

**А.А. Генбач, Ф.А. Исламов**  
(Алматинский университет энергетики и связи)

## **ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОНЦЕНТРАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЙ ТУРБИН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Многочисленные концентраторы напряжений, имеющие место в современных мощных паровых и газовых турбинах электростанций, являются источником многих аварий и несчастных случаев.

Хрупкие разрушения роторов являются наиболее опасными, поскольку они влекут за собой, как правило, полное разрушение всего цилиндра турбины, серьезные повреждения другого оборудования, а иногда и человеческие жертвы. Такие поломки происходят внезапно, и этим усугубляется тяжесть их последствий [1].

Хрупкие разрушения могут возникнуть по следующим основным причинам:

- 1) из-за плохого качества материала ротора;
- 2) из-за высоких динамических напряжений при внезапной и сильной разбалансировке ротора;
- 3) при неправильном проведении пуска из холодного состояния.

Ротор в процессе всего производства проходит тщательный контроль. Особенно опасными являются флокены - газообразные (водородные) включения, образующиеся в отливке при неправильной технологии производства и в дальнейшем при поковке, превращающиеся в сетку пятен и трещин.

Трещины на внутренней поверхности осевого сверления ротора могут появиться и в процессе эксплуатации в результате ползучести и исчерпания длительной прочности. Поэтому при капитальных ремонтах турбины, особенно прослужившей достаточно долгое время, тщательно осматривается расточка ротора[2].

При внезапной разбалансировке ротора, например, при вылете длинной лопатки, появляется поперечная неуравновешенная сила. Даже пластические материалы при динамических нагрузках разрушаются хрупко. Высокие динамические напряжения изгиба в сбалансированном роторе приводят к быстрому появлению трещины усталости, ее развитию и хрупкому разрушению.

Особую опасность для ротора представляют пуски из холодного состояния, если последние производятся слишком быстро, и ротор не успевает прогреться.

Трещины в роторах и валах турбин могут образовываться не только на внутренней расточке, но и на поверхности вследствие усталости или малоциклового термической усталости материала.

При вращении колеблющего вала в нем возникают изгибные напряжения, достигающие максимальных значений на его поверхности. Особенно значительны они в местах концентрации напряжений, т.е. в местах резких изменений диаметров сечений, в тепловых и шпоночных канавках.

Высокие температурные напряжения в сочетании с напряжениями от центробежных сил могут привести к недопустимому возрастанию напряжений на расточке ротора. При пуске еще большие температурные напряжения возникают в роторе на его поверхности, которая имеет непосредственный контакт с паром. Эти напряжения многократно усиливаются концентрацией напряжений. Даже при умеренных скоростях пуска турбин в местах концентрации возникают столь значительные напряжения, что происходит пластическое течение материала. Это приводит к тому, что при выходе агрегата на стационарный режим в роторе появляются остаточные напряжения, которые релаксируют накопление повреждений в материале за счет ползучести. При многократном повторении таких пусковых напряжений в роторе возникают трещины малоциклового термической усталости.

В практике на турбинах большой мощности зарегистрированы случаи появления трещин усталости в цельнокованных роторах цилиндра низкого давления, в переходе от последнего диска к шейке вала, на которой размещено концевое уплотнение. Постепенное развитие и ступенчатый характер трещин свидетельствовали об их усталостном происхождении. По-видимому, значительную роль в появлении и развитии трещин сыграли образующиеся в них концентрированные солевые растворы, сильно снижающие сопротивление материала усталости [1]. При образовании трещин наблюдалось возрастание уровня вибрации подшипника.

Трещины термической усталости обычно возникают в тех местах турбины, где температура изменяется значительно, и достигает максимальных значений, где имеются резкие переходы, надрезы, галтели. Как правило, это область первой ступени ЦВД и ЦСД, и зона уплотнений первой диафрагмы или ближайшего отсека концевого уплотнения. Особую опасность представляют тепловые (компенсационные) канавки. В этих местах напряжения могут в 5-6 раз превышать номинальные напряжения[2].

Другим слабым местом является галтель между диском первой ступени и валом, которая подвергается тщательной полировке для уменьшения концентрации температурных напряжений.

Вибрация лопаток и дисков и связанные с ней усталостные разрушения происходят под действием периодических импульсов со стороны парового потока. Диски лопаток и турбин имеют большое число собственных частот и форм колебаний. Из них наибольшее значение имеют две формы колебаний: зонтичные и веерные. Опасными для турбинных дисков являются веерные колебания с числом узловых диаметров от двух до шести.

