

УДК 621.165.62-192

О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, д-р техн. наук; доц. НТУУ «КПИ», г. Киев

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН, ОТРАБОТАВШИХ ПАРКОВЫЙ РЕСУРС

Запропоновано комплексний підхід до оцінки залишкового ресурсу високотемпературних елементів парових турбін великої потужності з визначенням пошкодженості з урахуванням ремонтних відновлюваних змін конструкції парової турбіни в період експлуатації та експериментальних досліджень властивостей металу після 220 тис. годин експлуатації. Наведено розрахункові та експериментальні данні подовженої міцності металу роторів середнього тиску та залишкові терміни експлуатації парових турбін енергоблоків № 11, 13–15, що працювали в різних експлуатаційних умовах.

The complex approach to an estimation of a residual resource of high-temperature elements of steam turbines of the big capacity with definition of damages taking into account repair regenerative changes of a design of the steam turbine in operation and experimental researches of features of metal after 220 thousand hours of operation is offered. Are resulted settlement and experimental data of long durability of metal of rotors of average pressure and residual terms of operation of steam turbines of power units № 11, 13–15 which worked in different operational conditions.

Оценка остаточного ресурса энергетического оборудования и продление срока эксплуатации паровых турбин по нормативным документам (НД) [1] включает неразрушающий контроль металла, расчетную оценку ресурса паровых турбин и заключение про возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. При расчетной оценке ресурса паровых турбин авторы методических указаний по оценке индивидуального ресурса паровых турбин [2, 3] не учитывали конструктивные изменения в элементах энергетического оборудования, которые образовались на протяжении всего срока эксплуатации паровой турбины. В планово-предупредительных ремонтах (ППР) осуществляют выборки металла в местах появления трещин и растрескиваний, проточки роторов по канавкам уплотнений и др., что ведет к ремонтно-восстановительным изменениям конструкции роторов, корпусов и стопорных клапанов ЦВД и ЦСД.

Современное развитие вычислительной техники позволяет существенно уточнить расчетные модели литых элементов паровых турбин, таких как корпуса и клапана, путем создания в редакторах (*AVTOSCAD*, *Solid works* и др.) трехмерных моделей энергетических объектов.

В НД [3] не в полном объеме учитываются экспериментальные характеристики металла корпусов и роторов ЦВД и ЦСД, отработавших свой парковый ресурс, либо в связи с ограниченностью экспериментальных данных по сталям с большими сроками наработок в реальных условиях эксплуатации, либо в связи с отсутствием таких данных. Кроме того, недостаточно внимание уделяется изучению коэффициентов запаса прочности на этапе расчетной оценки ресурса паровых турбин, отработавших свой парковый ресурс [1-3].

При эксплуатации ТЭС в Украине в связи с тем, что на АЭС производится порядка 50 % всей электроэнергии, блоки мощностью 200 МВт активно участвуют в регулировании графика электрической нагрузки. В условиях частных пусков и остановов определяющим является не только остаточный ресурс и наработка в часах

или годах энергетического оборудования, отработавшего парковый ресурс, но и остаточное количество пусков из различных тепловых состояний.

При определении количества пусков из различных тепловых состояний по НД [3], принят консервативный подход, когда допустимое эквивалентное число пусков соответствует минимальному числу пусков из всех характерных типов пусков. Такой подход может существенно снизить допустимый остаточный ресурс энергетического оборудования. Так, при допустимом эквивалентном числе пусков по типу из холодного состояния (ХС) для ротора среднего давления (РСД) паровой турбины К-200-130 равном 1200 пусков, допустимое эквивалентное число пусков по типу из неостывших состояний может составлять 2800–3300, т.е. более чем в два раза превышать минимальное число пусков для данного элемента (1200). При этом количество пусков из ХС составляет порядка 20–35 % от общего числа пусков для паровой турбины за весь период эксплуатации. На этапе проектирования такой подход объяснялся как незнанием поведения оборудования в течение длительной эксплуатации, так и эксплуатацией паровых турбин большой мощности только в базовой части графика электрической нагрузки. В условиях сегодняшнего дня такой подход может быть несколько скорректирован, особенно с учетом внедрения современных систем технической диагностики.

Выбор коэффициентов запаса прочности есть оптимизационная задача для различных расчетов. Недостаточный коэффициент запаса, принятый на этапе проектирования, ведет к преждевременному выводу оборудования из работы, а избыточный – к снижению маневренных характеристик оборудования и перерасходу топлива на пуски, остановки и другие переходные режимы. Так же в запас идет выбор расчетной температуры в точке металла, равной температуре металла на номинальном режиме, при определении малоциклового усталости энергетического оборудования. Так, если принимать по НД [3] расчетную температуру металла в точке, равную температуре на номинальном режиме, то в реальных условиях такой выбор приведет к уменьшению допускаемого числа пусков (в отдельных случаях на порядок). Для РСД при расчетной температуре в точке металла, равной $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, допускаемое число циклов равно $N_d = 1000$, а при расчетной температуре в точке металла $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура металла РСД при максимальном значении интенсивности напряжений в начале нагружения) допускаемое число циклов составит $N_d = 11000$.

