

УДК 539.3:621.165

Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, д-р техн. наук., проф.; зав. отд. ИПМаш НАНУ, Харьков;
П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, канд. техн. наук, с.н.с.; с.н.с. ИПМаш НАНУ,
Харьков;
Т. В. ПРОТАСОВА, канд. техн. наук; м.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков

ВЛИЯНИЕ ОКРУЖНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ РОТОРА ТУРБИНЫ

Оценена возможность необратимого деформирования роторов вследствие окружной неравномерности предела текучести. Численные исследования выполнены на основе метода конечных элементов в сочетании с разложением решений в окружном направлении в ряды Фурье. Показано, что с превышением номинальной частоты вращения появляющиеся местные пластические деформации вызывают значительный прогиб ротора при окружной неравномерности предела текучести материала.

Ключевые слова: ротор паровой турбины, окружная неравномерность свойств материала, неосесимметричное деформирование, прогиб ротора, полуаналитический метод конечных элементов.

Введение. В мировой практике известны случаи повреждения роторов вследствие прогиба вала при превышении частоты вращения. По причине угона ротора из-за отказа системы защиты агрегата произошла авария на Ермаковской станции (1972 г.) [1], при разгонных испытаниях на Омской ТЭЦ-2 (1995 г.), Барнаульской ТЭЦ-3 (1996 г.) и Назаровской ГРЭС (1996 г.) произошли аварии, хотя срок эксплуатации машин был далек от исчерпания ресурса [2]. Это указывает на зарождения дефектов в предшествующий период эксплуатации и быстрое их развитие при превышении частоты вращения [3].

Испытания собранных роторов проводятся на разгонно-балансировочном стенде типа «Шенк» при повышенной частоте вращения (разгон), на 20 % превышающей номинальную (3000 об/мин) с целью обеспечения надежности эксплуатации турбоагрегата. Некоторые европейские производители (Германия, Швейцария) испытывают роторы с превышением скорости на 25 %, североамериканские – на (10–15) % [4]. При работе турбины (внезапный сброс нагрузки) частота вращения может возрасти на (10–15) %, а в аварийных случаях вследствие несвоевременного срабатывания противоугонных устройств (автоматов безопасности) превысить испытательное число оборотов. Расчетами показано, что частота вращения около 4100 об/мин является разрушающей для элементов ротора ЦНД турбины К-220-44 ХТГЗ [3].

Причины появления прогибов роторов условно можно разделить на конструкционные, связанные со свойствами материалов, и технологические, связанные с нарушениями эксплуатационного характера. Первая группа причин вызывает прогибы, обусловленные ползучестью или достижением в ряде случаев эксплуатационными напряжениями предела текучести [5]. Это предположение основывается на окружной неравномерности физико-механических свойств поковки ротора [6, 7], которая проявляется в различных значениях предела текучести по сечению вала. При увеличении частоты вращения сверх допустимой напряжения на части окружности достигают предела текучести, и возникает остаточный прогиб ротора, что отрицательно сказывается на ресурсе турбоагрегата.

Цель и методика исследования. В данной работе расчетным путем оценивается влияние местных упруго-пластических деформаций, возникающих при превышении номинальной частоты вращения вследствие окружной неравномерности свойств текучести, на прогибы двухпоточного сварного ротора ЦНД турбины К-220-44 ХТГЗ.

Для численного расчета прогибов роторов по трехмерной модели в цилиндрической системе координат с учетом окружной неравномерности свойств материала разработана методика [8, 9], основывающаяся на использовании полуаналитического метода конечных элементов. 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 и реализовать исследования за приемлемый промежуток времени по сравнению с решением задачи с помощью трехмерных конечных элементов. Учитываются упругопластические деформации материала, которые описываются по теории течения с изотропным упрочнением.

