

УДК 536.42:621.891

Г. Д. Гамуля<sup>1</sup>, В. В. Скороход<sup>2</sup>, В. П. Солнцев<sup>2</sup>,  
М. Н. Сурду<sup>3</sup>, Г. А. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СКТБ Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна, Харків

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Київ

<sup>3</sup>Державне науково-виробниче підприємство «Спецавтоматика», Київ

## Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»

---

Космічний експеримент «Дослідження перспективних для космічної техніки матеріалів на тертя і знос у відкритому космічному просторі і наземних лабораторіях» (шифр КЭ «Матеріал-тертя») прийнято до реалізації у першій п'ятірці на етапі розгортання російського сегменту Міжнародної космічної станції. Зараз у підготовці цього експерименту заплановано участь ряду російських, українських і білоруських організацій. Представлено стан робіт, які проводяться організаціями України з підготовки наукової апаратури для космічного експерименту «Матеріал-тертя» і розробки однієї з основних груп матеріалів, призначених для досліджень в цьому експерименті, — антифрикційних матеріалів з елементами самоорганізації.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Обоснование необходимости проведения Украиной ряда космических экспериментов (КЭ) на исследовательских модулях российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), в том числе для экспериментов, которые в дальнейшем были объединены под шифром КЭ «Материал-Трение» было выполнено в 1998 году и опубликовано в работах [5, 7]. Вопросы, связанные с применением аппаратуры, позволяющей регистрировать динамику изменения свойств материалов, применяемых для космических аппаратов, непосредственно в процессе воздействия факторов космического пространства были рассмотрены в [3].

В результате проведенных работ космический эксперимент «Исследование перспективных для космической техники материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных лабораториях» (шифр «Материал-Трение») был принят к реализации в первой пятерке на этапе развертывания российского сегмента Международ-

ной космической станции.

В настоящее время выполнены аванпроект и эскизный проект на научную аппаратуру космического эксперимента «Материал-Трение», в разработке которых участвовали Институт проблем материаловедения и СКТБ Физико-технического института низких температур НАН Украины, Государственное конструкторское бюро «Южное» и Государственное научно-производственное предприятие «Спецавтоматика».

Научная аппаратура космического эксперимента «Материал-Трение» предназначена для получения характеристик трения и изнашивания антифрикционных и износостойких материалов в натуральных космических условиях на борту исследовательского модуля РС МКС и в наземных лабораторных условиях с помощью трибометров космического назначения, а также изучение фрикционного поведения материалов в условиях космоса и выявление влияния факторов космического пространства на механизмы изнашивания исследуемых материалов.

Потенциальными объектами исследования явля-

ются антифрикционные и износостойкие материалы, перспективные для узлов трения КА, в том числе композиционные износостойкие материалы на металлической основе, включая принципиально новые материалы разработки Института проблем материаловедения НАНУ, в основу которых положен принцип самоорганизующихся систем; самосмазывающиеся антифрикционные материалы на полимерной основе; твердые смазочные покрытия и др. [2, 4]. Проведение экспериментов в космосе позволит выявить не только влияние вакуума, условий теплообмена и циклического изменения температуры, которые надежно моделируются в наземных экспериментах, но и учесть воздействие радиации и длительной микрогравитации на процессы трения. Последний фактор особенно важен для понимания влияния продуктов изнашивания материалов на процессы трения.

Результаты космического эксперимента «Материал-Трение» позволят повысить надежность и достоверность моделирования воздействия факторов космического пространства на процессы трения и изнашивания, что в свою очередь послужит основой для создания банка сертифицированных триботехнических данных материалов, перспективных для изделий космической техники.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «МАТЕРИАЛ-ТРЕНИЕ»**

Комплекс научной аппаратуры, разрабатываемой в настоящее время украинской стороной, состоит из комплекта бортового оборудования (КБО-Т) и комплекта наземного оборудования (КНО-Т).

На рис. 1 показана структурная схема КБО-Т, в состав которой входят:

- МБТ — многопозиционный бортовой трибометр, включающий три модульных узла трения и электромеханический привод. Конструктивно два МБТ, расположенные на одной оси, объединены в блок МБТ. В составе КБО-Т предусмотрено три блока МБТ.

