

УДК 539.1

**Методика испытаний
конструкционных материалов
на циклическую прочность в условиях
околоземного космического пространства**

В. А. Стрижало, Ю. Д. Скрипник

Институт проблем міцності Національної академії наук України, Київ

Надійшла до редакції 14.03.96

Наведено аналіз факторів навколоземного космічного простору, що впливають на міцність конструкційних матеріалів. Запропонована методика випробувань матеріалів на циклічну міцність в умовах відкритого космічного простору та схема побудови автоматичної багатозразкової установки з автономним приводом, що працює на сонячній енергії.

Сопротивление материалов усталостному разрушению обладает наибольшей чувствительностью к воздействию различных факторов окружающей среды (ФОС) по сравнению со статической и длительной прочностью материалов. Поэтому при постановке экспериментов по изучению влияния условий околоземного космоса на механические свойства конструкционных материалов в числе первоочередных должны быть испытания на усталость. В связи с этим следует также отметить, что усталостные явления наиболее опасны и характерны для конструкций космических аппаратов, а режимы испытаний могут быть приближены к эксплуатационным.

Все виды ФОС околоземного космического пространства, как и любые среды, воздействуют на материалы через их поверхность. Часть из них, относящаяся к проникающим излучениям, взаимодействует со всем объемом материала. Химические элементы, соединения и ионы остаточной атмосферы Земли начинают свое действие на поверхность через механизм адсорбции с последующей диффузией либо коррозией (образованием химических соединений). Еще одну группу факторов составля-

ют те, которые энергетически взаимодействуют с поверхностью посредством электромагнитных и кинетических воздействий (Феокистов (ред.), 1983; Белан и др., 1984; Космическая технология..., 1982; Мизун, 1988).

Имитация сложного комплекса ФОС в лабораторных условиях является практически непреодолимой задачей. В специальных камерах (Патон и др., 1973; Нусимов, 1982) воссоздаются лишь отдельные параметры космического пространства, а также некоторые их сочетания.

В связи с влиянием на долговечность конструкционных материалов наиболее изучены вакуумные и низкотемпературные условия (Алексеев и др., 1972; Алексеев, 1972; Гринберг и др., 1972; Стрижало, 1978; Стрижало, Скрипченко, 1987; Стрижало и др., 1988).

Долговечность в вакууме всех исследованных конструкционных металлических материалов (медь, алюминий, железо, титан и сплавы на их основе) увеличивается по сравнению с долговечностью при атмосферном давлении. Причем это увеличение происходит до некоторого уровня вакуума, выше которого долговечность остается постоянной.

Например, для меди такое насыщение наблюдается при вакууме 10^{-2} Па. Амплитуда деформации в цикле существенно изменяет эффективность влияния вакуума: с уменьшением амплитуды долговечность увеличивается в большей степени, чем при больших амплитудах. Металлографические исследования показали решающую роль поверхностных слоев материала в эффектах воздействия вакуума. Влияние состояния поверхности в этом случае часто является определяющим. Например, предварительное упрочнение пластическим деформированием поверхностных слоев титановых образцов вовсе исключает влияние вакуума на долговечность.

Основными процессами, протекающими в металлах при понижении температуры и определяющими характер изменения их служебных свойств, являются низкотемпературное упрочнение и охрупчивание. В общем случае увеличение прочности металлов за счет низкотемпературного упрочнения может быть нейтрализовано их охрупчиванием, вызывающим существенное снижение номинальных разрушающих напряжений. Для материалов с ОЦК-решеткой, к которым относятся углеродистые и низколегированные ферритные стали, характерным является значительное увеличение предела текучести и существенное уменьшение пластичности с понижением температуры.

Характерно также наличие так называемой критической температуры хрупкого перехода, при которой резко снижается вязкость разрушения. У материалов с ГЦК-решеткой (алюминиевые и медные сплавы, никель, аустенитные стали с высоким содержанием никеля) при понижении температуры прочность увеличивается, изменяется характер деформационного упрочнения и может повышаться пластичность. Металлы этой группы во всей низкотемпературной области не имеют порога хладноломкости. Необходимо отметить, что ряд сплавов нестабилен при низкой температуре. Так, в хромоникелевых сплавах протекают мартенситные превращения, способствующие значительному охрупчиванию материала и изменению его механических характеристик. Металлы с ГПУ-решеткой, к которым относятся титановые сплавы, по температурной зависимости механических свойств занимают среднее положение между металлами с ОЦК- и ГЦК-решетками и характеризуются наряду с повышением предела прочности значительным увеличением предела текучести, уменьшением пластичности и снижением сопротивления хрупкому разрушению при переходе в область криогенных температур. При понижении температуры наряду с увеличением статической прочности исследованных сплавов наблюдается увеличение их циклической

