

УДК 621.165.58

Е.В. ГЕОРГИЕВСКАЯ, канд. физ.-мат. наук; зав. лаб. прочности турбин ТЭС, АЭС и ГЭС, ОАО «НПО ЦКТИ», С-Петербург, Россия;

С.Н. ГАВРИЛОВ, канд. техн. наук; зав. отд. прочности и ресурса энергооборудования, ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ НАРАБОТКАХ, ЗНАЧИТЕЛЬНО ПРЕВЫШАЮЩИХ ПАРКОВЫЙ РЕСУРС

Рассмотрен опыт ОАО «НПО ЦКТИ», Россия, по оценке технического состояния и продлению срока службы паровых турбин, имеющих дефекты, препятствующие дальнейшей эксплуатации, при наработках, существенно превышающих парковый ресурс.

Ключевые слова: продление срока службы, турбина, парковый ресурс, дефект, трещина.

Введение

В настоящее время значительная часть эксплуатируемых на тепловых и атомных электростанциях паровых турбин отработала не только назначенный заводом-изготовителем срок службы, но и свой парковый ресурс [1], установленный с учетом опыта эксплуатации и рабочих параметров пара (см. табл.) и ограничивающий наработку и число пусков из холодного, горячего и неостывшего состояний.

Таблица

Значения паркового ресурса турбин в зависимости от параметров их эксплуатации, мощности и завода-изготовителя

Завод-изготовитель	Давление свежего пара, МПа	Мощность, МВт	Парковый ресурс турбин	
			тыс. ч	Количество пусков
ТМЗ	9 и менее	50 и менее	270	900
	13–24	50–250	220	600
ЛМЗ	9 и менее	100 и менее	270	900
	13–24	50–300	220	600
	24	500–1200	100	300
НПО Турбоатом	9 и менее	50 и менее	270	900
	13	160	200	600
	24	300	170	450
	24	500	100	300

Примечание: Парковый ресурс турбин, элементы которых работают в условиях ползучести, определяется наработкой или количеством пусков турбины; оба параметра действуют независимо.

Постановка задачи

Замена отработавших свой срок службы агрегатов на новые, современные и более эффективные, является лучшим решением проблемы исчерпания паркового ресурса, но это не всегда целесообразно по экономическим соображениям. Кроме того, опыт продления срока эксплуатации турбин, накопленный в ОАО «НПО ЦКТИ» за длительный период проведения работ по этой тематике, свидетельствует о том, что большинство обследуемых турбин не исчерпали своего физического ресурса, хотя их наработка значительно превышает парковый ресурс, а для некоторых уже превосходит

© Е.В. Георгиевская, С.Н. Гаврилов, 2013

эти параметры почти в два раза. Также следует учесть, что снижение температуры острого пара и пара после промперегрева относительно расчетных параметров работы турбин, вызванное необходимостью обеспечить работоспособность котлов, также способствует продлению реального срока службы турбоагрегатов за счет уменьшения остаточных деформаций ползучести на поверхности его осевого канала роторов и увеличения запасов длительной прочности в наиболее горячих зонах турбины.

Дальнейшая эксплуатация отработавших свой парковый ресурс турбин может неоднократно поэтапно продлеваться на ограниченный период [2] при условии положительных результатов расширенного контроля технического состояния турбины, проводимого в периоды ремонтов, а также расчетного обоснования возможности и сроков продления дальнейшей эксплуатации. Полный комплекс работ включает следующие этапы:

- анализ технической документации станции по режимам эксплуатации турбины, заменам и восстановительным ремонтам основных элементов, результатам контроля металла основных элементов в течение всего срока их эксплуатации;

- разработка и согласование с техническим руководителем организации-владельца турбоагрегата индивидуальной программы работ по расширенному диагностическому обследованию турбины;

- проведение расширенного контроля технического состояния основных узлов турбины по разработанной индивидуальной программе, включающего дефектоскопическое обследование, оценку деформационного состояния высокотемпературных элементов турбины, исследование структуры и свойств металла основных элементов по репликам и образцам, специальные исследования и эксперименты в случае необходимости;

- анализ данных расширенного диагностического обследования;

- разработка рекомендаций по устранению обнаруженных во время ремонта дефектов элементов турбины, препятствующих дальнейшей эксплуатации.

- расчётная оценка напряжённого состояния и остаточного ресурса роторов и корпусных деталей с учётом фактических данных о свойствах металла с учетом ползучести материала и режимах эксплуатации турбины;

- выполнение расчетов на хрупкую прочность, длительную прочность, мало- и многоцикловую усталость;

- выдача заключения о возможности, условиях и сроке продления эксплуатации турбины и рекомендаций по условиям дальнейшей эксплуатации.

