

**Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО**, д-р техн. наук, зав. отделом, ИПМаш НАН Украины, Харьков;

**П. П. ГОНТАРОВСКИЙ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков;

**Т. В. ПРОТАСОВА**, вед. инженер, ИПМаш НАН Украины, Харьков

## **НЕОСЕССИМЕТРИЧНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ ОКРУЖНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА**

Розглядаються питання викривлення високотемпературних роторів парових турбін внаслідок нерівномірності їхньої повзучості в окружному напрямку. Приводяться результати розрахунків неосесиметричного деформування ротора циліндра середнього тиску турбіни К-300-240 з використанням експериментальних даних про окружну неоднорідність механічних властивостей матеріалу, а також ротора турбіни Т-250/300 для заданих характеристик неоднорідності матеріалу. Результати порівнюються з даними натурних досліджень викривлень роторів різних турбін.

**Ключові слова:** високотемпературні ротори, повзучість, неосесиметричне деформування.

Рассматриваются вопросы искривления високотемпературных роторов паровых турбин вследствие неравномерности их ползучести в окружном направлении. Приводятся результаты расчетов неосесиметричного деформирования ротора цилиндра среднего давления турбины К-300-240 с использованием экспериментальных данных об окружной неоднородности механических свойств материала, а также ротора турбины Т-250/300 для заданных характеристик неоднородности материала. Результаты сопоставляются с данными натурных исследований искривления роторов различных турбин.

**Ключевые слова:** соединение с натягом, температура, профильные соединения.

Bending problems of high-temperature rotors of steam turbines as a result of circumferential nonuniformity of creep are considered. Results of calculations of nonaxisymmetric straining of intermediate-pressure rotor of turbine К-300-240 with use of experimental data about the circumferential nonuniformity of mechanical properties of a material, and of rotor of turbine Т-250/300 are presented for the preset magnitude of nonuniformity of material properties. Results are compared with experimental data of bending of various turbine rotors.

**Keywords:** high-temperature rotors, creep, nonaxisymmetric straining.

**Результаты ремонтных обследований прогибов роторов паровых турбин.** На практике при эксплуатации паровых турбин наблюдались так называемые прогрессирующие прогибы конструктивно осесимметричных роторов, работающих в условиях высоких температур и постоянно (или периодически) действующих напряжений. Опыт длительной эксплуатации однотипных по конструкции турбоагрегатов на одной и той же электростанции показал, что время появления прогибов роторов и скорость нарастания де-

формации могут быть существенно различны [1].

Результаты обследований роторов цилиндров среднего давления турбин мощностью 200–800 МВт при их ремонте подтверждают явления прогрессирующих прогибов роторов [2–4]. Приведенные в [2] данные из опыта длительной эксплуатации трех турбин К-800-240-3 Запорожской ГРЭС свидетельствуют о том, что указанный прогиб ротора может превышать 0,2 мм. Результаты обследования роторов ЦСД-1 трех турбин Т-250/300-240 ПО ТМЗ на ТЭЦ-22 Мосэнерго в течение длительного времени показывают, что даже для сравнительно новых роторов через 8–10 лет эксплуатации прогибы в несколько раз превосходят допустимые значения [2]. Данные ремонтных обследований РВД и РСД турбины К-1200-240-3 свидетельствуют, что за 15 лет эксплуатации (с 1980 по 1996 гг.) прогибы выросли с 0,03 мм до 0,11 мм у РВД и до 0,12 мм у РСД [3]. На появление прогибов указывают и приведенные в [4] результаты ремонтных обследований роторов турбин К-210-130 ЛМЗ некоторых ТЭЦ в Болгарии. После наработки чуть более 90 тыс. часов прогибы РСД превышают 0,2 мм, прогибы РВД развиваются несколько медленнее.

На рис. 1 отмечены экспериментальные данные о прогибах роторов во время эксплуатации, приведенные в работах [2–4]. Точками обозначены прогибы РСД-1 турбины Т-250/300-240 ТЭЦ-22 Мосэнерго из [2]: ● – ст. № 9, ○ – ст. № 10, ◉ – ст. № 11; ромбами – прогибы роторов турбины К-1200-240-3 [3]: ◆ – РСД, ◇ – ЦВД; квадратами – роторов турбин К-210-130: ■ – РСД (ТЭЦ Варна, ст. № 6), □ – РСД (ТЭЦ «Марица Восток-2», ст. № 6); ▣ – РСД (ТЭЦ «Марица Восток-2», ст. № 5) и треугольником ▲ – ЦВД турбины К-210-130 (ТЭЦ «Марица Восток-2», ст. № 5) [4].

