

УДК 536.42:621.891

Г. А. Фролов¹, Г. Д. Гамуля², А. Д. Колотило¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

² Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

МОДУЛЬНЫЙ ТРИБОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА И НАЗЕМНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Проведено дослідження модульного трибометра, виконаного за схемою «диск-індентор», який призначено для визначення триботехнічних характеристик антифрикційних матеріалів в умовах реального орбітального польоту та в лабораторних умовах моделювання впливу факторів космічного простору. Показано, що запропонована конструкція вузла тертя дає можливість оцінки впливу сили ваги на коефіцієнт тертя деяких антифрикційних матеріалів в умовах наземної лабораторії.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [5] было показано состояние работ по подготовке украинскими организациями комплекта узлов трения модульных трибометров для проведения космического эксперимента (КЭ) «Материал — Трение». Проведение КЭ предусматривает решение комплекса научно-технических задач, включая:

- определение адекватности характеристик трения и изнашивания триботехнических материалов по результатам их испытаний в натурных условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) и в наземных модельных лабораторных условиях;

- установление влияния ФКП на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов;

- определение триботехнических характеристик новых антифрикционных материалов и покрытий;

- создание банка данных по триботехническим материалам, перспективным для узлов трения космических аппаратов (КА) и т. д.

Очевидно, что решение даже некоторых из этих задач требует проведения большого объема триботехнических испытаний, что в условиях реального космического полета практически не-

выполнимо. В связи с этим установление адекватности характеристик трения и изнашивания материалов по результатам их исследований в условиях орбитального полета и в наземных лабораториях, на наш взгляд, имеет первостепенное значение.

Анализ результатов полученных в ходе проведения КЭ «Материал — Трение» позволит (при необходимости) установить поправочные коэффициенты коррекции результатов триботехнических испытаний, проводимых в наземных лабораторных условиях, и повысить их достоверность.

Известно, что ряд основных ФКП (вакуум, низкие температуры, солнечное излучение и радиационные потоки протонов и электронов) в настоящее время достаточно надежно моделируется в лабораторных условиях [1]. Однако моделирование длительного воздействия микрогравитации на характеристики трения и изнашивания в наземных условиях практически невозможно. В то же время микрогравитация может оказывать существенное влияние на поведение продуктов изнашивания материалов в паре трения. В зависимости от наличия или отсутствия гравитации частицы продуктов износа могут удаляться с дорожки трения или оставаться на ней, оказывая влияние на интенсивность и характер изнашивания. Поэтому оценка влияния на трение и изнашивание сил гравитации представляет практический интерес.

В таблице приведены основные параметры, которые должен обеспечить модульный трибометр «диск-индентор», разрабатываемый украинскими организациями для исследования адекватности триботехнических характеристик материалов, определяемых в условиях микрогравитации и в наземных условиях.

Технические характеристики модульного узла трения для исследования адекватности триботехнических характеристик антифрикционных материалов в условиях орбитального полета и наземных лабораториях

Ведущий (вращающийся) образец	диск
Ведомый (неподвижный) образец	цилиндрический индентор
Скорость скольжения	от 0.1 до 1.5 м/с
Погрешность поддержания заданной скорости V скольжения	0.01 V
Нормальная нагрузка, не более	30 Н
Погрешность измерения нормальной нагрузки.	± 0.1 Н
Изменение нормальной нагрузки в процессе испытаний при износе индентора 50 мкм, не более	25 %
Максимально допустимый коэффициент трения	0.4
Погрешность измерения силы трения	10 %
Максимально допустимая величина линейного износа	50 мкм
Погрешность измерения величины линейного износа в процессе непрерывного мониторинга	10 %
Диапазон изменения объемной температуры индентора	-92...+150 °С
Погрешность измерения температуры	± 2 °С
Время непрерывной работы, не менее	5 ч

В данной работе представлены результаты исследования одного из модульных трибометров «диск-индентор», выполненного на основе двухкоординатного упругого элемента и предназначенного для испытаний антифрикционных материалов космического назначения. Базовый вариант этого трибометра описан в работе [2].

ДОРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТРИБОМЕТРА

В ходе КЭ предполагается в режиме непрерывного мониторинга определение силы (коэффициента) трения, нормальной нагрузки, интегрального (суммарного) линейного износа пары

трения, температуры образца-индентора и корпуса трибометра.

