

УДК 621.165

## КАПЕЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ

Колесень Е.А., Чешун Ю.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

Термин эрозия (от лат. "erosion" – разъедание) означает разрушение поверхности металла рабочих лопастей под действием капель жидкости, которые натекают на поверхность с большой скоростью. С течением времени капельная эрозия может разъесть значительную часть профиля, иногда до 0,2 – 0,3 его хорды, что приведет к изнашиванию периферийных зон на половину хорды лопатки и в дальнейшем может послужить причиной отрыва части лопатки.

Существует ряд причин развития эрозии в проточных зонах турбины:

- 1) ударное и кавитационное воздействие влаги;
- 2) коррозия;
- 3) кавитация при воздействии механических напряжений в металле.

Механизм капельной эрозии нельзя считать полностью открытым. На сегодняшний день считается, что появление эрозии на поверхности металла происходит в следствие ударов капель на нее, при котором в кратчайшее время возникает импульс давления, который можно рассчитать по формуле:

$$\Delta p = \rho_K a_* w_K,$$

где  $\Delta p$  – импульс давления на поверхность, Па;

$\rho_K$  – плотность капли, кг/м<sup>3</sup>;

$a_*$  – скорость распространения звука в капле, м/с;

$w_K$  – скорость соударения, м/с.

Капельная эрозия считается процессом, который протекает во времени. Большое количество исследований показывают, что поверхности лопаток изнашиваются во времени неравномерно.

Конкретнее прохождение капельной эрозии можно отследить с помощью ее кривой и скорости протекания. Эрозию материала в основном представляют в виде зависимости массы металла  $m$ , ушедшего с единицы поверхности, от времени  $t$ . Помимо массы металла  $m$  можно использовать другие величины, к примеру, количество капель жидкости, которые столкнулись с поверхностью ко времени  $t$  и т.д.

Разделяют три временных периода развития эрозии рабочих лопаток, которые постоянно подвергаются ударному воздействию капель жидкой фазы парового потока. Для первой стадии, получившей название – инкубационный период, характерно накопление в поверхностном слое повреждений. Идет образование и рост микротрещин. Сама поверхность без видимых следов износа. На второй стадии – период интенсивной эрозии – происходит интенсивное выкрашивание поверхности материала с одновременным ростом шероховатости поверхности. И третья стадия, которая называется период

замедленного темпа эрозии, в ней поверхность лопатки «подстраивается» под капельный поток, воздействующий на нее.



Рисунок 1. Зависимость глубины износа входных кромок от времени

На рисунке 1 представлен график зависимости глубины износа входных кромок от времени. Для отслеживания процесса развития капельной эрозии были взяты 3 разные по расположению ступени лопаток: третья от выхода, предпоследняя и последняя. Как и говорилось ранее, этот процесс состоит из 3 стадий, протекающих со временем. Каждая стадия имеет свою скорость протекания, что можно проследить на графике. Проанализировав их, видим, что третья от выхода ступень имеет линейный характер уменьшения хорды профиля рабочей лопатки. В предпоследней уже заметна неравномерность изнашивания поверхности. На последней ступени турбины, начиная со второй стадии, наблюдается резкий скачок в росте разъедания поверхности, вызванной капельной эрозией. Из этого можно сделать вывод, что последняя ступень турбины подвержена наиболее интенсивному износу. Это связано с тем, что лопатки последних ступеней работают во влажной паровой среде и подвержены эрозионной деструкции, которая вызвана воздействием и кавитацией капель влаги.

Исход капельной эрозии достаточно серьезен. Одним из последствий эрозии является понижение надежности рабочих лопаток. Оно возникает из-за:

1. Увеличения напряжений изгиба, а также растяжения, причиной которого является уменьшение площади сечения самой рабочей лопатки. Самыми опасными местами, подверженными эрозии, являются выходные кромки рабочих лопаток последних ступеней, так как они возникают там, где напряжение близко к пределу, а это в корневой части. Снашивание периферийной части лезвия вызывает снижение напряжений в корневой части, но увеличивает напряжения в бандажах и связках. Это опасно тем, что может спровоцировать их отрыв;

2. Снижения прочности вследствие ухудшения качества поверхности и увеличения концентрации напряжений. Опасными зонами здесь являются кромки лопаток, иначе говоря, места, где изгибающие напряжения максимальны, а сами концентраторы расположены примерно перпендикулярно оси рабочей лопасти, что способствует появлению в них трещин.

3. Изменения собственных частот рабочих лопастей и значительного уменьшения конструкционного демпфирования в соединениях.

4. Откола вместе с металлическими частицами защитной пленки оксида хрома. В этом случае появляется коррозионная усталость – уменьшение предела усталости металла.

Дополнительным последствием эрозии является ухудшение показателя экономичности ступени с эродированными рабочими лопатками. Особенно сильное воздействие на ухудшение этого показателя турбины оказывает эрозионный износ лопаток последней ступени, которая вырабатывает максимальную мощность. Эрозия отрицательно сказывается на экономическом показателе, что и представлено в таблице 1.

Таблица 1-Влияние эрозии на снижение КПД турбины и убыток от снижения

Год эксплуатации	Снижение КПД турбины, %	Ориентировочный убыток, отн. ед.
2	0,5	1
3	1,0	3
4	1,7	6
5	3,2	12
6	5	24

Из предложенной таблицы можно сделать вывод: ущерб вырастает в 2 раза практически с каждым годом, что требует замены рабочих лопаток после каждых 4–5 лет эксплуатации.

