

УДК 536.42:621.891

М. А. Бронец¹, Г. Д. Гамуля², Ю. А. Еланский³,
Л. Т. Завгородный³, В. В. Скороход⁴, В. П. Солнцев⁴,
М. Н. Сурду⁵, В. Г. Тихий³, Г. А. Фролов⁴

¹Міжвідомча наукова рада з трибології при РАН, Мінпромнауки Росії і Спільці НДО, Москва

²Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки
Фізико-технологічного інститута низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

³Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

⁴Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

⁵Державне науково-виробниче підприємство «Спецавтоматика», Київ

Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения космического эксперимента «Материал — Трение»

Розглянуто стан робіт з підготовки наукового устаткування для космічного експерименту «Матеріал — Тертя». Запропоновано методику і оцінено похибки виміру зносу пари тертя в умовах орбітального польоту з використанням тензометричних датчиків. Описана конструкція модульного блока і розглянути варіанти компонування орбітального трибометра. Отримано експериментальні результати, що підтверджують високу зносостійкість і зниження зносу пари тертя з матеріалів з елементами самоорганізації при збільшенні швидкості ковзання в умовах вакууму.

ВВЕДЕНИЕ

В техническом задании, согласованном Российской, Украинской и Белорусской академиями наук, а также рядом предприятий и организаций этих стран, определены следующие цели проведения космического эксперимента (КЭ) «Материал — Трение»:

— установление влияния факторов космического пространства на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов;

— определение адекватности характеристик трения и изнашивания идентичных материалов по результатам их испытаний в условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) и наземных лабораториях;

— определение триботехнических характеристик новых антифрикционных материалов и покрытий.

Для достижения поставленных целей разрабатывается научная аппаратура, позволяющая провести испытания перспективных для космической техники материалов и покрытий в условиях воздействия ФКП и при их моделировании в наземной лаборатории. В процессе этих экспериментов будут установлены коэффициенты трения, закономерности изнашивания, состояния поверхностей трения, структурные изменения материалов, подвергшихся испытаниям, и определены показатели работоспособности материалов и покрытий для узлов трения космических аппаратов (КА).

Критериями полноты выполнения задач КЭ будут являться:

— определение триботехнических характеристик не менее 20 материалов различных классов для перспективной космической техники в условиях воздействия реального комплекса ФКП;

— установление адекватности характеристик

трения и изнашивания, полученных в наземных лабораториях и в ходе испытаний материалов в космическом пространстве.

— уточнение действующих методик испытаний материалов на трение и износ и выбор материалов для узлов трения КА.

— уточнение методов прогнозирования работоспособности материалов в узлах трения КА.

Научная аппаратура КЭ «Материал — Трение» представляет собой блочное, малогабаритное оборудование, состоящее из:

— трибометра, предназначенного для исследования трения скольжения инденторов (и пальчиков) по диску;

— модуля (4-позиционного) для испытаний подшипников скольжения;

— двух модулей для испытаний зубчатых передач и подшипников качения.

Организации Украины должны разработать, изготовить и провести весь цикл необходимых испытаний комплекта модульных трибометров, предназначенного для исследования трения скольжения инденторов по диску [1].

Модульный трибометр должен обеспечивать: измерение силы трения; измерение износа инденторов и диска; измерение температуры в контрольных точках; регистрацию исследуемых параметров, обработку информации для передачи на бортовой вычислительный комплекс.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА ПАРЫ ТРЕНИЯ

Отличительной особенностью разрабатываемого трибометра является возможность измерения износа исследуемой пары трения непосредственно в процессе проведения эксперимента как в условиях орбитального полета, так и наземной лаборатории.

С этой целью ГНПП «Спецавтоматика» разработана система измерения износа пары трения на базе тензометрических преобразователей.

Тензометрические преобразователи (датчики) сегодня широко применяются для измерения самых разнообразных величин (измерения силы, веса и т. д.). Такие датчики (в мостовом интегральном исполнении) имеют следующие типовые характеристики:

— максимальное значение коэффициента передачи — до 0.01;

— максимальное напряжение питания — до 1 В;

— годовая нестабильность крутизны функции преобразования — менее 10^{-4} — 10^{-3} ;

— приведенная годовая нестабильность нуля датчика — менее 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-3}$.

