

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА РАЗРУШЕННОГО РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ*

*А.Н. СМЕРНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Н.В. АБАБКОВ, канд. техн. наук
(КузГТУ, г. Кемерово),
Э.В. КОЗЛОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор
Н.А. КОНЕВА, доктор физ.-мат. наук, профессор
Н.А. ПОПОВА, канд. техн. наук, доцент
(ТГАСУ, г. Томск),
А.А. ЧЕГОШЕВ, аспирант
(КузГТУ, г. Кемерово)*

Статья поступила 3 сентября 2012 года

Абабков Н.В. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Исследовано структурное состояние металла разрушенного ротора паровой турбины с применением методов электронной микроскопии. Установлена взаимосвязь акустических и магнитных характеристик с параметрами микроструктуры металла разрушенного ротора паровой турбины.

Ключевые слова: ротор паровой турбины, микроструктура, микротрещины, диагностика.

В практике эксплуатации паровых турбин известны серьезные аварии в результате повреждения роторов. Большое внимание привлекли следующие случаи: авария на тепловой электростанции в США (штат Теннесси, 1974 г.); авария в России на Каширской ГРЭС-4 [1] (октябрь 2002 г.); авария в Украине на одном из энергоблоков Приднепровской ТЭС (2007 г.).

Большой интерес представляет исследование металла разрушенных роторов паровых турбин высокого давления для выявления причин его разрушения и для предотвращения в будущем подобных случаев. В настоящей публикации приведены результаты исследований металла фрагмента разрушенного ротора паровой турбины высокого давления (рис. 1, а), после наработки в 293 061 ч на ОАО «Западно-Сибирский Metallургический Комбинат (г. Новокузнецк).

Для экспериментальных исследований был вырезан образец из разрушенного ротора паровой турбины высокого давления в виде диска шириной 50 мм, включающий с одной стороны поверхность излома (рис. 1, б). На этих изломах можно различить поверхность непосредственного разрушения ротора за счет роста трещин, а также следы ударов выступающих частей поверхностей после окончательного разрушения сечения ротора и вращения одной из его образовавшихся частей относительно другой.

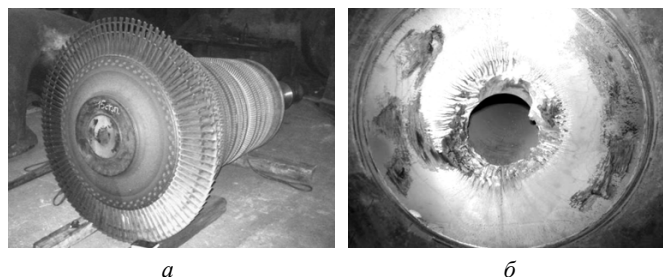


Рис. 1. Общий вид разрушенного ротора паровой турбины высокого давления:

а – общий вид; б – поверхность излома

Вид поверхностей излома говорит об усталостном характере разрушения ротора, а именно о многоциклового усталости. На изломе отчетливо различаются зоны, соответствующие трем ее стадиям: зарождения разрушения, устойчивого (стабильного) роста усталостной трещины и неустойчивого (ускоренного) распространения.

Химический состав исследованного металла был определен на оптическом эмиссионном спектрометре «ARL 3460 Quantis» и представлен в таблице.

Химический состав исследованного металла, %

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S
0,339	0,263	0,378	1,536	0,304	1,607	0,117	0.0086	<0,150

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0253

По химическому составу металла установлено, что ротор паровой турбины изготовлен из стали 34ХН1МА. Эта сталь относится к классу конструкционных легированных и предназначена для изготовления валов, роторов, дисков паровых турбин, валов-шестерен, муфт, зубчатых колес и других особо ответственных, тяжело нагруженных деталей, работающих при температуре до 500 °С.

В ходе исследования с применением просвечивающей электронной микроскопии (Просвечивающий электронный микроскоп Теснаі G2 FEI) установлено, что в составе исследуемого материала представлена α -фаза – феррит (твердый раствор углерода в α -Fe) и карбид железа (цементит Fe_3C). Морфологически присутствует три компонента: феррит, карбид железа и перлит, состоящий из смеси α -фазы и карбида железа. Перлит в стали является совершенным по концентрации углерода. В структуре перлит преимущественно присутствует в виде прослоек (рис. 2). Размер отдельных частиц цементита достигает 250×2500 нм.

