

УДК 539.4; 539.43

**М.Б. МИЛЕШКИН, И.В. БИБЛИК, Ю.С. ВОРОБЬЕВ***Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина***ОЦЕНКА РЕСУРСА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА**

Проведен анализ наиболее распространенных подходов к оценке остаточного ресурса элементов конструкций. Показано, что наиболее приемлемым для оценки остаточного ресурса эксплуатации с учетом всех возможных видов повреждения материала оборудования, может служить специальный расчетно-экспериментальный метод. Приведена методология оценки остаточного ресурса эксплуатации лопаток газотурбинных двигателей.

**ресурс, несущая способность, виды повреждения материала, расчетно-экспериментальный метод****Введение и постановка задачи**

Одним из важнейших свойств технических объектов является долговечность, определяемая сроком службы и ресурсом. Технический ресурс характеризует запас возможной наработки объекта до перехода в предельное состояние. Мероприятия по обеспечению ресурса проводятся на этапах проектирования, производства (изготовления) и эксплуатации.

Правильный выбор материалов и корректный расчет – основные источники повышения ресурса без значительного удорожания конструкции.

Особый интерес представляет проблема прогнозирования индивидуального ресурса машин и конструкций по результатам наблюдений за их состоянием в процессе эксплуатации.

Несмотря на большое количество работ по оценке остаточного ресурса оборудования, решены лишь отдельные аспекты этой проблемы, поскольку задача достаточно сложная и, кроме того, очень часто режимы эксплуатации деталей не соответствуют расчетным значениям. Например, вводится понятие эквивалентной наработки детали [1], которая позволяет контролировать выработку ресурса в тех случаях, когда деталь может эксплуатироваться в различных условиях.

На основе анализа наиболее распространенных подходов к оценке остаточного ресурса оборудования можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время вместо вероятностных методов оценки ресурса, основанных на статистике отказов, все большее значение приобретает тенденция оценки индивидуального ресурса оборудования на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающих методов контроля с проверочными расчетами на прочность.

2. Все более заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанной на сочетании механики разрушения, материаловедения и неразрушающего контроля.

Анализ также показывает, что проблема оценки остаточного ресурса окончательно не решена, хотя в ряде ответственных отраслей промышленности имеется большое количество нормативных документов, предписывающих проведение оценки технического состояния и остаточного ресурса.

**Основы расчетно-экспериментального метода**

Для оценки остаточного ресурса эксплуатации с учетом всех возможных видов повреждения материала оборудования и возможных синергетических эффектов (взаимодействие различных видов повре-

ждений, которое приводит к неучитываемому ускорению процессов деградации материала) может быть применен разработанный в Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины специальный расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) [2, 3], который позволяет учесть все особенности механического поведения материала.

В основе метода лежит создание компьютерной модели материала как совокупности структурных элементов с определенным распределением свойств мезообъемов. При этом каждому элементу ставится в соответствие какая-либо из характеристик предельного состояния или их совокупность – предельная деформация, при которой происходит разрушение структурного элемента, напряжение, при котором происходит переход от упругой к пластической деформации или разрушение и т.д.

Очевидно, что компьютерное “нагружение” изделия как совокупности элементов с определенными характеристиками необходимо проводить с учетом взаимодействия либо элементов различной физической природы, либо элементов, находящихся в различных механических состояниях, например, упругой или пластической деформации и разрушения. Следовательно, в рассматриваемом подходе важнейшим моментом является предварительное определение динамики изменения состояния локальных элементов с учетом возможной поврежденности.

Методы определения динамики изменения механического поведения материалов должны выбираться с учетом вида определяемых параметров и возможностей самих методов определения.

Создание модели материала является одним из важнейших этапов создания общей модели прочностной надежности и зависит от вида материала и особенностей рассеяния его свойств.

В предыдущих исследованиях [2, 3] наиболее удобным оказалось принимать за основную характеристику структурного элемента его предельную деформативность, т.е. деформацию, при достижении которой этот структурный элемент разрушается.