- БУК-1 — многоканальная система для управления работой блоков МБТ.

- БУК-2 — системный микроконтроллер, включающий микроконтроллер, контроллер интерфейса, блок памяти, блок связи с бортовым вычислительным комплексом.

- КТЭ-МБТ — контейнер для хранения, транспортирования и эксплуатации блоков МБТ и образцов материалов для экспонирования, а также БУК-1.

- КТ — собственно контейнер.

- КТ-БУК — контейнер для хранения и транс-

портирования БУК-2.

- ОМЭ — образцы материалов для экспонирования.

- ПМ — платформа для монтажа КТЭ-МБТ на внешней оболочке РС МКС.

Структурная схема МБТ представлена на рис. 2. МБТ представляет собой многопозиционный бортовой трибометр, включающий три модульных узла трения, установленные на общем валу, сочлененном с электромеханическим приводом. Привод

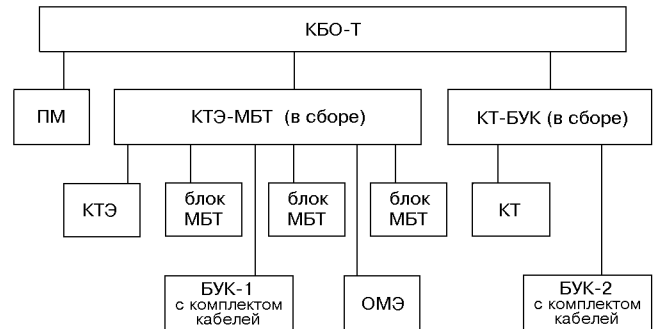


Рис. 1. Структурная схема комплекта бортового оборудования для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»: КБО-Т — комплект бортового оборудования; МБТ — многопозиционный бортовой трибометр; ПМ — платформа для монтажа КТЭ МБТ на внешней оболочке РС МКС; БУК-1 — многоканальная система для управления работой блоков МБТ; БУК-2 — системный микроконтроллер; ОМЭ — образцы материалов для экспонирования; КТЭ-МБТ — контейнер для хранения, транспортирования и эксплуатации блоков МБТ и образцов-материалов для экспонирования, а также БУК-1; КТЭ — собственно контейнер; КТ-БУК — контейнер для хранения и транспортирования БУК-2; КТ — собственно контейнер

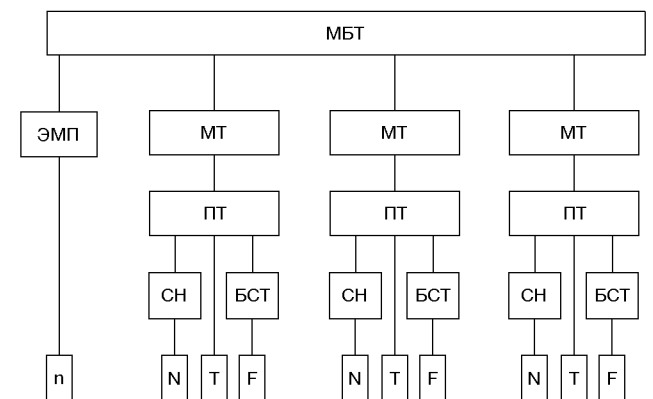


Рис. 2. Структурная схема многопозиционного бортового трибометра: МБТ — многопозиционный бортовой трибометр; ЭМП — электромагнитный привод; МТ — модульный узел трения; ПТ — пара трения; СН — система нагружения; БСТ — блок измерения силы трения; n — датчик частоты вращения вала; N — датчик силы (нормальной нагрузки); T — датчик температуры; P — датчик силы (силы трения)