прочности во всей области малоциклового усталости. В комнатных условиях и при азотной температуре кривые малоциклового усталости характеризуются наличием хорошо развитых участков квазистатического и усталостного разрушения. При температуре жидкого гелия участок квазистатического разрушения и циклической ползучести на кривых малоциклового усталости может не проявляться, как, например, для титановых сплавов, кривые малоциклового усталости смещаются в область меньших долговечностей, и даже при напряжениях, близких к пределу прочности, разрушение имеет усталостный характер.

Влияние среды на циклическую долговечность металлов и сплавов изучается в рамках сравнительно нового направления науки о прочности — механики коррозионного разрушения (Карпенко и др., 1977; Петров и Сопрунюк, 1991). При усталости наиболее типичным является двухстадийный процесс. Вначале происходит адсорбция активных элементов среды (атомы, ионы, комплексы), снижающая поверхностную энергию металла и облегчающая работу приповерхностных источников дислокаций. Затем на неоднородностях поверхности и приповерхностной структуры образуются коррозионные пары. Под коррозией металлов понимается в настоящее время переход металлов в ионное состояние в результате взаимодействия их с окружающей средой. Совместное воздействие механических напряжений и агрессивной среды обуславливает так называемое коррозионно-механическое разрушение. При этом различают коррозионное растрескивание — хрупкое разрушение металлов при статических напряжениях и коррозионную усталость — снижение циклической долговечности при переменных напряжениях. При малоциклового усталости, особенно в режиме с выдержкой времени под максимальным напряжением цикла, в той или иной мере одновременно присутствуют оба вида разрушений. Очевидно, в рассматриваемом случае околосредного космического пространства невозможно возникновение электропроводящих сред. Поэтому принципиально возможна лишь химическая газовая коррозия, которая реализуется обычно при высоких температурах. Учитывая высокую кинетическую энергию частиц разреженной плазмы околосредного космического пространства, такие процессы, по-видимому, могут иметь место.

В условиях сверхвысокого вакуума даже при низких температурах происходит сублимация материалов, скорость которой зависит от давления насыщенного пара данного вещества. В диапазоне температур поверхности КА (± 150 °С) металлические конструкционные материалы достаточно ус-

тойчивы к испарению в вакууме (Феоктистов (ред.), 1983). Однако влияние вакуума может привести к появлению микрошероховатости вследствие различия энергий связи внутри зерен и на их границе, а также разной скорости сублимации для неодинаково ориентированных зерен. В поверхностном слое толщиной в несколько межатомных расстояний могут сублимировать наиболее летучие составляющие сплавов, например цинк в бронзе (Белан и др., 1984). Внешние напряжения увеличивают скорость сублимации и понижают температуру, при которой образуются поверхностные дефекты. Такие изменения параметров поверхности увеличивают опасность коррозионных явлений.

Механическое воздействие метеорных частиц и космической пыли при высоких скоростях движения вызывает эрозию на поверхности материала (коррозионную эрозию). В исследованиях мишеней из алюминия и меди площадью 2.89 см^2 , экспонированных в течение двух лет в открытом космосе на околоземной орбите высотой около 350 км, обнаружены микрократеры, наибольшая плотность которых приходилась на кратеры диаметром 2 мкм (Зиновьева и др. 1990). С увеличением размеров кратеров плотность их распределения уменьшалась. Величина потока частиц оценивалась для кратеров диаметром менее 5 мкм в $(2 \pm 40) 10^{-3}$ частиц $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, для больших кратеров — $(1 \pm 2) 10^{-4}$ частиц $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Также посредством изменения структуры поверхностного слоя (образование дефектов) на протекание процессов адгезии и коррозии влияют α -, β - и γ -излучения, в также потоки нейтронов и протонов (Петров и Сопрунюк, 1991), что снижает циклическую долговечность. Корпускулярное излучение вызывает радиационные повреждения материалов в виде поверхностной эрозии, ионизации вещества и смещения атомов, зависящих от энергии частиц и времени облучения. Наиболее опасное — излучение радиационного пояса Земли, способное при экспозиции менее года существенно изменить свойства материалов (Феоктистов, 1983).