С учетом вышеизложенного разработан комплексный подход к определению остаточного ресурса элементов паровой турбины большой мощности и продлению срока их эксплуатации (рис. 1). Решение о продлении срока эксплуатации высокотемпературных элементов паровой турбины сверх паркового необходимо принимать экспертной комиссией на основе проведения следующих этапов исследований:

– экспериментальное исследование по НД, которое производится при планово предупредительных ремонтах энергетического оборудования – неразрушающий контроль металла для выявления дефектов и визуальная оценка повреждений, исследования структуры и свойств металла элементов паровых турбин;

– технический аудит энергоблока, содержащий анализ технической документации по режимам эксплуатации паровой турбины, повреждениям, изменениям геометрии в восстановительных ремонтах основных элементов паровых турбин, результатам контроля металла на протяжении всего срока их эксплуатации;

– экспериментальное исследование по влиянию старения материала в процессе длительной эксплуатации на изменение физико-механических особенностей легированных сталей при эксплуатационных и повышенных температурах;

– поверочный прочностной расчет элементов паровой турбины с учетом фактических данных про свойства металла и режимы эксплуатации, изменения конструктивной геометрии паровых турбин в ППР, особенностях пусковых и переменных режимов работы для оценки остаточного ресурса энергоблока, живучести и поврежденности его элементов, времени остаточной прогнозируемой наработки;

– экспертное заключение специализированной организации про состояние высокотемпературного оборудования паровых турбин и продление срока эксплуатации больше паркового ресурса.



Рис. 1. Комплексная схема определения остаточного ресурса элементов паровой турбины и продления срока их эксплуатации

В рамках комплексного подхода созданы 3D аналоги роторов, корпусов и клапанов ЦВД и ЦСД паровых турбин мощностью 200 и 800 МВт [4]. Учтены паровпускные и пароотводящие патрубки; радиусные переходы на наружных и внутренних поверхностях клапанов; кольцевые зоны перед сопловыми коробками; пазы расточек под диафрагмы и обоймы диафрагм, поверхности фланцевого разъема с учетом систем обогрева фланцев ЦВД и ЦСД; зоны паровпуска и выхлопа цилиндров ЦВД и ЦСД; дренажные отводов и зоны патрубков отбора. Также учтены в моделях патрубки подвода пара к концевым уплотнениям роторов ЦВД и ЦСД и другие элементы.

Для оборудования, отработавшего парковый ресурс, проведены экспериментальные исследования структуры и свойств металла по определению характеристик длительной прочности и пластичности, запасов прочности по деформациям n_ϵ и числу циклов n_N , мало- и много- цикловой усталости металла при кручении. Полученные данные использованы для оценки остаточного ресурса энергоблоков большой мощности [5].

Применение специальных ремонтно-восстановительных или технологических операций позволяет значительно увеличить физический ресурс металла указанных элементов. Несмотря на высокие требования к надежности высокотемпературных корпусных деталей паровых турбин, приходится считаться с практически неизбежным присутствием в литом металле начальных дефектов. Зачастую трещины в литых деталях, расположенные в недоступных для ремонта зонах корпуса, удалить не удастся, и поэтому ресурс литых корпусов турбин определяют по времени живучести до образования сквозной трещины. В 3D аналогах элементов паровых турбин большой мощности учтены ремонтно-восстановительные изменения конструкции и проведена оценка остаточного ресурса [6]. Решение о возможности эксплуатации корпуса с трещинами без ремонта (в частности, с трещинами в недоступных для ремонта зонах), а также о методах, объеме и периодичности контроля такого корпуса принимается на основании расчетов ресурса и экспериментальных данных.

Для определения остаточного ресурса роторов сверх паркового ресурса было проведено экспериментальное исследование длительной прочности, деградации статической и циклической прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации. Получена диаграмма длительной прочности роторной стали 25X1M1ФА для образцов металла РСД, отработавшего более 275 тыс. ч. Время до наступления предельного состояния по экспериментально полученной диаграмме длительной прочности равно 370 тыс. ч. Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния показала, что максимальные эквивалентные местные напряжения ползучести по программным комплексам *ANSYS* находятся в диапазоне 126–135 МПа. Время до наступления предельного состояния под действием таких эквивалентных напряжений по диаграмме длительной прочности материала [8] равно 350 тыс. ч.

Расчетная оценка поврежденности, остаточной наработки и остаточного ресурса роторов РСД по НД [3] для энергоблоков ТЭС представлена в таблице 1. Полученная расчетная оценка статической поврежденности роторов среднего давления для этих энергоблоков находится в диапазоне 0,8208–0,6200 (первая цифра графы 4 в табл. 1) для наиболее консервативного случая. Время наступления предельного состояния под действием эквивалентных напряжений определено с помощью диаграммы длительной прочности материала по данным работы [8].