Опасным вибрациям подвержены только тонкие диски, частота собственных колебаний которых мала. Для исключения возможности резонанса диск «настаивают», снимая с его боковых поверхностей часть металла для изменения частоты собственных колебаний.

При вибрации в материале диска проявляется явление усталости металла, ведущее к появлению трещины усталости. Трещины возникают в местах концентрации напряжений: разгрузочных отверстиях, галтелях, царапинах и рисках.

Особенно опасным местом диска является его обод, на котором крепятся лопатки. Форма обода сложна, лопаточный паз имеет скругления малого радиуса, в которых действуют повышенные напряжения. Эти напряжения еще более увеличиваются при неплотной установке лопатки в диске, когда на диск начинают действовать наряду с центробежной силой лопатки и переменные напряжения от ее колебания.

Поскольку в концентраторах напряжений в конечном счете сосредоточивается теплота, то представляет интерес произвести оценку удельных тепловых потоков, вызывающих различные виды напряжений в элементах статора и ротора турбины. Реально ожидать, что удельные тепловые потоки могут достигать величин порядка ( $10^6 \div 10^7$ ) Вт/м<sup>2</sup> и более.

Это предположение следует из того, что выделение теплоты может происходить от трения при задеваниях ротора. Особо опасные тепловые потоки возникают в режимах пуска и остановки турбомашин, т.к. происходят фазовые изменения теплоносителя (рабочего тела). При этом возникают взрывообразно за ( $10^{-6} \div 10^{-7}$ ) с паровые пузыри на поверхности турбины либо происходит схлопывание пузырей в процессе конденсации пара.

При термическом воздействии на концентратор через некоторое время часть поверхности нагревается до определенной температуры, в других частях элемента турбины сохраняется начальная температура. Поэтому внутри металла возникает градиент температуры, вследствие чего металл расширяется неравномерно. Окружающие ненагретые слои оказывают сопротивление этому расширению. В результате возникают термические напряжения как в нагретой части, так и в окружающем ненагретом массиве. Эти напряжения могут достигать разрушающих значений.

В работах [3-5] приведено решение задачи о термоупругих напряжениях для идеализированных процессов. Доминирующую роль в процессе разрушения играли нормальные сжимающие напряжения. Разрушение концентратора происходило в результате потери устойчивости в тонком слое, прилежащем к свободной поверхности. Поэтому рассматривалось напряженное состояние верхнего слоя, толщина которого зависит от коэффициента теплоотдачи и структуры металла.

В нагреваемом металле бурно возрастает плотность вакансий, которые быстро объединяются в полости, т.к. интенсивность процесса объединения вакансий пропорциональна квадрату их плотности. Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то материал приобретает пластические свойства и не разрушается под действием теплоты. Таковы все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые капиллярно-пористые структуры.

Если же в материале дислокации не образуются, то растущие полости вакансий концентрируют на своих краях напряжения и ведут к разрушению структуры, в то время, когда термические напряжения еще не достигают предела пластической текучести. Происходит хрупкое термическое разрушение.

Для познания механизма процесса разрушения проведены опыты с применением методов фотоупругости и голографии[3].

Оценка напряженного состояния моделей в сходственные моменты времени производилась путем фотографической регистрации картин изохром и подсчета порядка полос в различных точках исследуемых направлений.

Модели изготавливались квадратной формы из листового материала ЭД-6 М толщиной  $5 \cdot 10^{-3}$  м. На поверхность пластин наносилась координатная сетка, а в модели выполнялись канавки, имитировавшие пористую структуру концентратора и имеющие различные закругления и радиусы закругления. Нагревательные элементы представляли нихромовую фольгу с шириной полосы  $5 \cdot 10^{-3}$  м и клеивались в модели клеем холодного отверждения.

Решение задачи термоупругости позволяет определить предельное состояние пористой и металлической парогенерирующей поверхности.

