

МАШИНОСТРОЕНИЕ • ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛА

УДК 621.452

М.Н. ДАВЫДОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД НА КОРРОЗИЮ И МЕХАНИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ

Рассматриваются комбинированные методы испытаний деталей ГТД на коррозию и механическое нагружение. Описывается установка для комбинированных испытаний лопаток ГТД. *Лопатка турбины ; повреждаемость ; высокотемпературная коррозия ; моделирование испытаний ГТД*

Существующие методы автономных испытаний элементов ГТД на длительное статическое, повторно-статическое нагружение и другие виды механического и термического нагружений не воспроизводят полную картину коррозии, поскольку не моделируется рабочая среда, в которой протекает эксплуатация двигателя, и это, естественно, снижает достоверность оценки надежности и ресурса лопаток. Ускоренные испытания лопаток в системе двигателя с форсированием режима нагружения по частоте вращения, температуре, вибрации также не воспроизводят полностью картину коррозии по причине малой (по сравнению с ресурсом) длительности пребывания лопатки в газовой среде.

С целью полного воспроизведения повреждаемости деталей ГТД в ускоренных испытаниях применяются комбинированные методы испытаний.

Для исследования на коррозионную и эрозионную стойкость металлов, используемых в двигателестроении для изготовления вибронгруженных водоохлаждаемых деталей дизеля, цилиндровых втулок, головок цилиндров, блоков, корпусов турбокомпрессоров, разработан способ испытаний, позволяющий приблизить условия испытаний к реальным условиям системы охлаждения дизеля и существенно ускорить процесс испытаний. Это достигается тем, что испытуемый образец помещают в жидкость с агрессивной средой и устанавливают с зазором относительно волновода (рис.1). Нагружение образца осуществляют ультразвуковым генератором с магнитострикционным вибратором за счет колебаний волновода. Частоту и ампли-

туду колебаний волновода, а также физико-химическое состояние агрессивной среды поддерживают постоянным. При этом скорость эрозионного износа образца определяют по глубине каверн.

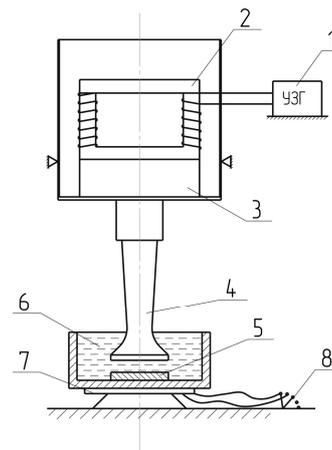


Рис. 1. Схема установки: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – магнитострикционный вибратор; 3 – концентратор; 4 – волновод; 5 – образец; 6 – ванна с агрессивной жидкостью; 7 – нагревательный элемент; 8 – терморегулятор

На практике используется способ испытаний металлов на коррозионное растрескивание, включающий нагружение и выдержку термообработанных образцов в коррозионно-активной среде. Недостатком этого способа является большая длительность испытаний. Для устранения данного недостатка термообработанные образцы перед нагружением и выдержке в коррозионно-активной среде намагничивают до остаточной намагниченности 2,5...3,5 кА/м. Время испытания при этом сокращается в 1,5...2 раза по сравнению со способом без намагничивания [1].

