

УДК 621.165 : 539.4

Н.И. МАМОНТОВ*, член-корреспондент Инженерной академии наук Украины,
Т.Н. ПУГАЧЕВА**

**Харьковское ЦКБ «Энергопрогресс» филиал ООО «Котлотурбопром»,
г. Харьков, Украина*

***Украинская инженерно – педагогическая академия,
кафедра теплоэнергетических установок ТЭС и АЭС, г. Харьков, Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ТУРБОАГРЕГАТА К-200-130 СТ. № 9 ЛУГАНСКОЙ ТЭС

Розглянуті питання, пов'язані з визначенням залишкового ресурсу і продовженням терміну служби ротора і корпусу циліндра середнього тиску турбіни К-200-130. Приведені дані по експлуатації турбіни, по обстеженню елементів ротора і корпусу циліндра середнього тиску. Приведені і запаси тривалої міцності в найбільш навантажених зонах РСТ, в стінці корпусу ЦСТ при різних режимах експлуатації.

The issues has been treated connected of determination of residual resource and extension of term of service of rotor and frame of cylinder of middle pressure of turbine of K-200-130. Information is resulted on exploitation of turbine, on the inspection of elements of rotor and frame of cylinder of middle pressure. Tensions and margins of the long safety are resulted in the most loaded of rotor, in the wall of frame of cylinder of middle pressure at the different condition of exploitation.

Для определения остаточного ресурса и продления срока службы проведено диагностирование и выполнены расчеты термо-напряженного состояния ротора и корпуса среднего давления К-200-130 ст. № 9 Луганской ТЭС. Данная работа выполнена в соответствии с действующими нормативными документами для турбин тепловых электростанций, работающих на органическом топливе [1, 2]. Нарботка цилиндра среднего давления составила 275 тыс. часов, а ротор среднего давления был заменён на демонтированный с турбины К-200-130 ст. № 9 Кураховской ГРЭС с наработкой 194 тыс. часов.

Ротор высокого давления и цилиндр высокого давления имеют наработку 66000 часов, поэтому в объёмы работ по диагностическому обследованию для продления срока службы, не включались.

Паровые турбины типа К-200-130, К-200-130-3 ЛМЗ были спроектированы на температуру свежего пара и пара после промпрегрева 565 °С при гарантированном сроке службы высокотемпературных деталей ($\bar{\Theta}_{мет} > 450$ °С) 100 тыс. часов. Однако, из-за трудностей, возникших при доводке до проектных показателей котлоагрегатов, они фактически эксплуатировались до 1970 г. при температуре пара 540 ÷ 565 °С, а начиная с 1971 г. при температуре 530 ÷ 545 °С.

Это обстоятельство дало возможность в настоящее время установить парковый ресурс основных элементов турбин при дальнейшей эксплуатации при пониженной температуре пара, равный 220 тысяч часов [2].

Согласно [1, 2] допускается периодически продлевать ресурс корпусных элементов и роторов после наработки 100 тыс. часов на срок не более $\Delta t = 50$ тыс. часов после проведения обследования и ремонта деталей в необходимом объеме и выполнении всех требований по контролю металла.

Обследование включает в себя следующие этапы:

- обнаружение трещин, дефектов, коррозионных и эрозионных повреждений;
- замеры остаточных деформаций ротора и пароперепускных труб, прогибов диафрагм, биения роторов и коробления цилиндров и обойм;
- контроль твердости основного металла и металла сварных швов высокотемпературных деталей;
- контроль состояния металла на основании исследования вырезок из корпусов клапанов и цилиндров.

На основании полученных данных обследования принято решение об устранении недопустимых дефектов, погибов и коробления.

Имеется большой опыт замеров остаточных деформаций $\varepsilon_{\text{ост}}$ на поверхности осевого канала роторов высокого и среднего давления с помощью электронного нутромера ИВД-3. Обработка результатов измерений производилась по специальной программе на персональном компьютере. Полученная информация используется для оценки состояния расточки, используя зависимость

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ост}} \cdot \frac{t + \Delta t}{t} < [\varepsilon],$$

где $[\varepsilon]$ – допускаемое значение.