Дальнейшая надежная и безопасная эксплуатация турбин допустима при выполнении в случае необходимости ремонтно-восстановительных работ и соблюдении рекомендаций по условиям их дальнейшей эксплуатации.

На стадии длительных наработок наиболее актуальными становятся проблемы, связанные со старением металла, деградацией его свойств под действием рабочих напряжений и высоких температур, накоплением усталостных деформаций и деформаций ползучести. Кроме того, начинают сказываться неоднократно проведенные ремонты: выборки металла, трещины и округлые дефекты, места ремонтных заварок, наведенные сварочными работами остаточные напряжения и пр.

Материалы исследования и опыт проведения работ

Особенно ценным и интересным является опыт проведения работ по продлению срока службы однотипных турбин, установленных на одной станции, на протяжении длительного периода времени. Такие работы позволяют выявлять особенности этого

типа турбин, влияющие на ресурс, следить за возникновением и развитием дефектов, проводить расчеты по обоснованию возможности продления основных ресурсопределяющих узлов с учетом имеющихся дефектов и проведенных ремонтных работ, активно участвовать в разработке технических решений по устранению выявленных недостатков и обеспечению надежной эксплуатации турбин, а также следить за эффективностью выполняемых мероприятий.

Такой уникальный опыт ОАО «НПО ЦКТИ» имеет в отношении четырех турбин ВПТ-50-130-4, изготовленных на Уральском турбомашиностроительном заводе (УТМЗ), Россия, в 1959–1961 годах и пущенных в эксплуатацию в 1960–1962 годах. Турбины эксплуатируются на одной из зарубежных ТЭС, со специалистами которой ОАО «НПО ЦКТИ» сотрудничает на протяжении уже более 20 лет.

Каждые 4–5 лет проводится капитальный ремонт одной из турбин, во время которого выполняется расширенное диагностическое обследование основных элементов турбин. Полученные за длительный период результаты такого обследования сопоставляются между собой и с результатами расчетных обоснований, что позволяет своевременно проводить необходимые восстановительные работы и предотвращать возможные аварийные ситуации.

В настоящее время наработка этих турбин превышает 400 000 часов, а температура свежего пара поэтапно снижена до 530 °С. Относительное время работы при максимально допускаемой температуре свежего пара (560 °С), при которой происходит наибольшая выработка ресурса, составляет (30–40) % от общей наработки турбин. Турбины работают в базовом режиме, имеют в среднем 9–12 пусков в год.

Снижение температуры свежего пара с 560 °С до 530 °С благотворно сказалось на ресурсных характеристиках. Однако оно приводит к смещению зоны фазового перехода сухого пара во влажный и увеличению влажности пара в последних ступенях цилиндра низкого давления (ЦНД). При высоких статических напряжениях и переменных термических нагрузках это ускоряет развитие трещин на поверхности насадных дисков, что и наблюдалось на всех осматриваемых турбинах: начиная с 1996 года, обнаружено интенсивное коррозионное растрескивание насадных дисков 21 и 22 ступеней в зоне разгрузочных отверстий, продольного шпоночного паза, заклепочных соединений, ступичной части и полотна диска. Контроль шпоночных пазов проводился поверхностными дефектоскопическими методами после снятия насадных дисков.

Примеры обнаруженных дефектов приведены на рисунках 1, 2, 5.

На рисунке 1 показаны повреждения, возникшие на полотне диска 21 ступени со стороны входа пара после наработки ~235 тыс. часов. Трещины развились за межремонтный период в четыре года. Трещины с максимальной глубиной до 8 мм появились на кромках разгрузочных отверстий, где действуют наибольшие напряжения от центробежных сил, и в зоне между отверстиями. Диски с такими трещинами, выходящими на обод с отверстиями под заклепки для крепления рабочих лопаток с вильчатыми хвостовиками, ремонту не подлежат [3], поэтому полотно диска подлежит замене. На ограниченный период до замены диска эксплуатация турбины была разрешена со срезанным полотном.

Однако не всегда наличие трещин приводит к таким радикальным решениям. В практике ОАО «НПО ЦКТИ» имеются и другие решения.

Например, во время капитального ремонта одной из рассматриваемых турбин были обнаружены множественные неглубокие, глубиной 1–3 мм, трещины на полотне и ободе насадного диска 23 ступени. Было принято техническое решение о проведении

восстановительного ремонта, заключающегося в снятии слоя поврежденного металла с целью ликвидации обнаруженных коррозионных трещин (см. рис. 2).

