

УДК 539.4.385:620.193.2

**Р. В. Гаврилов, Ю. А. Похил, Л. Ф. Яковенко,  
Е. Н. Алексенко, В. А. Лотоцкая**

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки  
Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

**Исследование влияния факторов  
космического пространства на циклическую  
долговечность материалов в условиях реального  
космического полета.  
Космический эксперимент «Пента–Усталость»**

---

Розглянуто стан виконання робіт з підготовки та проведення одного з першочергових спільних українсько-російських космічних експериментів на російському сегменті МКС — «Пента-Втома». Експеримент спрямовано на дослідження впливу реальних факторів космосу на опір втомному руйнуванню конструкційних матеріалів КА, та на порівняння з результатами впливу факторів, що імітуються в наземних лабораторних умовах.

---

**ВВЕДЕНИЕ**

Проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС» включает в себя в качестве одного из приоритетных направлений исследования в области космического материаловедения и технологий. К числу первоочередных космических экспериментов (КЭ) в этом направлении, которые планируется провести на этапе развертывания МКС, относится и КЭ «Пента-Усталость» — «Исследование влияние ФКП на усталостные характеристики материалов в условиях реального космического полета с применением специализированного бортового оборудования». Главным постановщиком КЭ от Украины является Специальное конструкторско-технологическое бюро по криогенной технике Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины в кооперации с украинскими организациями ОАО НПК «Курс» и НПП «Хартрон-Арко». С российской стороны в качестве постановщи-

ка КЭ выступает ЦНИИМАШ в содружестве с РКК «Энергия» и ЗАО «Композит-Тест».

Очевидно, что выбор и применение материалов для силовых конструкций элементов космических аппаратов (КА) определяется устойчивостью механических свойств (статических и динамических) этих материалов к воздействию факторов космического пространства (ФКП), таких как вакуум, электромагнитное излучение Солнца, мощные потоки корпускулярного излучения, низкие температуры, невесомость, микрометеоритные потоки, атомарный кислород и др.

Учет переменных нагрузок, действующих в процессе работы деталей и узлов механизмов, весьма важен, поскольку в 80 % случаев отказы и поломки механизмов при эксплуатации связаны с усталостным разрушением. Изделия космической техники, в особенности силовые элементы КА долговременного действия (орбитальных станций, космических систем многоцветного использования), испытывают многократные вибрационные нагрузки при запусках и посадках, на орбите в процессе стыко-

вок и расстыковок с другими КА, при коррекции орбиты, при раскрытии солнечных батарей, при выполнении технологических экспериментов на борту, в результате жизнедеятельности экипажа. Для обеспечения надежности и долговечности космических аппаратов конструкционные материалы силовых элементов корпуса, антенн, солнечных батарей, манипуляторов и других узлов должны обладать не только высокими значениями удельной статической прочности, но и высоким сопротивлением усталостному разрушению. Существенным является то, что характеристики сопротивления усталостному разрушению материалов наиболее чувствительны к влиянию таких факторов, которые воздействуют в главной мере на поверхность материала и его приповерхностный слой (внешняя среда и температура, некоторые виды радиации, микрометеоритная эрозия, атомарный кислород), так как процесс усталостного разрушения в большинстве случаев начинается с поверхности с дальнейшим распространением вглубь материала. Поэтому состояние поверхности и приповерхностного слоя и протекающие в них структурные изменения в результате одновременного воздействия динамической знакопеременной нагрузки и факторов окружающей среды во многом определяют характер сопротивления усталостному разрушению материалов.

Решению задачи получения достоверной информации о влиянии реальных ФКП на характеристики циклической прочности и долговечности конструкционных материалов при их испытаниях непосредственно в открытом космосе и посвящен эксперимент «Пента — Усталость».

Основные подходы и научно-техническая идеология серии летных экспериментов на борту РС МКС, объединенных общим шифром «Пента — Усталость», изложены ранее в работах [2, 8, 9]. Настоящая работа преследует цель более детального описания научно-технического наполнения данного КЭ, включая и результаты наземных имитационных исследований, являющихся физической базой для анализа и трактовки бортовых экспериментов.

#### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КЭ «ПЕНТА — УСТАЛОСТЬ»

Эксперимент направлен на решение двух основных проблем:

- исследование влияния ФКП на характеристики сопротивления усталостному разрушению материалов непосредственно в открытом космосе и сопоставление этих данных с данными, полученными при имитации ФКП в лабораторных

условиях с целью установления степени их адекватности;

- длительное экспонирование образцов материалов в открытом космосе для послеполетных наземных испытаний с целью установления влияния реальных ФКП на характеристики их циклической прочности и долговечности.

В прикладном аспекте проведенные исследования дадут возможность оценить работоспособность конструкционных материалов в космических условиях по такой важной механической характеристике, как сопротивление усталости.

В научном отношении полученные результаты будут важны как для понимания механизмов воздействия отдельных внешних факторов и их совокупности, так и для развития представлений о процессе усталости в целом. Так, например, сравнивая результаты испытаний, проведенных на борту *in situ* и в послеполетных лабораторных экспериментах с экспонированными материалами, можно будет оценить не только влияние накопленной материалом дозы облучения на сопротивление усталости, но и ответить на принципиальный вопрос о том, в какой мере влияет на циклическую долговечность исследованных материалов одновременное совместное воздействие радиации, вакуума, многократного термоциклирования (с периодом вращения КА) и других факторов реального космического полета. Такая постановка вопроса оправдана тем, что наличие механических и термических напряжений стимулирует радиационные повреждения, препятствуя рекомбинации части радиационных дефектов, как это происходит в предварительно облученных материалах.

Программа КЭ «Пента — Усталость» предусматривает решение следующих задач.

- Проведение широких предварительных наземных лабораторных исследований сопротивления усталости материалов-претендентов с целью отбора объектов исследования и определения рабочих параметров полетного эксперимента, включая дополнительные исследования материалов.
- Создание экспериментальной бортовой установки (ЭПУ) «Цикл-1» для циклического нагружения образцов.
- Проведение предварительных наземных лабораторных испытаний отобранных материалов на аналоге бортовой установки с целью отработки методики проведения КЭ.
- Проведение КЭ «ПЕНТА — УСТАЛОСТЬ» на борту МКС с целью получения характеристик сопротивления усталости материалов в условиях реального космического полета. Объекты

исследования — образцы материалов корпуса, ферм и солнечных батарей.

- Проведение параллельных с КЭ наземных исследований на аналоге бортовой установки, помещенной в наземный имитатор основных ФКП, в режиме, аналогичном бортовому эксперименту, с целью установления адекватности наземной имитации реальных ФКП.
- Длительное экспонирование на борту МКС образцов в открытом космосе и последующее возвращение их на Землю для послеполетных испытаний с целью выяснения влияния длительного пребывания материалов в космосе на характеристики сопротивления материалов усталостному разрушению.
- Диагностика состояния поверхности и изломов образцов материалов, возвращенных на Землю после КЭ, обработка результатов исследований и установление степени адекватности усталостных характеристик материалов, полученных в условиях космического полета и в условиях наземной имитации ФКП, выработка рекомендаций по отбору конструкционных материалов, работоспособных в условиях воздействия ФКП.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КЭ

Для исследования влияния ФКП на сопротивление усталости металлов и полимерных материалов будет разработана и создана установка «ЦИКЛ-1», размещаемая на РС МКС. Установка позволяет одновременно в идентичных внешних условиях открытого космоса испытывать партию плоских консольных образцов (8 шт.) одного материала на циклический изгиб.

Установка состоит из механической части, системы управления и контрольно-измерительной аппаратуры и платформы для экспонирования образцов в открытом космосе. Механическая часть, собранная в корпусе многопозиционного испытательного блока, платформа для экспонирования и датчики регистрации ФКП размещаются на внешней поверхности РС МКС. Остальная часть установки, включающая в себя системы измерения параметров, управления режимами, регистрации и преобразования данных, изготовленная в виде отдельного блока, размещается в зоне научной аппаратуры герметичного отсека РС МКС.

Космонавт-оператор производит общее включение установки. Далее установка работает в автоматическом режиме (замеры параметров эксперимента и выключение после поломки последнего образца или при достижении базового числа циклов).

Космонавт-оператор производит замену отработавшего блока циклического нагружения и съем подвергнувшегося заданной экспозиции блока экспонирования образцов.

