

Заключение

Сформулированные конструкторами НИИ машиностроения научно-методические основы разработки РДМТ и опыт их длительной эксплуатации в космосе, результаты деятельности по модернизации РДМТ путем применения жаростойких материалов и ужесточения требований к рабочему процессу, разработке РДМТ на экологически чистых компонентах топлива, а также уникальный научно-технический задел по РДМТ и ДУ нового поколения являются основанием для проведения НИР и ОКР по всем направлениям разработки двигательных систем космических аппаратов малого класса в интересах отечественных и зарубежных фирм.

Список литературы

1. Жиров С.П., Казанкин Ф.А., Кулябин К.П., Ларин Е.Г. и др. Современный уровень и направления развития ракетных двигателей малой тяги. /Доклад на Первой международной конференции-выставке "Малые спутники", г. Королев, 16-20 ноября 1998г.
2. Булдашев С.А., Завгородний Г.К., Казанкин Ф.А., Кулябин К.П., Ларин Е.Г. Двигательные установки малых космических аппаратов на основе РДМТ нового поколения. /Доклад на Первой международной конференции-выставке "Малые спутники", г. Королев, 16-20 ноября 1998г.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УПРУГИХ ТЕЛ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ, ДЕКРЕМЕНТА КОЛЕБАНИЙ И ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАСС СВОБОДНО ВИСЯЩЕГО ОБЪЕКТА

Иванов Ю.Н., Михайлов А.Л.

ОАО "Научно-производственное объединение "Сатурн", г. Рыбинск

Стало привычным и не требующим доказательств утверждение, что надежность конструкций в современной технике - важнейший фактор ее развития. В свою очередь, надежность конструкций определяется конструкционными материалами, эксплуатирующимися в переменных полях различной природы и интенсивности, под действием которых их структура, а следовательно, и свойства непрерывно изменяются. Без знания закономерностей и умения количественно оценить процессы, протекающие в материалах на всех стадиях их производства и эксплуатации, прогресс в обеспечении надежности техники невозможен.

Для изучения поведения материалов в условиях температурно-

силовых воздействий применяются самые различные, в том числе неразрушающие методы контроля за изменениями структуры, происходящими при этом. Поскольку изменения структуры неизбежно вызывают изменение физико-механических свойств материала, то измерение этих изменений и лежит в основе подавляющего числа методов неразрушающего контроля.

Из широко известных и применяемых весьма эффективным и информативным методом является измерение упругих (модуля упругости) и неупругих (внутреннего трения) свойств материалов. Менее известен и в силу своей новизны практически не применяем метод, основанный на изменении эквивалентных масс упругой конструкции.

С методической точки зрения важно, что измерение и модуля упругости, и внутреннего трения, и эквивалентных масс реализуется на общей основе - возбуждении колебаний в объекте контроля. Из теории колебаний известно, что если в упругом теле с помощью сосредоточенной в точке силы возбудить колебания, то перемещение любой другой точки тела является функцией времени и однозначно определяется собственными частотами, коэффициентами демпфирования и эквивалентными массами в точке приложения силы и в точке наблюдения за перемещением. Из указанных параметров собственная частота прямо связана с модулем упругости материала, коэффициент демпфирования определяет релаксационные свойства, а эквивалентные массы характеризуют форму колебаний упругого тела. Изменение этих свойств вследствие разных причин обуславливает их выбор в качестве диагностических признаков.

Физический смысл модуля упругости, по-общепринятому мнению, состоит в том, что при упругой деформации твердого тела отклонение атомов от равновесных положений пропорциональны действующим между атомами силам. В прикладном отношении это означает, что величина модуля упругости является количественной характеристикой сил межатомного взаимодействия, а его изменение под действием любых внешних факторов может служить надежным источником информации о процессах, протекающих при этом в материале изделия.

Методы измерения модулей упругости в зависимости от длительности действия внешней нагрузки, вызывающей деформацию, разделяют на статические и динамические. Статические методы основаны непосредственно на законе Гука и для неразрушающего контроля малоприменимы. В основе динамических методов лежат известные соотношения между упругими константами твердого тела и скоростью распространения в нем упругих волн. Из динамических методов, условно разделяемых на импульсные и резонансные, для неразрушающего контроля наиболее

удобны последние, в которых значение модуля упругости определяется по квадрату частоты собственных колебаний объекта.