Рассмотрим возможности и особенности применения этих датчиков в триботехническом эксперименте.

Одним из основных результатов такого эксперимента является определение двух трибологических величин: коэффициента трения и износа трущихся поверхностей.

Коэффициент K_T трения, как известно, определяется по уравнению

$$K_T = F_{тр} / F_H,$$

где $F_{тр}$ и F_H — силы трения и нагрузки.

Для определения коэффициента трения обычно достаточно обеспечить погрешность измерения менее 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-3}$. Такие характеристики, как правило, легко получить при использовании современных тензометрических датчиков, параметры которых приведены выше.

При измерениях износа прямое использование современных тензометрических датчиков не позволяет получить необходимый результат. Это обусловлено тем, что погрешность датчиков (данные приведены выше) значительно превышает саму измеряемую величину.

Например, пусть тензодатчик рассчитан на измерение максимального значения деформации Δ упругого элемента, равного 100 мкм (такие диапазоны измерения деформации характерны для современных упругих элементов), которое соответствует максимальному значению коэффициента передачи датчика $K_d = 0.01$ и максимальному значению деформирующей упругий элемент силы $F_H = 100$ Н. В соответствии с законом Гука

$$\Delta = \chi F_H,$$

где χ — жесткость упругого элемента. При погрешности датчика, приведенной выше, ошибка измерения нагрузки составит менее 1 Н, а погрешность измерения деформации — менее 1 мкм. Износ трущейся пары также приводит к изменению деформации упругого элемента. При этом величина износа часто не превышает 1 мкм, а погрешность его измерения должна составлять не более 3-5 %. Такая погрешность измерения в данном случае соответствует деформации упругого элемента, равной 0.03—0.05 мкм. Отсюда видно, что прямые измерения износа в этом случае невозможны.

Рассмотрим более подробно особенности использования тензометрических датчиков в триботехническом эксперименте. Функция преобразования датчика с достаточной для нашего эксперимента точностью описывается уравнением

$$K_d = \Delta K + \alpha F,$$

где α — крутизна функции преобразования датчи-

ка, ΔK — смещение нуля датчика.

Обычно в паспорте на датчик приводятся нестабильность нуля и крутизны функции преобразования на временном интервале в 1 год.

Измерительная аппаратура, разрабатываемая на базе прибора СА-320 для определения параметров датчика, обладает достаточной чувствительностью и позволяет определять изменения коэффициента передачи тензодатчика, не превышающие 10^{-8} относительной величины [1]. Это соответствует чувствительности по перемещению 10^{-4} мкм при использовании датчика с приведенными выше параметрами. Однако такая чувствительность не позволяет производить необходимые измерения без соответствующей методики, учитывающей особенности триботехнического эксперимента. Последний (или один из измерительных сеансов) обычно имеет небольшую продолжительность — порядка единиц часов. При этом в процессе эксперимента величина измеряемых усилий изменяется мало (это в первую очередь касается усилия нагрузки) и обычно не превышает одного — десяти процентов. Поэтому погрешность датчика можно охарактеризовать некоторой величиной ΔK_r .

Значение ΔK_r можно принять равным некоторому постоянному числу, определяемому перед началом эксперимента. Для этого достаточно измерить выходной сигнал датчика перед началом эксперимента и в дальнейшем вычитать значение этого сигнала из результатов последующих измерений. Погрешность датчика за время эксперимента будет равна:

$$\Delta K_s = (T_s/T_r)\Delta K_r.$$

Оценки показывают, что если смещение характеристик датчика является линейной функцией времени, то для КЭ продолжительностью 5—10 ч учет выходного сигнала датчика перед началом эксперимента и переход к измерению его приращений даст возможность измерять деформацию, а следовательно, и износ, величина которого может быть меньше 1 нм. Это следует из того, что отношение длительности эксперимента T_s к продолжительности года T_r равно 10^{-3} .

