

УДК 621.165:539.4

В.П. СУХИНИН, д-р техн. наук; проф. УИПА, г. Харьков

Т.Н. ПУГАЧЕВА, старший преподаватель УИПА, г. Харьков

МЕРЫ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ РОТОРОВ. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕТАЛЛОВ

Розглянуті питання, пов'язані з крихким руйнуванням роторів. Запропоновані критерії визначення міцних характеристик, при яких можливий перехід матеріалу суцільнокованого ротора у крихкий стан і його руйнування, що пов'язане з жорсткістю напруженого стану.

The issues has been treated connected of destruction of rotors. The criteria of determination of strongly descriptions at which passing of material of rotor is possible to the fragile state and his destruction are offered, that is related to inflexibility of the tense state.

Разрушения роторов паровых турбин в процессе эксплуатации приводят к серьезным повреждениям турбоагрегата и создают угрозу для персонала электростанции. Такие случаи с разрушением сооружений электростанций и возникновением пожаров имели место в мировой и отечественной практике эксплуатации. За редким исключением все случаи аварий были связаны с наличием в металле роторов металлургических дефектов – основных источников зарождения и развития трещин [1, 2].

Накопленные к настоящему времени экспериментальные и эксплуатационные данные, в том числе результаты исследований условий разрушения дисков, позволяют рассмотреть условия обеспечения прочности и долговечности конструкций на новом уровне. Для этого, прежде всего, необходимо уточнить критерии прочности.

Необходимо подчеркнуть, что количество марок сталей, используемых для изготовления роторов весьма ограничено и каждая из них проходила длительные стадии разработки, исследований свойств при низких и высоких температурах, а также апробацию в эксплуатации. При этом режимами термической обработки могут быть обеспечены наилучшие характеристики каждой выбранной марки стали как с точки зрения необходимых запасов прочности, так и с соотношения категорий прочности и вязкости. Указанный подход позволяет, при прочих удовлетворительных показателях качества металла, существенно повысить его сопротивление хрупким разрушениям.

Трещины в реальных деталях, изготовленных из материалов различных классов, обуславливают уровень более низких разрушающих нагрузок по сравнению с уровнем разрушающих нагрузок при отсутствии трещин. Снижение сопротивления разрушению материалов с трещинами зависит от характера разрушения, обусловленного состоянием материала: хрупкого, квазихрупкого, вязкого. На характер разрушения, при этом, влияют также: пластичность материала, уровень рабочей температуры и ее отношение к переходной температуре хрупкости T_{50} , скорость деформирования, величина концентрации напряжений, размеры трещины.

Классификация характера разрушений основана на температурных зависимостях силовых, деформационных и энергетических характеристик разрушения с использованием понятий первой и второй температур хрупкости.

Переход вязких разрушений в квазихрупкие зависит от первой критической температуры $T_{хр1}$, а квазихрупких в хрупкие – от второй критической температуры $T_{хр2}$. Первые критические температуры характеризуют начало снижения местных

пластических деформаций (ϵ_c) и устанавливаются по доле вязкой составляющей площади F_B в изломе ($F_B = 50\%$) или минимально допустимой работе разрушения при ударном нагружении образца с надрезом (KCV , кДж/м²). Вторые критические температуры устанавливаются по снижению номинальных разрушающих напряжений образцов с трещинами или концентраторами (по нетто сечению) ниже предела текучести или по условиям достижения плоского деформированного состояния при разрушении образца с трещиной [3].

Разрушающие напряжения и критические размеры трещин при температурах ниже T_{xp2} определяют на основе критериев линейной механики разрушения G_{1c} , K_{1c} , δ_{1c} , ϵ_c , которые являются характеристиками металлов для заданных условий испытаний и эксплуатации. Это дает возможность, после определения указанных характеристик на лабораторных образцах, оценить разрушающие нагрузки, напряжения и критические размеры трещин в элементах конструкции и деталях независимо от их размеров и формы.