Общая схема космического эксперимента для каждого исследуемого материала предусматривает как бортовые (циклические испытания и экспонирование), так и наземные эксперименты:

на бортовой установке «ЦИКЛ-1» подвергается испытаниям на усталость в условиях открытого космоса три партии образцов по 8 шт. различных конструкционных материалов. Результатом таких испытаний будет получение циклической долговечности в условиях воздействия ФКП в ходе испытаний;

другие партии образцов подвергаются предварительному экспонированию на платформе бортовой установки «ЦИКЛ-1» в открытом космосе с последующим возвратом их на Землю для послеполетных наземных испытаний на циклическую долговечность;

таким же испытаниям на усталость на идентичной установке будут подвергаться образцы исследуемых материалов в наземном имитаторе ФКП для оценки степени адекватности наземной имитации ФКП;

сопоставление и анализ полученных по предложенной схеме результатов позволит достоверно решить задачи КЭ.

#### СОСТАВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ КЭ «ПЕНТА-УСТАЛОСТЬ»

Научная аппаратура, разрабатываемая украинской стороной и обеспечивающая выполнение задач КЭ, состоит из экспериментальной полетной установки (ЭПУ) «Цикл-1» и комплекса наземного оборудования.

ЭПУ «Цикл-1» включает в себя:

- блоки циклического нагружения образцов БЦН-1А, БЦН-1Б и БЦН-1В;
- блок (платформа) экспонирования образцов БЭКС;
- блок управления, измерения и регистрации параметров БУ;
- соединительные кабели и элементы крепления.

Комплекс наземного оборудования включает в себя:

- лабораторный аналог установки «Цикл-1» — «Цикл-1А»;
- высоковакуумную лабораторную установку, в которой имитируется воздействие ФКП на циклически нагружаемые образцы — МУВКИ.

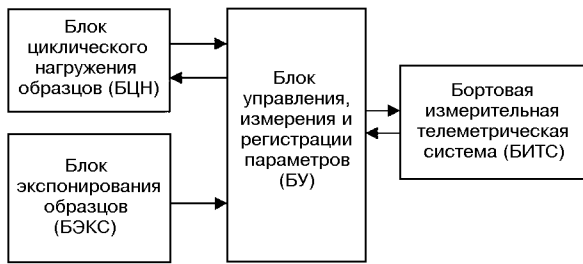


Рис. 1. Блок-схема ЭПУ «ЦИКЛ-1»

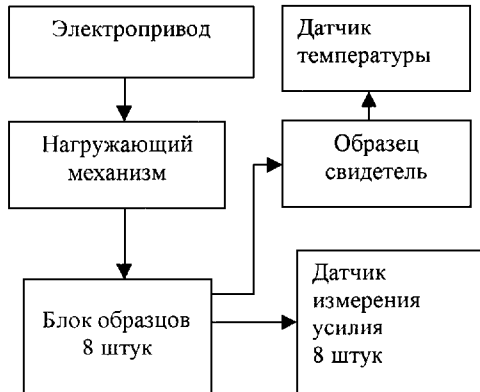


Рис. 2. Блок-схема блока циклического нагружения образцов БЦН

Блок-схема ЭПУ «ЦИКЛ-1» приведена на рис. 1 с указанием взаимных связей между блоками. БЦН и БЭКС размещаются на внешней поверхности РС МКС в зоне солнечного излучения с углом затенения не более  $60^\circ$ . БУ размещается в зоне научной аппаратуры герметичного отсека РС МКС.

Блок-схема БЦН-1 (А, Б и/или В) приведена на рис. 2. Блок позволяет одновременно в идентичных внешних условиях открытого космоса испытывать партию плоских консольных образцов (8 шт.) одного материала на циклический изгиб.

Блок-схема БЭКС и схема расположения образцов на платформе в развернутом виде приведены на рис. 3. Экспонируемые образцы закрепляются на автономной плоской платформе, которая представляет собой раскрываемый контейнер.

Блок-схема БУ приведена на рис. 4. БУ предназначен для выдачи команд управления на БЦН, сбора и регистрации величин нагрузки, температуры и числа циклов нагружения образцов конструкционных материалов, установленных на БЦН, а также для регистрации температуры образцов, установленных на БЭКС.