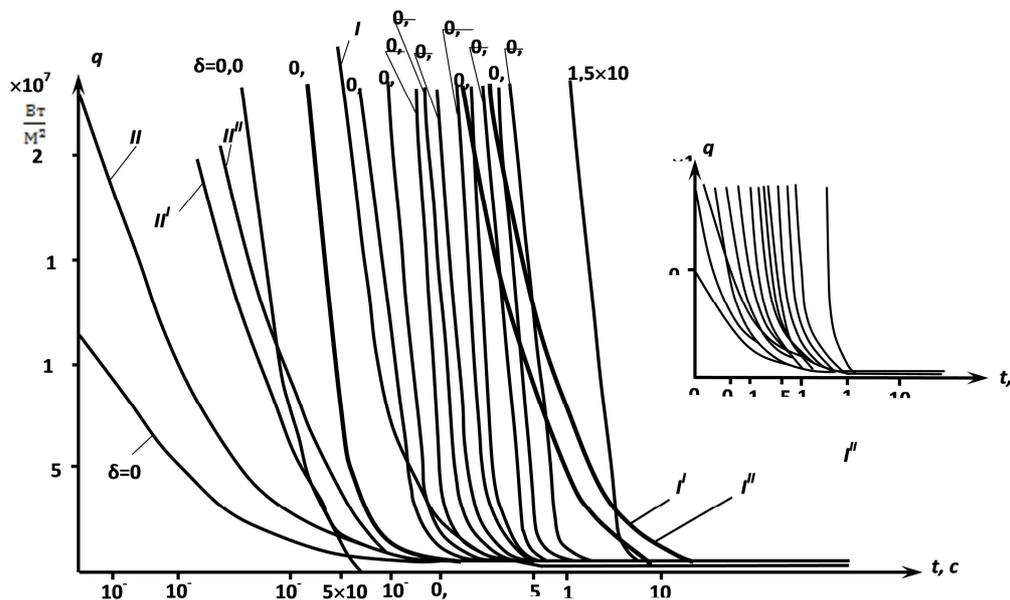
При термическом разрушении пористой структуры и металлической стенки требуется выяснить влияние величины удельного теплового потока, подводимого к поверхности, и времени его воздействия на создание разрушающих напряжений и глубину проникновения температурного возмущения.

При возрастании величины  $q$  за очень короткий промежуток времени динамические эффекты становятся весьма значительными, напряжения сжатия достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть эти напряжения в механизме термического разрушения материала. Требуется выяснить, какой вид напряжений достигает раньше своих предельных значений.

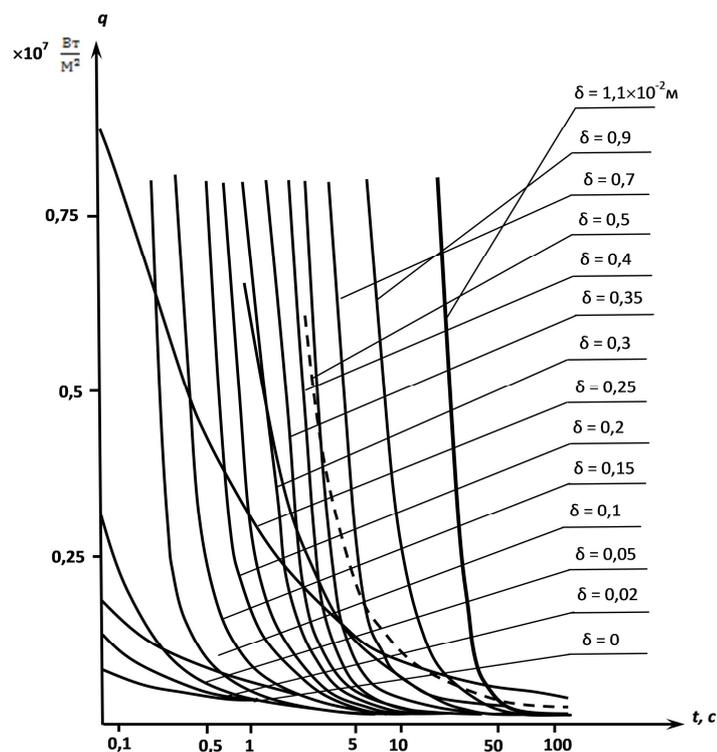
Рассмотрим пластину толщиной  $2h$ . К поверхности  $z=+h$ , начиная с момента времени  $t=0$ , подводится постоянный удельный тепловой поток. Нижняя поверхность  $z=-h$  и боковые края пластины – теплоизолированы.

Для пластин, выполненных из пористых материалов, меди и нержавеющей стали, функциональные зависимости  $q_1, q_2, q_3$  рассматривались на ЭВМ. Термомеханические характеристики структуры металлов представлены в [5]. Результаты расчетов показаны на рис. 1,2.

В случае пористой пластины тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени –  $10^{-8} \dots 10^3$  с. Нижний предел этого интервала ( $10^{-8}$  с) – время релаксации. Для интервалов времени  $10^{-8} \dots 10^3$  с соотношения для величин  $q_1, q_2$  и  $q_3$  теряют физический смысл. Поскольку терморазрушение – макропроцесс, принимаем его протекающим за время  $5 \cdot 10^{-3} \dots 10^3$  с.