Модель разрушения в РЭМ представляет собой имитационное развитие процесса деформации и разрушения и реализуется в результате взаимодействия между структурными элементами, находящимися в различных механических состояниях. Это взаимодействие рассматривается в рамках силового [2] и (или) энергетического [3] подходов.

Проблема ресурса, в первую очередь, связана с усталостными и другими видами эксплуатационных повреждений материалов. Явление усталости характерно практически для всех конструкционных материалов, при этом механизмы проявления усталости могут существенно различаться. В этой связи на первом этапе разработки методологии оценки ресурса на основе применения специального РЭМ, очевидно, не следует детализировать процессы, приводящие к образованию субмикро- и микротрещин, а основное внимание сосредоточить на реалистичном построении модели материала и реализации модели разрушения, отражающей в значительной степени реальную картину процесса разрушения соответствующего материала.

### **Результаты применения расчетно-экспериментального метода**

Для изготовления лопаток газотурбинных двигателей применяются сложнелегированные стали и сплавы. В процессе эксплуатации лопатки подвергаются воздействию комплекса нагрузок – статических, термоциклических и вибрационных. В результате могут наблюдаться различные виды повреждений (эрозия, ползучесть, появление трещин термоусталости и др.). Учитывая многообразие жаропрочных сталей и сплавов, для каждого материала должен проводиться конкретный анализ. В настоящей работе рассматривается общая методология применения РЭМ для оценки остаточного ресурса.

В качестве примера на рис. 1 приведена диаграмма усталости в области ограниченной выносливости, полученная с помощью РЭМ. Здесь термин «усталость» применяется в обобщенном смысле и включает все возможные виды повреждений конкретного материала.

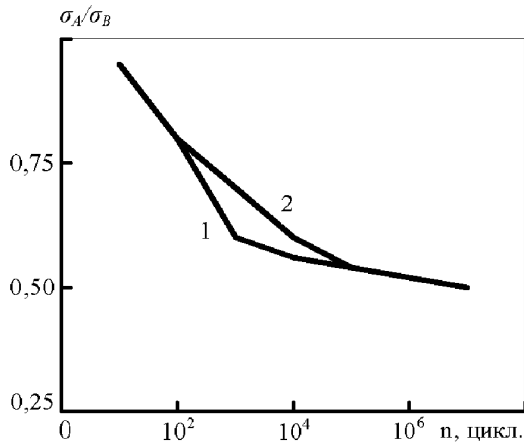


Рис. 1. Кривые усталости в полулогарифмических координатах: 1 – силовой подход; 2 – энергетический подход

Процесс получения такой диаграммы аналогичен натурным испытаниям образцов – последовательно "испытываются" образцы при разных амплитудах напряжения цикла ( $\sigma_A$ ). По оси абсцисс вместо числа циклов откладывается число шагов нагружения, которое образец выдерживает при заданной амплитуде цикла. Для того, чтобы "шаги нагружения" заменить на число циклов определяется ограниченный предел выносливости образцов конкретного материала в конкретных условиях испытаний (экспериментально или из справочных данных), затем проводится компьютерное нагружение при пределе выносливости и полученное число шагов приравнивается к  $10^7$  циклов. После этого диаграмма перестраивается. Естественно, что желательна экспериментальная проверка, т.е. в зависимости от области определения ресурса проводится уточнение диаграммы в соответствующих интервалах.

Компьютерное моделирование процесса усталостного разрушения позволяет легко оценить как все стадии процесса разрушения, так и моделировать влияние "промежуточной поврежденности" [4]. При компьютерном моделировании в определенный момент запоминается структура модели материала, которая является исходной для нагружения ее с любой другой амплитудой цикла. Таким образом можно воспроизводить поврежденность при любом ис-

следуемом законе нагружения. Кроме того, появляется возможность быстрой оценки различных материалов и конструкторских решений, а также влияния различных видов возможных повреждений на прочность.

На рис. 2 приведены кривые усталости материала с различной степенью исходной поврежденности.