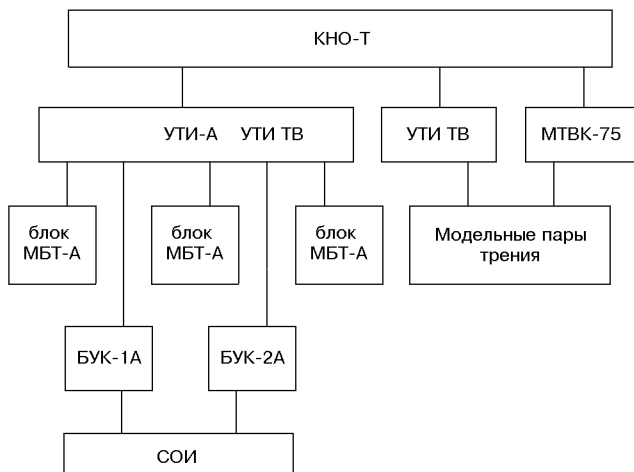


Рис. 3. Структурная схема комплекта наземного оборудования для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»: КНО-Т — комплект бортового оборудования; МБТ-А — лабораторный аналог многопозиционного бортового трибометра; УТИ-А — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на МБТ-А; УТИ ТВ — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на модельные пары трения; МТВК-75 вакуумная установка для испытаний модельных пар трения; БУК-1А — многоканальная система для управления работой блоков МБТ; БУК-2А — системный микроконтроллер; СОИ — система обработки информации, получаемой от КБО-Т и КНО-Т

снабжен датчиком частоты оборотов вала.

Узел трения состоит из пары трения, представляющей собой ведущий образец-диск (или два диска), к торцевым поверхностям которого прижимаются два ведомых образца-шарика (или цилиндрические инденторы), системы нагружения, блока измерения силы трения и датчика температуры одного из ведомых образцов.

На рис. 3 представлена структурная схема КНО-Т. В состав КНО-Т входят:

— МБТ-А — лабораторный аналог МБТ. В составе КНО-Т предусмотрено три блока МБТ-А;

— БУК-1А — многоканальная система для управления работой МБТ-А;

— БУК-2А — системный микроконтроллер, включающий микроконтроллер, контроллер интерфейса, блок памяти, блок связи с компьютером;

— Модельные пары трения для отбора материалов, перспективных для космического эксперимента (по 20 пар трения для каждого из исследуемых сочетаний материалов);

— УТИ ТВ — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на модельные пары трения;

— МТВК-75 — вакуумная машина трения;

— УТИ-А — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на МБТ-А;

— СОИ — система обработки информации, получаемой от КБО-Т и КНО-Т;

— Наземное оборудование для тестирования КБО-Т по стандартной программе, предусмотренной для оборудования, поставляемого на борт РС МКС.

На рис. 4 представлена структурная схема измерительных каналов трибометра. Основным элементом является многоканальная информационно-измерительная система (МИСС). МИСС предназначена для измерения электрического сопротивления, термоэдс, электрического напряжения, коэффициента передачи напряжения датчиков температуры: термометров сопротивления, термисторов, шести типов термопар, диодных чувствительных элементов и других датчиков, информативными параметрами которых являются перечисленные величины.

Система включает одноканальный измеритель МИСС, который совместно с шестнадцатиканальным коммутатором образует шестнадцатиканальную измерительную систему. Система имеет конфигурируемую оператором гибкую структуру, которая позволяет использовать для измерения температуры любой из возможных типов датчиков температуры или тензометрические датчики усилий любой структуры. Система позволяет гибко изменять алгоритм обработки исходной информации о параметрах датчиков, в том числе осуществлять усреднение или весовую фильтрацию для устранения влияния перекосов в трибометре и др. Количество используемых измерительных систем определяется числом необходимых измерительных каналов, а также ограничениями по количеству вводов и по быстродействию. Высокие точность и чувствительность измерительной системы и мощное программное обеспечение, позволяющие обеспечить необходимую реальную высокую помехоустойчивость в условиях влияния тепловых, вибрационных и электромагнитных помех, дают возможность достигнуть высокой информативности результата измерения.

#### ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ САМООРГАНИЗАЦИИ

Использование материалов на основе самоорганизующихся неорганических систем для узлов трения представляет особый интерес. Эти износостойкие материалы способны рассеивать внешний поток энергии, и при трении в экстремальных условиях улучшают свои функциональные свойства. По-