Электромагнитное излучение с длиной волны менее $3 \cdot 10^{-7}$ м, называемое коротковолновым, является ионизирующим и также может приводить к изменениям поверхностных свойств материалов наружных устройств КА. Металлы и сплавы, как правило, устойчивы к воздействию электромагнитной радиации (Феоктистов, 1983). Различные виды облучений, особенно проникающие, выше некоторых пороговых значений изменяют механические свойства материалов, в том числе и циклическую долговечность (Киселевский, 1990; Скрипник и Косов, 1979).

Помимо влияния на адгезионный и коррозионный механизмы снижения прочности описанные выше изменения параметров поверхности оказывают непосредственное влияние на циклическую долговечность и рассматриваются как самостоятельный фактор (Карпенко и др., 1977; Коцальда, 1976).

В упомянутых выше исследованиях влияния внешних воздействий на циклическую долговечность параметры среды, как правило, далеки от космических, так как в этих работах ставились иные задачи. Так, по-видимому, не изучались явления адгезии и коррозии в разреженной плазме, соответствующей космической, не изучалось влияние в сочетании с другими факторами разных видов радиоактивных облучений при допороговых дозах на механические свойства материалов и т. п. Каждый отдельно взятый фактор космической среды при кратковременной экспозиции оказывает пренебрежимо малое повреждающее действие на материалы. Однако при длительном пребывании КА на орбите и воздействии целого комплекса факторов на фоне эксплуатационных нагрузок, когда возможно проявление синергетических эффектов, для материалов конструкций может наступить такое состояние, при котором становится недопустимо большой вероятностью внезапного разрушения либо накопление запредельных деформаций. В связи с трудностью воссоздания и удержания длительное время описанного комплекса ФОС в наземных условиях очевидным является проведение механических испытаний непосредственно в открытом космическом пространстве на специальном оборудовании, установленном на внешней поверхности КА.

В настоящее время практически нет опыта механических испытаний в космических условиях, в связи с чем априори отсутствуют сведения о длительности экспериментов, достаточной для надежного обнаружения эффектов воздействия ФОС и длительного прогноза работоспособности конструкций. Продолжительность известных материаловедческих экспериментов в космосе, непосредственно не относящихся к вопросам прочности, составляет примерно один год (Феоктистов, 1983; Космическая технология, 1982). Поэтому при разработке настоящей методики один год был принят в качестве временной базы испытаний, т. е. за это время должны быть определены кривые долговечности исследуемых материалов.

При разработке методики исследования циклической долговечности ориентировались на такой вид испытаний, которым, с одной стороны, обеспечивал бы простоту, надежность, малую массу и габариты

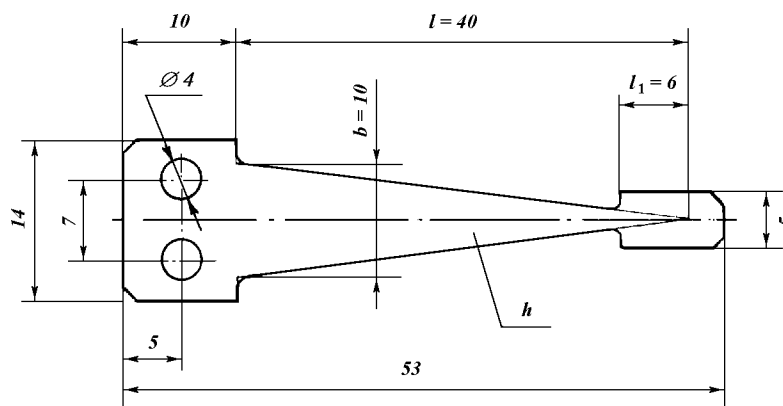


Рис. 1. Образец для испытаний

оборудования, минимум потребления энергии, а с другой — возможность охвата наибольшего диапазона режимов испытаний. Геометрия и расположение образцов в нагружающем устройстве должны обеспечивать максимальное восприятие ФОС, автоматическую смену образцов и регистрацию данных эксперимента. Необходимо также подчеркнуть, что дефицит энергии на борту КА диктует применение автономного силового привода испытательной машины, возможно с использованием солнечной энергии.

