

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 621.165+620.19

Д.А.Амирбеков, К.К.Кусаиынов

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: amirdos@mail.ru)*

Кавитационный износ лопаток паровых турбин Т-100/120-130

В статье рассмотрены процессы износа лопаток турбин типа Т-100/120-130, причины аварий турбин в процессе работы, а также характер износа лопаток в зоне фазового перехода ротора среднего давления. Приведено объяснение возможной причины возникновения кавитационного износа, которая влияет на прочность и долговечность конструктивных элементов проточной части паровых турбин. Предложены возможные меры борьбы с коррозией.

Ключевые слова: турбина, лопатки, кавитация, износ, коррозия, усталость.

Введение

Теплоэлектроцентральный представляет собой крупное промышленное предприятие, продукцией которого являются электрическая и тепловая энергии, отпускаемые потребителю в виде горячей воды или пара требуемых параметров. Паровая турбина представляет собой элемент турбоагрегата, приводящий электрический генератор, преобразующий механическую энергию вращения вала турбоагрегата в электрическую энергию и — одновременно — источник пара для теплового потребителя. Поэтому отказ турбины из-за аварии автоматически означает невыполнение электростанцией планов по выработке электроэнергии и тепла и серьезное ухудшение ее экономических показателей.

Действительно, электростанция, как всякое промышленное предприятие, имеет планы выработки электроэнергии и тепла, установленные на основе оптимизации работы энергохозяйства района в целом. Недовыработка плановой энергии конкретной электростанцией означает, что в лучшем случае эта энергия будет выработана другими электростанциями, имеющими худшие экономические показатели, чем та, на которой произошла авария. Поэтому, если авария произошла по вине персонала электростанции, последняя понесет убытки, связанные с удорожанием электроэнергии из-за подключения источников энергии с меньшей экономичностью.

Кроме того, исключение из работы части оборудования электростанции неизбежно приводит к удорожанию производства энергии из-за уменьшения коэффициента использования оборудования, так как при тех же капиталовложениях энергии вырабатывается меньше.

Состояние проблемы

Проточная часть представляет наиболее дорогую и уязвимую часть паровой турбины. Основными деталями проточной части любой турбины являются стальные лопатки, приводящие в движение ротор за счет движения среды, а именно за счет давления пара. Наиболее частыми причинами аварий рабочих лопаток являются:

1) усталость материала, вызванная вибрацией, приводящая к зарождению трещин усталости, их росту и последующему хрупкому разрушению;

- 2) коррозионная усталость — усталость в коррозионно-активных средах, характерная для зон фазового перехода, где действуют механизмы концентрирования растворов высокой агрессивности;
- 3) капельная эрозия, приводящая к износу рабочих лопаток, появлению концентрации напряжений и снижению их конструкционной прочности;
- 4) абразивный износ рабочих и сопловых лопаток первых ступеней цилиндров, в которые поступает пар из котла;
- 5) отрыв рабочих лопаток, вызванный чрезмерными центробежными силами;
- 6) излом рабочих лопаток, вызванный чрезмерными изгибающими напряжениями в них;
- 7) разрушения хвостовиков и связей (бандажей и проволок).

Элементы турбин, работающих на влажном паре, подвергаются непрерывному воздействию капель или струй жидкости, вследствие которых возможен износ (эрозия) поверхностей лопаток, дисков, диафрагм, обойм, корпусов и других деталей.

Актуальность проблемы

Рабочие лопатки паровых турбин в настоящее время в большей мере выбрасываются и заменяются на новые при капитальном ремонте. Восстановление лопаток турбин и продление их срока службы еще не развито в полной мере. Учитывая высокую стоимость одной лопатки и большое число лопаток, работающих по сей день, вопрос восстановления имеет большое значение.

В настоящее время выпускаемые серийно лопатки изготавливаются из коррозионно-стойких жаропрочных сталей 20X13-Ш и 15X11МФ-Ш мартенситного класса либо из титановых сплавов типа BT-6 и TC5, последние в основном используются на турбинах, спроектированных для АЭС.

Причиной эрозии лопаток турбин типа Т-100/120-130 в зоне фазового перехода РСД, последних ступеней РНД с лопатками наибольшей длины является удар капель воды с относительно высокой скоростью. Присутствие воды объясняется тем, что пар расширяется в турбине, пока не станет влажным. В свою очередь невлажный пар вызывает повреждения, а капли воды вырываются из скопления воды на направляющих лопатках и на корпусе. Но при кавитационной эрозии капли жидкости представляют собой двухкомпонентную систему из жидкости и пара. Анализ условий, в которых находятся отдельные элементы оборудования, показывает, что наиболее характерными видами эрозии являются:

- 1) ударное воздействие капель; 2) кавитационная эрозия; 3) щелевая эрозия.