Если датчик недостаточно стабилен на интервале эксперимента, тогда величину нестабильности датчика в каждый момент времени ΔK_c можно представить линейной функцией времени t (рис. 1):

$$\Delta K_c = \Delta K_{c0} + \beta t,$$

где ΔK_{c0} — выходной сигнал датчика в начале эксперимента, а β — крутизна зависимости выходного сигнала датчика от времени при постоянной нагрузке.

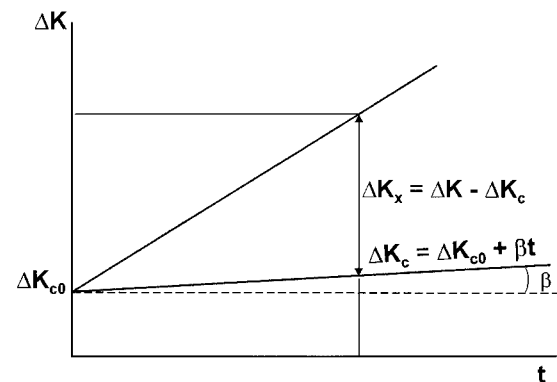


Рис. 1. Учет нестабильности датчика на интервале эксперимента

Для определения коэффициентов рассматриваемой линейной зависимости перед началом эксперимента, на временном интервале, примерно равном длительности эксперимента, необходимо провести два измерения и по ним известными способами вычислить искомые коэффициенты линейной зависимости. После этого в процессе проведения эксперимента для каждого момента времени с начала эксперимента рассчитывают величину ΔK_c и вычитают его из текущего значения измеряемого параметра датчика. Такой подход позволяет в принципе измерять малые деформации (износ) с погрешностью менее 0.1—1.0 % даже при использовании не очень качественных датчиков.

Существенной особенностью триботехнического эксперимента является то, что измерения производятся в динамике, при движении трущихся элементов. Как результат, погрешности сборки и изготовления трущихся поверхностей приводят к сильным помехам при измерении усилия или износа за счет паразитных колебаний сигнала. Например, при измерениях трибологических характеристик в условиях вращения пары трения неперпендикулярность вращающейся детали к оси вращения (биение) приводит к модуляции выходного сигнала датчика синусоидой, а неплоскостность трущихся деталей — к наложению на сигнал помехи гармоник. В свою очередь, микронеровности поверхности трущихся деталей вызывают появление в выходном сигнале датчика квазিশумовой помехи. Следует отметить, что рассмотренные обстоятельства касаются в одинаковой степени любого типа датчиков и существенно усложняют процесс измерений в трибометрии. Для обеспечения высокой точности измерений необходимо искать оптимальные пути подавления помех разного вида.

Рассмотрим особенности подавления периодических помех квазисинусоидальной или несинусои-

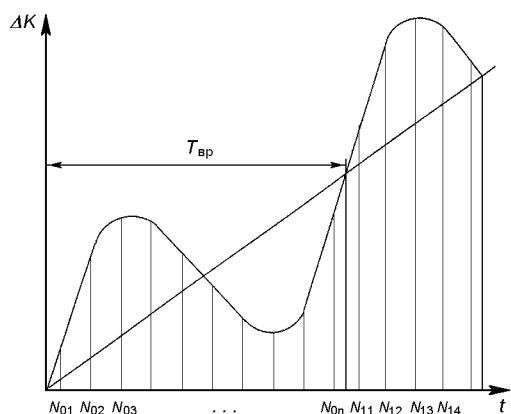


Рис. 2. Способы подавления периодических помех квазисинусоидальной или несинусоидальной формы

дальной формы. Сегодня можно предложить два подхода к решению этой проблемы (рис. 2). Первый подход заключается в снятии информации с выхода датчика в строго заданные моменты времени, при одном и том же угле поворота вращающейся детали. При этом изменения сигнала датчика не будут зависеть от вращения детали, а будут определяться только измеряемым усилием и износом. Для усреднения результата измерения в этом случае необходимо накапливать результаты измерения на выбранных n периодах вращения трущихся деталей:

$$N_k = \sum_{i=1}^n N_{ik} / n.$$

Очевидно, что для реализации данного способа усреднения необходимо иметь датчик числа оборотов.