Указанным требованиям удовлетворяют, на наш взгляд, испытания в условиях циклического знакопеременного изгиба с кинематическим заданием перемещения точки приложения нагрузки, т. е. жесткий режим нагружения. Реализация малоциклового нагружения в данном случае имеет то преимущество перед кратковременными статическими испытаниями и испытаниями на многоцикловую усталость, что режим внесения повреждений от механических нагружений и внешних воздействий приближается к реальным. С другой стороны, создать нагружение с автономным приводом оказывается проще в случае малоциклового испытания, чем многоциклового. Кроме того, долговечность при малоцикловой усталости является характеристикой, весьма чувствительной к слабым и длительным воздействиям ФОС.

Выбор частоты нагружения, циклограммы испытаний и типа силового привода оказывается в определенной степени взаимосвязанным.

Из-за ограниченного доступа к зоне испытаний нагружающее устройство должно иметь такой запас образцов, который бы обеспечил проведение законченного цикла исследований — получение одной или нескольких кривых долговечности материала. Одновременное испытание, например, 24 образцов, размещенных в рабочих органах машины, описанной ниже, позволит построить три кривые долговечности либо две с большим числом

экспериментальных точек. Если испытания выполняются на базе 10^5 циклов, то частота нагружения должна быть не менее 0.2 цикла/мин. При большей частоте могут быть созданы циклы с выдержкой времени.

Для испытаний (рис. 1) взят плоский образец, изготовленный в виде балки равного сопротивления изгибу. Широкой частью он закреплен консольно в рабочих органах машины. Свободный конец имеет нерабочую часть l_1 для приложения нагрузки в расчетной точке на расстоянии l от заделки. Толщину образца h выбирают в зависимости от требуемой деформации на его поверхности (крайних волокнах) при заданном перемещении консоли, осуществляемом ползуном 2 (рис. 2) через кромки 6, образованные проточкой. Ползуны для всех образцов l имеют постоянный ход между упорами 3, а размах заданной для каждого образца деформации определяется его толщиной и шириной проточки.

Пренебрегая деформацией нерабочего участка образца l_1 , а также предполагая справедливыми гипотезы плоских сечений и неразрывности деформаций, зависимость деформации на поверхности образца ϵ от прогиба w (на расстоянии l от заделки) найдем из выражения $\epsilon_y = wh / (l^2 - l_1^2)$.

В предлагаемой методике испытаний на малоцикловую усталость задается амплитуда полной деформации ϵ_a , равная сумме упругой ϵ_y и пластической $\epsilon_{пл}$ составляющих. Известно, что долговечность при малоцикловом нагружении определяется пластической деформацией в цикле — шириной петли диаграммы циклического деформирования $\Delta\epsilon_{пл}$ (рис. 3, а), которая при тех же предположениях описывается аналогичной зависимостью: $\Delta\epsilon_{пл} = \Delta w_{пл} h / (l^2 - l_1^2)$, где $\Delta w_{пл}$ — удвоенный остаточный прогиб в полцикле.

В данных испытаниях нагрузка P и напряжения σ на поверхности образца не оцениваются, так как

