

Рис. 5. Хроматографический анализ масла бака трансформатора

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев. – М.: Изд. НЦЭНАС, 2002. – 216 с.

УДК 621.438

## ДИАГНОСТИКА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ТИПА ГТК-10И И ГТК-25И

Д.А. Годовский

ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», Уфа, Россия

*В статье приведены основные методы дефектоскопии лопаток газотурбинных установок. Рассмотрены способы оценки степени деградации материалов, позволяющие прогнозировать остаточный ресурс лопаток. Предложен комплексный метод оценки степени и характера дегра-*

*дации материала лопаток, позволяющий определить вклад химической и механической составляющих разрушающего воздействия.*

*Результатом предлагаемого метода является повышение информативности и достоверности оценки характера и степени деградации материала лопатки после эксплуатации в условиях высоких температур.*

В настоящее время газовые турбины широко используются в качестве энергоустановок различного назначения. Они применяются в качестве энергетических машин, двигателей самолетов, судов, автомобильных двигателей, в составе газотурбогенераторов различного назначения. Однако наибольшее распространение газотурбинные установки (отечественные и импортные) получили в качестве привода центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Газотурбинная установка (ГТУ) – достаточно сложное энергетическое оборудование, состоящее из множества деталей и узлов. Поэтому для большинства ГТУ ресурс определяется состоянием его элементов в процессе эксплуатации. В состав современной ГТУ могут входить следующие основные узлы: камера сгорания, компрессоры, турбины, регенератор, различные статорные детали, узлы управления и регулирования. В настоящее время наработка многих ГТУ, эксплуатируемых на магистральных газопроводах, превысил 100000 ч, в то время как ресурс отдельных деталей и узлов значительно меньше (например, для лопаток назначенный ресурс варьируется в диапазоне от 18000 до 80000 часов) [1].

На сегодняшний день уже накоплена достаточно большая статистика по отказам ГТУ, при анализе которой можно выделить два типа дефектов, классифицируемых по причинам возникновения [2, 3]:

- 1) конструктивно-производственные (случайные отклонения в геометрии профиля, в технологии изготовления узлов ГТУ и их регулировании);
- 2) эксплуатационные – неравномерность воздушного потока при отклонении режимов, различная наработка отдельных узлов, а следовательно и износ.

Бесперебойная работа ГТУ во многом определяется долговечностью и надежностью лопаточного аппарата. Рабочие и направляющие лопатки турбины работают в наиболее сложных эксплуатационных условиях: высоких и быстро сменяющихся температур (900 °С и выше), высоких нагрузок и вибраций, агрессивных сред (продукты горения воздушно-топливной смеси), эрозионного воздействия и т.п. Это приводит к появлению дефектов на лопатках турбины ГТУ и выходу их из строя [4]. Следовательно, для своевременного ремонта турбомашин и предотвращения аварийных ситуаций необходимо контролировать состояние лопаток в процессе эксплуатации [5, 6].

**Методы дефектоскопии лопаток ГТУ.** Для оценки технического состояния лопаточного аппарата в настоящий момент применяются разрушающие и неразрушающие методы контроля. Разрушающие методы контроля (фрактографические, металлографические, определение механических свойств) применяются при исследованиях с целью продления назначенного ресурса лопаток, а так же при изучении причин разрушения лопаток. Во всех других случаях применяются неразрушающие методы контроля.

Основными методами неразрушающего контроля являются:

1) визуально-оптический контроль – предусматривает визуальный и с применением специальных оптических приборов осмотр деталей с целью выявления таких повреждений как коррозия, эрозия, трещины, износ и др.;

2) метод цветной дефектоскопии состоит в нанесении на тщательно очищенную деталь проникающего жидкого реагента-красителя. По истечении некоторого небольшого промежутка времени, называемого контактным временем и необходимого для проникновения жидкости в трещины, избыточный реагент-краситель тщательно смывается, а на деталь наносится реагент-проявитель, который выводит проникающий реагент-краситель из трещин за счет капиллярного эффекта. Проявление красителя на фоне реагента-проявителя происходит в местах трещин. Данный метод является предпочтительным в условиях специализированного ремонтного предприятия, на котором контролю подлежит большое количество лопаток;

3) весовой метод – оценивается изменение массы лопатки в результате коррозионного и эрозионного износа;

4) измерение твердости – проверяется изменение твердости материала в результате эксплуатационного воздействия;

5) контроль методом вихревых токов – заключается в наведении в контролируемой детали вихревых токов, или токов Фуко, путем электромагнитной индукции. При наличии таких дефектов как трещины, неоднородность структуры изменяется электропроводность материала и, следовательно, индуцируемый ток. Изменение тока регистрируется специальными приборами;

6) метод магнитной дефектоскопии – применяется для выявления трещин, неоднородностей, посторонних включений на поверхностях деталей изготовленных из ферромагнитных материалов. Метод состоит в намагничивании детали и нанесении на ее поверхность суспензии измельченного ферромагнитного материала в соответствующей жидкости. При наличии дефекта в детали магнитное поле искажается, а магнитные частицы располагаются вдоль границ дефектного участка, тем самым, выявляя его. Данный метод позволяет надежно выявлять дефекты лопаток, однако

его применение ограничено наличием громоздкой аппаратуры для намагничивания и размагничивания деталей.