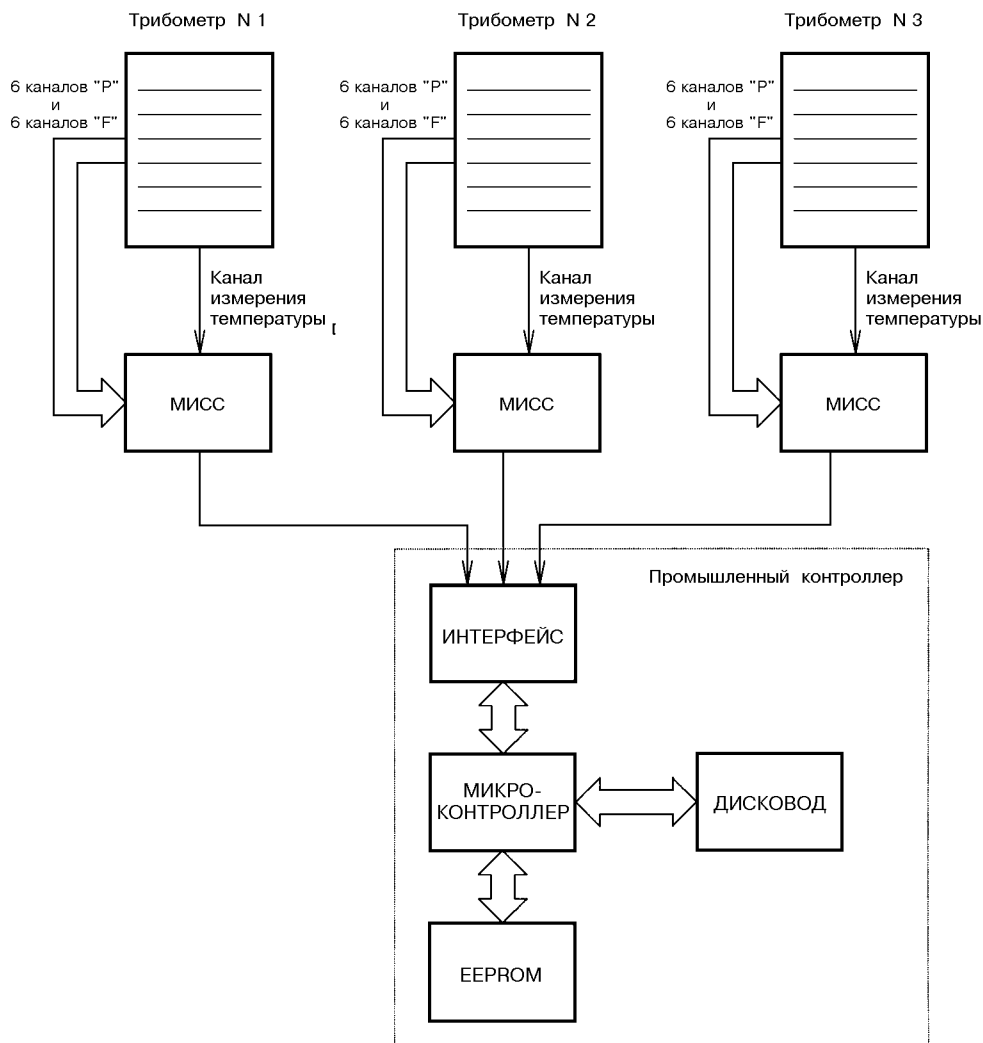


Рис. 4. Структурная схема измерительных каналов трибометра на базе системы МИСС

скольку космический вакуум, среда планет Марса, Венеры являются экстремальными для работы узлов трения космических аппаратов, в условиях которых наиболее интенсивно проявляется воздействие внешних энергетических потоков на материалы, следует ожидать, что композиции на основе самоорганизующихся систем могут проявить максимальный уровень своих функциональных свойств.

Триботехнические исследования, которые проводились в вакууме, показали, что характер трения и износа резко изменяется, если в композициях есть как твердые фазы — упрочнители, так и твердые смазки. Их совместное влияние наиболее выражено, если во время трения возбуждаются химические процессы, приводящие к образованию вторичных структур с динамическим характером устойчивости. Это свойственно системам, содержащим халько-

генидные составляющие. При весьма малых концентрациях халькогенидной составляющей (до 1.5 %) интенсивность износа уменьшается в 5—10 раз. Такие композиции обладают всеми необходимыми элементами процессов самоорганизации и без сомнения станут определяющими для нового поколения материалов космического назначения.