**Рис.1.** Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия в области концентраторов напряжений в зависимости от времени действия для различной глубины проникновения тепловой волны  $\delta$ : I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь,  $h=0,1 \times 10^{-3}$  м); II – оплавление поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь,  $h=0,1 \times 10^{-3}$  м);  $h$  – толщина стенки.



**Рис.2.** Зависимость  $q$  и  $f(t)$ , представленная на рис. 1, в диапазоне  $q=(0,25\dots0,75)*10^7$ Вт/м<sup>2</sup> Участки кривых сжатия, определяющие глубину проникновения  $\delta > 0,3*10^{-2}$ м для больших величин  $q$  и малых  $t$ , экранируются кривой плавления II, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения I. Кривая плавления пористой поверхности пористостью  $E=5\%$  проходит значительно выше, чем у поверхности с  $E=30\%$ , что объясняется ее устойчивое хрупкое разрушение.

Для металлов кристаллы разрушаются при напряжениях до  $10^{-5}E$ , где  $E$  - модуль Юнга. Процесс состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия возникают микротрещины в области концентраторов напряжений (включений, неоднородностей). Высокие внутренние напряжения также могут появляться вследствие неоднородного протекания пластической деформации, после чего наступает хрупкое разрушение, аналогично пористому материалу. Пластическая деформация при этом рассматривается как первопричина разрушения, хотя она может задерживать рост трещин[6].

В основе разрушения, с одной стороны, лежат разрывы межатомных связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой – разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, когда происходит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения. В окрестности острого концентратора возникает высокая интенсивность напряжений и наступает пластическое течение материала или распространение хрупкой трещины. Устанавливается предельное равновесие хрупких тел с трещинами.

Таким образом, механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения пористых материалов. Ряд термомеханических свойств также различен. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода проведена аналогия в поведении материалов в предельном состоянии и выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет предсказывать и предотвращать возникновение таких состояний для металлической поверхности и подбирать оптимальные тепловые нагрузки для пористых материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трухний А.Д., Лосев С.М. Стационарные паровые турбины. – М.: Энергоиздат, 1981.- 456с.
2. Молочек В.А. Ремонт паровых турбин. – М.: Энергия, 1968. – 376 с.
3. V.M. Polayev, A.N. Genbach, A.A. Genbach / An experimental study of thermal stress in porous materials by methods of holography and photoelasticity // Experimental thermal and fluid science, crème of the Americas, New York, volum 5, number 6, november. – 1992. – P. 697-702.

4. Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // Теплофизика высоких температур. – 1991. Т. 29, №5. – с 923-934.

5. Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. – 2011. №2 (65). – С. 91-93.

6. Поляев В.М., Генбач А.А., Пчелин А.Л. Термический способ разрушения материала // Вестник МГТУ. – 1992. Серия Машиностроение, №2. – С.104-110.

Генбач А.А., Исламов Ф.А.

**Электр станциялардың кернеу шоғырландырғыштарында пайда болатын жылу ағындарын бағалау.**

**Түйіндеме.** Турбомашиналардың бұзылу себептері қаралды. Бұзылудың басты себебі кернеу шоғырландырғышымен байланысты. Күйзелткіш жылу ағынан анықтау есебі шешілді. Шешім кеуек және метал материалдарына берілген. Созылу, сығу және балқыту арқылы материалдың күйзелуін шамданатын жылу ағындары анықтаған. Жылу ағынының әрекет уақыты әсері айқындалды. Кернеу шоғырландырғышы аймағында жылу ағынының әртүрлі ену тереңдігі қарастырылды.

Генбач А.А., Исламов Ф.А.

**Оценка тепловых потоков, возникающих в концентраторах напряжений турбин электростанций.**

**Резюме.** Рассматриваются причины аварий турбомашин. Главная причина аварий связана с концентраторами напряжений. Решается задача по определению разрушающих тепловых потоков. Решение дано для пористых и металлических материалов. Определены тепловые потоки, вызывающие разрушение материалов растяжением, сжатием и плавлением. Выявлено влияние времени действия тепловых потоков. Рассмотрена различная глубина проникновения тепловой волны в окрестностях концентраторов напряжений.

Genbach A.A., Islamov F.A.

**Evaluation of heat flow in a stress concentrator power turbines.**

**Summary.** Reasons of accidents of turbo-machines are examined. The main reason of accidents is related to the concentrators of tensions. The task is being decided on determination of destroying thermal streams. The decision is given for porous and metallic materials. Thermal streams are certain, defiant destruction of materials tension, compression and melting. The influence of time of action of thermal streams is educed. The different depth of penetration of heat-wave is considered in a neighborhood of concentrators of tensions.