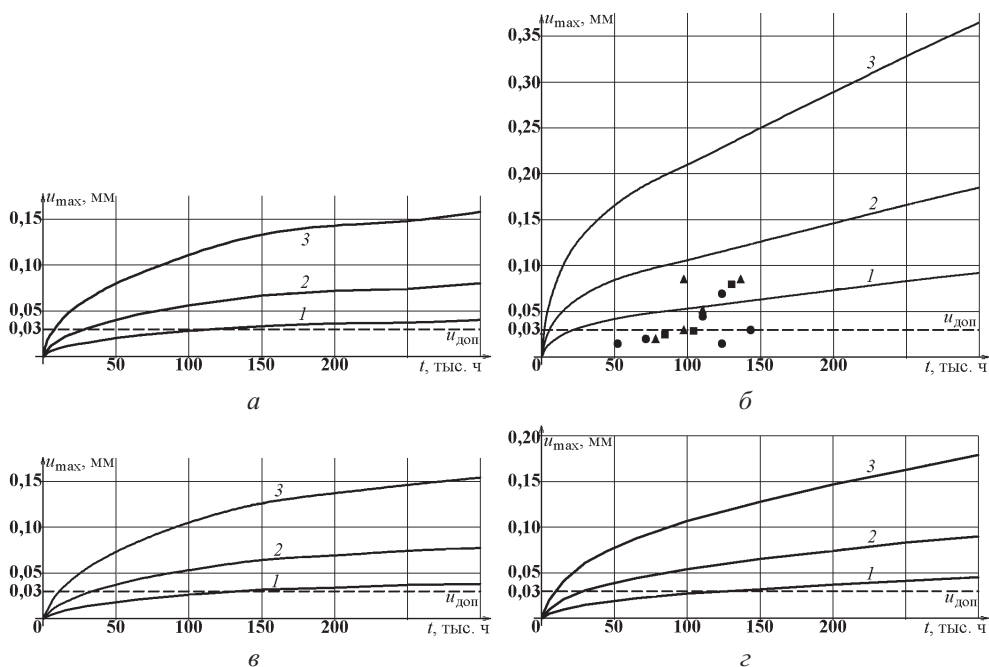


Рис. 4. Изменение во времени максимальных прогибов РВД (а, в) и РСД (б, г) турбин Т-250/300 (а, б) и К-300-240 (в, г); ●, ▲, ■ – турбины Т-250/300-240 № 9, 10 и 11 соответственно. (Здесь и на рис. 6: 1 – $\Delta\sigma_{0,2} = 5$ МПа; 2 – $\Delta\sigma_{0,2} = 10$ МПа; 3 – $\Delta\sigma_{0,2} = 20$ МПа.)

тации соответствуют расчетным при неравномерности скорости ползучести, вызванной разностью условных пределов текучести на диаметрально противоположных сторонах ротора до 10 МПа.

Отметим, что после устранения остаточного прогиба, проточки и балансировки ротора он снова деформируется примерно с таким же темпом по времени, о чем свидетельствуют данные ремонтных обследований [2, 5]. Все это подтверждает предположение, что одной из причин прогрессирующих прогибов высокотемпературных роторов является неравномерность скорости ползучести материала.

Деформирование роторов при превышении рабочей частоты вращения.

Исследования влияния местных упругопластических деформаций, возникающих при превышении номинальной частоты вращения вследствие неравномерности свойств текучести, на искривление оси ротора выполнены на примере сварного ротора низкого давления (РНД) турбины К-220-44 (рис. 5). Закон изменения интенсивности напряжений σ_i в зависимости от интенсивности пластических деформаций ε_i^p (диаграмма деформирования материала) описан в [17]. Прогибы ротора вычислялись для заданных коэффициентов неравномерности свойств материала до превышения номинальной частоты вращения на 40%.

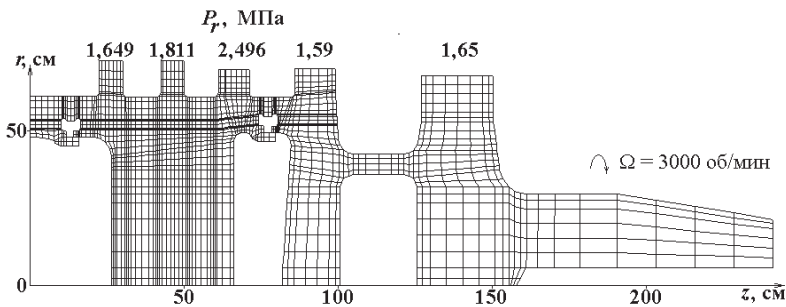


Рис. 5. Мерициональное сечение РНД турбины К-220-44.