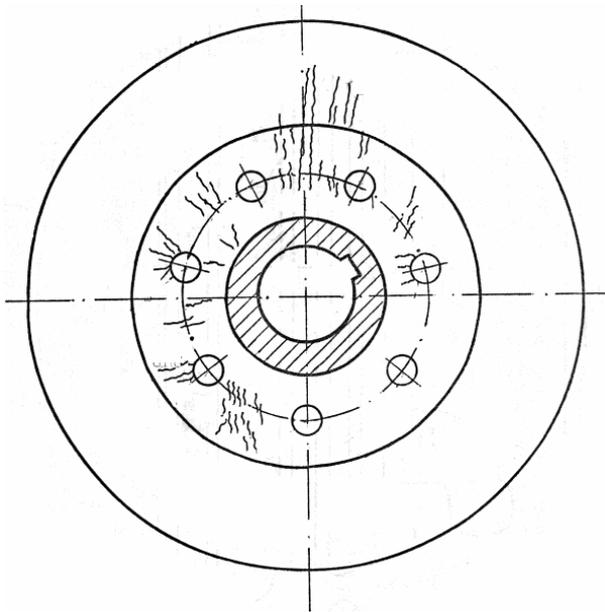


Рис. 1 – Расположение трещин на диске 21-й ступени ВПТ-50-130-4

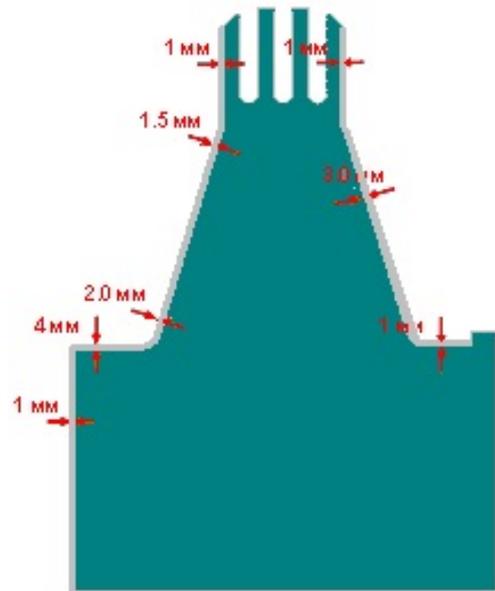


Рис. 2 – Схема обработки диска 23 ступени при восстановительном ремонте

В результате изменились геометрические размеры диска, в частности уменьшилась толщина диска, в том числе и в зоне вильчатого хвостовика. Возможность дальнейшей эксплуатации турбины с таким диском требовала подтверждения. Были выполнены соответствующие расчеты (см. рис. 3 и 4) с использованием пространственной конечно-элементной модели насадного диска, хвостового соединения лопатки и заклепок. Расчеты показали, что напряжения в отремонтированном диске не превышают допустимых, следовательно, допускается дальнейшая эксплуатация турбины.