Изменение предела текучести в окружном направлении аппроксимируется с помощью тригонометрических функций. Оно определяется по максимальному и минимальному значениям предела текучести материала, которые наблюдаются на диаметрально противоположных сторонах ротора. В соответствии с этим изменение пластических свойств материала в окружном направлении задается в виде

$$\sigma_i(\varepsilon_i^P, \theta) = \sigma_i(\varepsilon_i^P) (1 + k \cos \theta),$$

где σ_i – интенсивность напряжений в диаграмме деформирования материала при отсутствии окружной неравномерности свойств; k – коэффициент окружной неравномерности свойств.

Условия изготовления роторов (или поковок) не позволяют обеспечить абсолютную равномерность их физических и механических свойств; допустимая неравномерность свойств оговаривается техническими условиями. У высококачественных роторов японских турбостроительных фирм неравномерность механических свойств металла, характеризующих упругопластическое деформирование, достигает 2 % [10]. Неравномерность механических свойств материала можно оценить по результатам контрольно-приемочных испытаний поковок роторов. Из них следует, что максимальная разность пределов текучести для двух диаметрально противоположных образцов достигает 20 МПа, а иногда и 30 МПа [11]. В этих случаях коэффициент окружной неравномерности k принимает значения 0,02 и 0,03, что соответствует отношению максимального предела текучести к минимальному

$$\delta = \frac{\sigma_{0.2}^{\max}}{\sigma_{0.2}^{\min}} = \frac{\sigma_{0.2}(0)}{\sigma_{0.2}(\pi)}, \text{ равному } 1,02 \text{ и } 1,03 \text{ соответственно.}$$

Расчетные исследования прогибов ротора выполнены для заданных коэффициентов окружной неравномерности свойств материала и прослеживались до превышения частоты вращения на 40 %. Меридиональное сечение рассчитываемой симметричной части ротора показано на рис. 1. Анализ сходимости результатов показал, что при решении упругопластической задачи достаточно ограничиться четырьмя гармоническими составляющими в разложении компонент решения в окружном направлении.

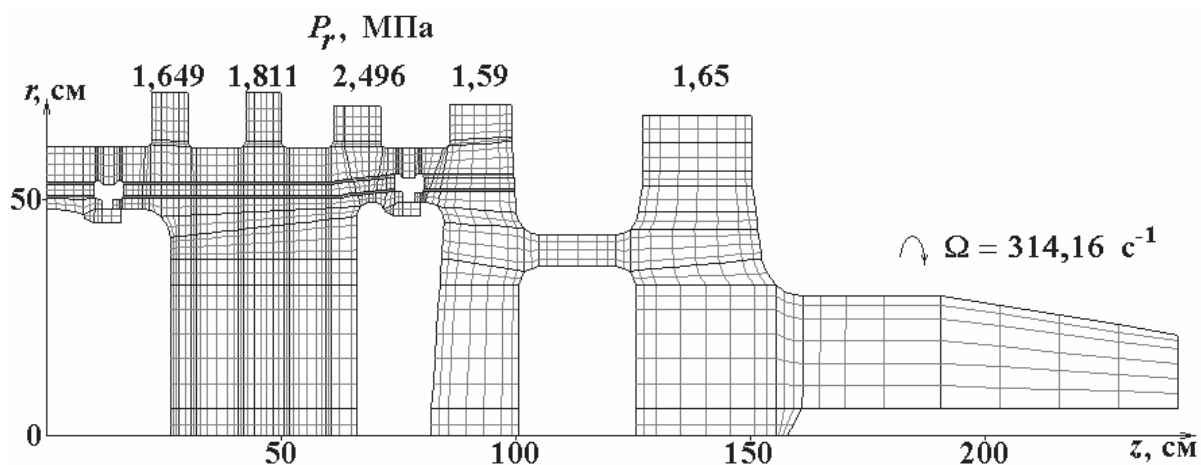


Рис. 1 – Расчетная схема сварного ротора ЦНД турбины К-220-44

В таблице приводятся полученные максимальные значения интенсивности пластических деформаций ε_i^P , имевшие место в пятой ступени, в плоскости с минимальным пределом текучести ($\theta = \pi$), и максимальный прогиб u^{\max} ротора в плоскости симметрии при разной частоте вращения ω (об/мин).