В качестве датчиков силы трения и нормальной нагрузки выбраны константановые фольговые тензорезисторы КФ5П1-3-400-А-23 (16 тензорезисторов, сформированные в 4 измерительных моста) с длиной базы 3 мм и активным сопротивлением 400 Ом. В качестве резисторов, которые компенсируют первоначальный коэффициент преобразования (смещение нулевой точки), применены 4 нормирующие фольговые преобразователя ПНФ-Б с начальным сопротивлением 16 Ом.

Максимальное отличие сопротивлений между тензорезисторами одной группы не превышало 0.1 Ом. Для наклейки тензорезисторов применялся высокотемпературный клей УВД-10Т.

Определение интегрального (суммарного) линейного износа пары трения в режиме непрерывного мониторинга производится по методу, предложенному профессором М. Н. Сурду [4]. Двухкоординатный упругий элемент узла трения спроектирован таким образом, что интегральный линейный износ пары трения сопровождается уменьшением начальной нормальной нагрузки пары трения. Таким образом, контролируя изменение нормальной нагрузки, можно непрерывно регистрировать величину интегрального линейного износа пары трения. При этом следует учитывать, что при предельно допустимом интегральном линейном износе 50 мкм начальная нагрузка снижается на 25 %.

Для измерения температуры образца-индентора и корпуса трибометра применялись резистивные платиновые датчики температуры HEL-705-U-1-12-00 (Honeywell), у которых температурный диапазон -200...+260 °С, сопротивление 1000 Ом (при 25 °С), чувствительность 3.7 Ом/°С, точность 0.3 °С.

В процессе проведения работ по доработке узла трения было рассмотрено три варианта конструкций, в которых вал с диском (контртело) установлен на подшипниках качения, смонтированных непосредственно в теле двухкоординатного упругого элемента (рис. 1).

Результаты ресурсных испытаний такого узла трения (рис. 1, в) показаны на рис. 2. Видно, что

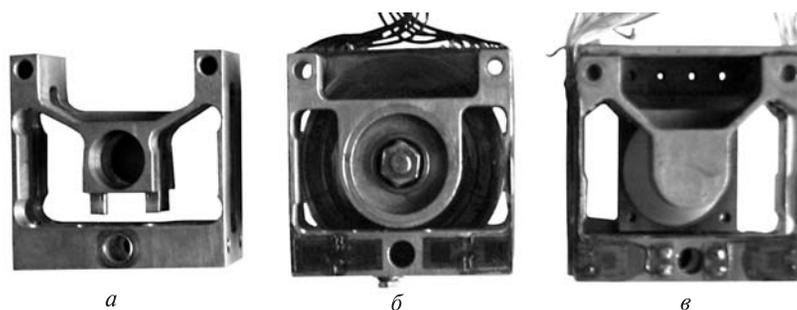


Рис. 1. Внешний вид двухкоординатных упругих элементов, изготовленных и исследованных при разработке узла трения: *а* — исходная конструкция упругого элемента, *б* — сборка узла трения, *в* — конструкция упругого элемента с увеличенной опорной базой для диска-контртела и специальной конфигурацией измерительных балок для уменьшения влияния температуры на показания тензорезисторов