Таким образом, из опубликованных результатов обследований конкретных роторов следует, что их прогибы значительно превышают допустимое значение 0,02–0,03 мм, отмеченное на рисунке пунктирной линией. Это свидетельствует о практической важности решения вопроса установления причин такого деформирования роторов и возможности его снижения до допустимых значений.

Причинами появления прогрессирующего прогиба ротора могут являться:

- попадание на горячий ротор воды из системы парораспределения или из трубопроводов теплообменников;
- задевание ротора об элементы статора, вызывающее местные перегревы его поверхности;
- неравномерность ползучести стали в окружном направлении в зоне высоких температур ротора (прежде всего зона регулирующей ступени и первых ступеней РВД и РСД) [2].

Последнее предположение основывается на неравномерности физических, механических свойств и химического состава поковки ротора [5]. Условия изготовления роторов (или поковок) не позволяют обеспечить абсолютную равномерность их физических и механических свойств; допустимая неравномерность свойств оговаривается техническими условиями [2].

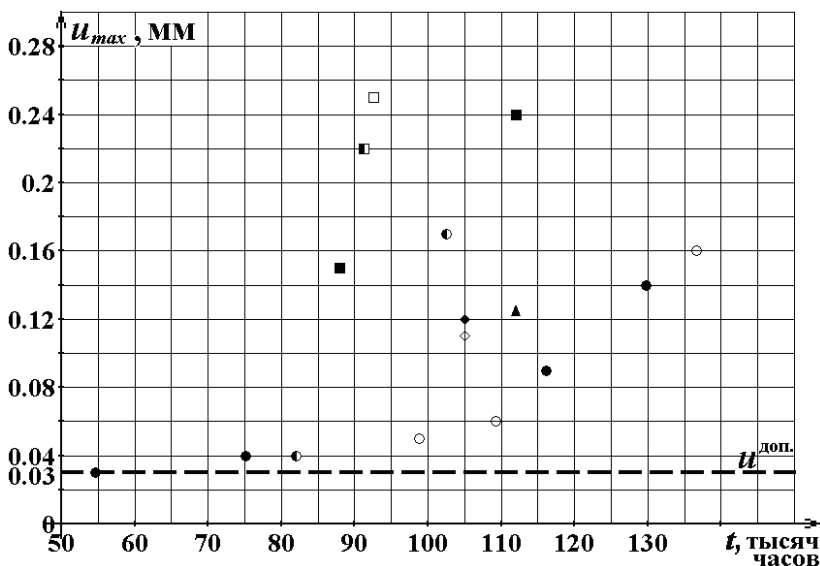


Рисунок 1 – Прогибы роторов эксплуатировавшихся турбин

У высококачественных роторов японских турбостроительных фирм неравномерность механических свойств металла, характеризующих упругопластическое деформирование, достигает 2-3 % [6]. Очевидно, что в отношении свойств ползучести эта неравномерность может быть больше.

Расчеты прогиба РСД турбин К-800-240 и К-1200-240-3 ЛМЗ при условии, что скорость ползучести роторов на среднем участке составляет 1 % за 100 тысяч часов и при этом скорости ползучести по образующим вала отличаются между собой на 1 %, показали, что через 100 тысяч часов работы можно ожидать прогиб, близкий к 0,2 мм [3].

**Оценка искривления ротора ЦСД турбины К-300-240 на основе экспериментальных данных об окружной неоднородности механических свойств материала.** Покажем, что неравномерность ползучести стали в окружном направлении в зоне высоких температур может быть причиной прогибов роторов при эксплуатации паровых турбин. Проведем расчетную оценку неосесимметричного деформирования РСД турбины К-300-240 на основе экспериментальных данных об окружной неоднородности механических свойств материала.

Окружную неоднородность механических свойств материала можно оценить по типичным данным для роторных сталей, полученным при контрольно-приемочных испытаниях периферии дисков первой ступени. Максимальное отличие пределов текучести для двух диаметрально противоположных образцов может достигать 20 МПа, а в некоторых случаях и

30 МПа. Указанная неоднородность материала с достаточной степенью точности может быть распространена на весь объем поковки в области первой ступени.