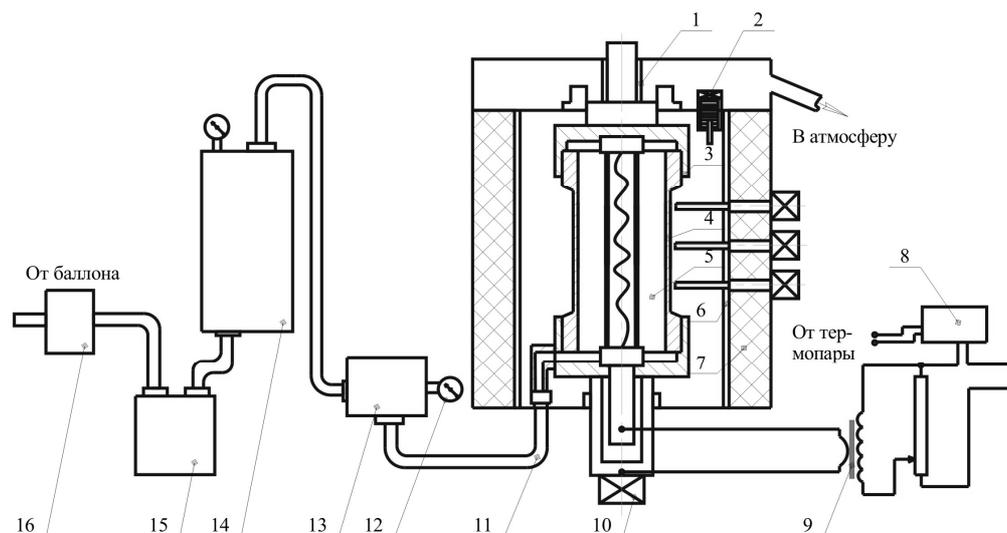


Рис. 2. Принципиальная схема установки для испытания материалов на длительную прочность при сложном напряженном состоянии: 1 – тяга; 2 – устройство для прохода газа в верхнюю полость; 3 – переходные втулки; 4 – образец; 5 – нагреватель; 6 – устройство для передачи на индикатор радиальных перемещений образца; 7 – термоизоляция; 8 – автоматический регулятор температуры; 9 – трансформатор; 10 – клеммы трансформатора; 11 – вводная трубка; 12 – манометр; 13 – самозапирающийся клапан; 14 – дополнительная емкость; 15 – фильтр; 16 – компрессор высокого давления

В Институте проблем прочности АН Украины разработана установка, позволяющая при наличии любой механической системы нагружения (осевого растяжения или кручения) испытывать материалы на длительную прочность при плоском напряженном состоянии и высокой температуре (до 1273 К) [2].

Плоское напряженное состояние в образце создается при совместном действии внутреннего давления с растяжением или кручением.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. Образец с помощью резьбы крепится в переходных втулках, которые тягами соединены с захватами машины, создающей осевое усилие или скручивающий момент. Во внутренней полости образца находится нагреватель, изготовленный из металлокерамического сплава и состоящий из стержня, концентрично расположенного внутри полого цилиндрического кожуха. Нагреватель питается от понижающего трансформатора, клеммы которого соединены со стержнем нагревателя и нижней тягой. Предусмотрена также регистрация в процессе испытания радиальных деформаций рабочей части образца. Все приспособление для крепления, нагрева и нагружения образца защищено наружным кожухом и термоизоляцией. Передача перемещений на индикатор осуществляется с помощью устройств, обеспечивающих автоматическое запираение канала при разрыве образца. Осевые деформации фиксируются при-

борами механической системы машины, на которой установлено приспособление.

Газовая среда (аргон, азот или другой инертный газ), создающая внутреннее давление в образце, поступает от баллона в компрессор и, проходя через фильтр, заполняет емкость. Оттуда через самозапирающийся клапан, снабженный манометром, газ по трубке поступает во внутреннюю полость образца. При разрушении образца срабатывает клапан, отключающий подачу газа. Газ, находившийся в образце, поступает в верхнюю полость приспособления и выходит в атмосферу.

Результаты испытаний, полученные на базе 5...10 тыс. ч с помощью описанных выше испытательных установок, можно экстраполировать на большие базы, после чего могут быть ускоренно определены пределы длительной прочности материалов и конструктивных элементов (в случае применения специальных переходных креплений) с учетом характера длительного нагружения в эксплуатации.

В зависимости от конструкции элементов судовых энергетических установок и характера малоциклового механического нагружения стенды для испытания образцов и моделей разделяются на две группы [2]:

- стенды для испытания моделей корпусов и трубчатых элементов на действие циклического внутреннего давления;