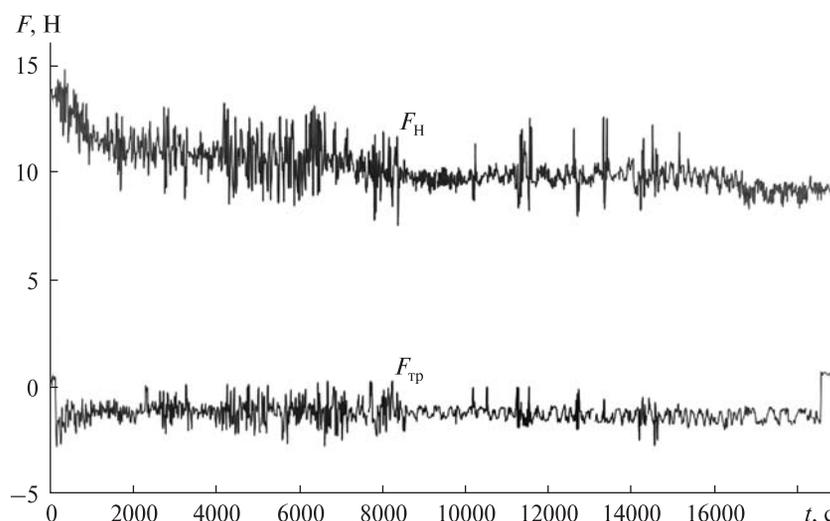


Рис. 2. Компьютерная запись изменения нагрузки F_n и силы трения $F_{тр}$ от времени t эксперимента при испытаниях узла трения (рис. 1, *в*)

отклонение нормальной нагрузки F_n и силы трения $F_{тр}$ от среднего значения может достигать $\pm 20\%$, что затрудняет определение износа пары трения в режиме непрерывного мониторинга.

Несмотря на то, что двухкоординатный упругий элемент изготовлен из алюминиевого сплава Д-16Т, в экспериментах было установлено заметное влияние градиента температуры на показания тензорезисторов, предназначенных для измерения нагрузки и силы трения. Например, при скорости скольжения 0.3 м/с градиент температуры между местом установки индентора и крайней точкой упругого элемента превышал 20 °С.

Исследование распределения усилий и деформаций, которые возникают в подшипниках и в муфте передачи вращения от двигателя на вал узла трения, выявили дополнительные возмущения в рассматриваемой конструкции узла трения. Для устранения влияния установленных возмущений на точность измерения триботехнических характеристик была предложена конструкция узла трения, в которой образец-диск устанавливается непосредственно на вал двигателя. Это полностью исключает механические возмущения, возникавшие в прежних конструкциях из-за наличия муфты, и улучшает

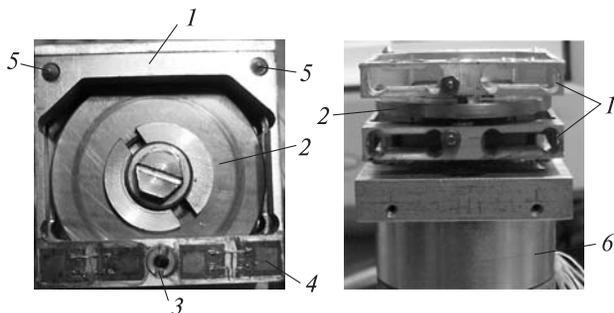


Рис. 3. Модульный узел трения без защитного экрана: 1 — двухкоординатный упругий элемент, 2 — диск-контртело из стали ШХ-15, 3 — индентор из материала СКМ ИПМ-304, 4 — тензорезисторный датчик, 5 — направляющая для установки упругого элемента на приводе, 6 — привод

отвод тепла трения от индентора через образец-диск.

В свою очередь, уменьшение массы двухкоординатного упругого элемента способствует снижению градиента температур на его поверхности. Такая конструкция позволяет вернуться к классической схеме измерения нагрузки с использованием плоской тензоизмерительной балки (рис. 3). Наличие резьбового соединения для установки индентора в корпусе упругого элемента обеспечивает задание начальной нагрузки в паре трения без применения специальных тарировочных приспособлений.

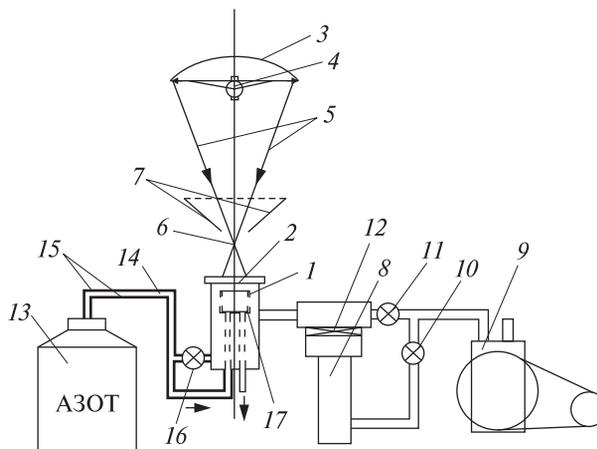
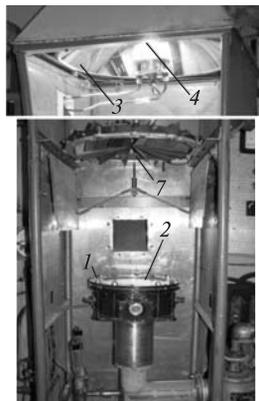