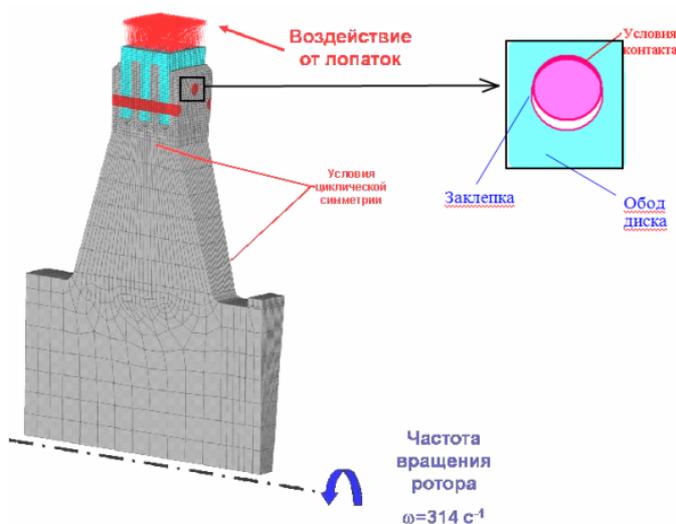


Рис. 3 – Конечно-элементная модель диска 23 ст. и схема граничных условий

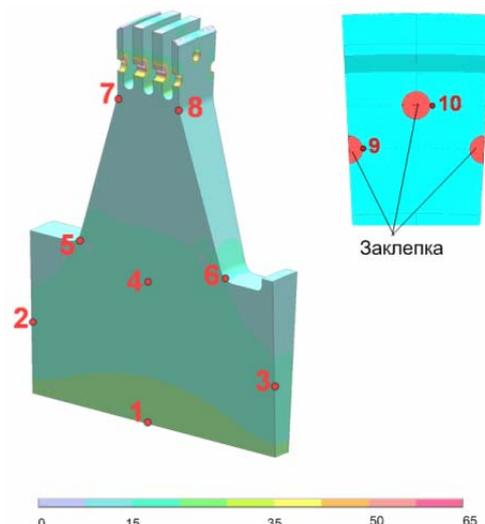


Рис. 4 – Распределение интенсивности напряжений в диске 23, кгс/мм²

Временная эксплуатация турбины с отремонтированным диском 23 ст. была разрешена на 25 тыс. час. до следующего капитального ремонта, что также было обосновано расчетным способом.

Обследование турбины по окончании этого периода показало, что новых трещин на поверхности насадного диска 23 ст. за последний межремонтный период не образовалось. Таким образом, принятое решение было правильным и позволило продлить эксплуатацию турбины.

Другой пример проведения необходимого ремонта для продления дальнейшей эксплуатации связан с наличием глубоких трещин (свыше 10 мм) на поверхности шпоночного паза насадных дисков 21 и 22 ступеней (см. рис. 5 и 6).

Следует отметить, что возникновение трещин в указанной зоне при длительных наработках является закономерным и вызвано наличием концентраторов напряжений в виде галтельных переходов малых радиусов в сочетании со значительными нагрузками, приходящимися на зону шпоночного паза в процессе эксплуатации.

Проблема обнаружения трещин в указанной зоне связана с тем, что проконтролировать поверхность продольного шпоночного паза насадных дисков 21 и 22 ступеней можно только при снятии дисков, что требует дополнительных временных и финансовых затрат.

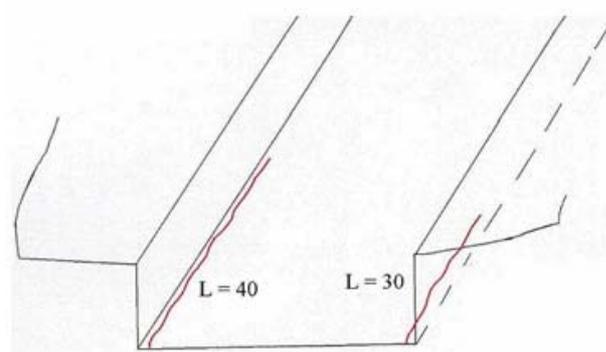


Рис. 5 – Пример обнаружения глубоких трещин на поверхности шпоночного паза 21 ст. (фотография и схема)

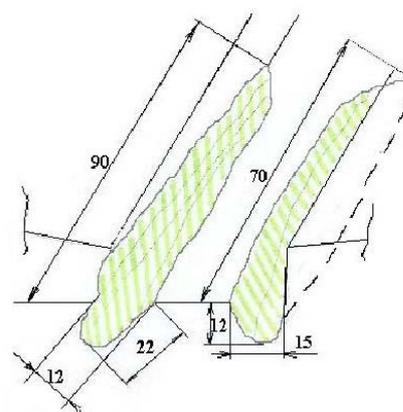


Рис. 6 – Пример проведения восстановительного ремонта выборка глубоких трещин на поверхности шпоночного паза 21 ст. (фотография и схема)

Однако, многолетний опыт обследования турбин ВПТ-50-130-4 показывает, что начало трещинообразования в шпоночных пазах можно определить по косвенным

признакам. Как правило, образованию трещин на поверхности продольного шпоночного паза предшествует интенсивное коррозионное растрескивание соответствующих насадных дисков на кромках разгрузочных отверстий и на полотне и ободке дисков, что легко обнаружить при внешнем визуальном контроле или дефектоскопическом обследовании поверхностными методами.

При составлении индивидуальной программы обследования каждой конкретной турбины эти факторы обязательно учитываются, чтобы не пропустить момент начала образования трещин на поверхности шпоночного паза и не допустить аварийной остановки агрегата в период продления срока службы. В то же время снятие дисков без особой необходимости также нежелательно, причем не только по экономическим соображениям.

Еще один вопрос, который следует решить при обнаружении трещины на поверхности шпоночного паза это возможность дальнейшей эксплуатации турбины после проведения восстановительного ремонта, который обычно заключается в выборке обнаруженных трещин (см. рис. 6), т.к. глубина выборок иногда превышает 20 мм. Также следует рассмотреть вопрос о возможности образования новых трещин в вершинах выборок.