В зоне шпоночного паза (рис. 3, участок 2) выявлено большое число микротрещин с максимальной плотностью, определенной на расстоянии 0,2 мм от поверхности кручения. Микротрещины расположены преимущественно по границам зерен.

В исследуемой стали параметр кристаллической решетки превышает параметр кристаллической решетки чистого α -Fe, а именно равен $2.8691 \dots 2.8696$ Å. Это

свидетельствует о том, что в твердом растворе присутствуют элементы, приводящие к увеличению параметра кристаллической решетки α -Fe. К таким элементам относятся элементы внедрения – C, N, в меньшей степени O и элементы замещения – V, Mo, Mn, Cu.

Все фрагменты содержат дислокации. Бездислокационные фрагменты также присутствуют в структуре материала, однако их объемная доля не превышает 5 %. Размер фрагментов во фрагментированной субструктуре служит индикатором степени пластической деформации. Чем меньше размер фрагментов, тем больше степень пластической деформации.

Средний размер фрагментов вблизи зоны шпоночного паза (рис. 3, участок 2) имеет минимальное значение ($\sim 2,5$ мкм). Во всех остальных точках его величина почти в два раза выше и практически не меняется.

Методом исследований состояния поверхностного слоя разрушенного ротора паровой турбины высокого давления со стороны излома был выбран спектрально-акустический метод, основанный на измерении времени задержки и скорости распространения волн Рэлея [2–4], а также магнитошумовой метод, основанный на эффекте Баркгаузена [5, 6].

Для измерения акустических и магнитных характеристик датчики приборов устанавливались сначала вдоль, а затем и перпендикулярно поверхности исследуемого ротора паровой турбины (рис. 3, участки 1–78).

После установки датчика и получения устойчивых значений производилось измерение. Для получения достоверных результатов измерения проводились в каждой точке не менее 8 раз. После записи результата измерений во временный буфер датчики перемещались в соседнюю зону, и по достижении устойчивого значения производили запись значений.

Все измерения (скорость, величина времени задержки ПАВ, интенсивность магнитного шума) за-

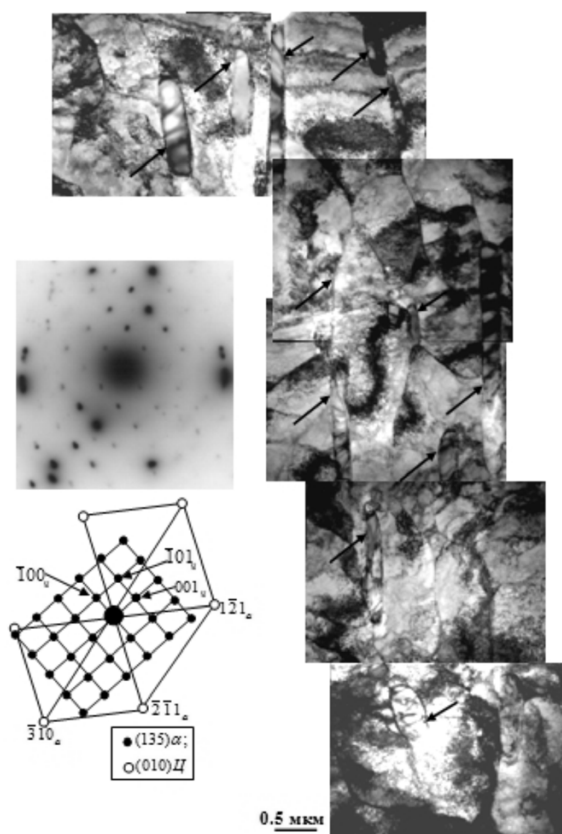


Рис. 2. Изображение тонкой структуры зерна перлита (Стрелками отмечены пластины цементита)

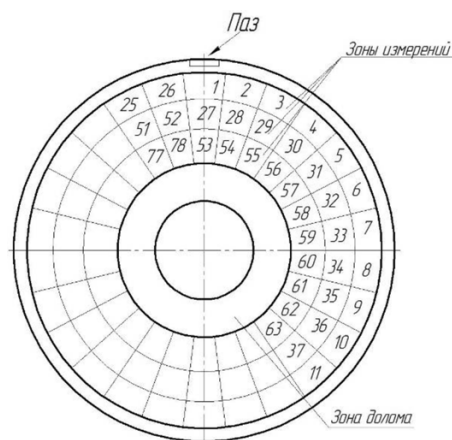


Рис. 3. Схема вырезки образцов для исследования методами электронной микроскопии, зоны измерения акустических и магнитных характеристик