Рис. 4. Принципиальная схема установки «Уран-Т»: 1 — вакуумная камера, 2 — кварцевый иллюминатор, 3 — эллипсоидный отражатель радиационного нагревателя, 4 — ксеноновая лампа ДКСШРБ-10000, 5 — поток световых лучей, 6 — фокальная зона установки; 7 — жалюзи, 8 — диффузионный вакуумный насос, 9 — форвакуумный насос, 10, 11 — вакуумный вентиль, 12 — вакуумная задвижка, 13 — сосуд Дьюара, 14 — трубопровод подачи жидкого и газообразного азота, 15 — теплоизоляция, 16 — натекатель, 17 — радиационный экран, охлаждаемый азотом

Указанные изменения конструкции двухкоординатного упругого элемента не повлияли на его прочностные и деформационные характеристики, рассчитанные в работе [2].

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на вакуумной установке «Уран-Т» (рис. 4) [3], в которой для моделирования нагрева узла трения от солнечного излучения используется ксеноновая лампа ДКСШРБ-10000 с концентратором лучистой энергии.

Для измерения параметров трения применялась компьютеризированная система измерения и управления (СИУ) [4], разработанная в НИИ прецизионных измерений при Укрметртестстандарте, позволяющая одновременно контролировать показания всех тензометрических мостов и датчиков температуры. В качестве привода трибометра использовался макетный бесколлекторный электропривод, разработанный и изготовленный МПП «Збруч» (Украина), показавший удовлетворительную работоспособность в диапазоне температур от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Макетный электропривод обеспечивает плавную регулировку скорости скольжения от 0.1 до 1.5 м/с при нагрузке до 30 Н, что удовлетворяет параметрам, указанным в таблице.

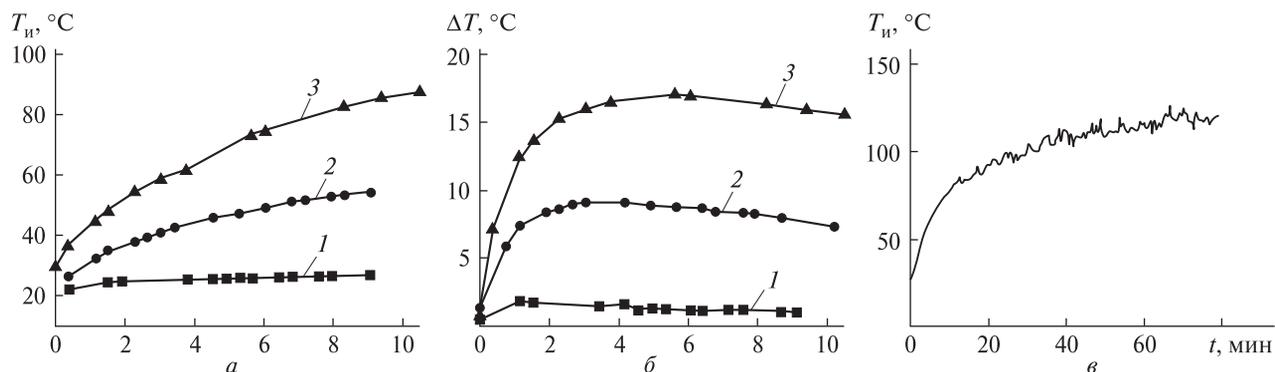


Рис. 5. Температурные характеристики узла трения «диск-индентор»: *а* — изменение температуры индентора T_n для различных скоростей скольжения при времени t эксперимента 10 мин, *б* — градиент температуры ΔT на поверхности упругого элемента (1, 2 и 3 — скорости скольжения 0.1, 0.7 и 1.5 м/с соответственно), *в* — зависимость температуры T_n индентора от времени эксперимента для скорости скольжения 0.7 м/с

При исследованиях работоспособности электропривода в диапазоне температур от -80 °С до $+150$ °С установлено, что при положительных температурах для обеспечения скорости скольжения 1.5 м/с при нагрузке 30 Н (максимально допустимые значения) потребляемая мощность составляет 60–70 Вт. При снижении температуры потребляемая мощность возрастает и при -80 °С достигает 100 Вт. Для надежного пуска макета электропривода при низких температурах (-80 ... -100 °С) необходим дополнительный резерв мощности 40–45 Вт.