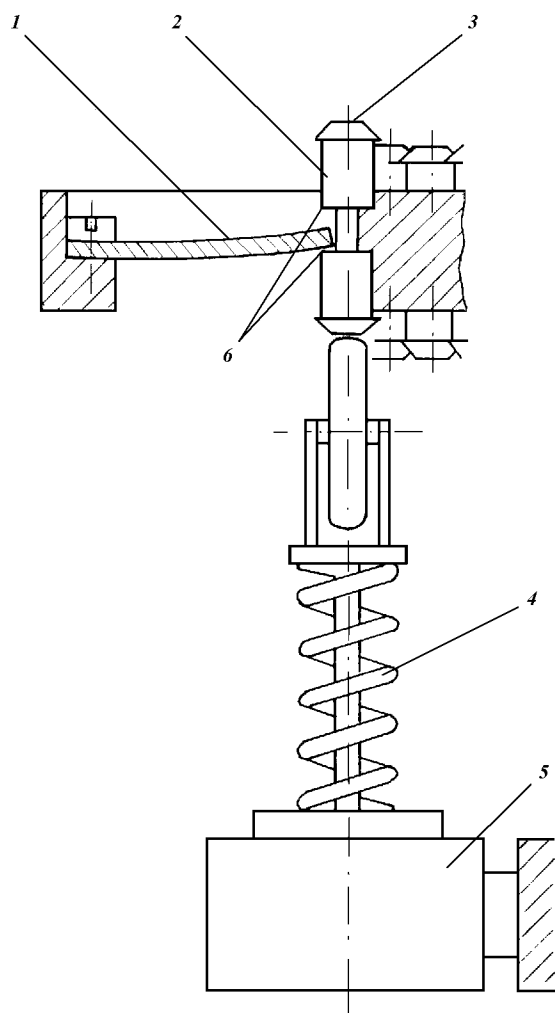


Рис. 2. Схема нагружения образца

экспериментальные результаты представлены в координатах $\Delta\varepsilon_{пл} - \lg N$, N — число циклов до разрушения. Остаточный прогиб в полцикле $0.5\Delta w_{пл}$ устанавливают в ненагруженном состоянии с помощью датчика перемещений 5 (рис. 2) по положению ползуна, которое он занимает под действием пружины 4, обеспечивающей малое измерительное усилие. Разрушение фиксируется тогда, когда ползун в процессе измерения утапливается до упора, не испытывая сопротивления образца.

При анализе данных экспериментов, очевидно, следует учитывать наиболее влияющие ФОС, регистрация которых осуществляется штатными средствами на борту, и в данной работе не рассматривается. Для интегральной оценки воздействий ФОС возможно использование ненагружаемых образцов-свидетелей.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из нагружающего устройства *НУ* и преобразователя солнечной энергии *ПСЭ*, расположенных на внешней поверхности КА, а также системы автоматического управления и регистрации экспериментальных данных *АСУ*, находящейся внутри станции.

Нагружающее устройство содержит кассету 1 с образцами 2 и ползунами 3 (в рассматриваемой конструкции их 24), расположенными по окружности. Кассета приводится во вращение двигателем 21. С двух сторон кассеты размещены нагружающие ролики 4 так, что ползуны, проходящие под ними при вращении кассеты, занимают одно из крайних положений. За один оборот кассеты каждый образец деформируется по одному симметричному циклу, состоящему из двух полциклов, смещенных во времени (рис. 3, б). Между роликами образцы находятся в ненагруженном состоянии. Их остаточный прогиб в полцикле измеряется датчиком перемещений 22. Каждый оборот кассеты фиксируется с помощью метки 7 и датчика оборотов 6. Температура образцов контролируется термопарой 5. Сигналы с датчиков 22, а также с термопары 5 поступают в разъем 20. С учетом максимальных нагрузок и КПД механизмов *НУ* мощность двигателя, необходимая для вращения кассеты со скоростью 3 оборота/мин, составляет около 15 Вт.

Преобразователи солнечной энергии в механическую могут быть построены на разных принципах. Наиболее простым является использование циклического изменения температуры соответствующих конструктивных элементов испытательной установки при орбитальном движении КА вокруг Земли с продолжительностью цикла нагружения, равной периоду обращения станции (около 100 мин). Здесь может быть реализовано термическое расширение газообразных, жидких или твердых рабочих тел в таких устройствах, как сильфоны, биметаллические пластины, а также сплавы с памятью. Однако при этом способе за указанный срок (один год) можно получить лишь 10^3 циклов. Следовательно, необходимо обеспечить более производительное устройство. Его можно создать из приведенных выше, если запасенная в каждом цикле нагрев—охлаждение механическая потенциальная энергия будет высвобождаться постепенно посредством специального механизма (например, типа маятникового часового спуска), приводя в движение рабочие органы испытательной машины.

Известны и другие способы преобразования солнечной энергии в механическую — через тепловую и электрическую: солнечные полупроводниковые элементы в сочетании с электродвигателем, концентратор солнечных лучей с тепловым двигателем