По данным [3] при температурах металла выше 450 °С и длительном сроке эксплуатации возможно появление трещин в тепловых канавках роторов и корпусных элементах. В шести тепловых канавках переднего концевого уплотнения РСД турбины К-200-130, отработавшего 126 тыс. часов и накопившего 507 циклов «пуск – останов», были выявлены трещины глубиной до 1,8 мм, что объясняется ухудшенными механическими характеристиками материала [2]. Для роторов с пониженной длительной пластичностью $\delta_p^c = 4 \div 10 \%$ при рабочей температуре следует ожидать появления трещин в тепловых канавках после 1250 пусков.

Для определения дополнительного срока эксплуатации наиболее напряженных деталей турбины, таких как ротора ВД и СД, необходимо выполнить оценку расчетного остаточного ресурса, который зависит от накопленной повреждаемости металла в ободах дисков первых ступеней из-за исчерпания длительной прочности и малоциклового усталости.

Расчеты остаточного ресурса роторов выполнялись с помощью программ для ПЭВМ, составленных на базе метода конечных элементов. Для расчетов используются полученные на образцах, вырезанных из поковок роторов, кривые ползучести роторной стали 25Х1М1ФА для различных температур и напряжений на базе испытаний до 160 тыс. часов. При температурах выше 525 °С учитывается увеличение предела длительной прочности материала обода на 10 % по сравнению с материалом в центральной части поковки.

Для оценки индивидуального ресурса можно использовать имеющиеся экспериментальные зависимости пределов ползучести и длительной прочности от исходных значений пределов текучести и прочности поковки при комнатной температуре. Это дает возможность уточнить величину остаточного ресурса, используя критерии по накопленной повреждаемости материала и по деформационной способности в условиях ползучести. В последнем случае коэффициент запаса по долговечности оценивается по накопленной деформационной повреждаемости

материала при ползучести и представляет собой отношение времени до разрушения (при достижении предельной повреждаемости) к времени эксплуатации.

По данным ЛМЗ расчетный ресурс турбины К-200-130 при температуре пара 540 °С и числе пусков из неостывшего состояния не более 20 в год составляет 200 тыс. часов, если в галтелях пазов под Т-образные хвостовики рабочих лопаток РСД отсутствуют дефекты типа трещин длиной свыше 0,5 мм. ЛМЗ было выполнено обследование ободов РСД турбины после 170 тыс. часов эксплуатации. Трещин и дефектов не было обнаружено [4].

Данные по эксплуатации турбины

Турбина К-200-130 ст. № 9 зав. № 732 производства ЛМЗ пущена в эксплуатацию в 1962 г. По данным Луганской ТЭС турбина отработала с момента пуска до начала ремонта 2007 г. 275031 часов.

По данным ТЭС для расчетной оценки остаточного ресурса принимаем следующие значения параметров пара:

- среднегодовая температура свежего пара $T_0 = 545$ °С;
- давление $P_0 = 130$ кгс/см²;
- средняя температура пара после промперегрева $T_{\text{пп}} = 545$ °С;
- давление $P_{\text{пп}} = 22$ кгс/см².

За время эксплуатации число пусков турбины составило 1182. В период с 1962 по 1995 гг. число пусков равно 624 или 20 пусков в год, что соответствует базовому режиму работы турбоагрегата. С 1996 по 2007 гг. число пусков равно 558 или в среднем 45 пусков в год. Такой режим работы турбоагрегата можно охарактеризовать как маневренный.

В 1993 г. проведена замена стопорных клапанов, наработка установленных клапанов составляла 43000 ч. В 2003 г. произведена замена корпуса ЦВД совместно с регулирующими клапанами и проточной частью (установлен с блока ст. № 8), наработка на момент установки 51000 ч.

В период капитального ремонта 2007 г. в ходе осмотра и дефектации РСД, были обнаружены различные дефекты, в том числе и недопустимые для дальнейшей эксплуатации. Такие как, сквозная трещина на щёчке диска 13-ой ступени со стороны входа пара между отверстиями под заклёпки замковой лопатки и трещина от верхнего отверстия, выходящего на наружную образующую диска и внутреннюю поверхность паза на величину 3 мм. В настоящее время, отсутствуют апробированные методики по устранению сквозных трещин заклёпочных отверстий. Поэтому было принято решение о замене РСД ТГ № 9, заводской номер ротора 42919-1; 26341; 66608, наработка 229895 часов на ротор ТГ №3 Кураховской ТЭС, заводской номер 68732, наработка 194890, число пусков 860.