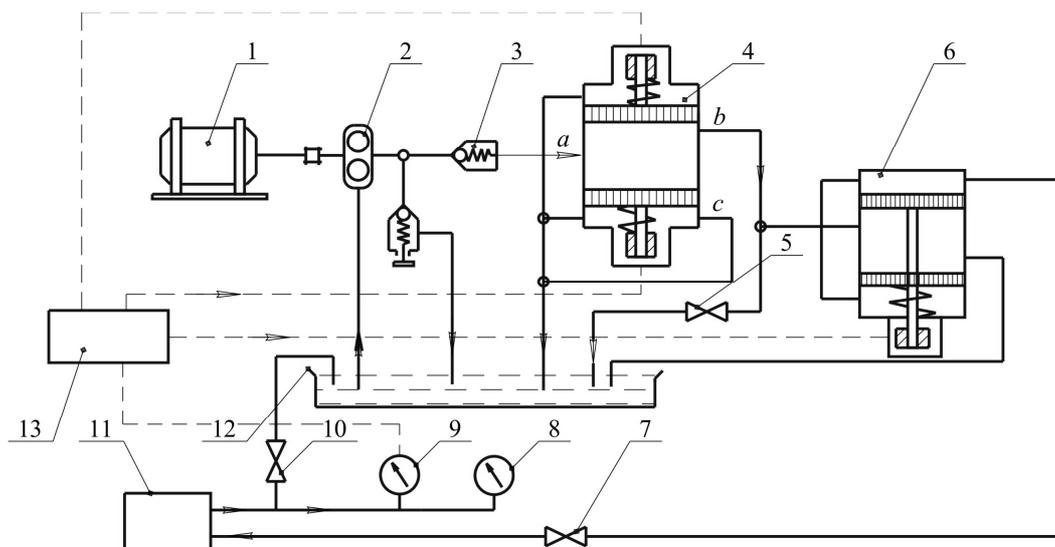


Рис. 3. Гидравлическая схема установки для испытания моделей сосудов пульсирующим давлением

- стенды для испытания образцов, моделей и конструктивных элементов на циклическое растяжение-сжатие и изгиб.

К первой группе относится автоматическая универсальная установка, позволяющая нагружать модель сосуда пульсирующим давлением с выдержками как при максимальном, так и при минимальном давлении (рис. 3).

Установка может соединяться с испытываемым сосудом непосредственно или с помощью гидродомкрата 11. Рабочая жидкость (масло) из бака 12 гидронасосом 2, приводимым от электродвигателя 1, подается через обратный клапан 3 на двухходовой золотник 4, который поочередно переключает линию подачи масла от насоса к испытываемой конструкции или к линии сброса. Изменение давления в гидравлической системе может задаваться от электроконтактных манометров 8 и 9 и регулируется вентилями 5, 7 и 10.

Управление гидравлической системой осуществляется со специального пульта электронного устройства 13.

Для осуществления режима повторного нагружения с выдержкой по времени предусмотрен специальный электрогидравлический золотник 6. Основной золотник 4 открывает магистраль подачи давления, а дополнительный 6 перекрывает ее на заданный промежуток времени. После срабатывания специального реле золотник 6 возвращается в нормальное положение и открывает магистраль подачи давления в домкраты. Таким образом, процесс автоматически повторяется.

Примером стенда для испытаний на малоцикловую усталость является установка

(рис. 4) [2], позволяющая проводить программное нагружение образцов. Образец 1, устанавливаемый в резьбовых захватах 2, нагружается с помощью неравноплечего рычага 5 грузом 6. Приложение и снятие нагрузки осуществляется снятием с арретира и арретированием нагрузочного рычага с помощью электромагнита 7 через рычажную систему с демпфирующим устройством 3, обеспечивающим плавность и заданную скорость нагружения. Образец нагревается электрическим током от трансформатора 8.

Частота приложения нагрузки задается программным устройством 4, представляющим собой лентопротяжный механизм с постоянной скоростью протягивания киноленты, на которой нанесена программа в виде соответствующей перфорации. При совпадении отверстия с заданным контактным штифтом замыкается цепь тока, и с помощью реле и системы блокировки включается соответствующий механизм.