Однако для применения большинства вышеперечисленных методов требуется демонтаж лопаток и тщательная подготовка поверхности, что не всегда возможно на компрессорных станциях. Поэтому в настоящий момент является актуальной разработка методики оценки технического состояния лопаточного аппарата неразрушающими методами контроля без предварительной подготовки поверхности. Кроме того, вышеперечисленные методы обнаруживают уже образовавшиеся дефекты и не позволяют определить степень деградации материала, что актуально для оценки остаточного ресурса лопаток при эксплуатации.

В результате анализа литературы можно выделить несколько способов оценки степени деградации материалов:

1. Способ электромагнитной дефектоскопии, основанный на сканировании изделия электромагнитным преобразователем, подсчете общего числа импульсов от краев и дефектов изделия и выделении информации о его дефектности путем определения превышения общего числа импульсов над числом импульсом от краев [7];

2. Способ контроля материалов, включающий приведение в контакт электродов с материалом изделия, измерение термоЭДС и оценку по полученным значениям термоЭДС свойств исследуемого материала [8]. Недостатком этого способа является его низкая информативность.

3. Комбинированный способ дефектоскопии лопаток турбомашин, включающий совместное использование метода термоЭДС и метода индукционной дефектоскопии [9].

Недостатком данного способа является низкая информативность и достоверность оценки степени и характера деградации материала лопатки в процессе эксплуатации.

Необходимо отметить, что известные неразрушающие методы оценки степени деградации материалов, основанные на магнитных, термоэлектрических и других эффектах [10 – 13], не позволяют оценить соотношение долей химической и механической составляющих, что значительно снижает достоверность оценки характера деградации материалов. Кроме того, магнитные методы преимущественно используются для оценки состояния изделий, выполненных из ферромагнитных материалов.

**Метод комплексной оценки состояния лопаток ГТУ.** При исследовании степени и характера деградации материала лопаток из кобальтовых, никелевых сплавов и легированных сталей автором экспериментально установлено, что повреждения, вызванные физико-механическими факторами, в

значительной степени проявляются при магнитных методах дефектоскопии, а дефекты, вызванные диффузионно-химическими факторами (например, окисление) проявляются при дефектоскопии по параметрам термоЭДС.

Полученные результаты позволили разработать комплексный метод оценки степени и характера деградации материала лопатки, позволяющий определить вклад каждого из вида разрушающего воздействия на деградацию материала детали. Крайними случаями подобной деградации материала являются лопатки, изменение свойств которых произошло либо в результате воздействия только механических факторов (оценивается изменением магнитных параметров материала от величины  $M_0$  до величины  $M_i$ , где  $M_0$  – магнитные характеристики исходного материала лопатки,  $M_i$  – магнитные характеристики текущего состояния материала лопатки,  $M_0 - M_i \neq 0$ ; в то время как изменение параметров термоЭДС равны нулю, т.е. химико-диффузионные причины деградации материала исключаются), либо в результате воздействия только химических процессов (т.е. когда изменение магнитных параметров равно нулю, в то время как наблюдается изменение параметров термоЭДС от некоторого значения  $T_0$  до  $T_i$ , где  $T_0$  – характеристики термоЭДС исходного материала лопатки,  $T_i$  – характеристики термоЭДС текущего состояния материала лопатки, т.е. физико-механические факторы деградации материала исключаются). Однако в процессе эксплуатации лопаток турбомашин, как правило, деградация материала происходит в результате совместного воздействия механических и химико-диффузионных факторов. В этом случае вклад каждого из этих факторов в картину общей деградации материала определяется исходя из доли каждого из них, рассчитанной по шкале от минимального значения степени деградации того, или иного вида, до его максимально возможного значения.

Рассмотрим пример реализации способа.