В настоящее время подготовка КЭ «Пента — Усталость» проходит стадию эскизного проектирования и макетирования научной аппаратуры и

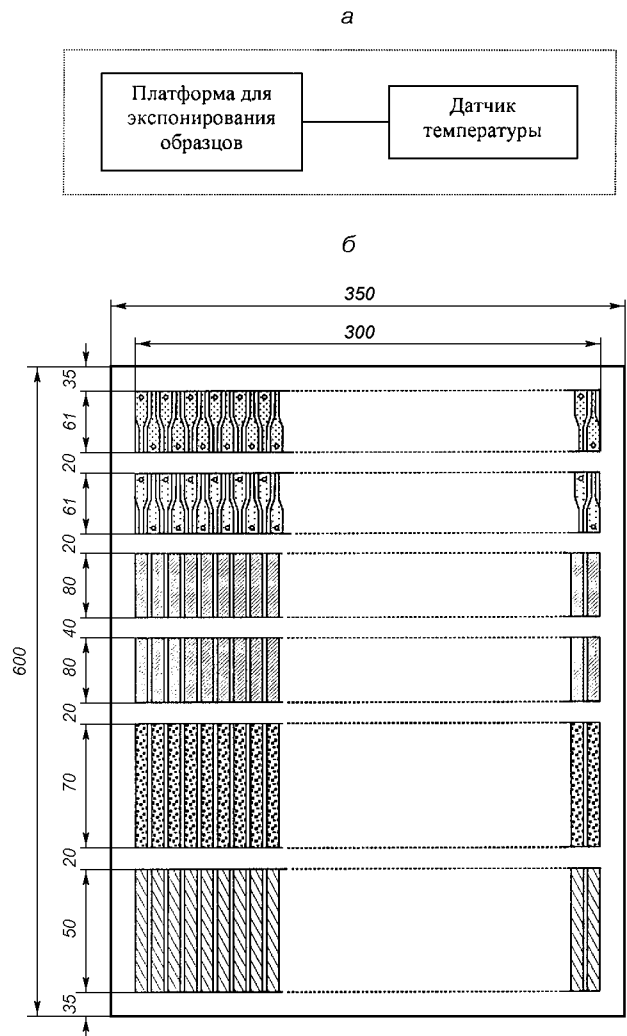


Рис. 3. Блок-схема блока экспонирования образцов ЭПУ «ЦИКЛ-1» (а) и схема расположения образцов на съемной платформе для экспонирования в развернутом состоянии (б)

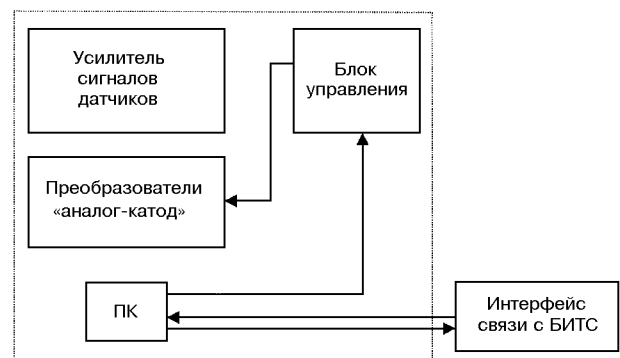


Рис. 4. Блок-схема блока управления, измерения и регистрации параметров установки «ЦИКЛ-1»

проведения наземных отборочных исследований характеристик сопротивления усталостному разрушению материалов-претендентов в условиях воздействия «искусственных» факторов космоса.

#### НАЗЕМНЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В СКТБ ФТИНТ НАН Украины разработана и создана лабораторно-испытательная база специализированного криогенного, вакуумного и имитационного испытательного и исследовательского оборудования различного назначения и созданы методики исследования и измерения комплекса физико-механических свойств в условиях наземной имитации как отдельных ФКП, так и совокупности основных факторов [1, 6].

Созданная лабораторно-испытательная база обеспечивает проведение разносторонних физических исследований, направленных на решение проблемы обеспечения работоспособности, надежности и долговечности широкого класса используемых в аэрокосмической технике конструкционных и функциональных материалов и покрытий в экстремальных условиях космического полета.