В последнее время широкое распространение получил весовой способ усреднения для подавления периодической помехи. Для реализации этого способа необходимо проводить усреднение на двух-четырёх периодах помехи с последующей математической обработкой результатов измерения. Этот способ позволяет подавлять периодическую помеху за короткое время в сотни тысяч раз. При этом, что очень важно, период подавляемой помехи относительно опорного интервала усреднения может изменяться на многие проценты без снижения эффективности подавления помехи. В этом случае также важно контролировать период помехи:

$$N_n = \sum_{k=1}^{k_m} N_{nk} / k,$$

где $k_m = 2\pi/\varphi$ — целое число; φ — угол между измерениями; $N_n = \Psi(N_n^1, N_n^2, N_n^3, \dots, N_n^r)$ — окна видов $(\sin^2 x)/x^2$. Подавление шумоподобных помех

может быть одинаково эффективно выполнено любым из описанных способов усреднения. Характерной особенностью этих помех в триботехническом эксперименте является то, что их спектр обычно лежит далеко за пределами спектра периодических помех, и по отношению к ним эти помехи являются высокочастотными. Это облегчает процесс их подавления в процессе усреднения. Выбор того или иного типа усреднения зависит как от условий эксперимента, так и от наличия соответствующего аппаратного обеспечения.

В любом случае применение описанных методов усреднения позволяет добиться значительного подавления помех, и следовательно, является гарантией достижения высокой точности измерений, в том числе и износа трущихся деталей.

КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЬНОГО БЛОКА И ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ БОРТОВОГО ТРИБОМЕТРА

Бортовой трибометр представляет собой автономную конструкцию, выполненную в виде отдельных модульных трибометров (рис. 3). В настоящее время прорабатывается несколько вариантов компоновки бортового трибометра. Каждый трибометр состоит из двух ведомых образцов 1, а сам ведомый образец представляет собой стандартный шарик диаметром 10 мм, изготовленный из подшипниковой стали и плотно завальцованный в держателе 2. Между держателем и шариком зажата медная пластина 3, к которой припаяна термopара 4 для измерения температуры нагрева шарика. Держатель устанавливается на траверсу 5 и крепится к ней гайкой 6. Ведущий образец состоит из сложенных вместе дисков 7 диаметром ~40 мм, рабочие поверхности которых обращены наружу. Диски зажаты между втулками 8. Втулки установлены на валу 9. Во вращение вал приводится электроприводом.

Траверсы шарнирно соединены между собой с помощью осей 10 и винта 11. Винт устанавливается на кронштейн 12, который на шарикоподшипнике 13 установлен на вал 9. Винт 11 и тензобалка 14 крепятся к кронштейну гайкой. Противоположные концы тензобалки и траверс соединены между собой винтом 15.

Усилие поджатия ведущих образцов к ведомым осуществляется калиброванной на заданное усилие пружиной 16. Пружина поджимается гайкой 17 на заданный размер, что обеспечивает заданное усилие. Изменение усилия поджатия образцов в процессе испытаний контролируется по двум тензодатчикам, установленным на балке 14.