Для оценки степени и характера деградации материала лопаток турбин, были изготовлены эталонные образцы рабочих лопаток из никелевого сплава IN738 применяемого в газовых турбинах ГТК-10И, ГТК-25И, с различной степенью механической и химической (окисление) деградации. Снятие магнитных характеристик производилось с помощью феррозондового комбинированного прибора Ф-205.30А, а параметров термоЭДС – прибором Т-ЗСП.

Для контрольной оценки степени и вида деградации материала эталонных и контролируемых лопаток были использованы разрушающие методы контроля с приготовлением шлифов и проведением металлографических исследований, включая оценку структурно-фазового и химического

составов материалов. Сравнительные результаты исследований приведены на рисунках 1...4.

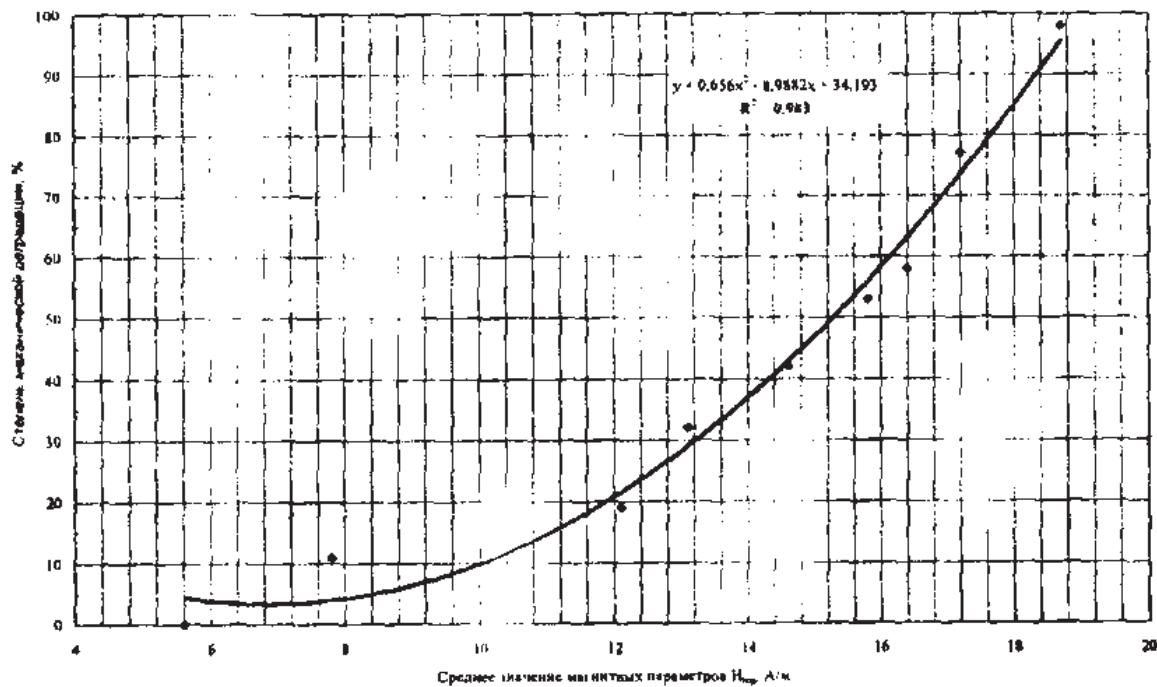


Рис. 1. Результаты замера эталонной лопатки феррозондом

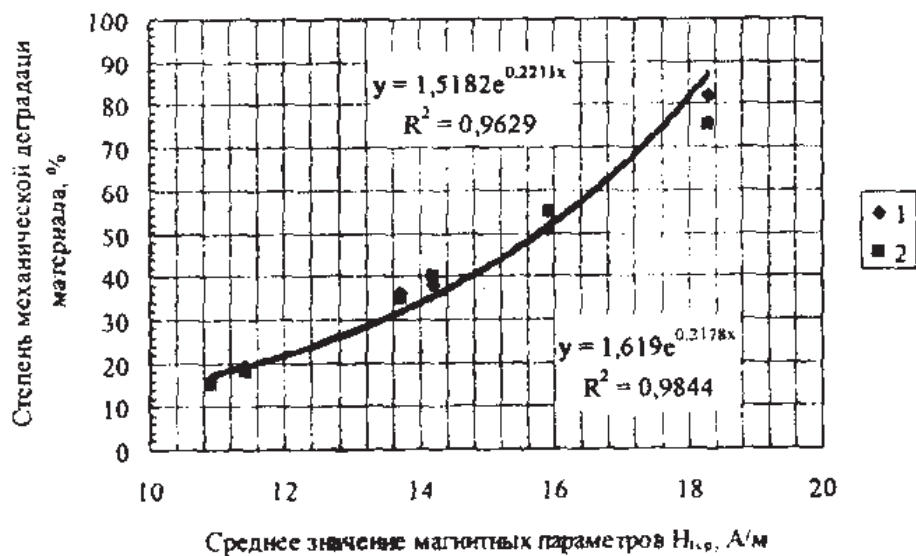


Рис. 2. Результаты замера контролируемой лопатки феррозондом:

- 1 – степень механической деградации материала, определенная по предлагаемому способу;
- 2 – степень механической деградации материала, определенная металлографическим методом

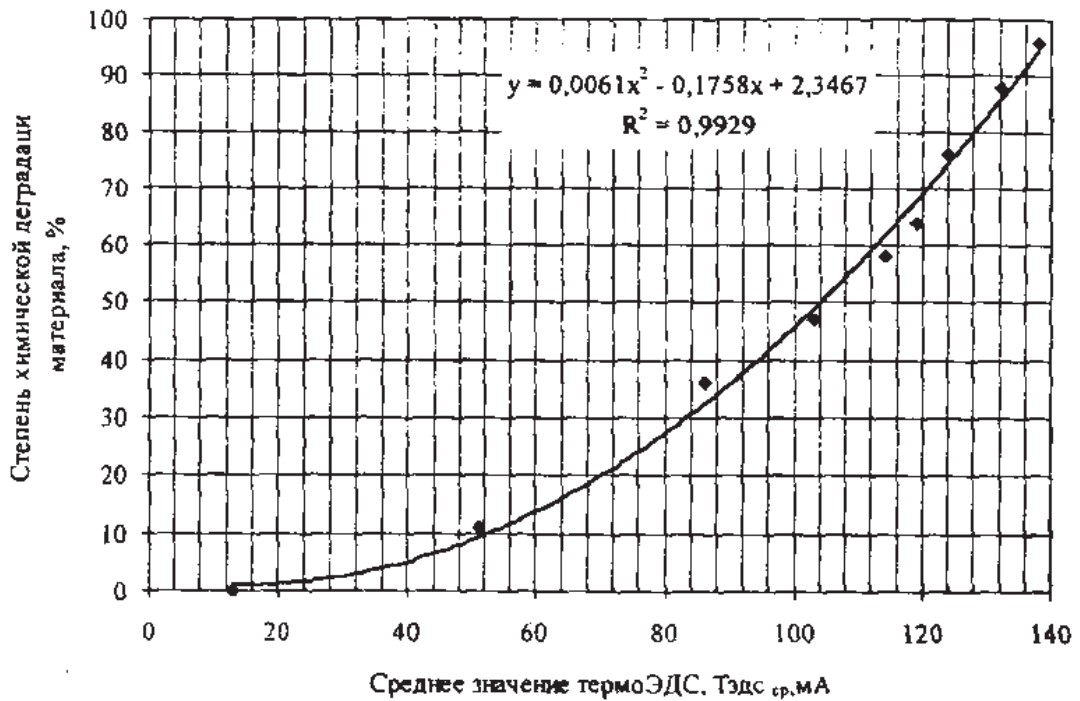


Рис. 3. Результаты замера термоЭДС эталонной лопатки

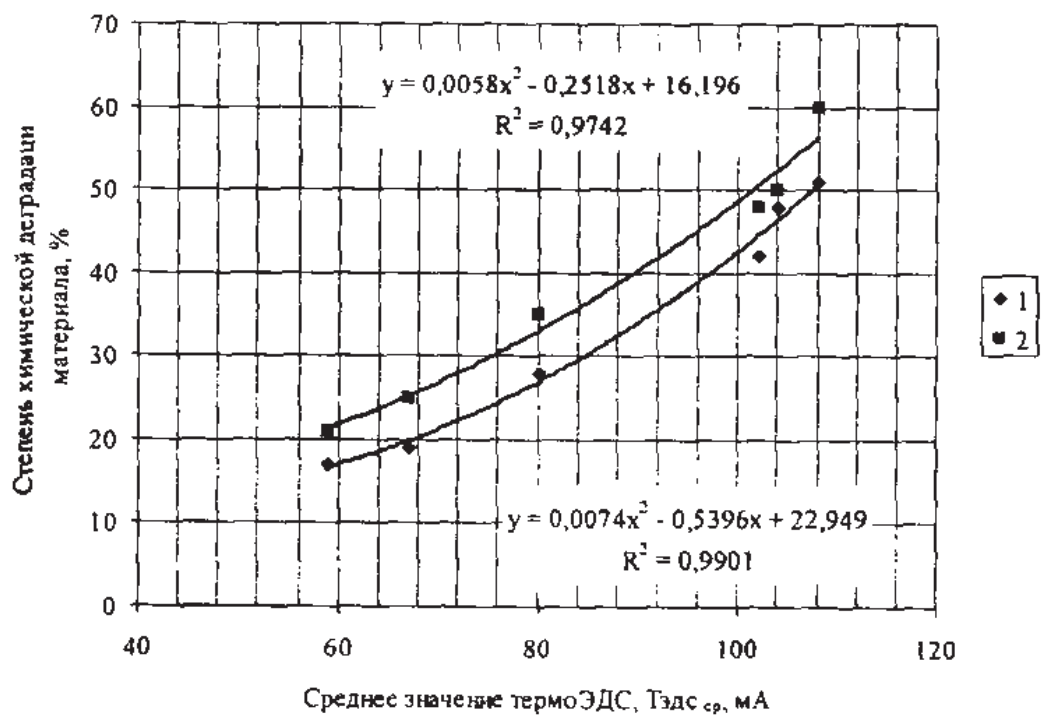


Рис. 4. Результаты замера термоЭДС контролируемой лопатки:  
 1 – степень химической деградации материала, определенная по предлагаемому способу;  
 2 – степень химической деградации материала, определенная известным методом

Сравнительные результаты оценки степени и вида деградации материала эталонных и контролируемых лопаток приведены в таблице.

Общий характер деградации материала

Степень механической деградации(МД) материала, %	Степень химической деградации (ХД) материала, %,	Заключение о характере деградации материала, МД, % / ХД, %
19	42	31 % / 69 %
38	51	42,7 % / 57,3 %
82	28	74,5 % / 25,5 %
51	17	75 % / 25 %
36	48	42,9 % / 57,1 %
16	19	42,7 % / 54,3 %

**Заключение.** В работе проведен обзор методов дефектоскопии лопаточного аппарата газотурбинной установки.

Основным недостатком большинства предлагаемых в настоящий момент методов является необходимость демонтажа и очистки лопаток перед проведением замеров. Кроме того, рассматриваемые методы не позволяют оценить соотношение долей химической и механической составляющих, что значительно снижает достоверность оценки характера деградации материалов. Поэтому нами предложен новый метод комплексной дефектоскопии лопаток, в котором отсутствуют вышеуказанные недостатки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт длительной эксплуатации стационарных ГТУ на магистральных газопроводах / Н.В. Дашунин [и др.] // Вестн. Двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 50 – 55.