Расчетная оценка статической поврежденности РСД энергоблоков с использованием экспериментальных данных лежит в диапазоне 0,7723–0,5833 (вторая

цифра графы 4 в табл. 1). Остаточная наработка и остаточный ресурс РСД энергоблоков посчитаны с учетом данных эксперимента по оценке длительной прочности, деградации статической и циклической прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации. Полученная расчетная оценка поврежденности, остаточной наработки и остаточного ресурса может рассматриваться как максимально низкий прогноз индивидуального ресурса для элементов паровой турбины К-200-130 энергоблоков ТЭС.

Таблица 1

Расчетная оценка повреждаемости,
остаточной наработки в годах и остаточного ресурса роторов РСД энергоблоков ТЭС

Номер блока	Наработка, час	Годовая статическая поврежденность	Статическая поврежденность, по данным [8]/по данным эксперимента	Остаточная наработка, годы	Остаточный ресурс, час
1	2	3	4	5	6
№ 11	287304	0,016780	0,8208/0,7723	13,53	84495
№ 13	254079	0,016658	0,7259/0,6830	19,03	117922
№ 14	247001	0,014226	0,6200/0,5833	29,16	175659
№ 15	255690	0,017182	0,7305/0,6873	18,16	116066

Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что при консервативном подходе к оценке поврежденности, расчетный остаточный ресурс роторов среднего давления паровой турбины К-200-130 энергоблоков ТЭС составляет 84495–175659 часов. По результатам экспериментального и расчетного исследования статической поврежденности и остаточного ресурса срок эксплуатации РСД паровой турбины К-200-130 энергоблоков ТЭС можно установить на уровне до 370 тыс. ч.

Выводы

1. Сформулирован комплексный подход к оценке остаточного ресурса паровых турбин большой мощности и продления срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. Выделены основные этапы исследований, на основе которых экспертная комиссия принимает решение о продлении срока эксплуатации паровых турбин большой мощности. Особое внимание надо уделить этапу экспериментального исследования по влиянию старения металла высокотемпературных элементов паровой турбины в процессе длительной эксплуатации [5].

2. В поверочном прочностном расчете теплового, напряженно-деформированного состояния и малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины необходимо учесть результаты экспериментального исследования металла и ремонтно-восстановительные изменения конструктивной геометрии элементов паровых турбин в ППР [5].

3. Продление эксплуатации паровых турбин большой мощности сверх паркового ресурса возможно на основе внедрения комплекса мероприятий по модернизации системы контроля основных параметров турбоустановки, мониторингу и диагностике роторов турбоагрегатов, мониторингу теплового и напряженно-деформированного состояния высокотемпературных элементов турбомашин в процессе эксплуатации. Также необходима оптимизация пусковых режимов, совершенствование схемных решений, предварительный прогрев роторов и другие мероприятия. Внедрение

автоматизированных систем технической диагностики (АСТД) и управления ресурсом энергоблоков позволит обеспечить надежную работу оборудования сверх паркового ресурса [7].

4. Проведена расчетная и экспериментальная оценка длительной прочности и эквивалентного местного напряжения высокотемпературных роторов паровых турбин, основанная на использовании программного комплекса *Solid works* для создания пространственных аналогов элементов турбомашин и программного продукта *COSMOS works* для определения значений эквивалентного местного напряжения и оценки длительной прочности. Показано, что эквивалентные местные напряжения роторов среднего давления РСД паровой турбины К-200-130 достигают 128–135 МПа после 100 тыс. ч. эксплуатации. Статическая поврежденность металла ротора среднего давления в стационарном режиме составляет порядка 58–77 %. Расчетный остаточный ресурс для РСД находится на уровне 84495–175659 часов. Срок эксплуатации роторов среднего давления паровой турбины К-200-130 можно продлить на 70 тыс. ч.

Список литературы: 1. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. – Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. 2. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – М., 1985, № АЗ-002/7382. – 49 с. 3. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М., 1996. – 99 с. 4. Черноусенко О.Ю. Расчетное исследование индивидуального ресурса корпусных деталей турбин (ЦВД, ЦСД, корпусов стопорных клапанов) и роторов К-200-130 блока 200 МВт // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 64-70. 5. Черноусенко О.Ю. Обобщение и анализ результатов расчетного исследования индивидуального ресурса корпусов и роторов ЦВД и ЦСД турбины К-200-130 блока 200 МВт // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 107-111. 6. Письменный Е.Н. Расчетное определение малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт с применением программного комплекса ANSYS И COSMOSWorks / Е.Н. Письменный, О.Ю. Черноусенко, Е.В. Штефан, Д.В. Рындюк, Д.С. Третяк // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. – С. 188-195. 7. Черноусенко О.Ю. Усталостные повреждения роторов ЦВД и ЦСД паровых турбин К-200-130-3 на ТЭС Украины / О.Ю. Черноусенко, А.В. Антонович, Н.Г. Кришук, М.В. Космина, М.О. Долгих // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 77-82. 8. Ланин А.А. Жаропрочные металлы и сплавы: справочные материалы / А.А. Ланин, В.С. Балина // Вопросы энергетики. – СПб.: Энерготех, 2006. – Вып. 8. – 156 с.

© Черноусенко О.Ю., 2010
Поступила в редколлегию 09.02.10