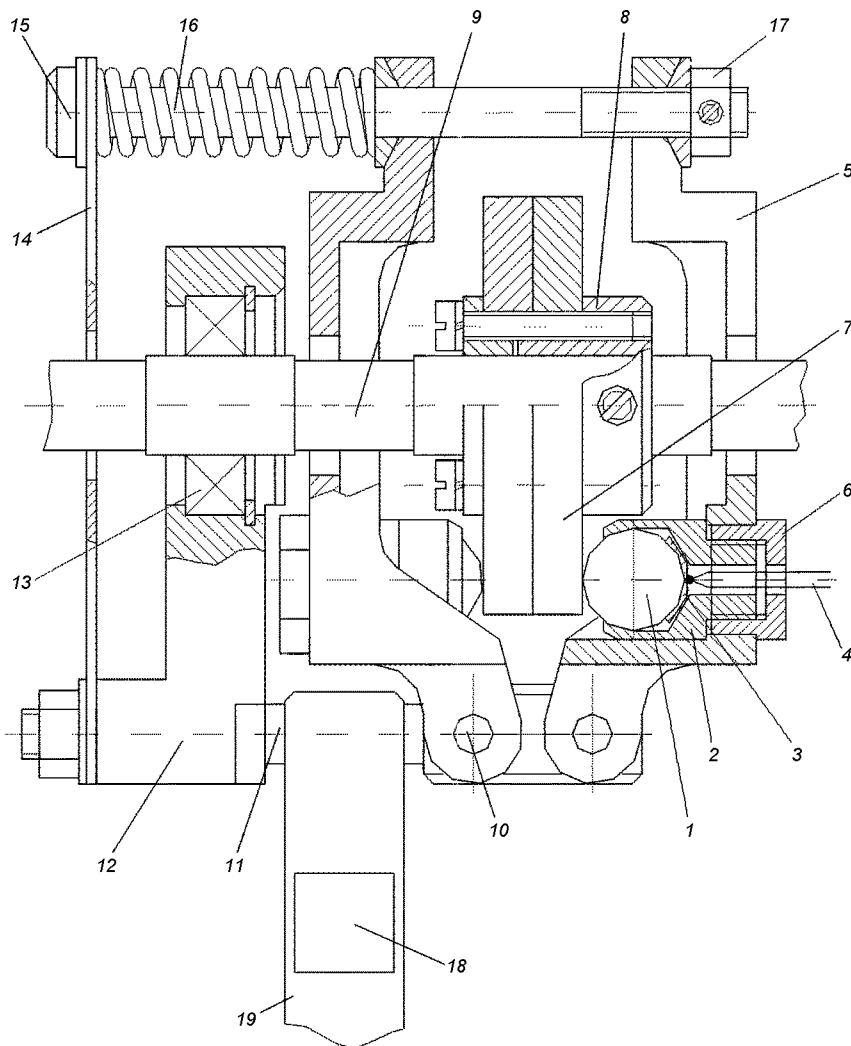


Рис. 3. Модульный трибометр: 1 — ведомый образец (индентор); 2 — держатель образца; 3 — медная пластина; 4 — термопара; 5 — траверса; 6, 17 — гайка; 7 — ведущий образец (диск); 8 — втулка; 9 — вал; 10 — ось; 11, 15 — винт; 13 — шарикоподшипник; 14, 19 — тензобалка; 16 — пружина; 18 — тензодатчик

Сила трения между образцами измеряется тензодатчиком 18, установленным на тензобалке 19, один конец которой закреплен шарнирно в устройстве отключения трибометра, а второй конец упирается в поверхность винта 11.

Следует отметить, что предлагаемый вариант конструкции модульного блока и варианты компоновки орбитального трибометра будут дорабатываться с учетом весовых ограничений выведения на орбиту, которые пока окончательно не определены.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ САМООРГАНИЗАЦИИ В ВАКУУМЕ

В условиях космического вакуума обычные механизмы, обеспечивающие повышение износостойкости материалов в процессе трибоактивации и воз-

никновения нормального механохимического износа, не реализуются в связи с отсутствием атмосферы активных газов (кислорода, азота и углекислого газа). При сухом трении в вакууме в результате накопления пластической деформации и дефектов структуры интенсивно развиваются процессы схватывания. Применение твердых смазок и прочих покрытий из антизадирных соединений, как правило, не позволяет рассчитывать на длительные сроки эксплуатации, особенно в экстремальных ситуациях, когда внешние воздействия могут существенно превышать физико-механические свойства и функциональные возможности покрытий.

Функциональные возможности большинства разработанных в настоящее время материалов определяются индивидуальными свойствами отдельных соединений, входящих в их состав и обладающих определенной антифрикционностью в силу специфики их кристаллического строения. Такие матери-

алы в большинстве случаев равновесны и не обладают нелинейными механизмами адаптации. В настоящее время ресурс повышения функциональных свойств равновесных материалов практически исчерпан. Поэтому дальнейшее повышение функциональных свойств связано с созданием материалов с нелинейными механизмами адаптации. Это свойственно неравновесным физико-химическим системам с элементами самоорганизации.

