

УДК 681.5:622.691.4

М.П. АНДРИИШИН<sup>1</sup>, В.Г. ОЛЯНИЧ<sup>1</sup>, Е.А. ИГУМЕНЦЕВ<sup>2</sup>, Е.А. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>*Управление магистральных газопроводов «Киевтрансгаз», Украина*<sup>2</sup>*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО АГРЕГАТА ГТК-10 ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрена методика определения остаточного ресурса газотурбинных агрегатов. Обследовано техническое состояние агрегатов ГТК-10-02 в УМГ «Киевтрансгаз», «Львовтрансгаз», «Прикарпаттрансгаз» и проведены оценка остаточного ресурса основных узлов и деталей после длительной эксплуатации. Выявлены детали и узлы ГТК, подлежащие безусловной замене.

газотурбинный агрегат, газотурбокомпрессор, ГТК-10-02, остаточный ресурс

### Введение

Современные газотурбинные установки (ГТУ) являются сложными техническими объектами с напряжённым рабочим процессом, что требует применения при их эксплуатации качественных жаропрочных материалов, современных технологий изготовления деталей, сложных процедур проверки их качества, дорогостоящих программ испытаний. Элементы ГТУ работают при высоких давлениях и температурах. Динамические нагрузки вызывают появление усталостных трещин, а коррозионные процессы в среде, содержащей серу, натрий, калий из продуктов сгорания топлива, ускоряют разрушение деталей.

### 1. Формулирование проблемы

Указанные деградационные явления имеют случайный характер и не поддаются точному расчёту при проектировании установок, а скорость изменения прочностных свойств материалов во многом зависит от уровня основных эксплуатационных факторов: наработки на основных режимах, числа пусков, числа аварийных остановок, качества топлива и т.д. Следовательно, уровень надёжности ГТУ не поддаётся точному расчёту и не может быть достоверно подтверждён при испытаниях вследствие

высокой стоимости экспериментальных исследований часто уникальных объектов.

**1.1. Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем.** Для многих существующих газотурбокомпрессоров (ГТК) разработаны модели расхода ресурса и накоплен опыт их применения в практике эксплуатации, где показано [1], что разработкой подобных моделей заняты многие ведущие газотурбостроительные фирмы мира. В тоже время существующие модели расхода ресурса создавались для конкретных установок и не могут применяться вне рассмотренных типов ГТК. Разработка методики создания моделей расхода ресурса является актуальной и в то же время сложной в научном плане задачей, решение которой позволит более обоснованно управлять эксплуатацией газотурбинных энергетических установок [2].

Известен метод определения остаточного ресурса [3], используемый для разработки моделей расхода ресурса. Данный метод не требует остановки и разборки агрегата для проведения освидетельствования его элементов. В тоже время, для определения остаточного ресурса необходимы данные о запасе прочности элементов, определенных расчетом и кривые разрушения, которые могут быть в наличии только у разработчика, что делает их не всегда доступными. Все остальные исходные данные для рас-

чёта носят статистический характер и определяются непосредственно на производстве.

Анализ погрешностей результатов вычисления ресурса деталей ГТК показал [3], что для получения достоверного результата нужно иметь надежные усталостные характеристики. Но даже и при наличии таких данных минимальное значение ресурса отличается от максимального почти на два порядка. Таким образом, предложенный метод может применяться только для определения приблизительных параметров ресурса [3].

Большинство перечисленных методов [1, 2, 3] кроме собственных недостатков имеют один общий — все они созданы для определенных типов ГТК, а применение их для других установок является невозможным. Этим можно объяснить отсутствие до настоящего времени общей и достаточно обоснованной методики разработки моделей расхода ресурса ГТК.

**1.2. Цель исследований.** ЗАО «НИКТИТ» и специалисты ООО «НТП «Трансгаздиагностика» на объектах ДК «Укртрансгаз» выполняли работы по обследованию узлов и деталей ГТК-10 с целью адаптации методики определения остаточного ресурса. За время выполнения этих работ специалисты ООО «НТП «Трансгаздиагностика» освоили весь комплекс работ, изучили необходимую нормативную документацию и поставили задачу разработать методику продления ресурса ГТК-10 применительно к условиям эксплуатации ДК «Укртрансгаз».