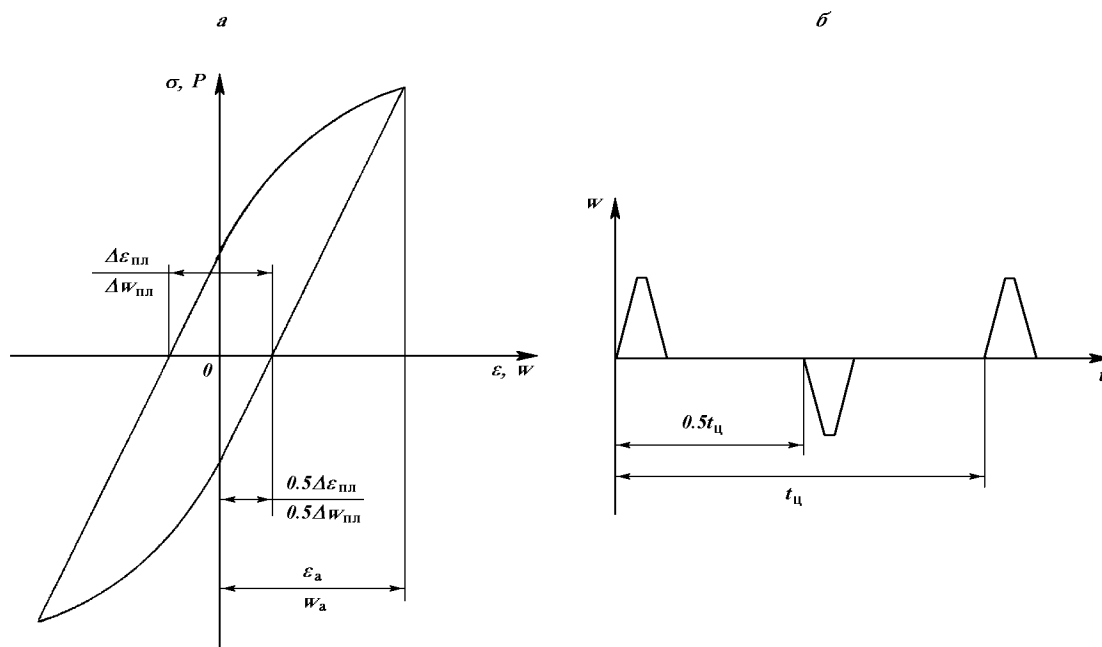


Рис. 3. Диаграмма (а) и циклограмма (б) деформирования образца

и радиатором для сброса тепла в окружающее пространство. Последнее принято в настоящей методике, причем в качестве двигателя привлечена тепловая машина с замкнутым термодинамическим циклом — двигатель Стирлинга в исполнении по схеме Сименса — рис. 4 (Уокер, 1985). Этот тип двигателя выбран в связи с тем, что в нем можно достичь хорошей балансировки механизма, устраняющей вибрации, которые недопустимы при расположении установки на специальной платформе, предназначенной для научного оборудования. Конструктивная схема двигателя показана на рис. 4. На нагревателе 9 концентрируются при помощи параболического отражателя 8 солнечные лучи. Тепло от холодильника 13 отводится в окружающее пространство посредством радиатора 11. Механизм косяк шайбы 15 соединен с поршнями 12 толкателями 14. Вал двигателя 18 соединен с электродвигателем-генератором 17, который может служить стартером при запуске теплового двигателя. Для балансировки механизма служат противовесы 16. В данной конструкции, благодаря толкателям в своих направляющих 19, цилиндры освобождены от поперечных усилий со стороны поршней, что имеет большое значение в условиях сухого трения. Заполнение рабочим телом (как правило, гелием) под давлением $5 \cdot 10^5$ Па и герметизацию двигателя производят при его изготовлении. Из-за

сопротивления движению рабочих поршней со стороны генератора и при перекачивании газа между полостями, а также в результате потерь на трение двигатель может устойчиво работать, начиная с определенной разности температур между горячей и холодной зонами рабочего объема, которая составляет 250—300 К. Для благоприятной ориентации ПСЗ относительно направления солнечных лучей его устанавливают так, чтобы ось параболоида была перпендикулярна к плоскости штатных солнечных батарей КА. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором 17, через согласующий преобразователь напряжения ПН поступает на электропривод нагружающего устройства.

Поскольку колебания температур одинаково ориентированных образцов, горячей зоны двигателя и любой поверхности конструкции под действием солнечных лучей подобны, запуск двигателя можно осуществить по показаниям термопары 5, контролирующей температуру какой-либо неподвижной площадки НУ, путем подачи напряжения на мотор-генератор от внешнего источника. Контроль за работой двигателя выполняют по генерируемому току.