Толчком к созданию таких материалов послужило бурное развитие и распространение идей неравновесной термодинамики и теории нелинейных открытых динамических систем. Именно достижения в этих областях позволяют ускорить прогресс не только в области создания износостойких материалов с нелинейными механизмами адаптации, но и в материаловедении и технологии в целом, используя не деструктивную, а созидательную функцию внешних потоков энергии. Особенно такая функция проявляется в случае получения неравновесных материалов, обладающих всеми элементами процессов самоорганизации подобно объектам живой материи. В таких материалах в результате воздействия внешних энергетических потоков протекает комплекс сложных физико-химических процессов с возникновением динамически устойчивых образований — диссипативных структур. Эти структуры характеризуются минимальным значением производства энтропии со свойственными им нелинейными механизмами адаптации и самозалечивания. Основным механизмом образования таких систем, сформулированный в работах [2, 3], заключается в реализации замкнутого цикла неустойчивостей: термодинамической, химической и индуцированных неравновесных фазовых переходов. Совокупность последовательного возникновения такого рода неустойчивостей позволяет сохранить неравновесность физико-химической системы и соответственно ее продолжительную возбудимость. В таком случае происходит диссипация внешней энергии, которая тратится на возбуждение и поддержание физико-химических процессов, приводящих к релаксации большей части структурных дефектов.

В системах, открытых к внешним потокам вещества, химическая неустойчивость, порождающая диссипативные структуры, возникает сама по себе вследствие нелинейного кинетического закона взаимодействия металла с двухатомным газом [4]. В то же время для материалов, обменивающихся только энергией, источник термодинамической неустойчивости является необходимым элементом неравновесной композиции. Без него нельзя обеспечить постоянную возбудимость системы в отсутствии внешнего обмена веществом. Постоянная воз-

будимость системы может быть достигнута за счет объемного введения в композицию источника термодинамической неустойчивости, химического соединения, термодинамически непрочного в интервале возможных температур, развивающихся в зоне контакта трущихся деталей, где продуктом разложения является элемент, образующий двухатомную молекулу. Получение композиционного материала, содержащего неустойчивое соединение с таким жестким термодинамическим ограничением, возможно только с применением метода порошковой металлургии. При этом матрица или основа материала не должна в процессе консолидации порошковой композиции образовывать термодинамически прочных соединений с продуктом разложения. Это относится также и к любому другому элементу, входящему в состав металлической матрицы. Кроме прочего, для сохранения неравновесности как главного источника и условия возникновения диссипативных структур должны быть наложены кинетические и диффузионные ограничения. Применение этих принципов позволило создать материалы на основе технических важных металлов и сплавов. При в этом для существенного повышения износостойкости в несколько раз, а порой и на порядок, достаточно ввести от 0.5 до 2.5 % масс. соединения, являющегося элементом термодинамической неустойчивости, в матрицу на основе известного равновесного сплава.

Сравнительные испытания материалов с элементами самоорганизации и их равновесных аналогов показали, что при введении 1 % об. соединения, являющегося источником постоянной возбудимости системы и соответственно реализующего в системе процессы самоорганизации, обеспечивается повышение износостойкости минимум в два раза на стандартных высокопрочных титановых сплавах и в 5—10 раз на известных износостойких инструментальных сталях.

Результаты сравнительных испытаний образцов высокопрочного титанового сплава на основе α -титана без и с 1 % об. добавкой элемента, приводящего к возникновению термодинамической неустойчивости, показали, что износостойкость материала с элементами самоорганизации возрастает на два-три порядка (рис. 4).

При создании эффективной технологии получения материалов с элементами самоорганизации методом СВЧ в условиях инициирования реакции потоком лучистой энергии была разработана методика изучения тепловых процессов с применением высокоскоростной многоканальной компьютерной записи температуры. Были проведены эксперименты, которые свидетельствуют о многовариантности