## 2. Результаты исследований

Для решения данной задачи в УМГ «Киевтрансгаз», УМГ «Львовтрансгаз» и УМГ «Прикарпаттрансгаз» проведены следующие исследования: теоретическое обоснование метода суммирования повреждений и определения единого запаса прочности деталей ГТК-10 и экспериментальное определение характеристик материала, как функции времени, температуры и факторов нагружения.

Для определения остаточного ресурса лопаток турбины (как наиболее нагруженных элементов ГТК) при термоциклическом нагружении использовался метод прогнозирования эквивалентного ресурса деталей ГТК, находящихся в условиях длительной эксплуатации [2, 4]. Он основан на использовании результатов расчета размахов упругих деформаций и обобщений экспериментальных данных испытаний материала на термоусталость по методике Коффина [2] при максимальной температуре лопатки. Для случая, когда повреждения накапливаются в условиях различных нестационарных режимов, остаточный ресурс лопатки определяется с использованием принципа линейного суммирования повреждений для соответствующих режимов, пусков и маневров [2]. Здесь применяется методика, основанная на расчете кинетики напряженно-деформированного состояния лопатки, работающей в условиях циклической нагруженности, и на деформационном критерии разрушения [2].

Прогноз расхода ресурса для ободов направляющих аппаратов (важных и сильно нагруженных элементов ГТК) позволяет рассчитывать остаточный ресурс  $N_{ост}$  с использованием экспериментальных данных по формуле [3]:

$$N_{ост} = \left[ (K_{\phi} / K)^m - 1 \right] N_{\phi}, \quad (1)$$

где  $m$  — коэффициент наклона кривой термической усталости;

$K, K_{\phi}$  — нормированное и фактическое значение коэффициента запаса;

$N_{\phi}$  — число пусков-остановов ГТК к рассматриваемому моменту времени.

Для роторов и дисков турбин и компрессоров применены методы оценки остаточного ресурса, где суммарные повреждения на различных  $i$ -тых режимах определяется выражением [2, 3]:

$$\prod_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (1 / K_i)^{m_i}, \quad (2)$$

где  $K_i$  — запас прочности;

$m_i$  — коэффициент наклона кривой разрушения.

Экспериментальное обследование технического состояния деталей и узлов ГТК-10 в условиях эксплуатации включает: неразрушающий контроль металла основных деталей и узлов с использованием капиллярной дефектоскопии; оценку степени коррозионно-эрозионного износа агрегата; контроль твердости; исследование структуры металла, снятие металлографических реплик; проведение исследовательских работ в условиях лаборатории завода-изготовителя (оценка изменений фазового и структурного состояния металла после длительной эксплуатации и оценка изменений уровня характеристик и свойств металла).

Контроль твердости производится в различных точках дисков, роторов, ободов, шестерен, жаровых труб, обоймы лопаток, диафрагм, корпусов, диффузора, крепежных шпилек [5]. Результаты замеров твердости пересчитываются в прочностные показатели [4] и сравниваются с нормативными значениями. Твердость и показатели прочности должны соответствовать нормативным значениям, что свидетельствует об отсутствии существенных изменений механических свойств за время длительной эксплуатации. Контроль твердости (Табл.) показал, что, несмотря на разброс значений по различным УМГ ГТК и их узлам, твердость находится в норме.

Таблица

Результаты контроля твердости узлов ГТК-10-2

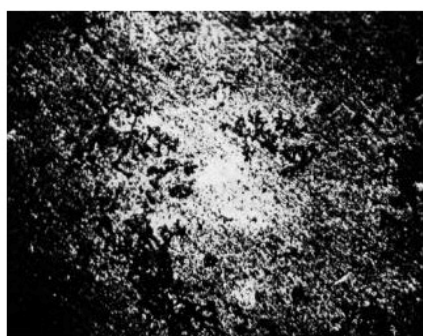
Наименование КС	ст.	Твердость по Бринеллю, НВ					
		Диск		Корпус		Ротор	
		ТНД	ТВД	ОК	ТВД	ТНД	ОК
«Бердичев»	6	292-296	288-292	180-192	129-147	288-298	240-250*
«Рогатин»	1	285-290	285-295	185-190	147-155	284-318*	234-241
«Ужгород»	5	254-267	250-297*	179-195	137-150	266-308	232-240
Норма		249-295	249-295	<197	111-156	262-311	212-248

Примечание \*) Твердость находится в пределах погрешности прибора 54-359М ( $\pm 5\%$ ).