Исходя из параметров, приведенных в таблице, для исследования модульного трибометра были выбраны следующие режимы работы: начальная нагрузка 20 и 30 Н; скорость скольжения 0.1, 0.7 и 1.5 м/с; начальная температура 20–25 °С; диапазон изменения температуры узла трения от -90 °С до $+130$ °С.

В качестве объекта для триботехнических испытаний была выбрана открытая пара сухого трения «диск-индентор». Материал образцов-инденторов — композиционный самосмазывающийся материал СКМ ИПМ-304 (предназначен для работы в вакууме [6, 7]), материал образца-диска — термообработанная сталь ШХ-15. Эксперименты проводились при давлении 0.1 Па, так как при этом давлении средний коэффициент трения для выбранной пары трения составляет примерно 0.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

Было выполнено три серии экспериментов.

Серия А. Определение температурных характеристик узла трения в зависимости от скорости скольжения. Для исследования температурного режима работы узла трения были выбраны три скорости скольжения: 0.1, 0.7 и 1.5 м/с. Температура измерялась с помощью двух датчиков HEL-705-U-1-12-00 (Honeywell), один из которых был установлен в инденторе, а другой закреплен в наиболее удаленном от индентора месте упругого элемента. Результаты эксперимента приведены на рис. 5.

На рис. 5, *а* показана зависимость температуры индентора от скорости скольжения и продолжительности эксперимента. При скорости скольжения 1.5 м/с температура индентора достигает $+80$ °С уже после 10 мин работы узла трения и имеет тенденцию к дальнейшему увеличению. При скорости скольжения 0.1 м/с температура индентора стабилизируется на уровне $+25$ °С.

Градиент температуры на поверхности упругого элемента (рис. 5, *б*) не превышает 18 °С даже для максимальной скорости скольжения индентора по диску и имеет тенденцию к некоторому уменьшению при увеличении продолжительности работы узла трения. Однако, как показано выше, при увеличении времени эксперимента

температура индентора может достичь предельного значения $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. (рис. 5, в).

Серия Б. Моделирование влияния орбитального изменения температуры КА на параметры трения. Для проведения эксперимента был выбран следующий режим испытаний: начальная нагрузка на индентор – 30 Н (удельное давление при использовании цилиндрического индентора $\varnothing 2\text{ мм}$ с плоским торцом составляет примерно 1 кг/мм^2); скорость скольжения – 0.7 м/с ; давление в камере 0.1 Па .

В условиях орбитального полета характер изменения температуры пары трения при проведении эксперимента зависит от многих факторов, и на данном этапе исследований не известен. Поэтому для экспериментов серии Б был выбран режим изменения температуры трибометра (узла трения с приводом) от $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$, практически перекрывающий ожидаемый диапазон за время 90 мин, что приблизительно равно времени одного оборота МКС вокруг Земли. Однако в реальных условиях полета за это время температура трибометра, по-видимому, должна вернуться к исходному значению ($-90\text{...}-100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Охлаждение трибометра до заданной температуры обеспечивалось путем теплообмена излучением с криогенным (азотным) экраном вакуумной камеры. Длительность предварительного охлаждения трибометра до температуры $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляла около 5 ч.

Для нагрева трибометра использовался имитатор солнечной лучистой энергии. Поток световых лучей с помощью эллипсоидного отражателя направлялся на установленный в вакуумной камере трибометр через кварцевый иллюминатор (рис. 4).

Зависимость нормальной нагрузки пары трения (силы прижатия) и силы трения от изменения температуры в диапазоне $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\text{...}+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ показана на рис. 6, а. Установлено, что с ростом температуры трибометра начальная сила прижатия образцов и сила трения существенно уменьшаются и достигают минимальных значений при температуре трибометра $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время коэффициент трения от изменения температуры зависит мало и достигает минимального значения при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6, б).