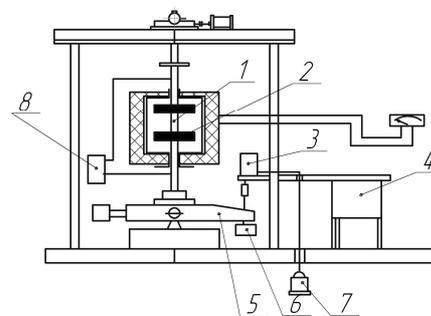


Рис. 4. Принципиальная схема установки с программным нагружением для испытаний на малоцикловую усталость

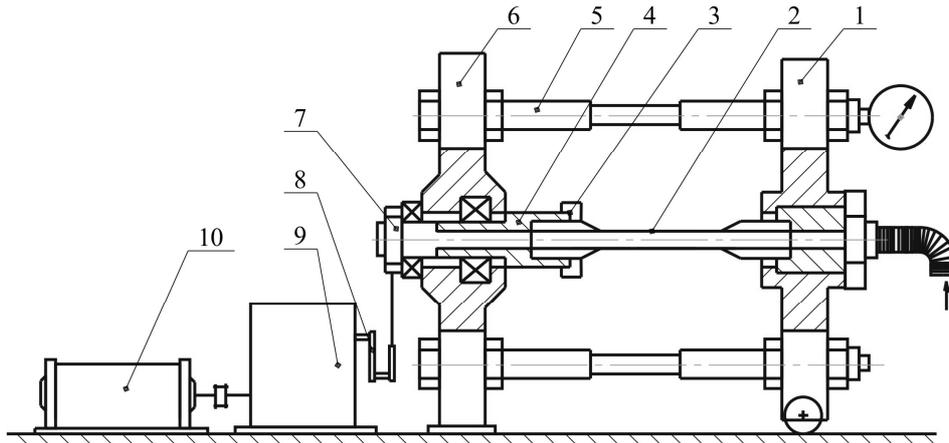


Рис. 5. Схема установки для испытаний на термоусталость при сложноподвижном состоянии

Воспроизведение сложноподвижного состояния при ускоренных испытаниях требует создания специальных установок [2]. Такие установки позволяют получить однородное плоскоподвижное состояние при растяжении-сжатии и кручении.

Схема подобной установки приведена на рис. 5. Осевая деформация при растяжении и сжатии возникает в случае периодического нагрева током и охлаждения воздухом образца 2, жестко закрепленного между двумя массивными стойками 1 и 6, соединенными силоизмерительными колоннами 5. Деформация сдвига задается образцу механически, путем передачи крутящего момента через головки образца, закрепленные в захвате 3. Последний связан со шпинделем 4, который получает движение через коромысло 7 и эксцентрик 8, находящийся на приводном валу редуктора 9, вращаемого электродвигателем 10. Вал редуктора соединен с электродвигателем шкивами клиноременной передачи, что позволяет варьировать частоту механической нагрузки в широком диапазоне (30...240 цикл/ч). Амплитуда угла закручивания задается смещением оси эксцентрика относительно оси приводного вала и может изменяться от 0 до $7^{\circ}30'$.

При испытаниях на термоусталость в условиях чистого сдвига стойка 1 свободно перемещается в осевом направлении, исключая тем самым влияние температурной деформации на напряженное состояние образца. В условиях сложноподвижного состояния в образце возникают одновременно осевое температурное и механическое касательное напряжения. С помощью специального программного устройства можно проводить испытания в условиях синхронного действия осевых и сдвиговых деформаций при произвольном смещении их по фазе.

Таким образом, на установке можно проводить испытания в условиях циклически меняющихся температур в режиме жесткого нагружения и воспроизводить практически любое напряженное состояние в интервале от чистого сдвига до растяжения-сжатия. Заданный температурный и механический режим поддерживается автоматически с помощью электрической системы управления.

Поломки от МЦУ являются результатом совместного действия тепловых и механических напряжений и деформаций. Фирма Пратт-Уитни спроектировала и апробировала установку для исследования МЦУ узлов и деталей газогенератора (рис. 6) [3].

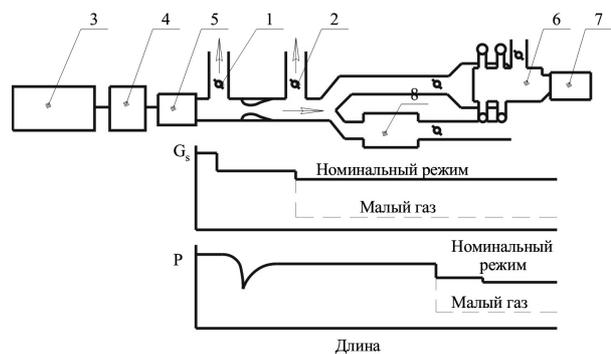


Рис. 6. Общая схема установки для проведения испытаний на МЦУ: 1 – клапан, регулирующий подачу воздуха на установившемся режиме; 2 – клапан циклического режима; 3 – промышленный ГТД со свободной турбиной FT4; 4 – коробка передач; 5 – компрессор; 6 – смеситель; 7 – испытываемый газогенератор; 8 – охладители