Анализ структуры металла диска ТВД ст. № 6 КС «Бердичев» УМГ «Киевтрансгаз» (наработка 148 300 часов) показал (рис. 1, а, б), что микроструктура соответствует стали ЭП-428 (20Х12ВНМФ) мартенситного класса. Микродефектов в виде пор, трещин на участках не обнаружено. На участках диска, подверженных воздействию наиболее высоких температур, отмечена частично сохранившаяся мартенситная ориентация. Степень коагуляции карбидной фазы соответствует 3 баллу шкалы ОСТ 34-70-690-84. Вблизи крупных скоагулированных карбидов выявляются участки вторичного метастабильного структурно-свободного феррита до 8-10%. Изменение структуры находится в допустимых пределах. Аналогичные результаты наблюдаем по агрегатам ст. № 1 КС «Рогатин» УМГ «Львовтрансгаз» (наработка 106 243 часа) и ст. № 5 КС «Ужгород» УМГ «Прикарпаттрансгаз» (наработка 97 492 часа) (рис. 1, в, г).

Микроструктура диска ТНД (рис. 2) ст. № 6 КС «Бердичев», изготовленного из стали ЭП-428 (20Х12ВНМФ), представляет собой сорбит отпуска с частично сохранившейся мартенситной ориентацией. Количество структурно-свободного феррита незначительно и составляет в различных участках примерно 2-7%. Степень коагуляции карбидной фазы соответствует 1-2 баллу шкалы сфероидизации ОСТ 34-70-690-84. Изменение структуры находится в допустимых пределах. Аналогичные результаты наблюдаем по агрегатам ст. № 1 КС «Рогатин» и ст. № 5 КС «Ужгород».

На направляющих лопатках ТВД, ст. № 6 КС «Бердичев», изготовленных из сплава ЖС-6К, отмечены следы сульфидно-оксидной коррозии (преимущественно на верхней части обоймы (рис.4)) и механические повреждения. Методом цветной дефектоскопии обнаружены растрескивания в поверхностном коррозионном слое в зоне выходных кромок. Направляющие лопатки ТНД изготовлены из стали ЭИ-572. На направляющих лопатках в районе выходных кромок отмечены отдельные значительные механические повреждения.



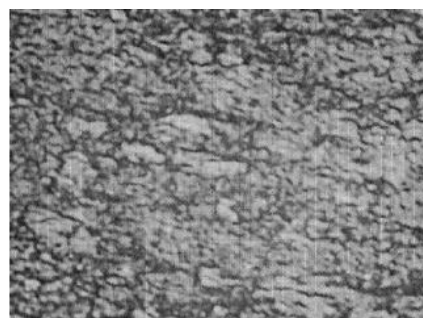
×100

а



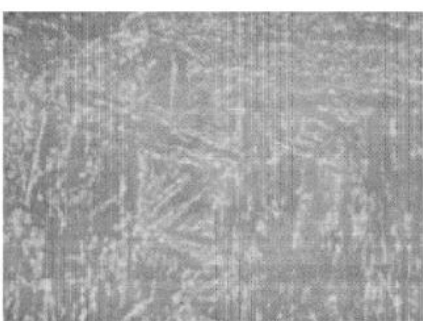
×100

б



×360

в



×500

г

Рис. 1. Микроструктура ступицы диска ТВД ГТК-10-2:  
а, б – ст. № 6 КС «Бердичев»;  
в – ст. № 1 КС «Рогатин»;  
г – ст. № 5 КС «Ужгород»

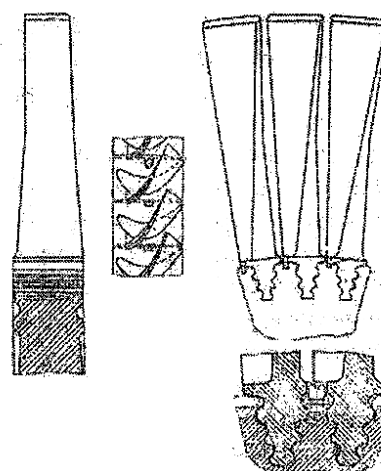


Рис. 2. Рабочие лопатки ТНД

Методом цветной дефектоскопии трещины на профильных частях лопаток не выявлены. Однако, ввиду значительного эрозионного износа профильных частей, комплект направляющих лопаток ТНД рекомендован к замене. Аналогичные рекомендации выданы по агрегату ст. № 5.

