

А.А. Генбач, Ф.А. Исламов

(Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАДЕВАНИЯ РОТОРА ТУРБИНЫ

Концентраторы напряжений в турбомашинах являются источником аварий и несчастных случаев персонала на электростанциях[1].

Особое внимание должно быть обращено на устранение концентраторов напряжений, при ремонте которые приводят к усталости металла (снижают предел усталости) и служат первоисточником появления усталостных трещин и изломов. Примерами концентраторов служат плохая обработка поверхности (шероховатость, риски, забоины и др.), резкие изменения формы или размеров (отверстия, выточки и т.п.), неправильные переходы от одного диаметра к другому (острые углы или недостаточные радиусы закруглений), действие внешней среды (коррозия) [2].

С целью уменьшения напряжений и повышения предела усталости все уступы и переходы должны выполняться с закруглениями или переходами по плавной кривой (галтели) валов, дисков и других напряженных деталей. Повышение предела усталости достигается шлифованием, полировкой деталей.

Для деталей, работающих продолжительное время при постоянном напряженном состоянии, особенно в области высоких температур, проявляется свойство металла медленно и непрерывно пластически деформироваться – «ползти», даже в тех случаях, когда рабочие напряжения лежат значительно ниже предела текучести при данной температуре. В зависимости от температуры и нагрузки деформация ползучести может продолжаться вплоть до разрушения.

При производстве ремонтных работ после очистки ротор осматривается оптическими приборами, особенно в зонах с концентраторами напряжений. Напряжения возникают в кольцевых выточках, галтелях, переходах сечений от одного диаметра ротора к другому, в шпоночных канавках, отверстиях, резьбовых соединениях, на кромках без достаточных радиусов закругления, а также в деталях при их горячей посадке с завышенными натягами, вызывающими большие удельные давления. Концентраторами напряжений могут быть дефекты, возникающие в процессе эксплуатации и ремонта: насечки, риски, пробоины, наклеп, разъедания поверхности. Причиной появления этих дефектов могут быть грубая обработка и повреждения поверхностей (удары), износ от попадания твердых частиц, паразитные токи, эрозия, коррозия, вибрация.

Обработка рабочих поверхностей для горячей посадки деталей на вал (диски, втулки, центрирующие кольца) должна проводиться с частотой, соответствующей 6-8-му классу. Чистота поверхности повышает длительную прочность и коррозионную стойкость. Поэтому после обработки производят полировку мест горячей посадки до полного удаления следов резца. Натяг горячей посадки должен быть рассчитан на сохранение плотной посадки при пуске турбины, когда диски прогреваются быстрее вала, при числе оборотов, когда срабатывает предохранительный выключатель; ослабление посадки между сопрягаемыми деталями может привести к наклепам, контактной коррозии и опасным напряжениям, связанным с вибрацией[1,2].

Галтели, углы, кромки и другие переходные места должны быть обработаны с требуемыми радиусами закруглений и с последующей шлифовкой. Сверловка отверстий, нарезки резьбы, обработка и устройство новых шпоночных канавок, кольцевых выточек и других углублений могут быть допущены только в особых случаях, с обеспечением необходимой прочности деталей и с принятием мер для устранения очагов концентрации напряжений.

Оставление трещин во вращающихся деталях при таких условиях не может быть допущено; расчистка трещин должна производиться до полного их удаления, с закруглением краев образующейся канавки. Если обработка трещины приводит к недопустимому ослаблению детали, то она бракуется.

Повреждение вала в виде царапин, задиров, рисок (особенно опасны глубокие, идущие вдоль шейки), а также коррозионные повреждения (ржавление) и шероховатости рабочих поверхностей устраняются в зависимости от величины дефекта и его направления проточкой с последующей шлифовкой или только шлифовкой.

Различные дефекты на поверхности лопаток в виде рисок, царапин, шероховатостей и плохой полировки, а также выточки, резкие переходы сечений, надрезы и наклеп в местах расклепки бандажа являются очагами местных напряжений, способствующих разрушению

лопаток. Чаще всего в зонах концентрации напряжений при определенных условиях начинается и развивается разрушение рабочих лопаток, дисков и других деталей турбины.