На установке воспроизводится в точности давление КНД и вентилятора двигателя и осуществляются быстрые переходные режимы. На этой установке с высокими температурами и давлениями изолирован от остальной части двигателя, что позволяет проводить измерения на

препарированных деталях, находящихся в воспроизводимых действительных условиях работы газогенератора на двигателе. На стенде обеспечиваются условия разгона и сброса оборотов двигателя.

Система автоматического регулирования и ЭВМ установки полностью отделены от испытуемого газогенератора. Система управления рассчитана на минимальное применение ручных операций и требуется минимальное количество первоначальных данных для каждого испытания. Все операции во время испытания управляются автоматически компьютером, по заранее составленной программе, которая введена в компьютер.

С помощью компьютера устанавливается необходимое смещение РУД газогенератора и воспринимается сигнал обратной связи – величина частоты вращения для контроля работы установки.

Для исследования выносливости жаропрочных сталей и сплавов при изгибе в условиях высоких температур широкое распространение получили машины типа машины Лера - Шенка, воспроизводящие нагружение образцов круговым чистым изгибом.

На рис. 7 показана схема одной из секций установки этого типа НУМ-1 [2]. Образец 3 крепится с помощью цангового зажима в отверстиях валов шпинделей 2, которые приводятся во вращение с частотой 50 Гц от электродвигателя 5. Нагрев образца осуществляется в печи 4. Особенностью установки является возможность наложения на чистый изгиб осевой растягивающей нагрузки с помощью пружины 1. Такое нагружение в значительной степени имитирует работу материала в рабочих лопатках турбин, которые подвергаются переменному изгибу от воздействия газового потока и растяжению от ЦВС. Осевая нагрузка существенно уменьшает напряжения изгиба в образце. Поэтому для достижения расчетных величин напряжения необходимо значительно увеличить вес подвешиваемого к образцу груза 6.

Из установок, работающих по схеме консольного изгиба при высоких температурах, наибольшее распространение получили установки ВУ-8 (типа Велера) [2]. Схема установки приведена на рис. 8. Образец 1 крепится в цанговом зажиме на консольном конце вала 5, установленного в подшипнике 4 и приводимого во вращение от электродвигателя. Нагружение образца осуществляется с помощью грузов 6, подвешиваемых к нему через подшипник 2. Образец нагревается в печи сопротивления 3, которая

может перемещаться по станине установки. На машине одновременно можно испытывать два образца.

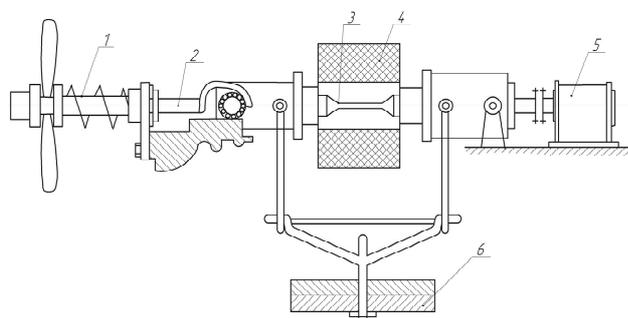


Рис. 7. Схема секции установки НУМ-1

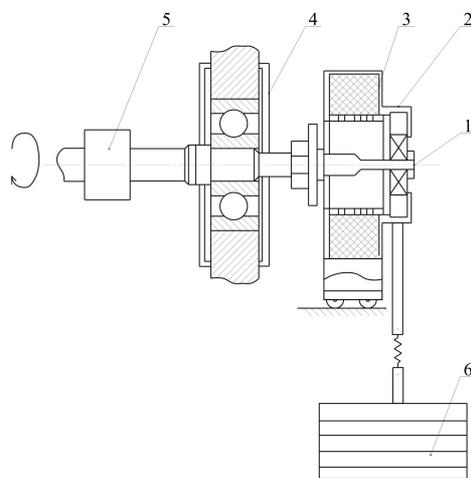


Рис. 8. Схема установки ВУ-8

Пример комплексного исследования прочностных характеристик натуральных монокристаллических лопаток турбины при циклических, в том числе двухфакторных, нагружениях приведен в работе [4].