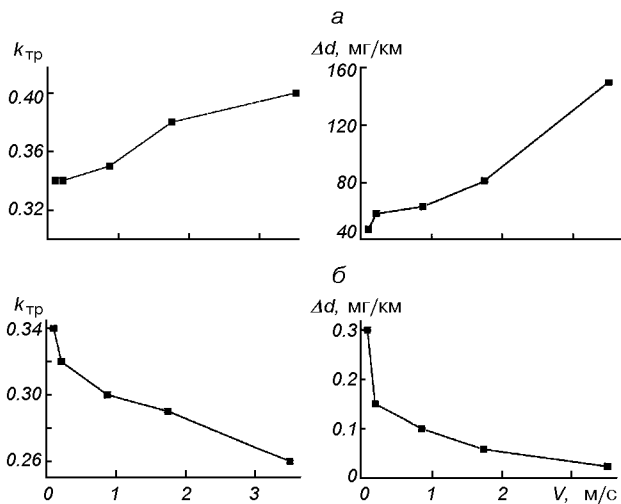


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения $k_{тр}$ и износа J от скорости скольжения: *a* — высокопрочного титанового сплава на основе α -титана, *б* — того же сплава с добавкой 1 % об. элемента термодинамической неустойчивости

поведения неравновесной системы в процессе распространения необратимой экзотермической реакции в объеме материала. Установлено, что выбор траектории эволюции определяется реологическими свойствами порошковой системы, которые задают характер и количество связей между дискретными элементами, определяя тем самым общее макроскопическое поведение: активное спекание всего образца, его рост или зональное обособление усадки.

Методом металлографического, рентгенофазового, микрорентгеноспектрального, а также дериватографического анализов установлен механизм образования диссипативных структур, возникновение которых обусловлено наличием замкнутого цикла неустойчивостей. Основопологающей неустойчивостью является химическая. Как и в классических гомогенных системах, она возникает вследствие появления петли обратной связи в системе сопряженных реакций. Это приводит к автоволновому процессу в дискретно-однородной среде. Суперпозиции концентрационных и тепловых волн инициируют неравновесный фазовый переход, изменяющий масштаб области протекания химических реакций в кинетической зоне. При этом в системе наблюдается автолокализация, вследствие чего экранируется источник термодинамической неустойчивости от диффузионного и кинетического рассея-

ния в окружающую среду.

Однако до настоящего времени остается нерешенным вопрос об адекватности трибологических характеристик, полученных в лабораторных условиях, при моделировании воздействия ФКП на пару трения, и в условиях орбитального полета, в том числе и для антифрикционных, износостойких материалов с элементами самоорганизации. Большой интерес представляет изучение поведения этих материалов в условиях воздействия солнечной радиации, потоков протонов и электронов и т. д. Поскольку материалы с элементами самоорганизации обладают нелинейными механизмами адаптации со свойственными им процессами самозалечивания, то в таких условиях следует ожидать дополнительного улучшения их функциональных свойств. Это и является одной из основных целей проведения КЭ «Материал — Трение».

1. Гамуля Г. Д., Скороход В. В., Солнцев В. П. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал — Трение» // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 28—34.
2. Скороход В. В., Солнцев В. П. О динамическом характере устойчивости в порошковых реагирующих системах // Доп. НАНУ.—2001.—№ 11.—С. 74—80.
3. Солнцев В. П., Скороход В. В., Баранов В. Л. Модель автоколебательной топохимической реакции в открытой системе металл — двухатомный газ // Доп. НАНУ.—2001.—№ 12.—С. 83—87.
4. Skorokhod V. V., Solntsev V. P., Soltseva T. A. Physicochemical fundamentals of creating materials with elements of self-organization // Proc. Inter. Conf. «Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges». — Kyiv, 2002.—Vol. 1.—P. 60—61.

THE ORBITAL TRIBOMETER AND NEW MATERIALS FOR THE PERFORMANCE OF THE “MATERIAL—FRICTION” SPACE EXPERIMENT

M. A. Bronovets, G. D. Gamulia, Yu. A. Yelanskii, L. T. Zavgorodnyi, V. V. Skorokhod, V. P. Solntsev, M. N. Surdu, V. G. Tikhii, and G. A. Frolov

The state of the preparation of the scientific equipment for realization of the “Material-Friction” space experiment is considered. We offer a method and give an estimate of the error of measurement of wear of pair friction under orbital flight conditions with the use of strain-gauge sensors. The design of a module and versions of layout of orbital tribometer are presented. We derived experimental results confirming a high wear resistance and decrease of wear of pair friction from materials with elements of self-organizing with increasing speed of slip under vacuum conditions.