Внутреннее трение, в отличие от модуля упругости, характеризует поведение твердых тел, отклоняющееся от элементарного закона Гука, в соответствии с которым деформация мгновенно, без временной задержки следует за напряжением. В действительности реальные тела этому правилу не подчиняются, и если напряжение к твердому телу приложить мгновенно, то так же мгновенно возникнет упругая деформация, но с течением времени будет нарастать и неупругая деформация. При этом упругая деформация превращается в тепловую. Свойство твердых тел необратимо превращать механическую энергию, сообщенную им при деформации, в тепловую объединено общим названием внутреннего трения. Для задач неразрушающего контроля и диагностики важно, что количественные параметры процессов превращения энергии сравнительно легко измеряются и чувствительны к изменениям тонкой структуры материала.

Величину внутреннего трения чаще всего измеряют также с использованием механических колебаний, как свободно затухающих, так и вынужденных резонансных. Неупругость при колебаниях твердых тел проявляется в отставании деформации от напряжения, ее вызвавшего, что приводит к гистерезису, и диаграмма "напряжение - деформация" имеет форму петли, площадь которой определяет количество энергии, необратимо превращающейся в тепло за один период колебаний. В зависимости от конкретных задач и инструментальных возможностей применяют различные меры внутреннего трения. В исследовательской практике в качестве удобной количественной характеристики внутреннего трения часто используют логарифмический декремент колебаний, т.е. логарифм отношения амплитуд двух затухающих колебаний, отстоящих друг от друга на один период.

Эквивалентные массы, являясь функцией перемещения соответствующих точек упругого тела при вибрации, позволяют следить за изменением форм колебаний, вызванных какими-то изменениями в материале контролируемого тела. Отличительной особенностью этого метода контроля является его локальность, дающая возможность определить местонахождение дефекта. Вычисление эквивалентных масс ведется на основе результатов измерения перемещения точек вибрирующего тела или любого другого параметра, связанного с перемещением - скорости перемещения, его ускорения или напряжения в контролируемой точке. Методы подобных измерений относительно сложны из-за требований по их точности, а наиболее перспективным и эффективным, на наш взгляд, представляется применение для этих целей спекл - интерферометрии.

Обобщая краткий обзор методов измерения рассматриваемых фи-

зических величин, отметим, что у них есть один общий недостаток, существенно ограничивающий их применение в неразрушающем контроле и диагностике, а именно - почти все они реализованы лишь для специально изготовленных образцов или для деталей простой геометрической формы (стержень, пластина и т.п.). Кроме того, в большинстве случаев требуется жесткая связь объекта исследования с источником колебаний, что снижает точность измерения и модуля упругости, и, особенно, внутреннего трения, так как максимум точности достигается при колебаниях свободно висящего объекта. К таким условиям измерения близки установки резонансного типа [1], в которых объект (обычно цилиндрический) подвешивается на двух упругих нитях вблизи узлов колебаний, одна из которых соединена с источником колебаний, а другая - с их приемником. Подобные установки позволяют измерять модуль упругости (по резонансной частоте) и внутреннее трение (по декременту колебаний), но отмеченный выше недостаток - объект должен быть простой формы - делает их малопригодными для неразрушающего контроля деталей более сложной конфигурации.

Этого недостатка лишен метод измерения полного спектра резонансных частот, в котором объект любой формы подвешивается на одной упругой нити, колебания в нем возбуждаются коротким ударом, а звук, испускаемый им при этом, воспринимается микрофоном, связанным с анализатором спектра [2]. Здесь, однако, имеют место другие недостатки. Во-первых, от удара объект раскачивается, что требует дополнительного его закрепления. Во-вторых, время для измерения параметров колебаний ограничено временем их затухания, а это влечет за собой сложности методического характера. И то, и другое снижает точность результатов измерений и затрудняет широкое практическое применение данного метода.