Существует зависимость между величиной предела текучести, полученной в результате термообработки стали, и сопротивлением ползучести при высоких температурах. На основании данных о пределах текучести и кривых ползучести стали 20Х3МВФ на базе испытаний 2 тыс. часов в [7] приводятся значения скорости ползучести при температуре 500-550 °С и напряжениях  $\sigma = 120-150$  МПа (табл. 1). При этом разность скоростей ползучести при  $\Delta\sigma_{02} = 100$  МПа и  $T = 500$  °С составляет  $(0,018 - 0,024) \cdot 10^{-3}$  %/ч; с возрастанием температуры выше 500 °С это различие уменьшается. При установившейся ползучести разброс скоростей ползучести уменьшается и составляет  $(0,008 - 0,023) \cdot 10^{-3}$  %/ч при  $\Delta\sigma_{02} = 175$  МПа и  $T = 500$  °С.

Таблица 1 – Скорости ползучести  $\dot{\epsilon}_{ij}$  и разности скоростей ползучести  $\Delta \dot{\epsilon}_{ij}$  стали 20Х3МВФ

по кривым ползучести от 1 до 2 тыс. часов				
Температура $T$ , °С	Напряжение $\sigma$ , МПа	$\dot{\epsilon}_{ij} \cdot 10^3$ , %/ч		$\Delta \dot{\epsilon}_{ij} (\Delta\sigma_{02}=100 \text{ МПа}) \cdot 10^3$ , %/ч
		$\sigma_{02}=750$ МПа	$\sigma_{02}=650$ МПа	
500	120	0,0050	0,0230	0,018
	150	0,0060	0,0300	0,024
550	120	0,0163	0,0170	0,007
	150	0,0230	0,0230	0
по графикам скоростей установившейся ползучести				
Температура $T$ , °С	Напряжение $\sigma$ , МПа	$\dot{\epsilon}_{ij} \cdot 10^3$ , %/ч		$\Delta \dot{\epsilon}_{ij} (\Delta\sigma_{02}=175 \text{ МПа}) \cdot 10^3$ , %/ч
		$\sigma_{02}=800$ МПа	$\sigma_{02}=625$ МПа	
500	120	0,005	0,013	0,008
	150	0,007	0,030	0,023

На основе использования указанных данных об окружающей неравномерности ползучести роторных сталей выполнены расчеты искривления ротора турбины К-300-240 по трехмерной модели с применением созданного ранее методического обеспечения [8].

Меридиональное сечение ротора с разбивкой на конечные элементы приводится на рис. 2.

Проведены расчетные исследования кинетики напряженно-деформированного состояния ротора для 300 тысяч часов эксплуатации турбины. В случае, когда разность пределов текучести  $\Delta\sigma_{02}$  на диаметрально противоположных сторонах ротора составляет 20 МПа, окружная неравномерность скорости ползучести в районе первой ступени при стационарном режиме работы турбины ( $T = 500$  °С,  $\sigma = 150$  МПа) достигает значения  $\dot{\epsilon}_{ij}^{max}/\dot{\epsilon}_{ij}^{min} = 1,153$ .

Рассматривались также и несколько других вариантов окружной неравномерности свойств материала (табл. 2).

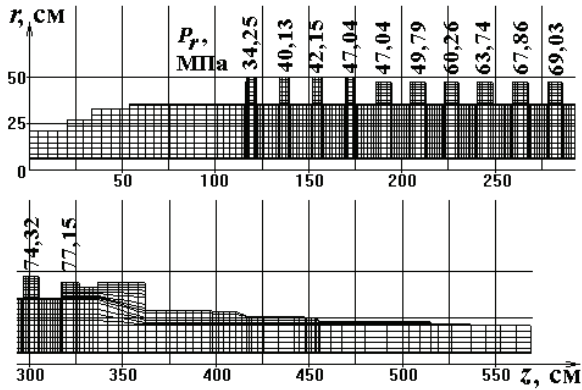


Рисунок 2 – Расчетная схема ротора

Таблица 2 – Варианты расчета ротора

Вариант	$\Delta\sigma_{02}$ , МПа	$k$	$\dot{\epsilon}_{ij}^{max} / \dot{\epsilon}_{ij}^{min}$
1	20	0,071	1,153
2	10	0,036	1,075
3	5	0,018	1,037

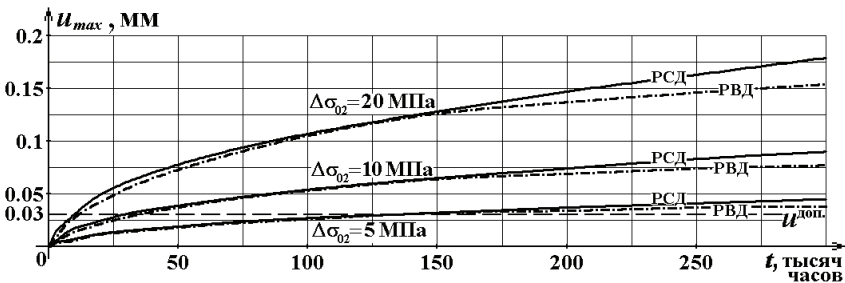


Рисунок 3 – Расчетные значения максимальных прогибов РСД и РВД турбины К-300-240

Изменение максимального прогиба ротора со временем приводится на рис. 3. Сплошными линиями обозначается прогиб рассматриваемого ротора в районе расточки между первой и второй ступенью.