Система автоматического управления АСУ включает следующие основные функциональные узлы: измерительные преобразователи ПИ сигналов датчиков перемещения w , оборотов n , температуры T ,

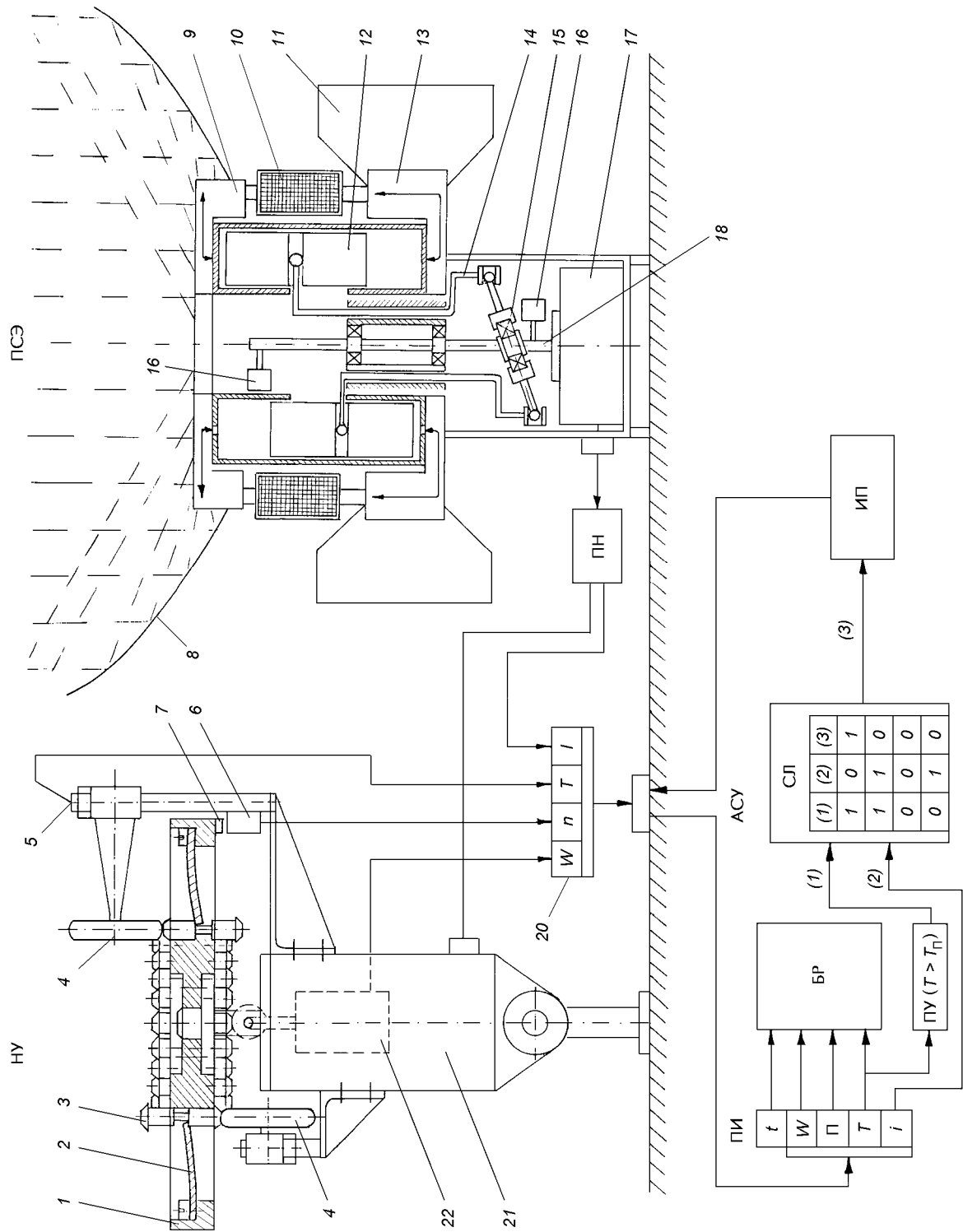


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

генерируемого тока i , а также таймер t ; блок регистрации экспериментальных данных $БР$; пороговое устройство $ПУ$; логическую схему $СЛ$ и источник питания $ИП$.

В автоматическом режиме установка работает следующим образом. При выходе КА на дневную часть орбиты показания термпары 5 достигают экспериментально установленной величины T_n , достаточной для запуска теплового двигателя; пороговое устройство $ПУ$ ($T > T_n$) подает сигнал на первый вход логической схемы $СЛ$. Поскольку двигатель еще не работает, на второй вход сигнал от преобразователя i не поступает. Логическая схема устроена так, что в этом случае на ее выходе будет 1, при всех других комбинациях входных сигналов на выходе будет 0. По команде $СЛ$ включается источник питания $ИП$, который через генератор 17 запускает тепловой двигатель. С началом работы двигателя на втором входе $СЛ$ появляется сигнал и $ИП$ отключается. После захода КА в ночную область орбиты вследствие понижения температуры горячей зоны двигатель останавливается.