С целью устранения отмеченных недостатков нами разработан способ безударного возбуждения колебаний объекта любой геометрической формы, свободно висящего на одной нити. Эта нить соединена с источником механических колебаний и передает их объекту. Изменяя частоту, подаваемую от источника колебаний, добиваются ее совпадения с собственной частотой объекта, который, будучи в резонансе, испускает звуковые волны той же, резонансной, частоты, которую можно измерить любым известным и доступным способом, например, тем же микрофоном с выходом на частотомер, осциллограф или другой измерительный прибор. Внутреннее трение измеряется по одной или нескольким его характеристикам, например, так же, как в [1], по декременту колебаний.

Достоинства данного метода очевидны - объект исследования остается неподвижным относительно приемника колебаний, каждая из ре-

зонансных частот возбуждается и изучается не в спектре, а отдельно и без ограничения времени измерения, исключено влияние ударного устройства. Все это дает возможность измерения собственной частоты объекта с высокой точностью, ограниченной лишь классом точности частотомера, т.е. с абсолютной погрешностью не более 0,001 Гц. Снимаются ограничения и устраняются случайные погрешности измерения внутреннего трения.

Приведем некоторые примеры использования установки, собранной на основе описанного выше метода. Установка состоит из источника колебаний - пьезоэлектрического преобразователя электрических сигналов в механические, к которому прикреплена тонкая металлическая нить для подвешивания объекта измерения. Напротив объекта устанавливается микрофон, выход которого связан с осциллографом для контроля формы и амплитуды колебаний объекта и электронным частотомером. Для измерения декремента колебаний в установке предусмотрен второй частотомер, работающий в режиме непрерывного счета, который включается одновременно с отключением источника колебаний.

Первый пример. Контроль собственных резонансных частот лопаток производится на вибростенде в режиме вынужденных резонансных колебаний с жестким креплением лопатки за замковую часть в специальном приспособлении. Были проведены сравнительные измерения собственной частоты сорока лопаток одного типоразмера на вибростенде и в свободно висящем состоянии. Сравнение результатов измерений показало, что имеют место случаи, когда значения частот, одинаковые в зажатом состоянии, будучи измеренными в свободно висящих лопатках существенно отличаются друг от друга, и наоборот. Это, на наш взгляд, является следствием способа крепления лопатки, а именно - в резонансных колебаниях свободно висящей лопатки задействован весь ее объем, включая замковую часть, и ничего более. В случае же жесткого зажатия за замок резонансная частота представляет собой некую условную величину, характеризующую механическую часть измерительной системы в целом, куда входит сама лопатка (без замка), приспособление с вкладышами для крепления лопатки и т.п. Естественно, что любые неконтролируемые изменения в этой системе отразятся на результате измерения. Именно данные обстоятельства делали малоэффективными попытки использовать изменение собственной частоты жестко закрепленных объектов в качестве диагностического признака. Напротив, возможность измерения частоты свободно висящего объекта делает применение этого признака весьма перспективным, подтверждением чему служат данные проведенных нами измерений частоты семи лопаток, проходивших вибростеновые испытания на усталость при различных уровнях напряжений