Данные по обследованию элементов ротора и корпуса цилиндра среднего давления

По данным визуального и ультразвукового контроля поверхности осевого канала РСД недопустимых дефектов не обнаружено. Бой ротора составляет 0,15 мм, что является допустимым.

В период капитального ремонта были произведены визуальный контроль и магнитно-порошковая дефектоскопия наружной поверхности ротора. В результате контроля были обнаружены трещины по диску 13 ступени глубиной до 5 мм, трещины

в тепловых канавках, а также в расточках между концевыми уплотнениями. Трещины от 2 до 5 мм были устранены путем проточки.

На входных кромках рабочих лопаток 20–22 ступеней имеются незначительные повреждения, входные кромки рабочих лопаток на ступенях 17–19, 23 находятся в удовлетворительном состоянии.

После произведённых ремонтных работ по устранению дефектов, восстановлению лопаточного аппарата 13–16 ступени, ленточного бандажа, восстановлению надбандажных усов 13–21 ступени РСД был проведён контроль, в результате которого дефектов не обнаружено.

По данным визуального контроля и магнитно-порошковой дефектоскопии на внутренних поверхностях корпуса среднего давления обнаружены многочисленные дефекты в виде трещин, промоин и других несплошностей, которые были выбраны, заварены и зачищены, проведен визуальный контроль и магнитно-порошковая дефектоскопия

Для заварки выборок на корпусе из стали 15X1M1ФЛ без последующей термической обработки применяются аустенитные электроды. После заварки дефектов, была произведена механическая обработка абразивным инструментом, для восстановления геометрии корпуса и был выполнен визуальный контроль, который дал положительный результат.

На всех диафрагмах усы надбандажных уплотнений развальцованы или стёрты заподлицо с козырьком.

На выходных кромках направляющих лопаток соплового аппарата 23 ступени обнаружены многочисленные забоины. На 16, 17 и 20 диафрагмах оборван крепёж шпонок. Крепёж высверлен и заменён на новый. Прогиб диафрагм 14 и 15 ступеней составляет 3,4 и 4,1 мм, соответственно.

Твердость основного металла крышки (вне зон наплавки от предыдущих ремонтов) составляет $135 \div 160$ НВ. Твердость нижней половины цилиндра – $179 \div 189$ НВ. Допускаемое нижнее нормативное значение по [2] равно 145 НВ. Поскольку зоны корпуса с твердостью 135 НВ носят локальный характер, можно считать, что твердость металла цилиндра соответствует нормам для стали 15X1M1ФЛ.

Твердость шпилек горизонтального разъема составляет $243 \div 277$ НВ, что отвечает нормативным требованиям. Шпилька № 18 по правой стороне замена на новую. УЗД шпилек дала положительные результаты.

Механические свойства удовлетворительные. Бейнитная структура металла не претерпела изменений, таким образом, растрескивание на поверхности корпусов ЦСД вызвано термическими напряжениями, возникающими при быстрых пусках и остановах турбины.

Расчетная оценка остаточного ресурса ротора среднего давления

В соответствии с методикой, согласованной с заводом – изготовителем турбины АО ЛМЗ, определяются напряжения, деформации, запасы длительной прочности и повреждаемости металла ротора среднего давления. Расчеты напряжений и запасов прочности выполнены по программе на ПЭВМ для решения осесимметричной задачи с учетом ползучести материала методом конечных элементов, используя программный комплекс ANSYS.

Для уточненной оценки напряженного состояния используется теория пластического течения в условиях ползучести, основанная на данных по испытанию образцов при длительном нагружении в течение 160 тыс. часов.

Ротор эксплуатировался на Кураховской ТЭС на блоке ст. № 3 с 1974 по 2000 г. Нарботка составила 194890 часов, количество пусков – 860.

Температурные поля в режиме номинальной нагрузки определялись при температурах пара промперегрева 545 °С. Ротор нагружен центробежными силами, усилиями от центробежных сил лопаток, и имеет неравномерное температурное поле.

При определении запасов длительной прочности ободов дисков использовались конкретные свойства поковок из стали Р2М. При температурах металла 525 ÷ 550 °С предел длительной прочности обода на 10 % выше, чем прочность металла бочки ротора. При температурах ниже 500 °С длительная прочность обода и бочки одинакова. В диапазоне 500 ÷ 525 °С закон изменения прочности стали – линейный.