При вращении кассеты происходит нагружение образцов, измерение их остаточных прогибов w_1, \dots, w_{24} и оборотов кассеты n (т. е. циклов). Эти величины, а также температура и время анализируются и регистрируются в построенном на базе микроЭВМ $БР$, выполняющем по программе следующее: счет числа циклов n , регистрацию через определенное заданное число циклов всего указанного комплекса данных, выявление разрушенных образцов по условию $w^s < w_p$, где w_p — перемещение ползуна до упора; s — номер образца, отсчитываемого от метки на кассете. В случае обнаружения вновь разрушенного образца происходит внеочередная запись данных. При испытании одной кассеты (24 образцов) ориентировочное количество регистрируемых чисел не превышает 10^4 , что требует объема памяти до 100 Кбайт.

Таким образом, предложенная методика испытаний на малоцикловую усталость в условиях космического пространства, на наш взгляд, проста и надежна, отвечает весогабаритным и энергетическим характеристикам экспериментального оборудования, а значит, может быть реализована на практике.

Алексеев А. И. Влияние скорости пластической деформации на характер зависимости долговечности меди от глубины вакуума // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 57—60.

Алексеев А. И., Гринберг В. М., Любарский И. М. Особенности воздействия вакуума на усталостное разрушение меди в

высоко- и низкоамплитудной области деформации // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 52—56.

Белан Н. В., Гайдуков В. Ф., Гусяков А. А. и др. Особенности поведения материалов в условиях низких температур, вакуума и невесомости: Учеб. пособие. — Харьков: Изд-во ХАИ, 1984.—188 с.

Гринберг Н. М., Любарский И. М., Цуриков Н. А. Усталостное разрушение армо железа в вакууме // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. — Харьков: Физ.-техн. ин-т низких температур АН УССР, 1972.—С. 61—66.

Зиновьева Н. Г., Родэ О. Д., Кузин Г. А. и др. Микрократеры на мишенях, экспонированных на околоземной орбите // Космические исследования.—1990.—28, № 1.—С. 117—124.

Карпенко Г. В., Кацов К. Б., Кокотайло И. В., Руденко В. П. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах. — Киев: Наук. думка, 1977.—112 с.

Киселевский В. Н. Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов / Под ред. А. А. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1990.—168 с.

Космическая технология и материаловедение. — М.: Наука, 1962.—188 с.

Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов: Пер. с польск. — М.: Металлургия, 1976.—456 с.

Мизун Ю. Г. Процессы в геосфере. — М.: Знание, 1988.—64 с. Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. — М.: Машиностроение, 1982.—176 с.

Патон Б. Е., Патон В. Е., Дудко Д. А. и др. Стенд для исследования технологических процессов в условиях, имитирующих космос // Космические исследования на Украине.—1973.—Вып. 1.—С. 5—9.

Петров Л. Н., Сопрунюк Н. Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1991.—216 с.

Скрипник Ю. Д., Косов Б. Д. Уравнение малоцикловой усталости облучаемой стали ОХ16Н15МЗБ // Проблемы прочности.—1979.—№ 1.—С. 12—17.

Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наук. думка, 1978.—238 с.

Стрижало В. А., Скрипченко В. И. Малоцикловая усталость при низких температурах. — Киев: Наук. думка, 1987.—216 с.

Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов В. А. и др. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. — Киев: Наук. думка, 1988.—240 с.

Уокер Г. Двигатели Стирлинга: Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985.—408 с.

Феоктистов К. П. (ред.) Космические аппараты. — М.: Воениздат, 1983.—319 с.

TECHNIQUE FOR TESTING CONSTRUCTION MATERIALS FOR THE CYCLIC STRENGTH UNDER THE OUTER SPACE CONDITIONS

V. A. Stryzhalo and Yu. D. Skrypnik

We analyze the outer space agents that affect the strength of construction materials. We propose a technique for testing materials for the cyclic strength under the outer space conditions and suggest a design of an automatic multisample installation with an autonomous drive powered by solar energy.