Объектом исследования являлись монокристаллические охлаждаемые лопатки первых ступеней турбин высокого давления из сплава ЖС-30.

Технические данные: диапазон частот: 100..2000 Гц, температура нагрева: до 1000 °С, точность контроля амплитуды лучом лазера: 0,8%

При комнатной температуре лопатки испытывались на установках с электродинамическими вибраторами и на высокочастотных воздушных вибростендах. При высокой температуре лопатки с частотами до 2000 Гц испытывались на установке с нагревом в печи сопротивления и контролем амплитуд лучом лазера (рис. 9), а лопатки с частотами выше 2000 Гц – на установке с высокочастотным возбудителем, индук-

ционной печью и контролем режима нагружения по тензодинамометру (рис. 10).

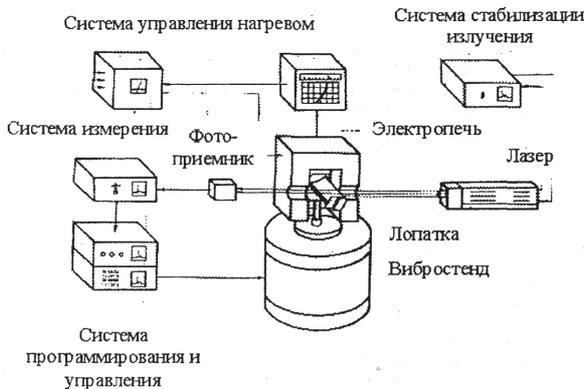


Рис. 9. Схема установки для испытаний лопаток на усталость при высокой температуре с контролем амплитуд лучом лазера

Технические данные: диапазон частот: 100...2000 Гц, температура нагрева: до 1100°C, точность контроля амплитуды лучом лазера: 0,8 %.

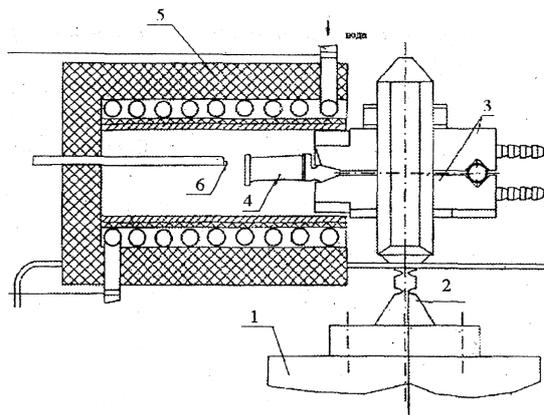


Рис. 10. Схема установки для испытаний на усталость высокочастотных лопаток при высокой температуре: 1 – вибростенд; 2 – рама; 3 – динамометрические зажимные элементы; 4 – лопатка; 5 – печь с индукционным нагревом; 6 – термопара

Технические данные: диапазон частот: 5...5000 Гц, температура нагрева: до 1100°C, точность контроля нагружения тензодатчиками на зажимах: $\pm 2\%$.

Исследование сопротивления термической усталости монокристаллических лопаток проводилось на известном стенде термоциклических испытаний (рис. 11), который был разработан в Институте проблем прочности академии наук Украины совместно со специалистами СНТК им. Н. Д. Кузнецова.

Технические данные стенда: температура нагрева: до 1200°C, скорость нагревай охлажде-

ния: 100...200°C/с, диапазон частот виброн нагружения: 100...3000 Гц.

Нагрев лопатки и формирование необходимого температурного поля осуществляется профилированным индуктором, питаемым токами высокой частоты, с одновременной прокачкой охлаждающего воздуха через внутреннюю полость лопатки. Циклирование осуществляется с помощью внешнего обдува воздухом через профильное сопло.