Комплексные исследования физико-механических свойств материалов и ответственных узлов космической техники, проводимые в СКТБ ФТИНТ НАНУ, в условиях, приближающихся к реальным, позволили сформулировать обоснованные физические критерии оценки и отбора характерных классов материалов, пригодных для использования в жестких условиях эксплуатации космических изделий. Эти критерии базируются на всестороннем анализе экспериментально установлен-

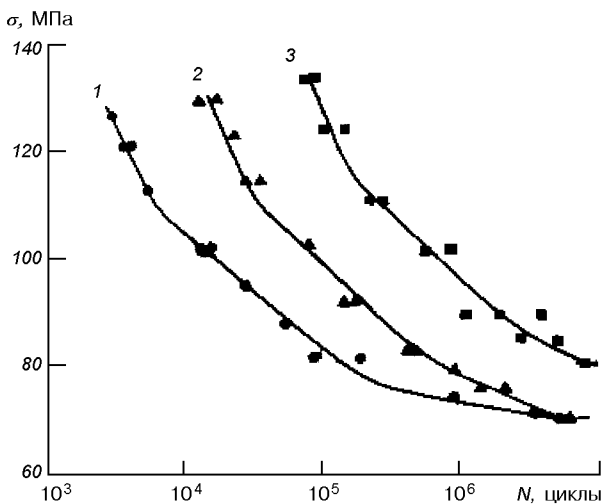


Рис. 5. Кривые усталости магниевого сплава MA21, полученные на воздухе (1) и в вакууме  $10^{-6}$  торр при 293 К (2) и 11 К (3)

ной взаимосвязи широкого спектра внешних и внутренних факторов и на построении причинно-следственной цепочки: «предыстория — структурно-фазовое состояние — макроскопические свойства — условия эксплуатации — применение» [6].

При отборе материалов-претендентов для КЭ «Пента — Усталость» непременно будут использованы результаты наземных систематических исследований влияния вакуума и низких температур (как основных нерадиационных факторов космического пространства) на сопротивление конструкционных материалов усталостному разрушению. Приведем наиболее характерные из них [3, 5, 7].

**Влияние вакуума.** Анализ результатов влияния вакуума на характеристики сопротивления усталости и циклической трещиностойкости металлов и сплавов, свидетельствует о положительном эффекте вакуума на эти характеристики практически всех металлических материалов.

На рис. 5, 6 показан характер влияния вакуума на кривые усталости и кинетические диаграммы усталостного разрушения металлических материалов. Видно, что циклическая долговечность магни-

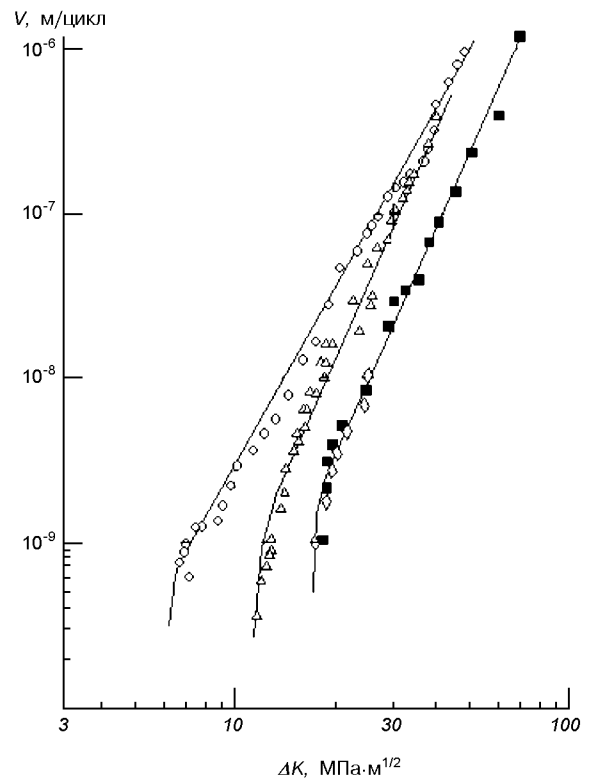


Рис. 6. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали 03X20H16AG6, полученные на воздухе и в вакууме при различных температурах: кружки — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; ромбики — вакуум, 93 К; квадратики — вакуум, 11 К