Таким образом, первая и вторая критические температуры позволяют выделить три вышеупомянутые вида разрушения, отличающиеся уровнями разрушающих напряжений, скоростями разрушения, пластическими деформациями, видом излома. В наибольшей степени дефекты (трещины) снижают сопротивление разрушению при хрупком разрушении материалов, т.е. при температуре ниже T_{xp2} . При хрупком характере разрушения резко снижаются разрушающие напряжения, которые по отношению к пределу текучести составляют 0,2–0,5 его величины, а критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{1c} при температуре ниже T_{xp2} могут составлять 30–50 % от значений K_{1c} при нормальной температуре.

Как показывает практика, во многих случаях причиной разрушений деталей машин и элементов конструкций являются технологические, производственные и эксплуатационные дефекты.

Дефекты существенно сокращают долговечность конструктивных элементов, и период развития усталостных трещин в зависимости от условий эксплуатации (режима циклического нагружения), а также уровня концентрации напряжений и может составлять существенную, в ряде случаев и преобладающую, долю общей долговечности конструктивного элемента.

На вязкость разрушения существенное влияние оказывает прочность конструкционных сталей. Как правило, с увеличением $\sigma_{0,2}$ вязкость разрушения снижается, но для каждого класса материалов эта зависимость своя. Это свидетельствует о сильном влиянии параметров структуры материала на сопротивление хрупкому разрушению даже для материалов одного класса.

На протяжении длительного времени существовала оценка прочности турбинных дисков, как одного из главных и определяющих конструкцию ротора элементов, при которой максимальные упругие напряжения сравнивались с пределом прочности (исходя из предположения, что последний соответствует разрушающему напряжению). Изменение представлений о надежности роторов вызвало необходимость сравнения рабочих напряжений с пределом текучести. Исследования несущей способности элементов конструкции ротора (в первую очередь дисков) позволили сделать вывод, что в обоих указанных случаях не учитываются резервы прочности, обусловленные пластическими свойствами материала.

Диск турбомшины как элемент ротора (и ротор в целом), представляя собой осесимметричную пространственную конструкцию, как правило, значительных размеров, находится в объемном сложнапряженном состоянии. При проектировании

роторов и дисков наряду с мерами по обеспечению надежности во время эксплуатации стремятся выполнить конструкцию минимального веса, используя в максимальной степени прочностные ресурсы материала реальной детали. Решение этих вопросов в значительной мере зависит от совокупности всех свойств, характеризующих прочностные и пластические показатели материала с учетом условий эксплуатации.

Если прочность гладкого образца, на котором исследуются механические свойства материала, определяется лишь его прочностными характеристиками ($\sigma_{0,2}$; σ_b или $\sigma_{д.п}$), то для оценки прочности конструкции этого, как правило, недостаточно, поскольку распределение напряжений в образце одноосное, равномерное, а в диске – неоднородное, неравномерное.

Основными способами повышения прочности дисков и роторов являются оптимизация конструкции, автофреттирование и подбор материала, обладающего необходимыми характеристиками прочности и пластичности. Под оптимизацией конструкции подразумевается подбор профилей дисков и конструктивных элементов ротора, обеспечивающих минимальные массу и уровень напряжений.

В [4] приведены результаты испытаний дисков из легированной стали одной марки с высокой и низкой пластичностью, оцениваемой относительным сужением. Для дисков из материалов с высокой пластичностью эта характеристика составляла 75 %, с низкой – 1–3 %. Проводились также испытания пластичных дисков с надрезами при различной ударной вязкости, существенно влияющей на прочность. Для обоих пластических состояний прочность надрезанных образцов была более чем в 1,5 раза выше прочности гладких образцов, а прочность надрезанных дисков меньше прочности ненадрезанных при полном отсутствии закономерности результатов. В [5] для обеспечения оптимального уровня сопротивления дисков разрушению рекомендуется ориентироваться на пластичность материала, характеризуемую относительным поперечным сужением $\psi = 40\%$. Указано, что более высокие значения сужения ($\psi > 40\%$) приведут к снижению относительной прочности дисков с центральным отверстием.

Для определения прочности диска, работающего при постоянной температуре, используются кривые деформирования металла при одноосном растяжении или идентичные им изохронные кривые ползучести $\sigma = f(\epsilon)$, перестраиваемые для отдельных моментов времени из кривых ползучести $\epsilon = f(t)$.