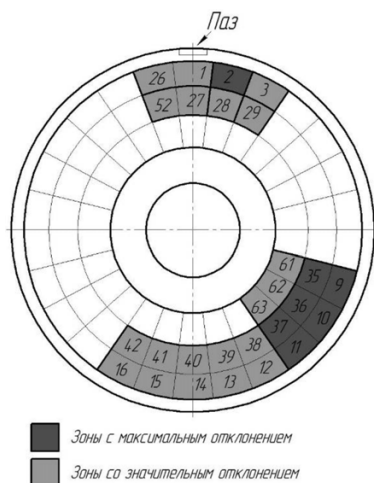


Рис. 4. Результаты измерения акустических и магнитных характеристик по поверхности излома исследуемого ротора

писывались в памяти программных модулей приборов. После проведенных измерений полученные значения обрабатывались методами математической статистики.

На рис. 4 показаны результаты измерения акустических и магнитных характеристик на поверхности излома ротора.

Как видно из рис. 4, максимальные значения отклонений измеренных характеристик выявлены в зонах сканирования 2, 9–11 и 35–37, т. е. на тех участках, где наблюдаются наибольшие структурные изменения. Также значительные отклонения от средней величины обнаружены в зонах 1, 3, 12–16, 26–29, 38–42, 52 и 61–63.

Таким образом, на участках, где обнаружены микротрещины с максимальной плотностью, значения акустических и магнитных характеристик имеют максимальные отклонения от средних значений, тогда как на участках, где структура более однородная и микротрещины не выявлены, акустические характеристики имеют минимальные отклонения от средних значений либо вообще не имеют отклонений.

Выводы

1. Определен химический и фазовый состав стали, из которой изготовлен ротор паровой турбины, а также определены параметры микроструктуры.

В зоне шпоночного паза выявлено большое число микротрещин с максимальной плотностью, определенной на расстоянии 0,2 мм от поверхности кручения. Микротрещины расположены преимущественно по границам зерен.

2. Установлены взаимосвязи акустических и магнитных характеристик со структурным состоянием металла разрушенного ротора паровой турбины. Сопоставление показало, что на участках, где обнаружены микротрещины с максимальной плотностью, значения акустических и магнитных характеристик имеют максимальные отклонения от средних значений. В то же время на участках, где структура более однородная и микротрещины не выявлены, акустические и магнитные характеристики имеют минимальные отклонения от средних значений либо вообще не имеют отклонений.

3. Между измеренными акустическими и магнитными характеристиками и параметрами микроструктуры установлена взаимосвязь, количественная интерпретация которой позволит использовать спектрально-акустический и магнитошумовой методы для диагностирования роторов паровых турбин и предотвращения их разрушения в будущем.

Список литературы

1. Загретдинов, И.Ш. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и вывод / И. Ш. Загретдинов, А.Г. Костюк, А. Д. Трухний и др. // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 5–15.
2. Митенков Ф.М. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Ф.М. Митенков, А.Л. Углов, С.Н. Пичков, В.М. Попцов // Проблемы машиноведения и надежности машин. – 1998. – № 3. – С. 3–9.
3. Абабков Н.В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н.В. Абабков, А.В. Бенедиктов, А.Н. Смирнов и др. // Вестн. КузГТУ. – 2010. – № 5. – С. 101–106.
4. Углов А.Л. Новая автоматизированная система неразрушающего контроля прочности и надежности элементов машин и конструкций / А.Л. Углов, В.М. Попцов // Машиностроитель. – 1993. – № 11. – С. 2–4.
5. Смирнов А.Н. Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков // Извест. Сам. науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12. – № 1 (2). – С. 520–524.
6. Смирнов А.Н. Применение магнитошумового метода контроля для оценки качества наплавленного металла / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков // сб. науч. тр. Всероссийской конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов», ИрГТУ. – Иркутск, 2011. – С. 194–198.

The research of metal structure condition of steam turbine's destroyed rotor

Smirnov A.N., Ababkov N. V., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Chegoshev A.A.

A metal structure condition of steam turbine's destroyed rotor by using methods of electronic microscopy is researched. The correlation between acoustic and magnetic characteristic with microstructure parameters of steam turbine's destroyed rotor metal are established.

Key words: rotor of the steam turbine, microstructure, microcrack, diagnostic.