Результаты расчета начальных упругих напряжений ($t = 0$) и напряжений через 195 тыс. час и 220 тыс. час эксплуатации, а также запасы длительной прочности в наиболее нагруженных зонах ротора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Напряжения и запасы длительной прочности в наиболее нагруженных зонах РСД (на ресурс 195000 и 220000 часов)

Номер точки	Вид напряжения σ_p	Напряжения, кгс/мм ²			Запасы длительной прочности		
		$t = 0$	$t = 195000$ ч	$t = 220000$ ч	фактические		нормативные
					$t = 195000$ ч	$t = 220000$ ч	
1	σ_i	11,8	8,7	8,7	1,79	1,77	1,5
2	σ_1	7,8	6,9	6,9	1,87	1,84	1,35
3	σ_1	10,0	9,1	9,1	1,91	1,89	1,35
4	$\sigma_{\text{мизес}}$	39,9	15,4	15,3	1,10	1,10	1,1
5	$\sigma_{\text{мизес}}$	39,6	15,3	15,3	1,15	1,14	1,1
6	σ_r	14,2	9,8	9,8	1,74	1,72	1,65
7	σ_r	13,8	9,9	9,9	1,77	1,75	1,65
8	$\sigma_{\text{мизес}}$	41,6	16,4	16,3	1,11	1,11	1,1
9	$\sigma_{\text{мизес}}$	42,4	16,4	16,3	1,11	1,11	1,1
10	σ_r	14,1	10,5	10,5	1,74	1,72	1,65
11	σ_r	14,2	10,5	10,5	1,74	1,72	1,65

Из данных таблицы 1 видно, что рассчитанные запасы по длительной прочности на ресурс 220 тыс. часов удовлетворяют нормативным значениям. Таким образом, при дальнейшей эксплуатации РСД с температурой пара после промперегрева 545 °С срок службы 220 тыс. часов по критерию длительной прочности обеспечен.

Для ротора турбины ст. № 9 Луганской ТЭС ожидаемая расчетная деформация при суммарной наработке 220000 ч равна 0,38 %, что меньше допускаемого значения 1 %.

Рассмотрим циклическую прочность ротора при пусках из холодного состояния по заводской инструкции. Анализ циклической прочности всех галтелей с учетом температуры металла показал, что наименьшее число пусков до появления трещин определяется галтелью диска 13 ступени с температурой 528 °С и напряжениями 39,9 кгс/мм². Число пусков до появления трещин по экспериментальной кривой термической усталости стали Р2М составляет $N_p = 16000$. Принимая запас по числу пусков 5, допускаемое число нагружений будет равно $[N] = 3200$, что выше нормативного значения 2000 [2] (для $T_{\text{min}} = 530 \text{ °C} = \text{const}$).

При пусках к напряжениям от действия центробежных сил ротора и лопаток добавляются термические напряжения, величина которых зависит от режима пуска. Напряженное состояние при пусках определялось из условия, что они проводились в соответствии с заводской инструкцией.

Повреждения на дне тепловых канавок возникают в основном на нестационарных режимах от переменных термических напряжений. Согласно выполненным расчетам, наибольшее повреждение достигается в цикле «Пуск из холодного состояния (ПХС) – стационарный режим». В оценке возможного накопленного повреждения принято, что все пуски соответствуют наиболее неблагоприятному случаю.

При проведении расчета термонапряженного состояния ротора были рассмотрены две модели ротора – с тепловыми канавками и без них.

Для обеих моделей были определены температурные поля в стационарном режиме и при пуске из холодного состояния в момент времени, соответствующий максимальной разности температур между наружной и внутренней поверхностями ротора и соответствующих температурных напряжений.

Число циклов нагружения до появления трещин определялось по экспериментальным кривым малоциклового. С учетом коэффициента запаса 5 допускаемое число циклов составляет $[N] = 2300$.

За время эксплуатации турбины было проведено 860 пусков, что меньше допускаемого числа пусков.

Расчетная оценка остаточного ресурса корпуса цилиндра среднего давления

Стенка корпуса нагружена внутренним давлением, осевыми усилиями от перепада давлений на направляющие лопатки 13 ступени и обоймы и термическими напряжениями от неравномерного температурного поля. При решении упругой задачи влияние фланцев горизонтального разъема на напряжения в стенке не учитывается. При расчете на длительную прочность задается стационарное температурное поле стенки при температуре перегретого пара 545 °С. Предполагается, что напряжения во фланцах малы, так как жесткость их намного выше жесткости тонких торообразных стенок. Учитывая, что температура фланцев меньше, чем стенок, фланцы не будут иметь значительных осевых перемещений из-за ползучести материала и ограничивают возможность перемещения в осевом направлении торцевых стенок верхней и нижней половин корпуса. Поэтому расчет напряжений в стенках при длительной эксплуатации выполняется при условии отсутствия осевых перемещений на краях, вызванных ползучестью материала стенок. Следовательно, рассматривается задача о релаксации начальных напряжений в стенках, которая решается с помощью программы для ПЭВМ.