В качестве величины, учитывающей свойства реального материала и способность его к перераспределению напряжений, может быть принята величина $\frac{\sigma}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{d\sigma}$, которая является котангенсом угла наклона касательной к кривой деформирования $\sigma = f(\epsilon)$ в логарифмических координатах. При степенной зависимости $\epsilon = A \cdot \sigma^m$ в такой же системе координат кривая деформирования обращается в прямую, а котангенс угла наклона касательной $\frac{\sigma}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{d\sigma}$, совпадающей в данном случае с кривой деформирования по всей ее длине, будет постоянной величиной, равной m (рис. 1). Таким образом, $m = \frac{\sigma}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{d\sigma}$ определяет форму кривой деформирования металла. Если коэффициент A представить как $1/E$, то при $m = 1$ кривая деформирования подчиняется закону Гука ($\epsilon = (1/E) \cdot \sigma = A \cdot \sigma$). Чем больше параметр m , тем больше материал приближается к идеальному пластичному и тем существеннее происходит перераспределение напряжений. При снижении этого параметра до $m = 1$ напряжения

не перераспределяются и такие материалы принято считать хрупкими, поскольку они разрушаются даже при одноосном нагружении без заметной пластической деформации (рис. 1). В этом смысле параметр m можно условно назвать степенью пластичности, однако не следует отождествлять его с понятием пластичности, характеризующейся величиной деформации до разрушения при одноосном нагружении.

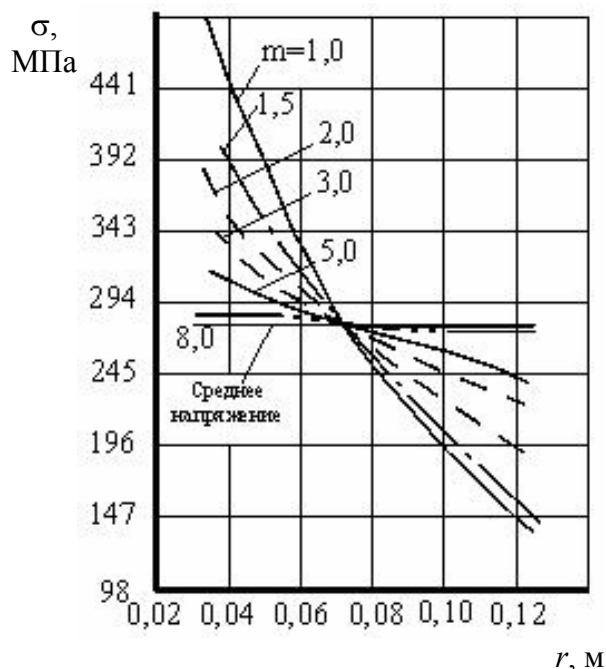


Рис. 1. Зависимость перераспределения напряжений в диске от параметра m

определяет причины хрупкого разрушения, принят коэффициент жесткости – отношение максимального касательного напряжения к эквивалентному, определяемому по теории наибольших линейных деформаций.

Г.В. Ужик [6] коэффициентом жесткости предложил считать соотношение максимальных касательных и нормальных напряжений, характеризующих сопротивление пластической деформации и разрушение отрыва. По этой схеме признаком протекания пластической деформации является возрастание касательных напряжений до уровня предела текучести материала раньше, чем нормальных напряжений до уровня сопротивления отрыву. В противном случае деталь разрушается хрупко.

Разрушение происходит, когда максимальное напряжение достигает предела прочности σ_b . Величиной, характеризующей хрупкое разрушение, является коэффициент жесткости $\gamma = \sigma_{\max} / \sigma_i = \sigma_b / \sigma_{0,2}$.

При двухосном состоянии жесткость напряженного состояния имеет максимальное значение при $\sigma_2 = 0,5 \cdot \sigma_1$, тогда

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_1 \cdot 0,866,$$

а коэффициент жесткости – $\gamma = \sigma_1 / \sigma_i = 1/0,866 = 1,155$.

