

лителя. Выходное напряжение с усилителя поступает на УЗП. Напряжение с УЗП преобразуется компаратором напряжения в сигнал формы меандр, который поступает на первый вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Данный тип фазового детектора предполагает разность фаз 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения на резонансной частоте УЗП.

Сигнал тока УЗП проходит через регулируемый фазовращатель, осуществляющий фазовый сдвиг в 90° между сигналами тока и напряжения на рабочей частоте УЗП. Далее компаратор тока преобразует форму сигнала в меандр и этот сигнал поступает на второй вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Сигнал с выхода фазового детектора через фильтр поступает на вход ГУН, удерживая резонансную частоту УЗП. При отклонении фазового сдвига от 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения, системой ФАПЧ вырабатывается сигнал рассогласования, сдвигающий резонансную частоту влево или вправо от точки резонанса УЗП. Это обусловлено фазо-частотной характеристикой УЗП (см. рисунок 1).

При резонансе фазовый детектор «исключающее ИЛИ» вырабатывает сигнал равный середине диапазона ($1/2$ питания фазового детектора). При изменении фазового сдвига, а значит и отклонения частоты от резонанса, на входе ГУН будет присутствовать сигнал рассогласования, который вернет ГУН на частоту резонанса УЗП. Ввиду того, что сигнал рассогласования отклоняется от средней точки фазового детектора в ту или иную сторону, ГУН уменьшает или увеличивает рабочую частоту, приближая ее к резонансной частоте УЗП.

УДК 53.082.78

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Как правило, первостепенными требованиями для трибосопряжений являются низкий коэффициент трения, высокая микротвердость и устойчивость к износу. Предшествующими исследованиями [1–3] было показано, что состав, структура и свойства металлов и сплавов на их основе могут быть эффективно модифицированы с помощью ионной имплантации по методу [2], либо путем нанесения покрытий [3]. Намечившиеся в последнее время тенденции широкого использования наноразмерных структур вынуждают повышать локальность методов измерения трибопараметров как по поверхности, так и по глубине

В некоторых случаях, наличие «дежурного» напряжения на УЗП, пусть и небольшого, нежелательно, особенно при присоединении особо тонких проводников (≤ 20 мкм), внося воздействие на поверхность проволоки перед рабочим ультразвуковым импульсом.

Для обеспечения режима работы УЗГ и нормальной работы ФАПЧ без «дежурного» напряжения на УЗП предложена структура усовершенствованной схемы УЗГ согласно рисунку 3.

Основное отличие заключается в использовании двух фазовращателей по 45° свободных от регулировки. Добавлен логический элемент «И», подключенный входами к компараторам, а выходом к ГУН. Благодаря этому удается удерживать частоту ГУН на резонансной частоте УЗП при отсутствии сигналов компаратора напряжения и тока в промежутках между рабочими импульсами. Таким образом реализован режим работы, когда между запусками рабочих импульсов частота ГУН близка или равна частоте резонанса УЗП.

Литература

1. DeAngelis D.A. Ultrasonic transducer for wire bonding and methods of forming wire bonds using ultrasonic transducers / D.A. DeAngelis, G.W. Shulze // Patent US 8.251.275B2. – 28.08.2012. – P.1–22
2. Lin S. Analysis of the sandwich ultrasonic transducer with two sets of piezoelectric elements / S. Lin, C. Xu // Smart materials and structures. – 2008. – № 17. – P. 1–9.
3. Петухов И.Б. Способ формирования синусоидального напряжения на микросхеме DDS AD9833 для системы фазовой автоподстройки частоты / И.Б. Петухов, И.Н. Кипарин // 10-я МНТК «Приборостроение-2017». – 2017. – С. 229–230.

материала. Первым важным шагом для решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам и контртелу. С этой целью авторами было разработано специализированное устройство [4], прототипом которого послужило устройство для измерения коэффициента трения методом «плоскость на диске» [5]. При разработке новой системы основное внимание было уделено расширению возможностей метода [4].