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы:

- предложенная конструкция узла трения по схеме «диск-индентор» обеспечивает необходимую точность измерения триботехнических характеристик антифрикционных материалов при проведении КЭ в условиях орбитального полета;
- наименьшее значение коэффициента трения для выбранной пары материалов и схемы испытаний наблюдается при температуре индентора $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- установлена слабая зависимость коэффициента трения от изменения начальной нагрузки в процессе испытаний, что подтверждает возможность измерения интегрального износа пары трения (до 50 мкм) в режиме непрерывного мониторинга.

Серия В. Оценка влияния силы гравитации на коэффициент трения. Результаты, приведенные на рис. 6—8 показывают, что коэффициенты трения для верхнего и нижнего инденторов заметно отличаются. Такое различие в коэффициентах трения может быть вызвано:

- а) влиянием типа крепления двухкоординатного упругого элемента на величину силы трения, регистрируемой для верхнего и нижнего инденторов;
- б) различным количеством продуктов износа, которое остается на верхней и нижней дорожках трения образца-диска.

Для проверки предположения а) были проведены испытания при самоустанавливающимся (рис. 3, п. 5) и фиксированном креплении двухкоординатного упругого элемента на корпусе электропривода. Полученные значения коэффициентов трения для верхнего и нижнего инденторов хорошо согласуются между собой (рис. 7).

Для проверки предположения б) было исследовано состояние дорожек трения на верхней и нижней сторонах образца-диска. Обнаружено, что на верхней стороне образца-диска значительная часть отделившихся частиц износа индентора (и диска) остаются на дорожке трения (явление трибопереноса), и при последующих проходах индентора (при повторных циклах взаимодействия) рабочая поверхность инден-

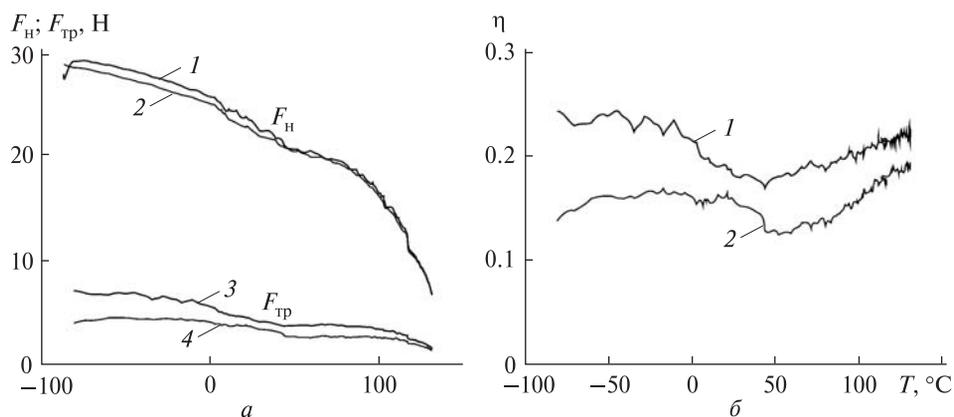


Рис. 6. Зависимость сил прижима F_H и трения $F_{тр}$ (а), коэффициента трения η (б) в диапазоне температур $-90...+130$ °С для пары трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, контртело — сталь ШХ15 (1 и 3 — на нижней стороне диска-контртела, 2 и 4 — на верхней стороне диска-контртела)

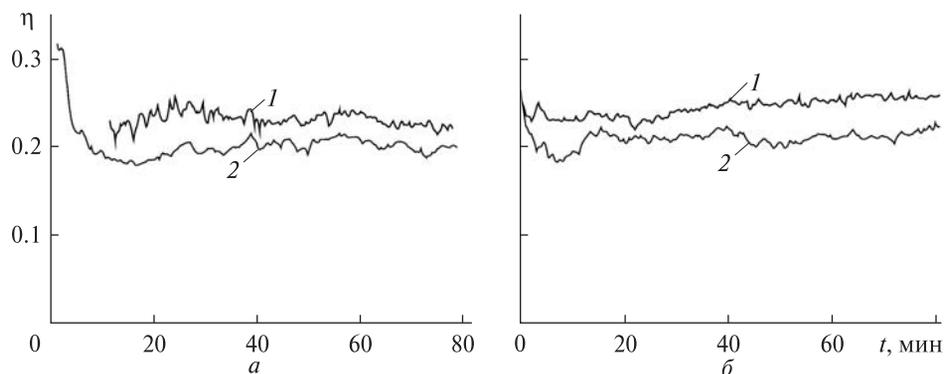


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения для фиксированного (а) и самоустанавливающегося (б) упругих элементов при начальной температуре индентора 25 °С (пара трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, диск — сталь ШХ15): 1 — нижняя сторона диска-контртела, 2 — верхняя сторона диска-контртела