При нестационарных режимах наибольшие суммарные напряжения возникают при пуске из холодного состояния в момент выхода на номинальную мощность. Температура пара в этот момент также достигает максимального значения 545 °С.

Результаты расчета упругих суммарных напряжений и напряжений с учетом релаксации в течение 300 тыс. часов эксплуатации для этих зон корпуса представлены в таблице 2.

Таблица 2. Напряжения в стенке корпуса ЦСД при различных режимах эксплуатации, кгс/мм²

Номер зоны	Пуск из холодного состояния	Стационарный режим		
		$t = 0$	$t = 100000$ ч	$t = 300000$ ч
1	15,0	9,5	2,0	1,4
2	-7,3	-6,4	-2,1	-1,5
3	-5,6	7,6	2,5	2,0
4	11,0	11,6	3,9	3,1
5	-9,2	-7,9	-3,4	-2,9
6	18,4	6,8	5,8	5,1

Расчетные и минимальные нормативные запасы длительной прочности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Запасы длительной прочности в стенке корпуса ЦСД при температуре пара 545 °С

Номер зоны	Нормативные значения	Расчетные значения	
		$t = 100000$ ч	$t = 300000$ ч
1	1,5	5,1	5,6
2	1,5	6,2	5,2
3	1,5	4,0	3,9
4	1,5	2,9	2,8
5	1,5	3,9	3,8
6	1,35	2,9	2,8

Как видно из таблицы 3, запасы длительной прочности для корпуса ЦСД на ресурс 300 тыс. часов обеспечены.

Максимальные упругие напряжения на поверхности стенки составляют 15 кгс/мм², а с учетом возможной концентрации напряжений от дефектов $K_\sigma = 3$ достигают 45 кгс/мм², что по кривой термической усталости стали при температуре 545 °С соответствует 4000 пусков (с запасом по числу циклов 5). Следовательно, прочность корпуса ЦСД обеспечена на длительный срок службы. Так как напряжения во фланце меньше чем в стенке, то запасы прочности во фланце будут выше.

Выводы

Выполнен анализ комплексного обследования состояния металла ротора и корпуса среднего давления турбины К-200-130 ст. № 9 Луганской ТЭС после наработки 275031 часов. Приведены результаты расчетов на прочность ротора и корпуса среднего давления. По результатам данных обследований и расчетной оценки ресурса сделан вывод о возможности дальнейшей эксплуатации ротора и корпуса среднего давления турбины на 25 тыс. часов с суммарной наработкой 220 тыс. часов до следующего

капитального ремонта на срок не более 5 лет, при работе турбины с температурой свежего пара и пара после промпрегрева 545 °С.

Обследование технического состояния корпуса не выявило серьезных дефектов, а выполненные расчеты корпуса ЦСД показали, что запасы по длительной прочности на 25 тыс. часов обеспечены.

По результатам обследования регулирующих и защитных клапанов ЦСД они также могут быть допущены к дальнейшей эксплуатации.

В целом ресурс основных элементов турбины не исчерпывается 300 тысячами часов и 2300 пусками и может продлеваться исходя из фактического состояния металла и последующих расчетов термо-напряженного состояния.

Литература

1. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей. Правила. ГКД 34.20.507-2003. – Киев: ОРИФРЭ, 2003.

2. Контроль металла и продление срока эксплуатации элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. СОУ-Н-МПЕ – 40.1.17.401.2004. – Киев: ОРИФРЭ, 2004.

3. *Израилев Ю.Л.* О живучести ответственных элементов турбин ТЭС // Энергетика. – 1989. – № 11.

4. *Балина В.С.* О ресурсе высокотемпературных роторов паровых турбин / В.С. Балина, Е.Д. Консон, С.А. Тихомиров // Теплоэнергетика. – 1988. – № 7.

© Мамонтов Н.И., Пугачева Т.Н., 2008