В реальных же условиях эксплуатации перечисленные выше виды эрозии взаимосвязаны друг с другом и действуют одновременно. Ниже приведена схема, в которой классифицированы виды эрозионного разрушения материалов (рис. 1) [1].



Рисунок 1. Схема классификации видов эрозионного разрушения материалов

Кавитация как термин был введен в 1894 году британским инженером Р. Фрудом. Кавитация (от лат. *cavitas* — пустота) — процесс парообразования и последующей конденсации пузырьков воздуха в потоке жидкости, сопровождающийся шумом и гидравлическими ударами, образования в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных паром самой жидкости, в которой они возникают [2].

Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении её скорости (гидродинамическая кавитация), либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения (акустическая кавитация); существуют и другие причины возникновения эффекта. Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, кавитационный пузырёк «схлопывается», излучая при этом ударную волну.

Механизм капельной эрозии нельзя считать полностью выясненным. По существующим сегодня представлениям «виновником» эрозии являются удары капель о поверхность металла, при которых в течение короткого времени (порядка 0,001 мкс) возникает импульс давления, которое в первом приближении можно оценить по формуле

$$\Delta p = p_k \cdot a_* \cdot w_k, \quad (1)$$

где p_k — плотность жидкости в капле; a_* — скорость распространения звука в жидкости; w_k — скорость соударения.

Если принять $p_k = 1000$ кг/м, $a_* = 1400$ м/с, $w_k = 300$ м/с, то $\Delta p = 420$ МПа. При таких местных циклических воздействиях в материале возникают волны напряжений, распространяющиеся и взаимодействующие между собой, отражающиеся от границ профиля и т.д. В результате на поверхности возникают трещины усталости, являющиеся началом эрозионного разрушения.

Характерный пример эрозии рабочих лопаток 18 ступени РСД турбоагрегата ст. № 3 Карагандинской ТЭЦ-3 представлен на рисунке 2. Для лучшей контрастности дефектов был применен метод капиллярной дефектоскопии. Эта ступень находится в зоне фазового перехода. В этой зоне пар конденсируется, и, в свою очередь, есть предпосылки для возникновения кавитационной эрозии.

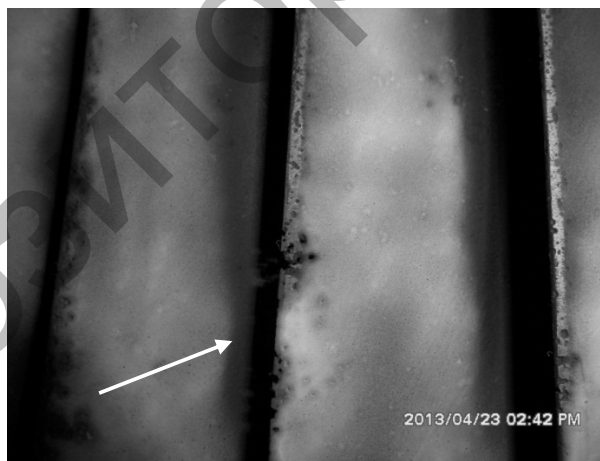


Рисунок 2. Эрозионный износ лопаток 18 ступени РСД т/а Т-100/120-130

Из формы дефектов можно предположить, что они возникли именно от воздействия в большей степени кавитации, так как видны кратеры в дефектах. В ходе исследования металла обнаружены местные отрывания основного металла от воздействия такого вида коррозии.

От воздействия коррозии и местных деформаций, а также вибрации произошло хрупкое разрушение нескольких лопаток 22 ступени РСД (рис. 3), что привело к аварийной остановке турбоагрегата ст. № 3 Карагандинской ТЭЦ-3.