Таблица

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

Неравно- мерность	$\omega = 3300$		$\omega = 3450$		$\omega = 3600$		$\omega = 3750$		$\omega = 3900$		$\omega = 4200$	
	ε_i^P , %	u^{\max} , мм	ε_i^P , %	u^{\max} , мм	ε_i^P , %	u^{\max} , мм	ε_i^P , %	u^{\max} , мм	ε_i^P , %	u^{\max} , мм	ε_i^P , %	u^{\max} , мм
$k = 0,02$	0	0	0,026	0,001	0,050	0,006	0,081	0,037	0,136	0,068	0,359	0,358
$k = 0,03$	0,001	0	0,028	0,002	0,051	0,011	0,084	0,058	0,138	0,107	0,363	0,535

Расчетные исследования показывают, что заметные упругопластические деформации в роторе появляются уже при превышении номинальной частоты вращения на 15 % (до 3450 об/мин), что может иметь место при эксплуатации турбины. При частоте вращения 3600 об/мин в случае окружной неравномерности предела текучести 3 % прогиб ротора достигает 0,011 мм. Даже при относительно небольшой окружной неравномерности предела текучести 2 % и при увеличении номинальной частоты вращения на 25 % (до 3750 об/мин) может также возникнуть значительный прогиб ротора 0,037 мм, создающий силы небаланса на рабочей частоте вращения, превышающие вес ротора. Максимальные пластические деформации в роторе при этом составляют лишь 0,081 %. В случае отсутствия окружной неравномерности предела текучести пластические деформации являются осесимметричными и не вызывают рассматриваемых прогибов роторов. Распределение интенсивности пластических деформаций в меридиональном сечении ротора при $k = 0,03$ и превышении рабочего числа оборотов на 20 % (3600 об/мин) показано на рис. 2 для плоскостей с максимальным ($\theta = 0$) и минимальным ($\theta = \pi$) значением предела текучести.

На рис. 3 приводится зависимость максимального прогиба ротора от частоты вращения для разных значений коэффициента окружной неравномерности предела текучести. Изгиб ротора возрастает с увеличением неравномерности свойств материала в окружном направлении и с увеличением частоты вращения ротора при угоне.

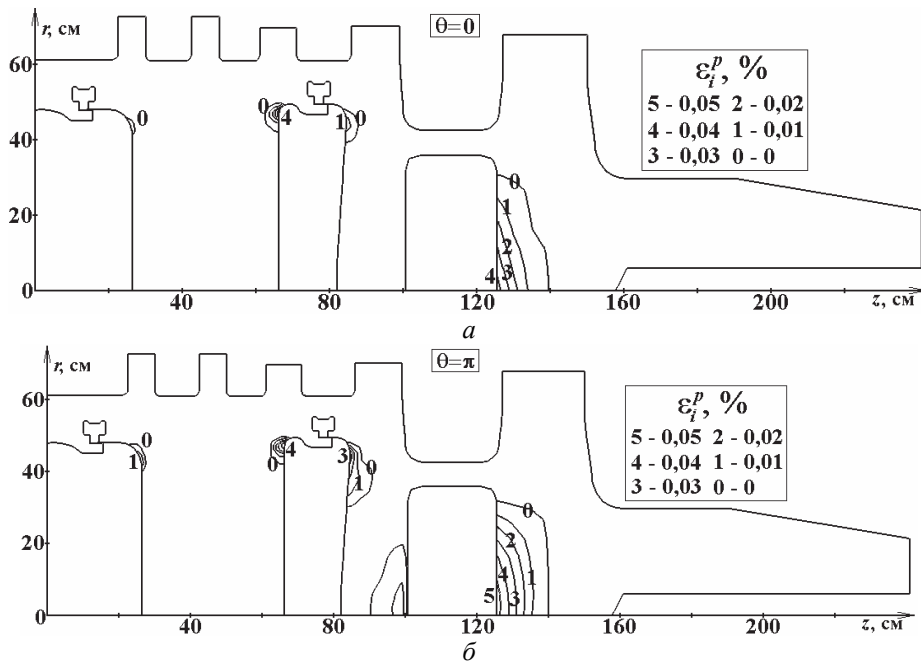


Рис. 2 – Изолинии интенсивности пластических деформаций ε_i^p в меридиональных плоскостях $\theta = 0$ а и $\theta = \pi$ б при частоте вращения ротора 3600 об/мин