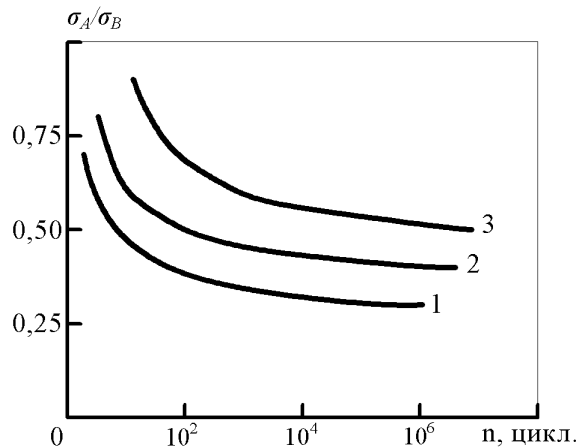


Рис. 2. Кривые усталости материала с различной степенью исходной поврежденности

Рассмотрены три варианта: кривая 1 – утонение, составляющее 20% от толщины образца, кривая 2 – утонение, составляющее 10% от толщины, кривая 3 – образец без исходной поврежденности. Видно, что характер кривых усталости совпадает, но предел выносливости уменьшается с увеличением исходной поврежденности.

Естественно, что кинетика как мало-, так и многоциклового усталости должна существенно зависеть как от первоначальных несовершенств в материале, так и от появившихся в процессе эксплуатации.

Поскольку к отказам элементов конструкций могут приводить различные физико-механические процессы, протекающие на разных масштабных уровнях, с различной скоростью и механизмом воздействия, при определении остаточного ресурса необходим учет всего многообразия факторов, приводящих к снижению эксплуатационных свойств. Предлагаемый подход позволяет учесть все возможные процессы и факторы, приводящие к деградации материала [5].

В общем случае последовательность действий при оценке остаточного ресурса элементов конструкций может выглядеть следующим образом:

1. Построение компьютерных моделей прочностной надежности элементов конструкций с учетом модели исходного материала, моделей формы, нагружения и разрушения.

2. Оценка фактического состояния материала элементов конструкций, бывших в эксплуатации.

Для этого необходимо определить:

- возможное изменение геометрических размеров;
- наличие поверхностных дефектов (трещин, коррозии, эрозии);
- возможное изменение механического состояния материала по уменьшению запаса пластичности;
- параметры трещин, которые могут образовываться внутри материала;
- возможное изменение структуры, характерное для деталей газотурбинных двигателей.

Для решения всех вышеперечисленных задач могут применяться различные методы дефектоскопии, в том числе: визуальный контроль, капиллярный контроль, магнитопорошковый контроль, ультразвуковой контроль, радиографический контроль, метод акустической эмиссии, механические испытания (для определения твердости) и др.

3. После определения фактического состояния материала элемента конструкции с помощью РЭМ проводится корректировка исходной модели материала на текущий момент времени и определяется прочностная надежность (запас прочности) в данный момент времени, а также определяется остаточный ресурс на последующий период эксплуатации.

Как уже отмечалось, в последнее время для изготовления лопаток в газотурбинных двигателях широко применяются высоколегированные многокомпонентные жаропрочные никелевые сплавы, имеющие более высокую, чем стали, жаропрочность. Применение этих сплавов регламентируется как

рабочей температурой (возможностью изменения структуры), так и их сопротивлением усталости и ползучести, а также жаропрочностью. Все это вызывает необходимость конкретного подхода к оценке индивидуального остаточного ресурса деталей конкретного оборудования.

Очевидно, что сопротивление ползучести и длительная прочность могут изменяться как в связи с изменением микроструктуры сплавов, так и с другими повреждающими факторами.

В процессе длительной эксплуатации при высокой температуре в материале лопаток происходят физико-механические и структурно-фазовые изменения, которые влияют на их работоспособность. Качественное состояние материала лопаток изменяется как на микро-, так и на макроуровне, в результате чего наступает предельное состояние материала, при котором возможно разрушение лопатки [6].

Не вдаваясь в подробности, приведем схему определения остаточного ресурса детали. Методология такой оценки с помощью специального РЭМ может быть реализована (в относительных единицах) даже при наличии деталей после хотя бы одной конкретной наработки.