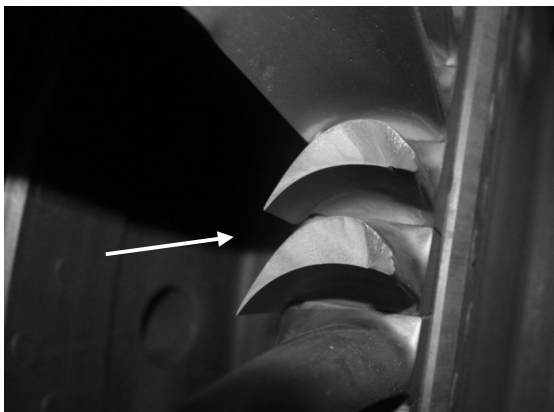


Рисунок 3. Хрупкое разрушение лопаток 22 ступени РСД т/а Т-100/120-130



Рисунок 4. Общий вид разрушения лопаток 22 ступени РСД т/а Т-100/120-130

Общий вид разрушения лопаток 22 ступени представлен на рисунке 4. Разрушение лопаток принесло колоссальные экономические потери вследствие простоя турбоагрегата.

Воздействие капель на поверхность лопаток имеют определенную форму (рис. 5). Из рисунка отчетливо виден характер воздействия капель, соответственно, можно предположить, что ударное воздействие капель происходит в определенной последовательности (прямолинейно).



Рисунок 5. Ударное воздействие капель на поверхность лопаток 22 ступени РСД



Рисунок 6. Внешний вид эродированной поверхности лопаток турбин

Результаты исследований с помощью растровой микроскопии показали, что эродированная поверхность представляет собой набор повторяющихся элементов пирамидального типа (рис. 6). Наиболее вероятное расстояние между соседними вершинами элементов составило в среднем 550 мкм. Вершины пирамид имели винтовое строение. В центре вершины чаще всего имелся кратер [3–7]. Исследователи предполагают, что материал делится на мезообъемы. В основании элементов пирамидального типа образуются микротрещины, которые, возможно, и образуют основные трещины, приводящие к разрушению основного материала.

При скоростях соударения 150–600 м/с, вызывающих эрозию рабочих лопаток паровых турбин, расчетное давление составляет 25–95 МПа. Предел текучести для рабочих лопаток, определенных в статических условиях, равен 68–80 МПа. Известно, что при высоких скоростях нагружения предел текучести повышается. Поэтому сравнение значений предела текучести и импульсного давления не позволяет сделать вывод о возможном повреждении материала при ударе одиночной капли [8]. Исследования показали, что при слиянии двух растекающихся по плоскости капель в месте контакта образуются микроструи, скорость которых в несколько раз превышает скорости радиального растекания исходных капель. Некоторыми исследователями отмечается, что эти обладающие большой скоростью микроструи могут сглаживать шероховатости на эродирующей поверхности. Близкий характер разрушений поверхности при капельной эрозии и кавитации послужил основанием гипотезы

о ведущей роли кавитационных явлений в ходе эрозионного разрушения лопаток паровых турбин каплями конденсата.

Предполагается, что при малых скоростях и больших диаметрах капель преобладает кавитационный механизм разрушения. Иначе трудно объяснить причины разрушения материалов повторяющимися ударами капель при скоростях 10–20 м/с. При больших скоростях соударения (несколько сот метров в секунду) сила удара капли настолько велика, что повреждение происходит при одном ударе и размер повреждения соизмерим с диаметром ударяющей капли.

Для борьбы с износом рабочих лопаток принимают активные и пассивные меры.

Активные меры:

- уменьшение влажности перед цилиндром низкого давления;
- снижение фактической влажности на входе в ступень;
- снижение содержания влаги в самой ступени;
- химический контроль среды;
- выбор рациональных режимов эксплуатации турбин и программ регулировки энергоблоков.

Пассивные меры:

- применение для изготовления лопаток более эрозионно-устойчивых материалов;
- наплавка (легирование) на входные кромки лопаток износостойких материалов на основе Со, типа стеллит;
- применение защитных покрытий.

Пассивные меры в большинстве случаев применяются при изготовлении или эксплуатации новых лопаток. Соответственно, при ремонтных компаниях основной задачей является решение проблемы восстановления лопаток турбин, находящихся уже в изношенном состоянии. Разработка технологии восстановления и упрочнения лопаток турбин является предметом самостоятельной публикации и в настоящей работе не приводится.

Заключение

Дальнейшее изучение зависимости износа лопаток паровых турбин от влияния кавитации позволит сократить материальные издержки при эксплуатации паровых турбин Карагандинской ТЭЦ-3, а также ряда других тепловых электростанций Республики Казахстан и перейти к научно обоснованным методам организации процесса эксплуатации, работ по реконструкции и модернизации оборудования.