Даже при незначительной окружной неравномерности ползучести, вызванной различием пределов текучести  $\Delta\sigma_{02} = 5$  МПа, прогиб ротора за 150 тыс. часов эксплуатации турбины может достичь 0,032 мм и превысить допустимое значение (обозначенное на графиках пунктирной горизонтальной

линией  $u^{\text{доп}}$ ). При большей окружной неравномерности недопустимый прогиб достигается раньше.

Здесь же штрихпунктирными линиями приводятся максимальные прогибы РВД этой турбины на расточке в районе регулирующей ступени для рассматриваемых реальных значений окружной неравномерности ползучести материала, выполненные по предложенной в работе [9] расчетной схеме. Прогибы РВД развиваются несколько медленнее, чем искривления РСД, но через 150 - 200 тыс. часов также превышают допустимые значения.

Следует отметить, что результаты, полученные с предполагаемыми [9] ( $\Delta\sigma_{02} = 6, 14, 28$  МПа) и реальными ( $\Delta\sigma_{02} = 5, 10, 20$  МПа) значениями окружной неравномерности ползучести материала качественно совпадают; при этом стрела прогрессирующего искривления ротора пропорциональна величине окружной неравномерности ползучести материала.

**Сравнение результатов численного анализа и обследований прогибов роторов.** На рис. 4 сплошными линиями приводятся результаты выполненных ранее численных исследований прогибов РСД турбины Т-250/300-240 с предполагаемыми значениями окружной неравномерности ползучести материала. Они соответствуют пределам текучести, отличающимся на противоположных сторонах ротора на 6, 14, 28 МПа [10]. За 150 тыс. часов работы турбоагрегата прогибы ротора достигают 0,07 мм (при  $\Delta\sigma_{02} = 6$  МПа), 0,18 мм (при  $\Delta\sigma_{02} = 14$  МПа) и 0,35 мм (при  $\Delta\sigma_{02} = 28$  МПа) и превосходят допустимое значение.

На этом же рисунке точками показаны значения прогибов РСД-1 (данные обследований во время ремонтов) эксплуатировавшихся турбин Т-250/300-240 ТЭЦ-22 Мосэнерго [2]. Значения прогибов роторов после их длительной эксплуатации соответствуют расчетным значениям при окружной неравномерности предела текучести 6 – 14 МПа.

Таким образом, проведенные численные исследования искривления РСД и РВД паровых турбин на основе экспериментальных данных об окружной неоднородности механических свойств роторных сталей показали, что неравномерность ползучести стали в окружном направлении в зоне высоких температур вносит существенный вклад в неосесимметричное деформирование эксплуатирующихся роторов паровых турбин.

Для однотипных роторов полученные расчетные значения прогибов с учетом окружной неоднородности свойств ползучести согласуются с результатами обследований работавших роторов.

Отметим, что устранение указанных прогибов роторов возможно с помощью термообработки в заводских условиях, а используемая в работе расчетная методика может использоваться при этом для оценки ползучести ротора от собственного веса при отпуске.

Для продления срока эксплуатации погнутых роторов в [1] было предложено снизить температуру металла ротора путем уменьшения температуры острого пара или внедрением системы принудительного охлаждения их вы-

сокотемпературных элементов. Созданными НПО ЦКТИ системами оснащены свыше 40 турбоагрегатов мощностью от 200 до 800 МВт как в странах СНГ, так и за рубежом. Опыт их эксплуатации показывает, что таким образом удастся снизить темп развития прогиба в 4 - 5 раз [1]. Как указывается в [11], остановить дальнейший рост прогиба роторов во время эксплуатации можно с помощью установки балансировочных грузов на основе применения специальной опытно-расчетной методики ЛМЗ [11]. Положительные результаты достигаются при этом для роторов со сроком эксплуатации более 10 лет (после двух капремонтов). Однако, имеются экспериментальные и расчетные исследования, показывающие, что установкой даже значительных по массе балансировочных грузов невозможно остановить процесс неравномерной ползучести роторов, потому что роторы ЦВД и ЦСД мощных паровых турбин работают далеко за первой критической частотой вращения (1450 – 1600 об./мин.), и балансировочные грузы, установленные по первой собственной форме, не могут вызвать ни больших вибросмещений, ни существенных напряжений в роторе [1].