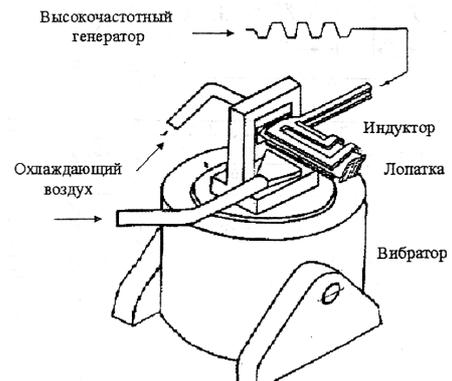


Рис. 11. Схема стенда термовиброциклических испытаний лопаток турбин

Параметры цикла термонагружения могут варьироваться в широких пределах, и диапазон их значений достаточен для воспроизведения условий циклической термической нагрузки пера лопатки в двигателе на переменных режимах.

Рассмотренные методы испытаний в большинстве случаев реализуют неполный состав нагружений, имеющий место в реальных условиях эксплуатации.

Основной недостаток комплексного метода испытаний – отсутствие коррозионного воздействия на образцы.

Предлагается метод комбинированного испытания, в котором наряду с механическим воздействием и термическим нагружением осуществляется коррозионное воздействие на образцы лопаток.

Испытываемая лопатка помещается в камере (рис. 12), выполненной из кварцевого стекла 1, поверх которой размещены витки катушки тока высокой частоты 2, причем витки катушки распределены неравномерно по длине с целью имитации температурной неравномерности, имеющей место в эксплуатации. Максимальная температура нагрева соответствует 950°C и выдерживается постоянной в автоматическом режиме с помощью электрического регулятора 8. Агрессивная среда создается в камере испаре-

нием солей 4 в тигле 5. При этом лопатка жестко закреплена в захватах 9, размещенных на вибростенде 10.

Воспроизведение в испытаниях коррозионного повреждения позволит повысить точность оценки ресурса и надежности лопаток турбин авиационных ГТД и энергетических установок.

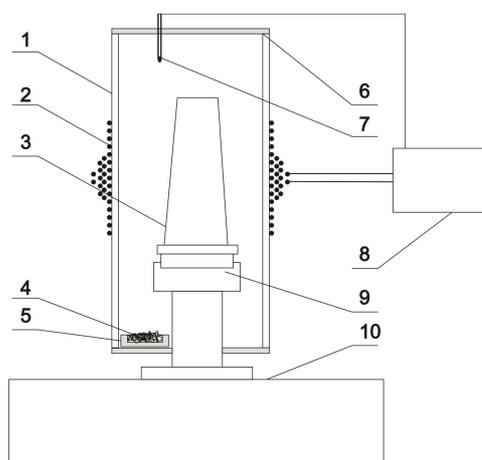


Рис. 12. Схема стэнда для комбинированных испытаний: 1 – камера из кварцевого стекла; 2 – витки катушки ТВЧ; 3 – испытываемая лопатка; 4 – соли; 5 – тигель; 6 – крышка; 7 – термопара; 8 – регулятор температуры; 9 – захваты; 10 – вибростенд

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стативкин, Г. П.** Патент SU 1821687 А1. Способ исследования коррозии и эрозии металлов / Г. П. Стативкин, П. А. Краножон, В. Е. Витвинский. МПК7 G01 N 17/00. Оpubл. 15.06.93. Бюл. № 22.

2. **Самсонов, Ю. А.** Справочник по ускоренным ресурсным испытаниям судового оборудования / Ю.А. Самсонов, В.И. Феденко. Л. : Судостроение, 1981. 200 с.

3. **Гроховская, Н. В.** Установка для испытаний на малоцикловую усталость / Н. В. Гроховская // Новости зарубежной авиации. 1983. № 11. С. 20–27.

4. **Еленевский, Д. С.** Прочность монокристаллических лопаток турбин при вибрационном, термодинамическом и вибротермодинамическом нагружении / Д. С. Еленевский, В. А. Соляников // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 7 «Обеспечение прочностной надежности рабочих лопаток высокотемпературных турбин» М. : ЦИАМ, 2008. С. 40–61.

ОБ АВТОРЕ



Давыдов Марсель Николаевич, ст. преподаватель. Дипл. инж.-мех. по авиадвигателям (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.