тора экранируется от ювенильной (исходной) поверхности материала образца-диска слоем перенесенных вторичных структур. В результате после окончания периода приработки трение осуществляется между материалом индентора и слоем, состоящим в основном из частиц износа индентора.

Учитывая, что индентор изготовлен из антифрикционного самосмазывающегося материала СКМ ИПМ-304, явление трибопереноса обеспечивает более низкий коэффициент трения по сравнению с трением в отсутствие такого явления [5].

На дорожке трения нижней стороны образца-диска отделившиеся частицы износа индентора (и диска) под действием сил гравитации систематически удаляются из зоны трения. Трение индентора в этом случае происходит в основном по ювенильной (исходной) поверхности материала образца-диска в режиме квазиприработки, который характеризуется повышенным значением коэффициента трения.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 8, показывают, что:

- при скорости скольжения 0.1 м/с износ индентора мал, и коэффициенты трения после пе-

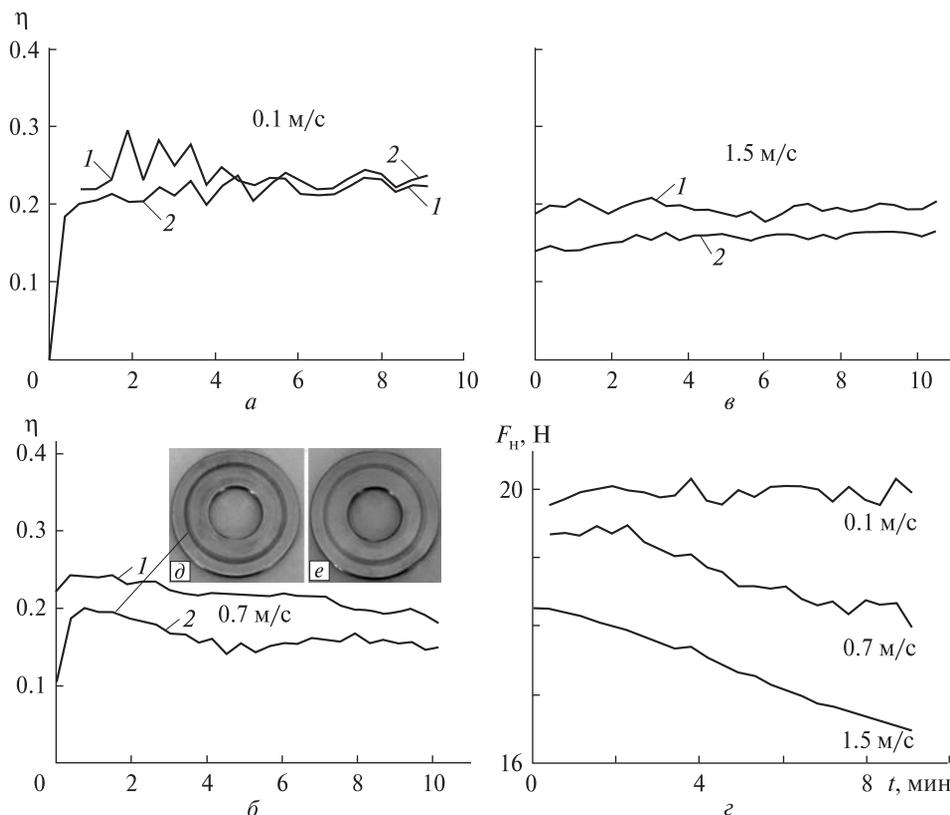


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения на верхней (д) и нижней (е) сторонах диска-контртела для скоростей скольжения 0.1 (а), 0.7 (б), 1.5 м/с (в) и усилия прижима (г) от времени испытаний (пара трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, контртело — сталь ШХ15): 1 — коэффициент трения на нижней стороне диска, 2 — на верхней

риода приработки практически одинаковы для нижней и верхней дорожек диска (рис. 8, а);

- при увеличении скорости скольжения интенсивность изнашивания индентора возрастает, о чем свидетельствует снижение нагрузки на индентор (рис. 8, е). Различие коэффициентов трения на верхней и нижней дорожках проявляется сильнее при сохранении более высокого коэффициента трения на нижней дорожке диска (рис. 8, б и в).