Для решения этих вопросов специалисты ОАО «НПО ЦКТИ» проводят уточненный расчет напряженно-деформированного состояния диска с выборками (см. рис. 7) под действием эксплуатационных нагрузок с использованием современных расчетных пакетов, а также прогнозирование роста трещины с привлечением подходов линейной механики разрушений. По результатам проведенных расчетов даются рекомендации о целесообразности проведения ремонта и сроках дальнейшей эксплуатации в случае выборки трещины до следующего обследования.

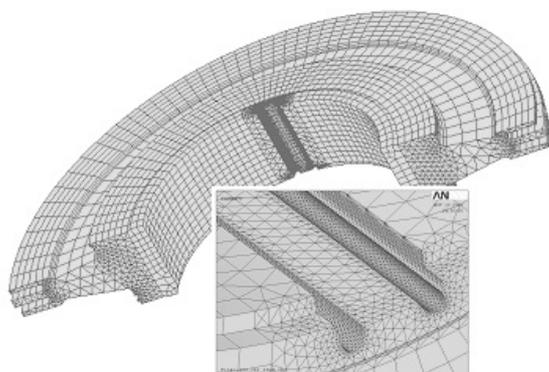


Рис. 7 – Расчетная схема диска 22 ступени с выборками в зоне продольного шпоночного паза

Приведенные выше примеры показывают, что при длительной эксплуатации в элементах турбины возникают различные повреждения, которые определяются ползучестью и изменением свойств материала под действием высоких температур, малоциклового и многоциклового усталостью, эрозийными процессами в проточной части, коррозионным растрескиванием под напряжением и т.д. При определении расчетного индивидуального ресурса турбины должно быть учтено влияние всех

факторов, определяющих условия ее дальнейшей эксплуатации, что позволит дать обоснованный прогноз по срокам продления ее безопасной и надежной эксплуатации.

Выводы

Рассмотренные примеры демонстрируют, что даже при очень длительных сроках эксплуатации турбин и имеющихся существенных повреждениях и дефектах вопрос о продлении срока службы не всегда однозначно решается только заменой оборудования или его составных частей. Во многих случаях дальнейшая эксплуатация может быть неоднократно поэтапно продлена, но такому продлению должен предшествовать комплекс работ, объединяющий тщательное обследование

технического состояния оборудования и расчетное обоснование возможности и условий продления.

Такая работа должна проводиться в тесном сотрудничестве специалистов организации-владельца оборудования, ответственных за его эксплуатацию, и экспертной организации, дающей заключение о возможности и условиях продления. Успех и качество этих работ во многом зависят от опыта участвующих в нем специалистов. К настоящему моменту времени специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» накоплен значительный опыт проведения работ по оценке технического состояния и продлению срока службы паровых турбин производства ЛМЗ, ТМЗ, ХТГЗ для тепловых и атомных электростанций, эксплуатируемых как в России, так и за рубежом. Кроме того, как указывалось выше, важным фактором является продолжительность работ на однотипном оборудовании данной станции, что позволяет наиболее полно и эффективно решать вопросы, связанные с продлением ресурса оборудования.

Список литературы: 1. СО 153-34.1-17.421-03. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: ОРГРЭС, 2003. – 76 с. 2. СО 153-34.17.440-03. Методические указания о порядке проведения работ по оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М.: ВТИ, 2003. – 153 с. 3. РД 34.30.507-92. Методические указания по предотвращению коррозионных повреждений дисков и лопаточного аппарата паровых турбин в зоне фазового перехода. – М.: ВТИ, 1992. – 110 с.

Поступила в редколлегию 15.01.13

УДК 621.165.58

Особенности продления срока службы паровых турбин при наработках, значительно превышающих парковый ресурс [Текст] / Е.В. Георгиевская, С.Н. Гаврилов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 107-113. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-774X.

Розглянутий досвід ПАО «Науково-виробниче об'єднання Центральний котлотурбінний інститут» (Росія) з оцінки технічного стану та продовження терміну служби парових турбін, що мають дефекти, перешкоджаючі подальшій експлуатації, під час наробіток, суттєво перевищуючих парковий ресурс.

Ключові слова: продовження терміну служби, турбіна, парковий ресурс, дефект, тріщина.

Considered the experience of JSC «NPO CKTI», Russia, about the assessment of the technical state and the extension of service life of steam turbines with defects that prevent the further operation, when their operating time significantly exceeds a park resource.

Keywords: life extension, turbine, park resources, defect, crack.