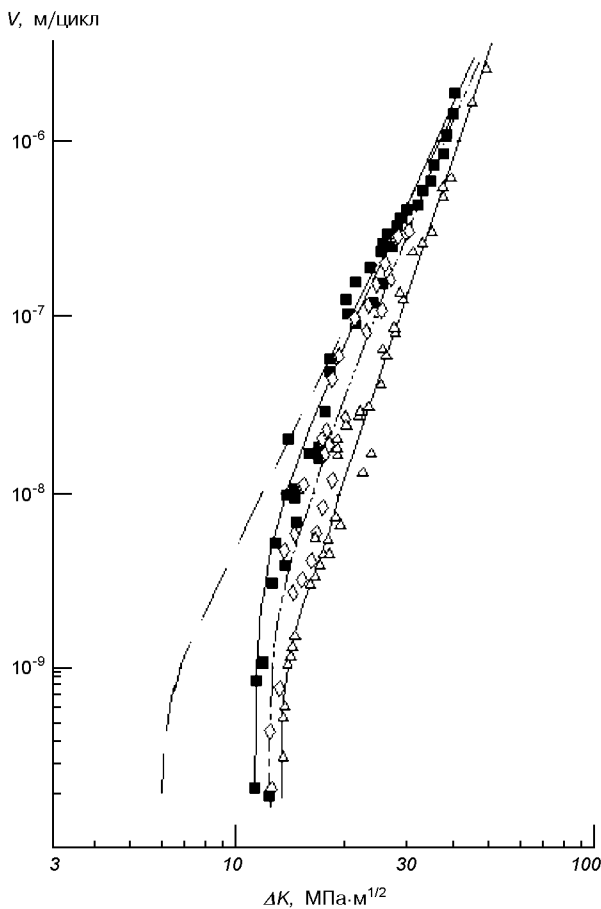


Рис. 7. Кинетические диаграммы усталостного разрушения титанового сплава VT5-1кт: штриховая линия — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; ромбики — вакуум, 93 К; квадратики — вакуум, 11 К

своего сплава MA21 в области ограниченной выносливости возрастает почти на порядок при переходе от испытаний на воздухе к испытаниям в вакууме (рис. 5). Изменяется также и кинетика роста усталостной трещины — для хромо-никель-марганцевой стали в вакууме заметно возрастает пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений и уменьшается скорость роста усталостной трещины при одинаковых значениях коэффициента интенсивности напряжений (рис. 6).

Показано, что улучшение характеристик усталостного разрушения в вакууме обусловлено более однородным распределением микропластической деформации в поверхностном слое металла вследствие изменения условий адсорбции атомов кислорода на свежесформированных поверхностях ступенек скольжения.

Влияние низкой температуры на характеристики сопротивления усталости и циклической трещино-

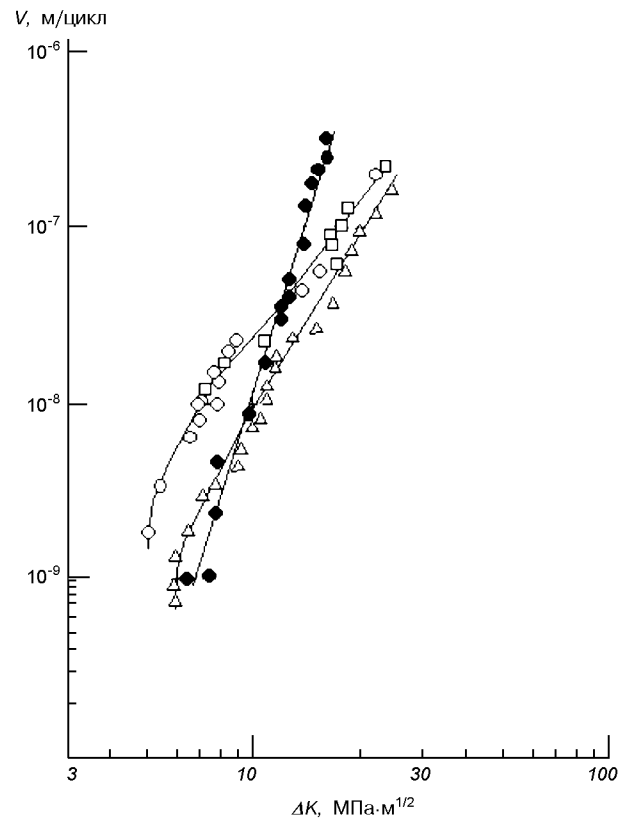


Рис. 8. Кинетические диаграммы усталостного разрушения титанового сплава VT22: кружки — воздух, 293 К; треугольники — вакуум, 293 К; точки — вакуум, 93 К

стойкости металлических материалов, в отличие от вакуума, неоднозначно и зависит от типа кристаллической решетки, структуры, уровня приложенных напряжений.

