

Список литературы

1. Мхитарян Н.М. Гелиоэнергетика – К.: Вища школа, 2002. – 255 с.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки, М: Энергоатомиздат, 1991. – 153 с.
3. Мхитарян Н.М. Солнечная энергетика. – К.: Вища школа, 2005. – 385 с.
4. М.М. Колтун, Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. – 193 с.
5. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 195 с.
6. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент: Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с. с ил.
7. Кувшинов В.В., Сафонов В.А., Стаценко И.Н. Применение солнечной энергии. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2005. – 66 с.
8. Баранов В.Я. Новые концентраторы излучения и перспективы их применения в оптике и гелиотехнике // Тр. ГОИ. – 1979. – Т. 45. – Вып. 179. – С. 57 – 70.
9. Баранов В.К., Васильева Л.В. и др. Селективно отражающее металлическое зеркало // Гелиотехника. – 1966. - № 2. – С. 9 - 11.
10. Колтун М.М. Солнечные элементы. – М.: Наука, 1987. – 192 с. с ил.
11. Алферов Ж.И., Андреев В.М. Перспективы фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии Преобразование солнечной энергии. / Под ред. Н.Н. Семенова. – Черногловка: ИХФ АН СССР, 1981. – 20 с.
12. Даффи Д, Бекман У. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 150 с.
13. Бекман У., Кейли С., Даффи Д. Расчет систем солнечного теплоснабжения. – М: Энергоиздат, 1982. – 210 с.

УДК 621.311.25.002.5.019

А.С.Селянский

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, г.Севастополь, Украина

УДАРНАЯ ЭРОЗИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

У даній статті розглядаються несправності, що виникають при експлуатації робочих лопаток циліндра низького тиску. Приводяться шляхи вирішення розглянутих проблем.

The article deals with disrepairs arising up during the operation of workings blades of cylinder of low pressure. Ways of decision of the considered problems are describe.

Введение

Современная техника невозможна без использования машин и механизмов, обладающих высокой надежностью и сравнительной долговечностью в условиях эксплуатации, характеризующихся повышенными значениями скоростей, давлений и температур, а во многих случаях также и агрессивностью сред.

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

Постановка проблемы

Причиной эрозии лопаток конечных ступеней цилиндра низкого давления, и особенно лопаток последнего ряда, которые имеют наибольшую длину, является удар водяных капель с относительной высокой скоростью. Присутствие воды объясняется тем, что пар расширяется в турбине, пока не станет влажным. Однако не влажный пар вызывает повреждение, а более крупные капли, вырывающиеся из скоплений воды на направляющих лопатках и на корпусе.

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.

Часто встречается химическая и электрохимическая коррозия. В реальных условиях эксплуатации названные виды эрозии, как правило, взаимосвязаны друг с другом и действуют одновременно (рис. 1) [1].

При больших скоростях соударения капель с поверхностью деталей и больших размерах капель эрозионное разрушение существенно возрастает. На первое место выходит в этом случае ударная эрозия, т.е. разрушение поверхности вследствие непосредственного механического воздействия капель влаги на поверхность.

Существует множество качественных оценок эрозии. Но из всего многообразия фактов лишь немногие дают более или менее точную закономерность: интенсивность эрозии растет (после определенного порога) пропорционально кубу скорости удара капелек.

Эрозия материала лопатки происходит постепенно до тех пор, пока ослабление его прочности и снижение к.п.д. ступени вызовет необходимость замены облопачивания. При этом неизбежен длительный простой турбины.



Рис 1. Схема классификации видов эрозионного разрушения материалов

Наиболее сильный износ выходных кромок лопаток последних ступеней наблюдается у турбин, работающих длительное время на различных нагрузках, особенно на режимах холостого хода [2]. На этих режимах имеет место отрыв потока в корневых сечениях лопаток, сопровождающийся обратными течениями из выхлопного патрубка. Обратные потоки пара захватывают капли влаги, которые и вызывают эрозию выходных кромок лопаток. Крупные капли за ступенью образуются в результате срыва пленок с поверхности диска, дробления влаги о поверхности выступающих деталей выхлопных патрубков, подачи конденсата на охлаждение патрубка при частичных нагрузках и по другим причинам.