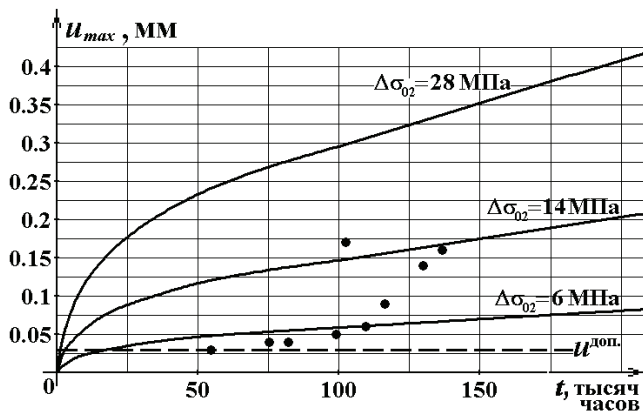


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные значения прогибов РСД-1 турбины Т-250/300-240

Обобщая результаты расчетных и натурных исследований прогибов роторов, можно отметить следующее. Важное значение при изготовлении высокотемпературных роторов паровых турбин имеют вопросы контроля и обеспечения однородности физико-механических свойств их материала в окружном направлении. Этим можно добиваться уменьшения или практического исключения значительных термических прогибов длительно эксплуатирующихся роторов. По разработанной методике [8] могут прогнозироваться указанные прогибы роторов. Методика может быть также применена для нормирования уровня неоднородности свойств материала в зависимости от вида роторов и условий их эксплуатации.

**Список литературы:** 1. Проблема прогибов роторов паровых турбин и пути ее решения / *И.А. Ковалев, Л.А. Хоменок, Д.В. Елькин* // Теплоэнергетика. – № 2. – 2003. – С. 64-67. 2. Повышение технического уровня паровых турбин при внедрении систем принудительного парового охлаждения роторов / *В.С. Шаргородский, Л.А. Хоменок, С.Ш. Розенберг, А.Н. Коваленко* // Электрические станции. – 1999. – № 1. – С. 30-36. 3. Повышение ремонтпригодности, ресурса и надежности РСД мощных паровых турбин / *В.С. Шаргородский, Л.А. Хоменок, С.Ш. Розенберг, И.С. Козлов, А.Н. Ремезов* // Труды ЦКТИ. – 2002. – Вып. 283. – С. 151-158. 4. Повышение надежности и продление срока службы роторов ВД и СД турбин К–210–130 ЛМЗ на ТЭЦ Болгарии / *Л.А. Хоменок, В.С. Шаргородский, С.Ш. Розенберг* и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 63-66. 5. Приближенный анализ искривления вращающихся валов, обусловленного ползучестью / *В.И. Розенблюм* // Сб. ЛГУ. – 1971. – № 8. – С. 30-36. 6. Опыт определения остаточного ресурса высокотемпературных роторов паровых турбин: в 2 т. Т. 2. Продление ресурса ТЭС / *Дж. Болтон*. – М.: ВТИ, 1994. – С. 1-15. 7. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: руководящие указания. Ч. 1 / ЦКТИ. – Ленинград, 1966. – Вып. 16. – 220 с. 8. Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах / *Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Т. В. Протасова* // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. праць. Тем. випуск: Динаміка і міцність машин. – Х.: 2004. – № 20. – С. 151-160. 9. Искривление роторов турбомашин при окружной неоднородности свойств материала / *Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Т.В. Протасова* // Надежность и долговечность машин и сооружений: международный научно-технический сборник. – К.: Институт проблем прочности НАН Украины, 2008. – № 31 – С. 170-177. 10. Оценка прогрессирующего искривления высокотемпературных роторов при окружной неоднородности их свойств / *Н. Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин, Т.В. Протасова* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9 (25). – С. 73-77. 11. Опыт восстановления работоспособности роторов с остаточным погибом / *М.И. Шкляр, Н.П. Суханов, Н.С. Лебедько, Н.П. Егоров, А.И. Куменко* // Электрические станции. – 2005. – № 10. – С. 67-69.

*Поступила в редколлегию 06.06.2012*