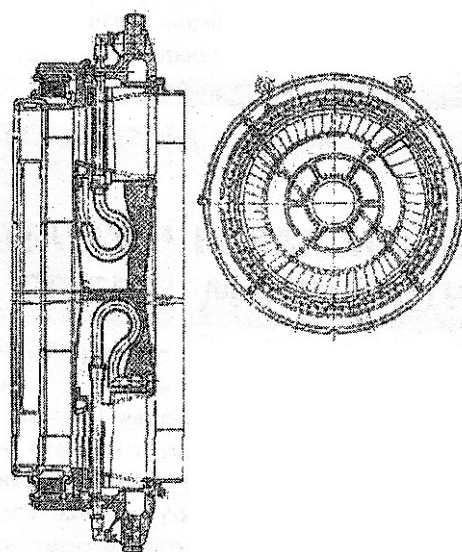


Рис. 3. Обойма направляющих лопаток ТВД-ТНД

Микроструктура металла корпуса ТВД, ст. № 6 КС «Бердичев», характерна для стали марки 12МХЛ и представляет собой феррито-перлитную структуру с содержанием Ф80(П20) шкалы ГОСТ 8233-56. Размер зерна соответствует 6-5-4 номерам шкалы ГОСТ 5639-82. В структуре наблюдается некоторое

довыделение и коагуляция карбидных фаз, в том числе по границам зерен, что обусловлено длительной наработкой.

Степень сфероидизации карбидов соответствует 2-3-му баллу шкалы ОСТ 34-70-690-84, что является допустимым.

Микроструктура металла корпуса ТВД, ст. № 1 КС «Рогатин», также представляет собой феррито-перлитную структуру, характерную для стали 12МХЛ. Размер зерна ферритной составляющей соответствует 6-8 баллу по шкале ГОСТ 5639-82. После длительной наработки структура характеризуется довыделением и коагуляцией карбидной фазы, и ее дифференциацией в направлении границ зерен.

Микроструктура вставки ст. № 6 КС «Бердичев» представляет собой аустенит с размером зерна 2-3-1 номеров шкалы ГОСТ 5639-82. В структуре отмечается значительная коагуляция карбидных фаз как по границам зерен, так и внутри зерна. Состояние границ зерен свидетельствует о значительном снижении ударной вязкости и пластичности за счет заметного выделения охрупчивающей интерметаллидной  $\sigma$ -фазы, что приводит к резкому снижению длительной прочности и сопротивляемости металла хрупким и усталостным разрушениям. Вставка полностью исчерпала свой ресурс и рекомендована замене на новую.

### **3. Перспективы дальнейших исследований**

Учитывая сложность проблемы определения эквивалентного ресурса, намечено решить дополнительные задачи: исследовать закономерность расхода общего эквивалентного ресурса при эксплуатации ГТК; разработать методику расчета оптимальных сроков регламентных работ ГТК на основе эквивалентного ресурса; ввести оценки технического состояния ГТК с использованием систем параметрической и вибрационной диагностики.

### **Выводы**

В статье изложена методика поузлового определения как наружного состояния деталей и узлов, так и структуры металла. Такой метод дает возможность глубоко изучить техническое состояние той или иной детали, после чего принять решение о ее дальнейшей эксплуатации или замене. Решение данной задачи дает возможность с полной уверенностью эксплуатировать газоперекачивающие агрегаты ГТК-10 газотранспортной системы ДК «Укртрансгаз» по их техническому состоянию.

### **Литература**

1. Ольховский О.О. Энергетические газотурбинные установки. – М.: Энергаториздат, 1985. – 185 с.
2. Игуменцев Е.А., Черныш И.Ю. Оценка и прогнозирование ресурса газотурбинных двигателей при длительной эксплуатации // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: Дон-НТУ, 2006. – Вып. 31. – С. 102-103.
3. Гецов Л.Б. Прогнозирование остаточного ресурса высокотемпературных деталей ГТУ при нестандартных условиях эксплуатации // Тяжелое машиностроение. – 1997. – № 1. – С. 13-18.
4. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 360 с.
5. Олянич М.В., Игуменцев Е.А. Практические методы определения увеличения ресурса газоперекачивающих агрегатов // Энергетика: економіка, технології, екологія: Наук. журн. – 2005. – № 2. – С. 3-7.

*Поступила в редакцию 1.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.