При расчете неосесимметричного деформирования роторов турбомашин применяется теория типа течения с изотропным упрочнением, которая удовлетворительно описывает поведение материала при умеренных деформациях в случае активного нагружения и упругой разгрузки. Для изотропного материала приращения компонент тензора пластических деформаций вычисляются по зависимостям [10]

$$\Delta \varepsilon_{ij}^p = \left(\frac{3}{2^1 \sigma_i} \right)^2 \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{2E} \right) S_{ij} S_{km} \Delta \sigma_{km} + \frac{3}{2^1 \sigma_i} \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{2E} \right) ({}^1 \sigma_i - {}^1 \sigma_T), \quad (7)$$

где ${}^1 \sigma_i$ – интенсивность напряжений, соответствующая началу шага, ${}^1 \sigma_i = \sqrt{\frac{2}{3} S_{ij} S_{ij}}$; S_{ij} – девиаторная часть тензора напряжений, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{ij} \delta_{ij}}{3}$; σ_{ij} – компоненты полного тензора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера; E_k – касательный модуль, определенный по диаграмме деформирования материала при температуре, соответствующей концу шага ${}^2 T$; ${}^2 E$ – модуль Юнга при температуре, отвечающей концу шага ${}^2 T$; ${}^1 \sigma_T$ – предел текучести, соответствующий началу шага.

При решении упругопластической задачи соблюдается следующая последовательность вычислений. Если напряжения превышают предел текучести материала, в данном элементе фиксируется возникновение пластической зоны, что требует численного обращения матрицы податливости материала и вычисления касательного модуля из диаграммы деформирования. На последующих итерациях касательный модуль

заменяется секущим, и уточняются приращения упругопластических деформаций по схеме метода переменных параметров упругости. В случае фиксирования разгрузки текущий предел текучести запоминается, и осуществляется переход к упругим соотношениям, т.е. касательный модуль заменяется модулем Юнга. Пластические деформации при этом сохраняют свои последние значения. Итерационный процесс заканчивается в результате достигнутой точности или по исчерпанию заданного числа итераций. Если в пластическую зону не попала ни одна точка тела, итерационный процесс прекращается после решения упругой задачи.

В табл. 2 приведены полученные максимальные значения интенсивности пластических деформаций ϵ_i^P в 5-й ступени ротора в плоскости с минимальным пределом текучести ($\theta = \pi$) и его максимальный прогиб u_{\max} в плоскости симметрии при разной частоте вращения Ω .

Т а б л и ц а 2

Максимальные уровни пластических деформаций ϵ_i^P и максимальный прогиб u_{\max} ротора

$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	Ω , об/мин, равное				
	3450	3600	3750	3900	4200
5	<u>0,023</u>	<u>0,046</u>	<u>0,077</u>	<u>0,130</u>	<u>0,349</u>
	0	0,002	0,007	0,016	0,088
10	<u>0,023</u>	<u>0,047</u>	<u>0,078</u>	<u>0,131</u>	<u>0,351</u>
	0	0,003	0,015	0,035	0,176
20	<u>0,026</u>	<u>0,050</u>	<u>0,082</u>	<u>0,139</u>	<u>0,361</u>
	0,001	0,006	0,030	0,070	0,344

Примечание. Над чертой приведены значения ϵ_i^P , %, под чертой – u_{\max} , мм.

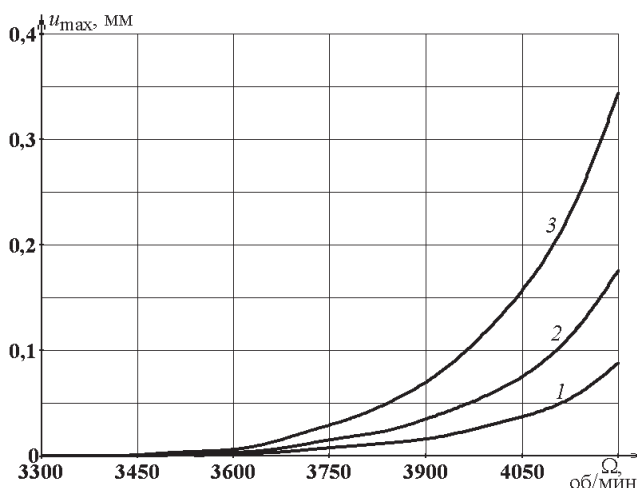


Рис. 6. Максимальный прогиб при угоне ротора с различной неравномерностью условного предела текучести.