Для изучения концентраторов напряжений рассмотрим выделение теплоты, имеющее место при задеваниях ротора турбины. Моделирование произведем для случая имитации процесса задевания тремя гребнями лабиринтовых уплотнений. Для этих целей исследуемая модель содержит три термоэлемента, соединенных параллельно, а концы спиралей заделываются в медные электроды, размещенные в торце (малой вертикальной грани). Образец имел размеры 90x60x25 мм. Просверливалось три отверстия перпендикулярно поверхности грани 60x25 мм на глубину 12 мм диаметром 6 мм. Провода термоэлементов выводились на ту же грань.

Исследования проводились с применением голографии, когда регистрация интерферограмм осуществлялась в реальном масштабе времени. Изучались напряжения в предельном состоянии материала, создаваемого термоэлементами. Мощность определялась с точностью $\pm 1,6\%$ [3].

Метод голографической интерферометрии позволяет изучать напряженное и деформированное состояние материала и измерять достаточно малые деформации, имеющие место в концентраторах напряжений.

Деформации регистрировались на поверхности образцов в реальном масштабе времени. Также фиксировались картины полей тепловых напряжений и места их концентраций.

Изменяя диаметр сверления отверстий от 3 до 6 мм и подводимую мощность от 7 до 30 Вт, можно было получать удельные тепловые потоки, равные $(0,25+4,2) \cdot 10^6$ Вт/м².

Анализ интерферограмм показал следующее (рис. 1). Расширение образца наблюдается вначале вокруг источника тепла, а затем во всем объеме. Деформация объема образца зависит от распределения температурного поля, создаваемого источниками тепла, и возникающих термических напряжений на поверхности и в объеме тела.

Сравнение картин деформаций голографических интерферограмм и термических напряжений на интерферограммах, полученных оптико-поляризационным методом [3], выявило их аналогичность, что указывает на взаимосвязь поверхностных и глубинных процессов.

Обнаружено, что образцы с малой пористостью $\epsilon=(5+20\%)$ находятся в более напряженном состоянии по сравнению с вязкими и пористыми средами $\epsilon=(40+90\%)$. Увеличение мощности теплового потока в два раза приводило у них рост деформации на поверхности до трех раз, тогда как у образцов с большой пористостью – лишь в полтора раза.

Число интерференционных полос на единицу длины выше у пород с низкими значениями пористости, что означает наличие в них больших термических напряжений, скорость роста которых увеличивается с ростом тепловой нагрузки.

Интерферограммы позволили обнаружить дефекты и трещины, непросматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы.

Расшифровка голографических интерферограмм производилась по методике [4]. Определялось направление вектора смещения \vec{d} . Величина \vec{d} находилась по фотографии интерференционной картины: $|\vec{d}| = N \cdot \lambda / (1 + \cos \varphi)$ где N – измеренное число полос между исследуемой точкой и полосой нулевого порядка; λ – длина волны; φ – угол между направлением освещения \vec{r}_0 исследуемой точки и наблюдения \vec{r}_n этой точки на голограмме, т.е. $\vec{r}_n \wedge \vec{r}_0$.

Градиент перемещений, определяющий величину деформаций для одного теплового источника, имел наибольшее значение в области нагревателя радиусом до $10 \cdot 10^{-3}$ м и возрастал с увеличением времени теплового воздействия (рис. 2). В случае трех одновременно действующих источников тепла, каждый из них создавал независимое поле перемещений, которое с ростом времени нагрева приводило к простой суперпозиции на поверхности образца (рис. 3). Это явление имело место как для полей перемещений вдоль плоскости, проходящей через центры источников, так и для плоскостей, отстоящих от них на расстоянии $6 \cdot 10^{-3}$ м.