Список литературы

- 1 *Энгель-Крон И.В.* Ремонт паровых турбин. — М.: Энергоиздат, 1981. — 186 с.
- 2 *Фадеев И.П.* Эрозия влажнопаровых турбин. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1974. — 208 с.
- 3 *Шубенко А.Л., Ковальский А.Э.* Кинетическая модель каплеударной эрозии рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин // Энергетика и транспорт. — 1989. — № 5. — С. 23–29.
- 4 *Скотникова М.А., Касторский Д.А., Строкينا Т.И.* Структурные превращения в металлах при скоростном резании // Вопросы материаловедения. — 2002. — Вып. 1 (29). — С. 199–215.
- 5 *Skotnikova M.A., Zubarev Yu.M., Chizhik T.A., Tsybulina I.N.* Structural-Phase Transformation In Metal of Blades of Steam Turbines From Alloy VT6 After Technological Treatment//Proceeding of the «10th World Conference on Titanium», 2003. — Hamburg, Germany, 2004. — Vol. 5. — P. 2991–2999.
- 6 *Skotnikova M.A., Martynov M.A., Ushkov S.S., Kastorski D.A.* Structural-Phase Transformation In Titanium Alloys at High-Speed Mechanical Effect // Proceeding of the «10th World Conference On Titanium» 13–18 Jules, 2003, Hamburg, Germany, 2004. — Vol. 2. — P. 831–838.
- 7 *Skotnikova M.A., Strokina T.I., Krylov N.A., Mesherykov Yu., Divakov A.* Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shock Loading // Proceeding of the Conference of the American Physical Society. Topical Group on «Shock Compression of Condensed Matter» held in Portland, Oregon, 20–25 July, 2003, New York, 2004. — P. 609–612.
- 8 *Речистер В.Д.* Дефектация судовых турбинных установок. — М.: Транспорт, 1970. — 256 с.

Д.А.Әмірбеков, Қ.Қ.Құсайынов

Т-100/120-130 турбина күрекшелерінің кавитациядан тозуы

Мақалада Т-100/120-130 турбина күрекшелерінің тозу процесі зерттелген. Турбинаның жұмыс істеу кезіндегі апаттар себептері, орташа қысым роторларындағы фазалы аймағында күрекшелерінің тозуы қарастырылған. Бу турбинасының құрылымдарының ұзақ жұмыс істеуіне және беріктілігіне әсер ететін кавитациялық тозуыдың себептерін түсіндіруі келтірілген. Коррозияға қарсы мүмкін шаралар ұсынылған.

D.A.Amirbekov, K.K.Kussaiynov

Cavitation wear of steam turbine blades T-100/120-130

This article examines the process of wear of turbine blades type T-100/120-130. The causes of accidents turbines in operation. Examined the nature of the wear of the blades in the region of the phase transition medium pressure rotor. An explanation of the possible causes of cavitation that affects the strength and durability of structural elements of the flow of steam turbines. The possible measures against corrosion.

References

- 1 Engel-Kron I.V. *Repair of steam turbines*, Moscow: Energoizdat, 1981, p. 186.
- 2 Fadeev I.P. *Erosion wet steam turbines*, Leningrad: Mashinostroenie (Leningrad office), 1974, p. 208.
- 3 Shubenko A.L., Kovalskiy A.E. *Energy and Transport*, 1989, 5, p. 23–29.
- 4 Skotnikova M.A., Kastorskiy D.A., Strokina T.I. *Problems of Materials science*, 2002, 1 (29), p. 199–215.
- 5 Skotnikova M.A., Zubarev Y.M., Chizhik T.A., Tsybulina I.N. *Proceeding of the «10th World Conference on Titanium»*, 2003, Hamburg, Germany, 2004, 5, p. 2991–2999.
- 6 Skotnikova M.A., Martynov M.A., Ushkov S.S., Kastorskiy D.A. *Proceeding of the «10th World Conference On Titanium»* 13–18 Jules 2003, Hamburg, Germany, 2004, 2, p. 831–838.
- 7 Skotnikova M.A., Strokina T.I., Krylov N.A., Mesherykov Yu., Divakov A. *Proceeding of the Conference of the American Physical Society. Topical Group on «Shock Compression of Condensed Matter»* held in Portland, Oregon, 20–25 Jules, 2003, New York, 2004, p. 609–612.
- 8 Rechister V.D. *Defectation marine turbine sets*, Moscow: Transport, 1970, p. 256.