После определенного времени эксплуатации турбинных ступеней в потоке влажного пара поверхности лопаток становятся шероховатыми, затем появляются более крупные впадины и наконец поверхность становится похожей на губку, при значительных износах возможны появление трещин и поломка лопаток.

Причины и механизм возникновения ударной эрозии.

При экспериментальном определении эрозионной стойкости различных материалов установлено, что процессы эрозии (глубина эрозионного износа $l_э$) протекают во времени в соответствии с этапами (рис. 2). Различают три типичных этапа. На первом этапе τ_1 , так называемом инкубационном периоде, видимых повреждений поверхности нет, потерь массы материала зафиксировать не удастся. В ряде работ показано, что собственно эрозии материала предшествует рост микронапряжений, увеличение плотности дислокаций в металле предельного значения $10^{-12} - 10^{-13} \text{ см}^{-1}$, что является признаком усталости материала.

Этап τ_2 , характеризуется тем, что имеет место максимальная скорость эрозии и в течение этого отрезка времени она остается практически постоянной. Во время следующего отрезка времени τ_3 , по различным причинам эрозия снова ослабевает. В

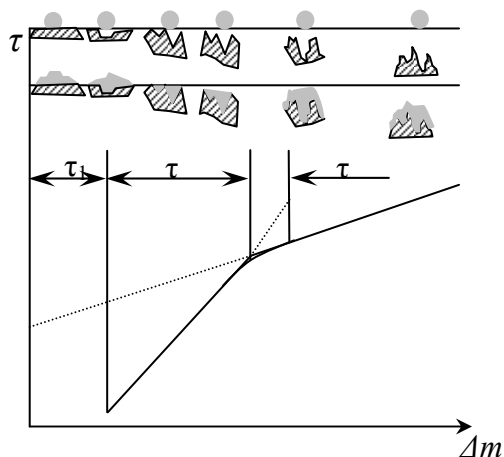


Рис. 2. Характерная кривая каплеударного разрушения металла и отвечающие ей участки эродированной поверхности

некоторых работах отмечается, что скорость эрозии на этапе τ_3 , иногда колеблется во времени. Поэтому для оценки эрозионной стойкости материалов обычно предлагается использовать значение скорости эрозии на этапе τ_2 или τ_3 .

Кроме зависимостей средней глубины эрозионного износа $l_э$ от времени эксплуатации или испытаний образцов τ (рис. 2) строят кривые износа металла зависимости массы потерь металла Δm от массы жидкой фазы (влаги) M , выпадающей на единицу поверхности, а также зависимости $l_э = f(M)$ или $\Delta m = f(\tau)$.

Характер этих кривых аналогичен характеру кривой, представленной на рис.2

Скорость эрозии зависят от:

- скорости встречи лопаток с частицами воды;
- формы и размеров этих частиц;
- частоты соударений;
- эрозионной стойкости материала лопаток;
- рельефа эродирующей поверхности.

В ряде работ приводятся эмпирические выражения, описывающие такие кривые, основанные на интерполяционных полиномах, которые строят по таблицам опытных данных. Приблизительно глубину эрозионного износа $l_{\text{э}}$ (или износ металла Δm) в зависимости от времени (или массы выпадающей влаги M) можно на участках τ_2 и τ_3 (рис. 2) представить прямой линией:

$$\left. \begin{aligned} l_{\text{э}2} &= a\tau + l_{\text{э}2}^0 \\ l_{\text{э}3} &= b\tau + l_{\text{э}3}^0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $l_{\text{э}2}$ и $l_{\text{э}3}$ - глубина эрозионного износа на участках интенсивного τ_2 и замедленного τ_3 разрушения металла;

a, a', b, b' - угловые коэффициенты, зависящие от свойств металла, скорости поверхностного соударения капель и других параметров двухфазного потока и омываемого тела;

$l_{\text{э}2}^0$ и $l_{\text{э}3}^0$ - константы, определяемые пересечением аппроксимирующих прямых с осью координат (рис. 2).