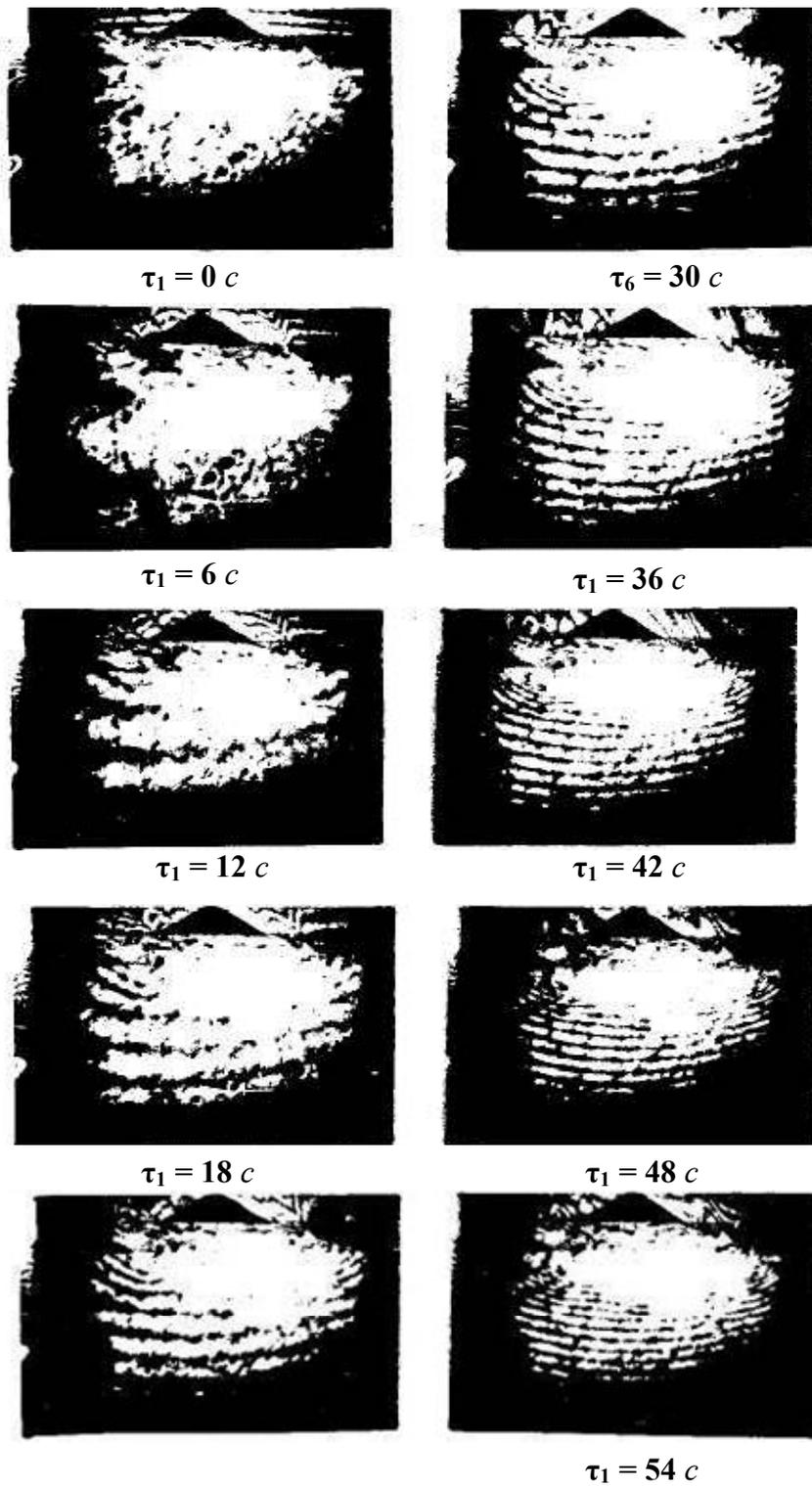


Рис. 1. Голографические интерферогаммы пористого образца с малой пористостью ($\epsilon=5\%$), отображающие состояние поверхности через каждые 6с вплоть до предельного состояния, при тепловом потоке $Q=15\text{Вт}$ ($q=0,5 \cdot 10^6 \text{Вт/м}^2$)

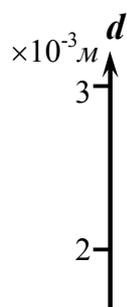


Рис.2. Зависимость перемещений вдоль поверхности образца от центра теплового источника при $q=5,5$ Вт для различного времени теплового воздействия: I – $t=15$ с; II – $t=25$ с; III – $t=30$ с. Один нагреватель, $x=0$, угол - $38^{\circ}55'$