Можно отметить два пути предупреждения эрозии: активный и пассивный.

К активным относят такие мероприятия как:

1. Уменьшение влажности воздуха перед ступенью. Существует несколько способов: повысить температуру пара и понизить давление на входе в турбину, использовать промежуточный перегрев пара и эффективность внешней сепарации. Важно правильно подобрать параметры на входе и выходе из турбины, чтобы обеспечить необходимую влажность в конце процесса расширения. Также можно уменьшить влажность на последнем этапе расширения путем увеличения конечного давления, однако с экономической точки зрения этот способ не выгоден.

2. Применение влагоулавливающих устройств в проточной части турбины. Опасность также представляет, образовавшаяся при разрыве водяных пленок

поток с профилей лопаток сопла, крупнодисперсная влага. Поэтому очень эффективной мерой борьбы с эрозией рабочих лопаток является применение внутриканальной сепарации путем отсасывания этой пленки из профиля лопаток сопла. Для этого в стенке лопатки проделывают щели, с помощью которых отсасывается водяная плёнка. Отсос пленки происходит под действием перепада давлений. Таким образом сюда можно включить и периферийную сепарацию, которая осуществляется по периферии ступени и за ступенью. Эта мера основана на использовании центробежных сил, действующих на капли: чем меньше радиус капли и окружная скорость, тем меньше центробежная сила. В корпусе или обойме устанавливают ловушку. Под действием этой силы капля падает в ловушку, захватывается козырьком, улавливающим влагу, и стекает по корпусу турбины, откуда она дренируется.

3. Снижение окружной скорости на периферии лопаток уменьшает плотность плёночного потока, попадающего на поверхность рабочих лопаток. На рисунке 2 можно заметить также влияние  $\alpha$  и  $\beta$  – углов направления относительной ( $w$ ) и абсолютной ( $c$ ) скоростей выхода пара.

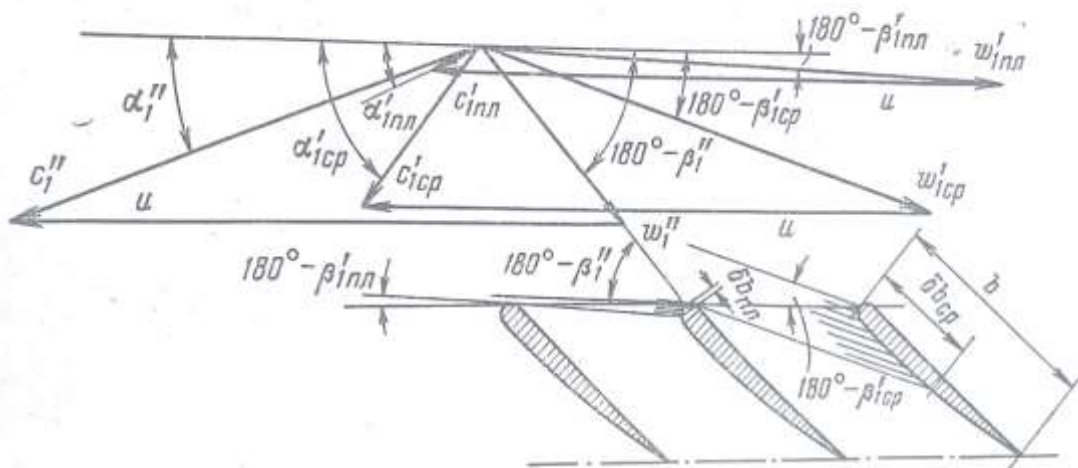


Рисунок 2. Входные треугольники скоростей турбинной ступени

К пассивным относят:

1. Реализация противоэрозионной защиты рабочих лопаток. Стеллитовые напайки устанавливаются для усиления входных кромок лопастей. Стеллит – это сплав на основе кобальта, характеризующийся высокой твердостью и износостойкостью. Такая пайка может крепиться к основному металлу серебряным припоем, но этот метод не подходит для турбин на атомных электростанциях в связи с условиями радиационной безопасности.

2. Изготовление лопаток из эрозионно-стойких материалов. Очень часто для изготовления рабочих лопаток предпочтение отдают титановым сплавам, которые обладают высокой прочностью от эрозионного износа. Еще одно преимущество титановых сплавов – плотность, которая в разы меньше плотности некоторых материалов, например, стали. Благодаря этому свойству повышается экономический показатель и увеличивается мощность турбины.

Уже долгое время проводятся исследования, заключающие в себе изготовление рабочих лопаток из титановых сплавов, однако такое выполнение не добилось широкого применения из-за высокой стоимости.

Перечисленные способы защиты от эрозионного износа и соблюдение строгих правил по ее предотвращению позволяют избежать опасного эрозионного повреждения лопаток.

#### Литература

1. Капельная эрозия рабочих лопаток [Электронный ресурс] / URL: <https://studizba.com/lectures/129-inzhenerija/1941-nadezhnost-raboty-turbinnogo-oborudovanija/37952-6-kapelnaja-jerozija-rabochih-lopatok.html>. – Дата обращения 14.03.2020.
2. Паровые и газовые турбины для электростанции: учебник для П 185 вузов – 3-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк [ и др. ]; под ред. А.Г. Костюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.
3. Паровые турбины. – 5-ое изд., доп. и подгот. к печати проф. Б.М. Троянским / А.В. Щегляев. – М., «Энергия».
4. Эрозия деталей паровых турбин [Электронный ресурс] / URL: <https://poznayka.org/s26421t1.html>. – Дата обращения 14.03.2020.