В литературе известны лишь качественные объяснения вида кривой износа, основанные на представлениях об изменении характера взаимодействия между каплями и поверхностью в результате изменений рельефа эродированной поверхности. Согласно этим представлениям по истечении инкубационного периода на поверхности появляются и накапливаются небольшие разрушения (начальный этап износа), возрастают глубины впадин (этап высокой скорости износа), углубление впадин до нескольких диаметров капель и заострение перемычек между кавернами (замедление износа). Так же формирование «сотовой» и иглообразной формы поверхности, типичной для эрозии турбинных лопаток (участок минимальной скорости износа).

В последние годы появилось несколько экспериментальных исследований удара одиночной капли жидкости по поверхности твердого тела. Были исследованы характер деформации капли и явления, возникающие после соприкосновения капли с поверхностью твердого тела, в широком диапазоне соударения. При соударении капли с твердой поверхностью в месте контакта возникает местный импульс давления. Непосредственно измерить эти давления достаточно трудно, так как зона их действия мала [3].

Давление при ударе жидкости об абсолютно твердую поверхность выражается хорошо известной формулой гидроудара Н.Е. Жуковского

$$P = \rho_2 a \omega \quad (2)$$

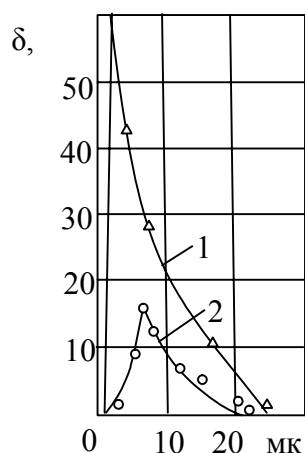


Рис. 3. Оциллографические записи давления соударения с твердым телом при двух скоростях водяной струи. Скорость струи: 1 - = 300 м/с; 2 - = 100 м/с

где ρ_2 - плотность жидкости;
 a_2 - скорость звука в жидкости;
 ω - скорость соударения.

С учетом того, что деформация твердого тела (стали) является упругой, действительное импульсное давление P будет несколько меньше.

В ряде работ было измерено давление соударения, развиваемое струей жидкости, с помощью пьезокерамических датчиков. На рисунке 3 показано изменение импульсного давления во времени. Время возрастания кривой нагрузки при ударе имеет длительность в пределах нескольких микросекунд. Время снижения давления составило 15-20 мкс. Предполагается, что падение пика давления связано с началом растекания жидкости.

Однако распределение давления по площади пятна контакта капли с поверхностью экспериментально получить, пока не удалось. Многие исследователи отмечают, что скорость радиального растекания капли при ударе в несколько раз больше, чем скорость соударения (более чем в 5 раз).

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, составляет 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 [4].

Исследованиями обнаружено, что при слиянии двух растекающихся по плоскости капель в месте контакта образуются микроструйки, скорость которых в несколько раз превышает скорости радиального растекания исходных капель. Некоторыми исследователями отмечается, что эти обладающие большой скоростью микроструйки 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 эрозией рабочих лопаток принимают специальные меры:

1. Активные меры:

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

2. Пассивные меры:

- применение для изготовления рабочих лопаток эрозионно-устойчивых материалов;
- установка на периферийном входном участке спинки профиля рабочих лопаток накладок из высокоустойчивого против эрозии материала-стеллита;
- специальная обработка той части поверхности лопаток, где можно ожидать эрозионное воздействие влаги;
- применения защитных покрытий.

Дальнейшее изучение ударной эрозии позволит сократить износ проточной части паровой турбины и перейти к научно обоснованным методам организации процесса эксплуатации, ремонтных кампаний, работ по реконструкции и модернизации оборудования.

Список литературы

1. Энгель-Крон И.В. Ремонт паровых турбин. – М.: Энергоиздат, 1981. -186 с.
2. Зезюлинский Г.С. Чупрынин А.С. Основы теории паровых турбин АЭС. – Севастополь: СИЯиП, 2000. – 281 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. Речистер В.Д. Дефектация судовых турбинных установок. – М.: Транспорт, 1970 – 256 с.