На рис. 3 приведена упрощенная схема определения остаточного ресурса эксплуатации при минимальных промежуточных данных.

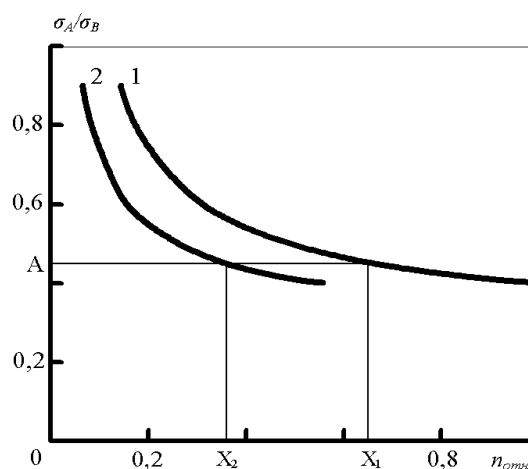


Рис. 3. Упрощенная схема определения остаточного ресурса эксплуатации при минимальных промежуточных данных

Точка А соответствует эксплуатационной нагрузке. Пусть кривая 1 соответствует разрушению лопатки при этой нагрузке после 20000 часов эксплуатации (точка  $X_1$ ). Если при оценке фактического состояния другой лопатки после некоторой наработки выяснилось, что изменилось ее структурно-механическое состояние и этому состоянию (как исходному) соответствует кривая 2, то остаточный ресурс эксплуатации этой лопатки будет определяться точкой  $X_2$ .

Естественно, что увеличение объема исследованных деталей с различной наработкой даст возможность более точно построить модель материала в РЭМ, а следовательно и повысить точность определения остаточного ресурса эксплуатации.

### Заключение

Таким образом, предложенный специальный расчетно-экспериментальный метод позволяет решать все основные проблемы при оценке остаточного ресурса. При этом обязательной является оценка фактического состояния материала конструктивных элементов, бывших в эксплуатации. Определение фактического состояния материала элементов изделия стандартными методами (металлографическим, методами неразрушающего контроля) и применение РЭМ позволяет определить остаточный ресурс этих элементов даже без строгого учета предыстории нагружения материала. В этом случае модель предполагаемых эксплуатационных нагрузок в течение продлеваемого срока службы рассматривается как аналогичная за предыдущий срок эксплуатации.

Следовательно, модель нагружения в РЭМ для цикла «исходное состояние – эксплуатация – определение нового состояния материала – оценка остаточного ресурса» в течение продлеваемого периода будет соответствовать режимам нагружения за истекший период эксплуатации.

### Литература

1. Кулишов С., Садыков В. Учет выработки ресурса при эксплуатации газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С. 6 – 8.
2. Mileskin M.B., Biblik I.V. Diagnostics for strength of fibre-epoxy composite material wares using computer modeling of fracture processes // Proceedings 2<sup>nd</sup> Int. Conf. «Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics». – Minsk, 1998. – P. 123 – 129.
3. Милешкин М.Б., Библик И.В. Реализация энергетического подхода при оценке прочности и пластичности конструкционных материалов специальным расчетно-экспериментальным методом // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды 5-й МНТК, 28-29 мая 2002 г. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2002. – С. 572 – 575.
4. Милешкин М.Б., Библик И.В. Основные проблемы оценки остаточного ресурса элементов конструкций по состоянию разрушения материала // Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання. – Х.: ХПМаш. – 2003. – Т. 2. – С. 388 – 393.
5. Милешкин М.Б., Библик И.В. Оценка ресурса элементов конструкций на основе нового расчетно-экспериментального метода // Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – К.: ИПП НАНУ, 2004. – № 2. – С. 81 – 86.
6. Механические свойства и структура материала рабочих лопаток ТВД агрегата ГТК-25И(М) после эксплуатации и регенерации / И.Л. Щеголев, Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокин, Л.А. Кривина // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 1. – С. 20 – 24.

*Поступила в редакцию 1.06.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Мацевитый, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.