Расчетные исследования показывают, что местные упругопластические деформации в роторе появляются при превышении номинальной частоты вращения на 15%

(до 3450 об/мин), что может иметь место при эксплуатации турбины. С увеличением номинальной частоты вращения на 25% (3750 об/мин) при неравномерности условного предела текучести $\Delta\sigma_{0,2} = 20$ МПа может возникнуть заметный прогиб ротора (0,03 мм), что создает силы небаланса на рабочей частоте вращения, превышающие вес ротора. Максимальные пластические деформации в роторе при этом составляют лишь 0,13%. Даже при относительно небольшой неравномерности условного предела текучести ($\Delta\sigma_{0,2} = 10$ МПа) и частоте вращения 3900 об/мин величина прогиба ротора также превышает рекомендованные значения. В случае отсутствия неравномерности условного предела текучести пластические деформации являются осесимметричными и не вызывают искривления оси. На рис. 6 приведена зависимость максимального прогиба ротора от частоты вращения для различных значений разности пределов текучести на диаметрально противоположных его сторонах. Изгиб ротора возрастает с увеличением неравномерности механических свойств материала и частоты его вращения при угоне.

Заключение. На основе созданной методики расчета неосесимметричного деформирования элементов и узлов энергомашин численно исследовано термонапряженное состояние роторов паровых турбин по трехмерной модели с учетом неравномерности свойств материала, особенностей конструкций и изменения во времени внешнего нагружения. Методика базируется на полуаналитическом методе конечных элементов расчета нестационарного теплового состояния, деформаций пластичности и ползучести, изменения свойств материала в окружном направлении и характеризуется экономичностью вычислений.

Впервые при расчетных исследованиях конкретных роторов паровых турбин показано влияние неравномерности механических свойств материала на их деформирование. Неравномерность скорости деформаций ползучести роторных сталей в зоне высоких температур РВД и РСД паровых турбин приводит к появлению прогибов, которые за 300 тыс. ч эксплуатации развиваются до 0,1–0,2 мм, что в несколько раз превышает допустимые значения. Полученные для однотипных роторов расчетные значения прогибов с учетом неравномерности характеристик ползучести согласуются с результатами обследований работающих роторов. Местные упругопластические деформации, возникающие при неравномерности условного предела текучести $\Delta\sigma_{0,2} = 10...20$ МПа и превышении номинальной частоты вращения, вызывают значительное искривление ротора.

Разработанная методика, ее программная реализация и полученные результаты для конкретных роторов позволяют определить предельные значения неравномерности механических свойств материала, приводящей к недопустимым прогибам, и могут быть использованы для решения вопросов нормирования неравномерности характеристик материала поковок с целью исключения в процессе эксплуатации дополнительного прогиба от неравномерности ползучести или текучести материала. Методика может быть применена для расчета термонапряженного и деформированного состояния других элементов энергетического оборудования (барабаны котлов, корпуса паровых турбин и т.п.).

Резюме

Розглядається необоротна деформація роторів парових турбін унаслідок нерівномірності механічних властивостей матеріалу по окружності на основі чисельного аналізу їхнього тривимірного напружено-деформованого стану. Показано, що така нерівномірність може бути однією з причин появи і розвитку прогресуючого прогину при повзучості високотемпературних роторів, що тривало експлуатуються, та їхнього викривлення при перевищенні номінальної частоти обертання.