2. Рафиков, Л.Г. Эксплуатация газокompрессорного оборудования компрессорных станций / Л.Г. Рафиков, В.А. Иванов. – М.: Недра, 1992. – 237 с.
3. Годовский, Д.А. Дефекты элементов газотурбинных установок / Д.А. Годовский // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 4. – С. 201 – 206.
4. Смыслова, М.К. Оценка работоспособности лопаток соплового аппарата газовых турбин ГТК-10И / М.К. Смыслова, Д.А. Годовский, А.В. Новиков // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. V междунар. науч.-техн. конф. Вып. 4. – Новополоцк, 2006. – С. 165 – 171.



5. Моверман, Г.С. Ремонт импортных газоперекачивающих агрегатов / Г.С. Моверман, И.И. Радчик. – М.: Недра, 1986. – 197 с.
6. Данилин, А.И. Диагностика и контроль деформационного состояния лопаток турбоагрегатов / А.И. Данилин, А.Ж. Чернявский., В.П. Сазанов // Контроль, диагностика. – 2003. – № 1. – С. 23 – 28.
7. А.с. СССР № 333460, МПК G 01 N 27/86, 1970.
8. Термоэлектрический способ контроля металлических материалов: пат. Рос. Федерации № 2229117, МПК G01N25/32, 2004.
9. Combined thermoelectric and eddy-current method and apparatus for non-destructive testing of metallic of semiconductor coated objects: пат. США № 5430376, МПК G01B 7/02, 1995.
10. Артамонов, В.В. Неразрушающий контроль микроструктуры металла теплоэнергетического оборудования / В.В. Артамонов, В.П. Артамонов // Дефектоскопия. – 2002. – № 2. – С. 34 – 43.
11. Дубов, А.А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла / А.А. Дубов // Контроль, диагностика. – 2004. – № 1. – С. 8 – 16.
12. Диагностика состояния и оценка остаточного ресурса элементов машин и конструкций / М.Б. Бакиров [и др.] // Контроль, диагностика. – 2004. – № 1. – С. 26 – 31.
13. Филинов, М.В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов / М.В. Филинов, А.С. Фурсов, В.В. Ключев // Контроль, диагностика. – 2006. – № 8. – С. 6 – 16.