Хрупкое разрушение при двухосном нагружении с $\gamma = 1,155$ обусловлено отношением предела прочности σ_b к пределу текучести $\sigma_{0,2}$, меньшем, чем жесткость напряженного состояния в наиболее нагруженной точке:

В работе [5] приведены результаты упруго-пластического расчета напряженного состояния плоских дисков с центральным отверстием. Из рисунка 1 видно, что при $m \geq 8$ тангенциальные напряжения практически выравниваются, а при $m = 1$ результаты упруго-пластического расчета совпадают с результатами упругого расчета диска. Отметим, что только одно условие $m > 1$ еще не означает способность детали к заметной пластической деформации, хотя образец из такого металла при одноосном растяжении разрушается с пластической деформацией. Ряд исследований на дисках из достаточно пластичных материалов, подтверждает возможность хрупкого разрушения при указанных условиях [6].

В качестве величины, характеризующей отличие напряженных состояний детали и образца, что и

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} < \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} > \frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{1,155} = 0,866 .$$

Найденное отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,866$ можно считать критическим. Для обеспечения некоторого минимального запаса по отношению к критической величине следует обеспечивать при проектировании для выбранной марки стали отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B \leq 0,85$ ($\sigma_{0,2} \leq 0,85\sigma_B$).

Апробацией этой величины можно считать то обстоятельство, что в результате анализа эксплуатационных данных не выявлено случаев разрушения дисков и роторов при соблюдении указанного соотношения $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Естественно это не относится к случаям повреждений, связанных с наличием недопустимых металлургических дефектов, конструктивных или эксплуатационных факторов.

Цельнокованные роторы находятся в объемном трехосном напряженном состоянии. Рассмотрим упрощенную модель цельнокованого ротора, представляющую собой сплошной вращающийся цилиндр. Максимальные напряжения имеют место в центре такого цилиндра. При этом тангенциальные и радиальные напряжения равны между собой, а осевые составляют 29 % от них.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2; \quad \sigma_3 = 0,29 \cdot \sigma_1; \\ \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_1 \cdot 0,71; \\ \gamma &= \frac{\sigma_1}{\sigma_i} = \frac{1}{0,71} = 1,40; \quad \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} > \frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{1,40} = 0,71 . \end{aligned}$$

Следовательно, для предупреждения хрупкого разрушения цельнокованого ротора необходим материал с пределом текучести $\sigma_{0,2} \leq 0,7\sigma_B$.

Итак, в качестве критерия хрупкого разрушения пластичных материалов следует принимать неравенство $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} > \frac{1}{\gamma}$ или $\sigma_{0,2} > \frac{\sigma_B}{\gamma}$.

Таким образом, возникновение хрупких разрушений связано не только со свойствами материала, но и с характером напряженного состояния, определяемым его жесткостью. Жесткость напряженного состояния зачастую обусловлена особенностями конструкции, в частности, наличием угловых переходов, канавок, отверстий, создающих неравномерность распределения напряжений. Поэтому следует учитывать не только хрупкость, характеризующую собственно металл, но и совокупность всех факторов, влияющих на напряженное состояние детали.

Список литературы: 1. Методические рекомендации и атлас повреждений деталей проточной части турбин / сост.: В.Ф. Резинских, Э.С. Гинзбург, А.М. Клыпина. – М.: Изд-во ВТИ, 1993. – 132 с. 2. Резинских В.Ф. Увеличение ресурса длительно работающих паровых турбин / В.Ф. Резинских, В.И. Гладштейн, Г.Д. Авруцкий. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 296 с. 3. Ashton R. The effect of porosity on 5086 – H116 aluminum alloy welds / R. Ashton, J. Wesley, G. Duxon // Welding J. – 1975. – № 3. – P. 95-98. 4. Lape E. On relations between various laboratory fracture test / E. Lape, J. Lubulan // Trans. ASME. – 1956. – № 4. – P. 823-835. 5. Рабинович В.П. Прочность турбинных дисков / В.П. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1966. – 151 с. 6. Ужик Г.В. Сопротивление отрыву и прочность металлов / Г.В. Ужик. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 180 с.

© Сухинин В.П., Пугачева Т.Н., 2010
Поступила в редколлегию 15.02.10