1. Урьев Е. В., Кистойчев А. В., Олейников А. В. О правке роторов системами балансировочных грузов // Электрические станции. – 2009. – № 1. – С. 10 – 15.
2. Шаргородский В. С., Хоменок Л. А., Розенберг С. Ш., Коваленко А. Н. Повышение технического уровня паровых турбин при внедрении систем принудительного парового охлаждения роторов // Там же. – 1999. – № 1. – С. 30 – 36.
3. Хоменок Л. А., Шаргородский В. С., Розенберг С. Ш. и др. Повышение надежности и продление срока службы роторов ВД и СД турбин К-210-130 ЛМЗ на ТЭЦ Болгарии // Там же. – 2001. – № 9. – С. 63 – 66.
4. Шаргородский В. С., Хоменок Л. А., Розенберг С. Ш. и др. Повышение ремонтно-пригодности, ресурса и надежности РСД мощных паровых турбин // Тр. ЦКТИ. – 2002. – Вып. 283. – С. 151 – 158.
5. Куменко А. И., Махнов В. Ю., Шкляр М. И. О проблеме прогибов роторов и возможности правки роторов высокого и среднего давления мощных турбин системами балансировочных грузов // Надежность и безопасность энергетики. – 2009. – № 7. – С. 62 – 68.
6. Шатохин В. Ф., Циммерман С. Д. Разработка системы предотвращения катастроф агрегатов. Ч. 1. Анализ катастрофических аварий и постановка задачи // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2005. – № 10 (26). – С. 19 – 31.
7. Беликова Н. З., Юланов О. А., Гладченко В. М. и др. Электронный автомат безопасности как элемент защиты турбоагрегатов // Электрические станции. – 2005. – № 5. – С. 40 – 47.
8. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И., Гришин Н. Н. Оценка разрушающего числа оборотов ротора турбоагрегата АЭС // Пробл. машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 55 – 60.
9. Розенблюм В. И. Приближенный анализ искривления вращающихся валов, обусловленного ползучестью // Сб. ЛГУ. – 1971. – № 8. – С. 30 – 36.
10. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370 с.
11. Баженов В. А., Гуляр А. И., Майборода Е. Е., Пискунов С. О. Полуаналитический метод конечных элементов в задачах континуальной механики разрушения при ползучести пространственных тел сложной формы и их систем. Сообщ. 2. Исследование достоверности результатов, эффективности метода и алгоритмы решения задач // Пробл. прочности. – 2002. – № 6. – С. 14 – 20.
12. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Протасова Т. В. Неосесимметричное деформирование высокотемпературных роторов паровых турбин при окружной неоднородности свойств ползучести материала // Вісн. НТУ “ХПІ”. – 2012. – № 55. – С. 179 – 186.
13. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении / Под ред. А. В. Станюковича. – Ч. 1. – Л.: Изд. ЦКТИ, 1966. – 220 с.
14. Кривенюк В. В., Околот Г. А., Усков Е. И. Методологические аспекты прогнозирования ползучести жаропрочных сталей и сплавов. Сообщ. 2. Прогнозирование в широких интервалах температур и длительностей нагружения // Пробл. прочности. – 2007. – № 4. – С. 50 – 61.
15. Прочность материалов и конструкций / Под общ. ред. В. Т. Трощенко. – Т. 5: Прогнозирование высокотемпературной ползучести и длительной прочности металлов / В. В. Кривенюк. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2012. – 749 с.

16. Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. О применении неявной схемы интегрирования по времени в конечноэлементном расчете ползучести конструкций по теории течения с анизотропным упрочнением // Пробл. машиностроения. – 1998. – № 3-4. – С. 68 – 75.
17. РТМ 108.021.103–85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – Введ. 01.07.86.

Поступила 10. 04. 2014

Вниманию подписчиков!

Подписаться на журнал «Проблемы прочности» можно, как обычно, в местных отделениях связи. Журнал включен в каталоги Украины и России.

Наш индекс – 70730.

Подписку Вы можете оформить непосредственно в редакции журнала с любого очередного номера.

Цена одного номера с учетом почтовых расходов в 2014 году составит:

в пределах Украины 30 грн.;

за пределами Украины 300 рос. руб. (~ 10.0 USD).

Почтовые переводы направлять по адресу:

01014, Киев–14, ул. Тимирязевская, 2.

Редакция журнала «Проблемы прочности»

Шинкаренко Нине Михайловне.

Справки по телефону: (044) 286 5657.

Отдельным письмом необходимо сообщить в редакцию требуемое количество номеров, сумму и дату отправки перевода, указать свой почтовый адрес. Отправка журналов осуществляется после поступления денег подписчика.