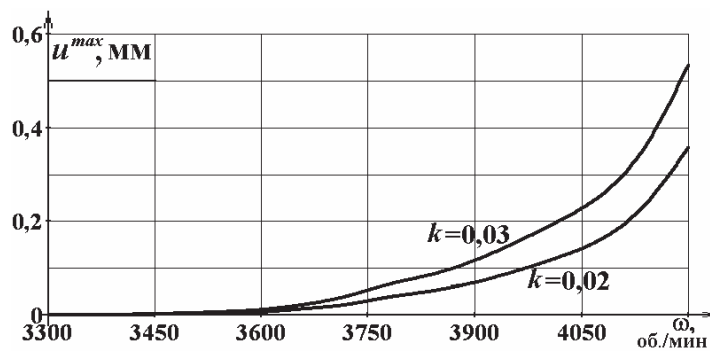


Рис. 3 – Зависимость максимального прогиба при угоне ротора с различной окружной неравномерностью предела текучести

Выводы. Исследовано НДС ротора ЦНД турбины К-220-44 по трехмерной модели с учетом окружной неравномерности пластических свойств материала и увеличении внешних нагрузок от центробежных сил. Показано, что местные упруго-пластические деформации, возникающие при неравномерности предела текучести в окружном направлении 2 % и превышении номинальной частоты вращения на 25 %, вызывают значительный изгиб ротора ЦНД паровой турбины К-220-44, равный 0,037 мм. Проведенные численные исследования и представленные фрагменты результатов свидетельствуют о возможности необратимого деформирования роторов вследствие окружной неравномерности пластических свойств материала, что может быть одной из причин прогибов роторов, обнаруженных при обследованиях работавших турбоагрегатов.

Полученные результаты позволяют оценить предельные значения неравномерности свойств материала, приводящих к остаточным прогибам роторов в процессе эксплуатации и могут быть использованы для решения вопросов нормирования окружной неравномерности свойств материала поковок роторов.

Список литературы: 1. Шатохин, В. Ф. Разработка системы предотвращения катастроф агрегатов. Часть 1. Анализ катастрофических аварий и постановка задачи [Текст] / В. Ф. Шатохин, С. Д. Циммерман // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10 (26). – С. 19–31. 2. Электронный автомат безопасности как элемент защиты турбоагрегатов [Текст] / Н. З. Беликова, О. А. Юланов, В. М. Гладченко, В. В. Леснов, А. В. Гладченко // *Электрические станции*. – № 5. – 2005. – С. 40–47. 3. Оценка разрушающего числа оборотов ротора турбоагрегата АЭС / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин, Н. Н. Гришин // *Проблемы машиностроения*. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 55–60. 4. *Кашарский, Э. Г.* Потери и нагрев в массивных роторах синхронных машин [Текст] / Э. Г. Кашарский, Н. В. Чемоданова, А. С. Шапиро. – Л.: Наука, 1968. – 200 с. 5. Повышение технического уровня паровых турбин при внедрении систем принудительного парового охлаждения роторов [Текст] / В. С. Шаргородский, Л. А. Хоменок, С. Ш. Розенберг, А. Н. Коваленко // *Электрические станции*. – 1999. – № 1. – С. 30–36. 6. *Розенблюм, В. И.* Приближенный анализ искривления вращающихся валов, обусловленного ползучестью [Текст] / В. И. Розенблюм // *Сб. ЛГУ*. – 1971. – № 8. – С. 30–36. 7. *Авраменко, С. А.* Ползучесть роторов паровых турбин в условиях электростанций [Текст] / С. А. Авраменко, Н. Н. Виноградов, В. И. Розенблюм // *Энергомашиностроение*. – 1975. – № 1. – С. 30–31. 8. *Шульженко, Н. Г.* Задачи термостойкости, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований): моногр. [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370 с. – Напечатано в России. – ISBN 978-3-8465-1493-1. 9. *Шульженко, Н. Г.* Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Т. В. Протасова // *Динаміка і міцність машин. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2004. – № 20. – С. 151–160. 10. Обеспечение прочности и ресурса энергооборудования – важнейшее направление исследований и разработок ОАО «НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова» [Текст] / Ю. К. Петреня, А. В. Судаков, Л. А. Хоменок, С. Н. Гаврилов, И. А. Данюшевский, А. И. Левченко, Е. Ю. Нефедьев, Л. Л. Смелков, А. С. Солдатов // *Надежность и безопасность энергетики*. – № 1. – 2008. – С. 14–19. 11. *Шульженко, Н. Г.* Неосесимметричное деформирование высокотемпературных роторов паровых турбин при окружной неоднородности свойств ползучести материала [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Т. В. Протасова // *Динаміка і міцність машин. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 55. – С. 179–186. – ISSN 2078-9130.