Процессы самоорганизации при трении возникают и в случае стандартных известных материалов при реализации нормального окислительного износа [1]. В таких случаях под воздействием внешней среды на поверхности трущегося тела вследствие трибоактивации образовывались вторичные структуры, которые обеспечивали резкое снижение интенсивности износа и коэффициента трения. По существу в зоне трения возникала динамически устойчивая структура, которая возобновлялась в

результате воздействия внешних энергетических и материальных потоков. В вакууме и инертных средах вследствие отсутствия материальных потоков внешней среды (воздуха, активных газов), процессы самоорганизации возможно реализовать в случае, если материал будет иметь продолжительную или постоянную возбудимость только внешними энергетическими потоками [6]. Такая композиция должна быть, без сомнения, неравновесной, в структуре которой должен находиться источник термодинамической неустойчивости. Для этого в структуре материала необходимо иметь гетерогенизирующую фазу, которая бы позволяла локализовать пластическую деформацию и привести к упругому взаимодействию полей напряжений вокруг нее, приводящему к трансформации упругой энергии в тепловую. Именно тепловая энергия, воздействующая на источник термодинамической неустойчивости, приводит к протеканию химических реакций в кинетической области, в результате которых происходит как релаксация напряжений, так и залечивание структурных и поверхностных межкристаллических дефектов. Возникает вопрос — как долго может сохраняться источник неустойчивости (неравновесности)?

Механизм сохранения постоянной возбудимости заключается в реализации автоволновых процессов в порошковой среде. Введение термодинамически неустойчивого соединения в композицию, при разложении которого в условиях трибоактивации возникают химические реакции, приводит к самообновлению источника возбудимости. При этом в порошковой реагирующей среде вследствие постоянного протекания химических реакций происходит релаксация дефектов в большей степени на поверхности трения, где они в основном накапливаются, т. е. происходит процесс залечивания, и материал восстанавливает свои функциональные свойства.

На рис. 5 показано, что введение небольшого количества термодинамически неустойчивого соединения в композицию, основой которой является обычная инструментальная сталь, приводит к увеличению износостойкости, например, в среде  $\text{CO}_2$  на порядок, а в вакууме — в пять раз.

На рис. 6 представлены результаты испытаний модельных материалов на основе титана. Как видно, при таких же структурных составляющих материал с элементами самоорганизации существенно превосходит свои равновесные аналоги. Композиция с элементами самоорганизации при трении в зависимости от величины внешних механических воздействий имеет несколько областей минимальных значений интенсивности износа или, как при-

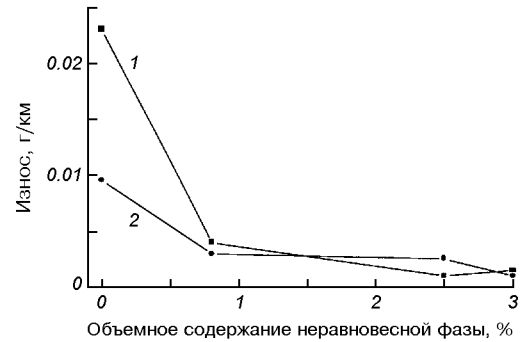


Рис. 5. Влияние содержания неравновесной фазы на износостойкость инструментальной стали в среде  $\text{CO}_2$  и вакууме при скорости скольжения 0.5 м/с и нагрузке 25 Н: 1 — в среде  $\text{CO}_2$  (300 Па); 2 — при давлении 1.33 МПа