- На рис. 8, д показана дорожка трения на верхней стороне диска. Отчетливо видны большие участки, покрытые частицами перенесенного материала индентора. На дорожке трения на нижней стороне диска (рис. 8, е) следов трибоперноса материала индентора заметно меньше.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтвердили работоспособность доработанной конструкции модульного трибометра «диск-индентор», выполненного на основе двухкоординатного упругого элемента и предназначенного для испытаний антифрикционных материалов космического назначения в рамках КЭ «Материал — Трение».

Исследовано распределение и градиент температур на поверхности двухкоординатного упругого элемента и температурные характеристики индентора для различных скоростей скольжения.

Обнаружено, что интенсивность изнашивания и коэффициенты трения на верхней стороне

диска меньше, чем на нижней стороне, что свидетельствует о разном влиянии сил гравитации на скорость удаления продуктов износа с поверхности верхней и нижней дорожек трения.

Показано, что размещение инденторов с двух сторон образца-диска позволяет оценить влияние силы тяжести на параметры трения, по крайней мере на примере материала СКМ ИПМ-304.

Таким образом, если моделирование микрогравитации в лабораторных условиях практически невозможно, то оценить влияние продуктов разрушения на формирование дорожки трения в условиях их различного накопления на поверхности трения оказалось возможным, используя разработанную конструкцию узла трения.

1. *Абраимов В. В., Негода А. А., Завалишин А. П., Колыбаев Л. К.* Комплексная имитация факторов космического пространства // *Космічна наука і технологія*. — 1995. — **1**, № 2–6. — С. 76–80.
2. *Боровик В. Г.* Модульный узел трения «диск – индентор» для триботехнических исследований в космическом пространстве // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 5/6. — С. 87–91.
3. *Боровик В. Г., Боровик Д. В., Колотило А. Д. и др.* Установка для испытаний модульных трибометров и пар трения по программе подготовки КЭ «Материал-Трение» // *Тез. докладов 6-й Укр. конф. по космич. исслед.*, 3–10 сентября 2006 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2006. — С. 89.

4. *Броновец М. А., Гамуля Г. Д., Еланский Ю. А. и др.* Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения КЭ «Материал – Трение» // *Космічна наука і технологія*. — 2003. — **9**, № 5/6. — С. 40–46.
5. *Гамуля Г. Д., Фролов Г. А., Колотило А. Д., Боровик Д. В.* Комплект модульных узлов трения для проведения КЭ «Материал–Трение» и результаты их испытаний // *Космічна наука і технологія*. — 2009. — **15**, № 3. — С. 11–19.
6. *Косторнов А. Г., Симеонова Ю. М., Фуцич О. И. и др.* Влияние определяющих параметров процесса сухого трения на формирование структуры зоны трибосинтеза в композициях на медной основе // *Порошковая металлургия*. — 2006. — № 3/4. — С. 14–21.
7. *Косторнов А. Г., Фуцич О. И., Чевычелова Т. М. и др.* Закономерности трения, износа и целенаправленного синтеза поверхностей трения композиционных самосмазывающихся материалов // *Порошковая металлургия*. — 2007. — № 3/4. — С. 11–19.

Надійшла до редакції 01.10.09

G. A. Frolov, G. D. Gamulia, A. D. Kolotilo

THE MODULAR TRIBOMETER FOR THE INVESTIGATION OF ADEQUACY OF FRICTION PARAMETERS UNDER ORBITAL FLIGHT AND LAND LABORATORY CONDITIONS

We investigated the friction unit of the «disk-indenter» modular tribometer for the determination of tribotechnical characteristics of antifrictional materials in the orbital flight conditions and during the simulation of space factor effect. It is shown that the proposed design for the friction unit enables us to estimate the gravity influence on the friction factor of some antifrictional materials in land laboratory conditions.