Bibliography (transliterated): 1. Shatohin, V. F., and S. D. Cimmerman. "Razrabotka sistemy predotvrashhenija katastrof agregatov. Chast' 1. Analiz katastroficheskikh avarij i postanovka zadachi." *Aviacionno-kosmicheskaja tehnik i tehnologija* 10 (26) (2005): 19–31. Print. 2. Belikova, N. Z., et al. "Jelektronnyj avtomat bezopasnosti kak jelement zashhity turboagregatov." *Jelektricheskie stancii* 5 (2005): 40–47. Print. 3. Shul'zhenko, N. G., et al. "Ocenka razrushajushhego chisla oborotov rotora turboagregata AJeS." *Problemy mashinostroenija* 7.1 (2004): 55–60. Print. 4. Kasharskij, Je. G., N. V. Chemodanova and A. S. Shapiro. *Poteri i nagrev v massivnyh rotorah sinhronnyh mashin*. Leningrad: Nauka, 1968. Print. 5. Shargorodskij, V. S., et al. "Povyshenie tehničeskogo urovnja parovyh turbin pri vnedrenii sistem prinuditel'nogo parovogo ohlazhdenija rotorov." *Jelektricheskie stancii* 1 (1999): 30–36. Print. 6. Rozenbljum, V. I. "Priblizhennyj analiz iskrivlenija vrashhajushhihsja valov, obuslovlennogo polzuchest'ju." *Sb. LGU* 8 (1971): 30–36. Print. 7. Avramenko, S. A., N. N. Vinogradov and V. I. Rozenbljum. "Polzuchest' rotorov parovyh turbin v uslovijah jelektrostancij." *Jenergomashinostroenie* 1 (1975): 30–31. Print. 8. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and B. F. Zajcev. *Zadachi termoprochnosti, vibrodiagnostiki i resursa jenergoagregatov (modeli, metody, rezul'taty issledovanij)*. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. ISBN 978-3-8465-1493-1. Print. 9. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and T. V. Protasova. "Primenenie poluanaliticheskogo metoda konechnyh jelementov dlja reshenija trehmernyh zadach termomehaniki v cilindricheskikh koordinatah." *Dynamika i micnist' mashyn. Visnyk NTU "HPI"*. No. 20. Kharkiv: NTU "HPI", 2004. 151–160. Print. 10. Petrenja, Ju. K., et al. "Obespechenie prochnosti i resursa jenergooborudovanija – vazhnejshee napravlenie issledovanij i razrabotok ОАО "NPO CKTI im. I.I. Polzunova." *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki* 1 (2008): 14–19. Print. 11. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and T. V. Protasova. "Neosesimmetrichnoe deformirovanie vysokotemperaturnyh rotorov parovyh turbin pri okružnoj neodnorodnosti svojstv polzuchesti materiala." *Dynamika i micnist' mashyn. Visnyk NTU "HPI"*. No. 55. Kharkiv: NTU "HPI", 2012. 179–186. ISSN 2078-9130. Print.

Поступила (received) 14.02.2014