В сплавах на основе ГПУ-решетки (в основном титановые и магниевые сплавы) величина порогового коэффициента интенсивности напряжений обычно возрастает при понижении температуры, а скорость роста усталостной трещины в припороговой области уменьшается. Однако для высокоамплитудной области кинетической диаграммы усталостного разрушения понижение температуры может приводить как к уменьшению скорости роста усталостной трещины (рис. 7), так и к ее увеличению (рис. 8).

Наиболее приемлемыми конструкционными материалами с точки зрения низкотемпературной циклической трещиностойкости являются структурно-стабильные сплавы на основе ГЦК-решетки, которые характеризуются повышением сопротивления усталостному разрушению при понижении температуры независимо от уровня нагружения.

## ВЫВОДЫ

В результате реализации КЭ «Пента — Усталость» будут получены следующие данные:

- усталостные характеристики (циклическая долговечность) нескольких конструкционных материалов, деформированных непосредственно в условиях воздействия факторов реального космического полета.
- усталостные характеристики (циклическая долговечность, кривые усталости) нескольких конструкционных материалов, деформированных в лабораторных условиях после их экспонирования в космосе;
- усталостные характеристики (циклическая долговечность, кривые усталости) исследуемых конструкционных материалов в наземных лабораторных условиях и в условиях имитируемого воздействия ФКП;
- установлена степень адекватности результатов усталостных испытаний материалов в условиях воздействия ФКП реального космического полета результатам, полученным в условиях имитируемого воздействия ФКП;
- разработаны экспериментально обоснованные рекомендации по дальнейшему применению конструкционных материалов, работоспособных в условиях воздействия ФКП.

1. Бондаренко С. И., Кислов А. М. Криогенная техника в космических условиях: разработки ФТИНТ НАН Украины // *Космічна наука і технологія*.—1995.—1, № 1.—С. 80—95.
2. Гаврилов Р. В., Еременко В. В., Похил Ю. А. Исследование физических характеристик материалов космического назначения при воздействии факторов космического пространства // *Тр. V Междунар. конф. «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-5)*. — Харьков, 2002.—С. 85—95.
3. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А. Исследование материалов и

процессов в условиях воздействия факторов космического пространства // *Космічні дослідження в Україні 2000—2002*. — Київ: КИТ, 2002.—С. 85—99.

4. Похил Ю. А. Конструкционные материалы для криогенно-вакуумной и аэрокосмической техники. Критерии отбора // *Металлофиз. новейшие технологии*.—1999.—21, № 6.—С. 3—8.
5. Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф., Алексенко Е. Н. Влияние вакуума на сопротивление усталостному разрушению конструкционных материалов // *Тр. IV междунар. симп. «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-4)*. — Харьков, 2001.—Разд. 4.—С. 380—384.
6. Arkhipov V. T., Cavrylov R. V., Lototskaya V. A., et. al. Development of on-board cryogenic facilities and ground-based test equipment for space experiments // *Space research in Ukraine 1998—2000*. — Kyiv: ADEF-Ukraine, 2001.—P. 87—92.
7. Gavrylov R. V., Pokhyl Yu. A., et al. Investigations for influence of cosmic-space factors on physical properties of space-application functional materials by methods of accelerated simulation // *Intern. Conf. ICFM-2001, Crimea, Ukraine, 2001*.—P. 230.
8. Eremenko V. V., Cavrylov R. V., Pokhyl Yu. A. Space Project «Penta» Complex // *Космічна наука і технологія*.—2000.—6, N 4.—С. 43.
9. Pokhyl Yu. A., Yakovenko L. F., Aleksenko E. N., Lototskaya V. A. «Penta-Fatigue» Experiment, Influence of Space Factors on Fatigue Fracture Resistance of Structural Materials // *Космічна наука і технологія*.—2000.—6, N 4.—С. 45.

---

INVESTIGATION OF SF INFLUENCE ON CYCLIC DURABILITY OF MATERIALS IN REAL SPACE FLIGHT CONDITIONS. SE «PENTA-FATIGUE»

R. V. Gavrilov, Yu. A. Pokhyl, L. F. Yakovenko, E. N. Aleksenko, V. A. Lototskaya

We consider the state of works on preparation and realization of «Penta — Fatigue», one of high-priority joint Ukrainian-Russian space experiments on the Russian Segment of the ISS. The experiment is aimed at the investigation of influence of the real space factors on fracture fatigue resistance of structure materials of SV and at the comparison of the investigation results with results of influence of factors simulated in ground laboratory conditions.