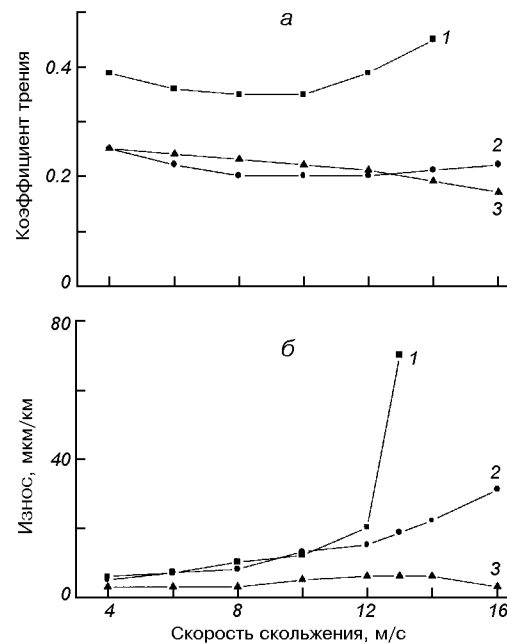


Рис. 6. Зависимость триботехнических свойств равновесного и неравновесного материалов на основе титана от скорости скольжения: 1 —  $\text{Ti} + 6$  об. % твердой смазки (равновесный материал); 2 —  $\text{Ti} + 12$  об. % твердого соединения + 6 об. % твердой смазки (равновесный материал); 3 —  $\text{Ti} + 12$  об. % твердого соединения + 6 об. % твердой смазки (неравновесный материал с элементами самоорганизации)

нято называть, областей нормального механохимического износа. Кроме того, материалы с элементами самоорганизации наследуют свои диссипативные свойства в зависимости от технологических параметров получения композиции, в частности температуры спекания (рис. 7). Наблюдается немонотонное изменение триботехнических свойств

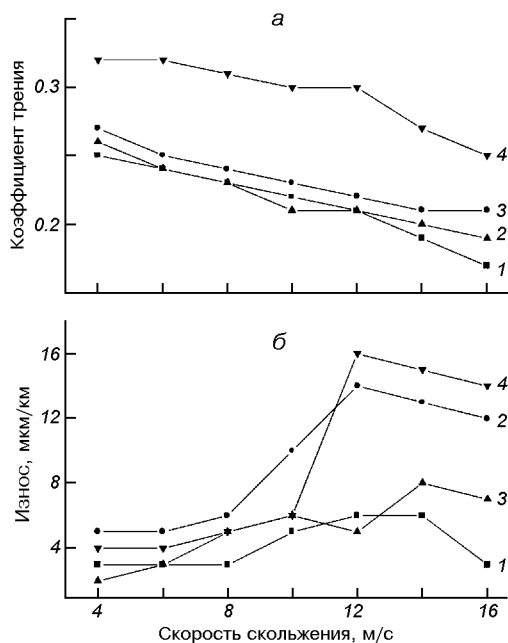


Рис. 7. Зависимость триботехнических свойств материала с элементами самоорганизации от температуры спекания: 1 — 1225 °С, 2 — 1250 °С, 3 — 1300 °С, 4 — 1350 °С

композиции, спеченной при разных температурах.

В настоящее время созданы материалы на базе металлических систем (Ti, V, Fe и др.), предназначенные для работы в узлах трения марсоходов, а также в условиях высокого вакуума. Изучение трения и износа этих материалов проводилось по различным схемам скольжения: сегментный образец — вал, плоский образец — вал, сфера — плоскость, плоскость — плоскость. Интенсивность износа материалов, содержащих подсистему, склонную к самоорганизации, в сравнении с известным материалом С-5, применяемым для шасси «Лунохода», в 2–3 раза ниже при трении в вакууме и в 8–10 раз при трении в разреженной среде CO<sub>2</sub>.

Испытания разработанных материалов для изделий типа «Зубчатое колесо» приводились в вакууме (6.7 мПа) и разреженной среде CO<sub>2</sub> (1.3 кПа) по схеме кольцо — сферический индикатор с радиусом 2.25 мм при скорости скольжения 0.5 м/с и нормальной нагрузке 25 Н. Пары кольцо — индентор изготавливались из одноименных материалов. Оценка интенсивности износа производилась по потере массы кольца и индентора в г/км пути трения. Данная схема испытания являлась основной при выборе перспективных материалов для шестеренчатых передач в луноходе, так же, как и условия испытаний (скорость, нагрузка).

Результаты испытаний показали, что введение в состав материалов термодинамически неустойчи-

вых соединений, вызывающих процессы самоорганизации, при трении и износе существенно снижают интенсивность износа как в среде CO<sub>2</sub>, так и в вакууме.

Наиболее износостойкими в разреженной среде CO<sub>2</sub>, как и на воздухе, является материал на основе высоколегированной стали Р6М5 с объемной долей термодинамически неустойчивого соединения до 3 %. При трении в вакууме лучше работает среднелегированный материал 10Х4В2М2 с объемной долей этого соединения 2.5 %. При этом оба материала примерно одинаково работоспособны и в вакууме, и в окислительных средах (воздух, CO<sub>2</sub>).