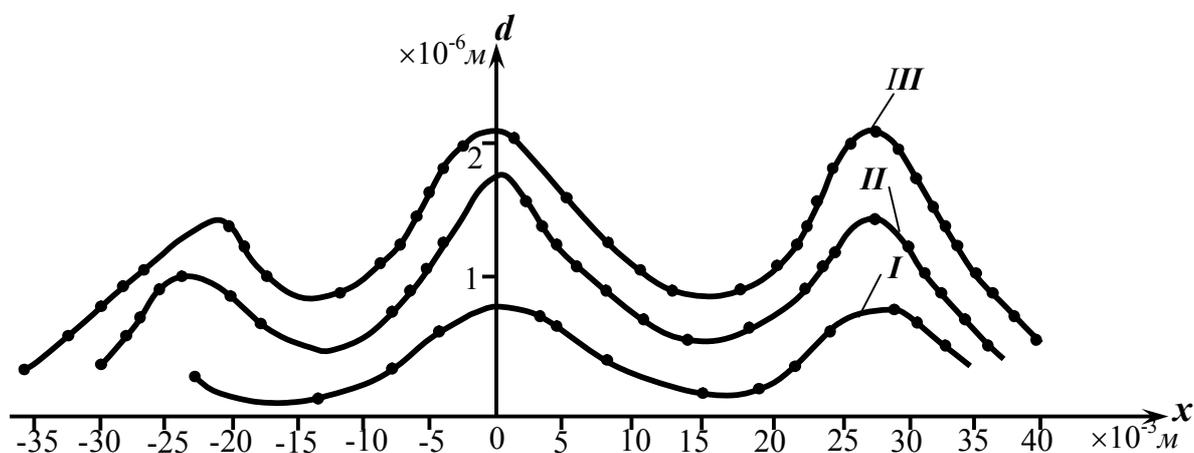


Рис. 3. Зависимость перемещения по плоскости, параллельной плоскости центров тепловых источников ($y=6 \cdot 10^{-3}$ м), поверхности образца при $Q=4,8$ Вт для различного теплового воздействия: I – $t=15$ с; II – $t=25$ с; III – $t=30$ с, угол - $38^{\circ}55'$

Знание закона распределения напряжений в материале позволяет уменьшить вероятность возникновения разрушительных трещин при проектировании, изготовлении и ремонте турбомашин.

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность применения оптического метода при моделировании концентраторов напряжений на примере задевания ротора турбомашин. Выявлены распределения термических напряжений объемного образца, расшифрованы голографические интерферограммы и намечены пути снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине концентраторов напряжений. Исследования имеют практическое значения в области предельного состояния деталей турбомашин, в том числе имеющих различную пористость.

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. – 376с.
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. Островский Ю.Н., Бугусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977.

Генбач А.А., Исламов Ф.А.

Турбина роторын тиіп кету үдерісін модельдеу

Түйіндеме. Турбомашиналарда әсіресе жөндеу жұмыстарынан кейін болатын болатын кернеу шоғырландырғыштары қарастырылады. Голографиялық интерферометрия көмегімен кернеулер мен деформациялардың визуализациясы жүргізілді. Интерферограммаларды тіркеу нақтылы уақыт масштабында жасалды. Кернеу шоғырландырғыштарының аймағындағы әртүрлі ақаулар айқындалды. Бір және үш жылу көздері бар кезіндегі материалдың орнын ауыстыруының тәуелділіктері тұрғызылды.

Генбач А.А., Исламов Ф.А.

Моделирование процесса задевания ротора турбины

Резюме. Рассматриваются возможные концентраторы напряжений в турбомашине, особенно имеющие место после проведения ремонтных работ. Проведена визуализация напряжений и деформаций с помощью голографической интерферометрии. Регистрация интерферограмм производилась в реальном масштабе времени. Выявлены различные дефекты в области концентраторов напряжений. Построены зависимости перемещений материала при одном и трех источниках тепла.

Genbach A.A., Islamov F.A.

Modeling the process of touching turbines rotor

Summary. Possible stress raisers are being regarded in turbo machines especially occurring after repairs. Visualization of stress and deformation is held with the help of holographic interferometry. The registration of interferogramme was conducted in real time. Different defects are revealed in the field of stress concentrators. Dependences of material transference are built at one and three heat resource.