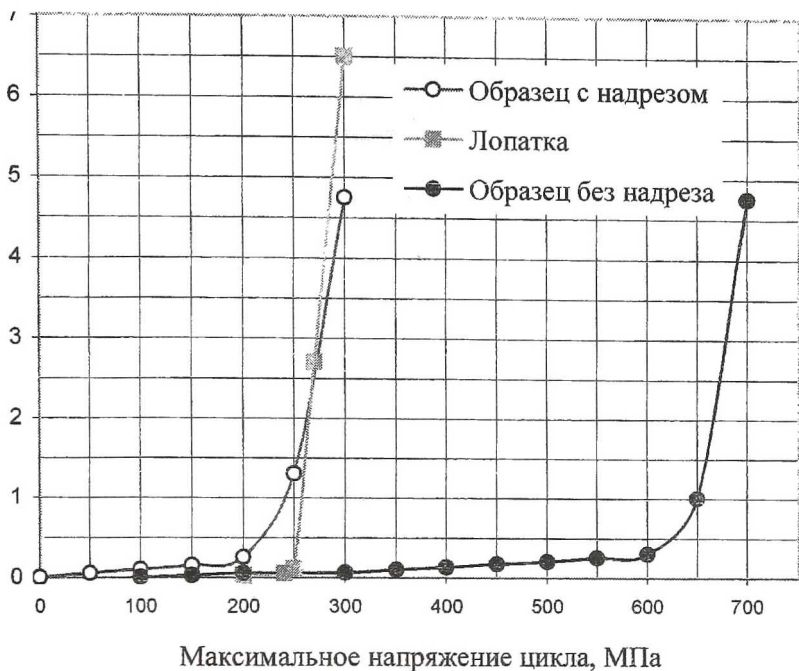


Рис. Изменение упругих свойств в процессе испытания на усталость

на базе 2×10^7 циклов. За количественную оценку происходящих в процессе испытаний лопаток изменений их состояния взято снижение квадрата частоты собственных резонансных колебаний $\Delta f^2 = (f_{исх.}^2 - f_{исп.}^2) \times 100 / f_{исх.}^2$, %, поскольку, как отмечалось выше, значение квадрата частоты пропорционально модулю упругости материала лопатки (в данном случае ЖС6У).

Методика испытаний предусматривала ступенчатое увеличение действующего напряжения, если лопатка выдерживала базовое число циклов на предыдущем уровне. После каждой ступени испытания измеряли частоту лопаток в свободно висящем состоянии. Средняя величина Δf^2 лопаток, выдержавших базовое количество циклов при 240, 250 и 270 МПа, составила в среднем 0,05 %, 0,11 % и 2,7 %, соответственно (см. рис.). Появление усталостной трещины после 85 000 циклов при 300 МПа вызвало увеличение Δf^2 примерно до 5...6 %.

Аналогичные эксперименты были проведены на плоских образцах с надрезом (коэффициент концентрации напряжений равен 2,5) из сплава ЖС6У и по другой методике усталостных испытаний - максимальное напряжение цикла с 50 МПа увеличивали ступенями по 50 МПа с базой

на каждом уровне 2×10^6 циклов с измерениями после каждого этапа испытания собственной частоты в свободном состоянии. Усредненные результаты по пяти образцам с надрезом и без надреза приведены на рисунке, из которого видно, что снижение модуля упругости примерно на 0,25 % свидетельствует о начале усталостного разрушения.

Относительно результатов измерения декремента колебаний следует отметить, что внутреннее трение, как чрезвычайно тонкое и чувствительное ко многим факторам физическое свойство требует дальнейшей тщательной отработки методики измерения, особенно способа подвешивания контролируемых объектов сложной геометрической формы. Такая же ситуация и с применением метода эквивалентных масс для свободно висящих вибрирующих объектов. Пока этот метод реализован при измерениях параметров перемещения точек упругих конструкций, жестко закрепленных на вибростенде. В частности, измерения эквивалентных масс рабочей лопатки компрессора из сплава ВД-17 в процессе развития усталостной трещины показали большую чувствительность по сравнению с чувствительностью упругих свойств. Так, изменению ΔI^2 лопатки с усталостной трещиной на 10 % соответствует изменение эквивалентной массы в одной из точек поверхности лопатки примерно на 40 %, и есть основания предполагать, что это различие на свободном от жесткого закрепления объекте будет еще больше.

Таким образом, методы измерения собственной резонансной частоты, декремента колебаний и эквивалентных масс свободно висящего объекта перспективны, как методы неразрушающего контроля и диагностики деталей любой геометрической формы с использованием в качестве диагностического признака величины изменения указанных физических свойств.

Список литературы

1. Криштал М.А., Драпкин Б.М. Установка для одновременного измерения модуля упругости и декремента колебаний материалов в широком диапазоне температур. - Заводская лаборатория. 1965. №11. С.1391-1393.
2. Магеррамова Л.А., Мельникова Г.В., Миронов А.К., Шор Б.Ф. Проблемы конструкционного демпфирования биметаллического турбинного колеса типа "блиск" с монокристаллическими лопатками. - В сб. "Новые технологические процессы и надежность ГТД". Вып.2. - М.: ГНЦ РФ ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2001. С.135-149.