Износостойкость этих материалов в сравнении с металло-стеклянным материалом С-5Ф (самым лучшим из серии, предложенных для шасси «Лунохода») при трении в вакууме выше в 3–4 раза и в 5–10 раз выше при трении в среде CO<sub>2</sub>. Это позволяет их рекомендовать в качестве материалов для зубчатых механизмов, работающих как на орбите, так и в атмосфере Марса.

Материалы с элементами самоорганизации на основе титана, в связи с его кристаллическим строением (гексагональная решетка), предпочтительно использовать как антифрикционные, в частности в качестве подшипников скольжения. Поэтому схема испытания (вал — втулка), скорость скольжения до 16 м/с и нагрузка 1.5–2.5 МПа были выбраны исходя из условий эксплуатации материалов такого класса.

Полученные результаты свидетельствуют о широких возможностях управления триботехническими свойствами материалов на основе титана. В отличие от материалов с элементами самоорганизации на основе легированных сталей мартенситного класса, которые не существенно изменяют коэффициент трения при изменении состава, степени легирования и величины внешней нагрузки, материалы на основе титана обладают более широким спектром функциональных свойств. Характеристики трения и износа этих материалов свидетельствуют о высокой износостойкости и позволяют их считать перспективными для применения в изделиях космической техники.

1. Поверхностная прочность материалов при трении / Под ред. Б. И. Костецкого. — Киев: Техніка, 1976.—296 с.
2. Скороход В. В., Фролов Г. А. Наземные исследования материалов и конструкций для ракетно-космической техники // Космічні дослідження в Україні, 2000—2002. — Киев: НКАУ, 2002.—С. 77—83.
3. Сурду М. Н., Фролов Г. А., Камелин А. Б. Некоторые аспекты применения импедансометрии в экспресс-измерениях влияния факторов космического пространства на свойства материалов // Сб. трудов конференции «Сучасні технології в аерокосмічному комплексі».—Житомир: ЖТІ, 2002.—С. 10—14.

- 4-6 вересня 2001. — С. 25—29.
4. Фролов Г. А., Скороход В. В. Задачи некоторых материаловедческих экспериментов на РС МКС // Сб. трудов Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев: НКАУ, ИКИ НАНУ-НКАУ, 8—10 октября 2001.—С. 31—35.
  5. Gamulya G. D., Ostrovska O. L., Yukhno T. P. Study of the adequacy of the friction and wear data obtained for antifriction and wear-resistant materials directly in space at orbital stations and in laboratory conditions // *Космічна наука і технологія*.—2000.—6, № 4.—С. 44.
  6. Skorokhod V. V., Soltsev V. P., Soltseva T. A. Physico-chemical fundamentals of creating materials with elements of self-organization // *Proceedings of Inter. conf. Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges*, 4-8 November 2002, Kiev, Ukraine. — P. 60—61.
  7. Trefilov V. I., Frolov G. A., Surdu M. N., et al. Degradation of materials and constructions under the influence of outer space factors // *Космічна наука і технологія*.—2000.—6, № 4.—С. 30—32.

**THE ELABORATION OF NOVEL SCIENTIFIC INSTRUMENTATION AND ANTIFRICTION MATERIALS FOR PERFORMING THE «MATERIAL-FRICTION» SPACE EXPERIMENT**

**G. D. Gamulya, V. V. Skorokhod, V. P. Soltsev,  
M. N. Surdu, G. A. Frolov**

The space experiment «The investigation of materials perspective for space engineering on friction and wearing in open space and ground laboratories (the code is SE «Material-Friction») was adopted for realization among the first five experiments at the stage of development of the Russian Segment of International Space Station. At present the participation of some Russian, Ukrainian, and Belorussian organizations is scheduled for preparation of the experiment. We describe the state of the work which is carried out by Ukrainian organizations for the preparation of scientific instrumentation for SE «Material — Friction» and for the elaboration of one of the main groups of the materials destined for investigations in the frameworks this experiment, namely, antifriction materials with elements of self-organizing.