Методика и обсуждение результатов. Установлено, что для решения поставленных задач одним из наиболее эффективных методов иссле-

дования коэффициента трения и износостойкости является трибосопряжение полированного ребра вращающегося диска, изготовленного из нержавеющей стали 12Х18Н9Т (контртело) и плоскости (образец) при сохранении неизменными основных параметров испытаний и положения пятна контакта. Измерение коэффициента трения реализуется с повышенной точностью и локальностью за счет жесткого фиксирования пятна контакта на образце при любых изменениях коэффициента трения в процессе испытаний. Участок образца, подвергаемый трению и износу, не смещается, трение постоянно происходит на ювенильной поверхности образца, и коэффициент трения характеризует взаимодействие между контртелом и материалом, не подвергнутым воздействию среды. В результате применения устройства осцилляции величины силы трения, обусловленные смещением пятна контакта, устраняются, и, при неизменных характеристиках регистрирующего прибора, повышается соотношение сигнал/шум. Это увеличивает точность измерений, позволяет снижать испытательные нагрузки и подвергать исследованию поверхностные слои микронной и субмикронной толщины с высокой локальностью измерений, как по глубине слоя, так и по его поверхности.

Основной проблемой устройств класса [4] является наличие жесткой механической связи приводного вала с нагрузочным валом, вызывающей в ряде случаев повреждение привода при избыточных нагрузках. Эту проблему удалось преодолеть путем использования методики бесконтактной передачи и измерения крутящего момента. Особое внимание было посвящено также вопросам повышения помехоустойчивости и снижения температурного дрейфа измерительной системы. С этой целью в разработанном устройстве в качестве деформируемого связующего элемента использовано поле постоянных магнитов по схеме, представленной на рисунке 1.

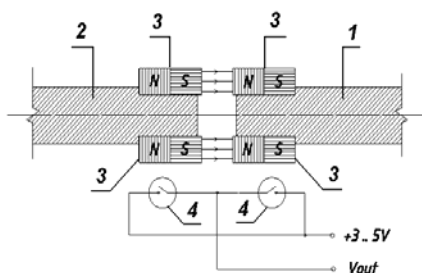


Рисунок 1 – Схематическое изображение устройства для бесконтактной передачи и измерения крутящего момента:

1 – приводной вал; 2 – нагрузочный вал;
3 – постоянные магниты; 4 – герметичные контакты

Как видно из схемы, в случае холостого хода нагрузочного вала длительность сигнала высокого уровня на выходе минимальна и может быть

определена с помощью таймера. При возникновении на нагрузочном валу крутящего момента поле постоянных магнитов деформируется и возникает отличный от нуля угол запаздывания нагрузочного вала относительно приводного вала. Продолжительность сигнала высокого уровня на выходе схемы ИЛИ, построенной на основе герконов, увеличивается. При этом измерительная система не связана механически с узлами, подверженными разогреву и ее температурный дрейф незначителен. Одновременно, благодаря наличию электромеханической развязки в устройстве может быть реализована полная герметизация нагрузочного вала.

Для проведения измерений испытуемый узел трения присоединяют к нагрузочному валу, затем придают вращение приводному валу и регистрируют длительность сигнала высокого уровня T . При неизменных условиях испытаний длительность сигнала холостого хода t известна, и программным методом рассчитывается приращение длительности сигнала высокого уровня $D = T - t$. По известной калибровочной зависимости приращения D от крутящего момента M программным методом определяют значение крутящего момента и рассчитывают коэффициент трения. Регистрация и обработка данных производится с помощью специально разработанного программно-аппаратного комплекса, совместимого как с интерфейсными устройствами на базе *PIO 821h*, так и с микропроцессорами *ATmega 328*. Программное обеспечение *TriboTest 2.2* обладает дружественным интерфейсом, совместимым с версиями операционных систем от *Windows XP* до *Windows 7*.

Ниже, в качестве примера, приводятся результаты исследования основных трибологических свойств ряда перспективных структур при использовании в качестве контртела диска из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Типичный результат измерений коэффициента «сухого» трения по усовершенствованному методу [4] представлен на рисунке 2. Нагрузка на образец во всех опытах сохранялась равной 0,2 Н.

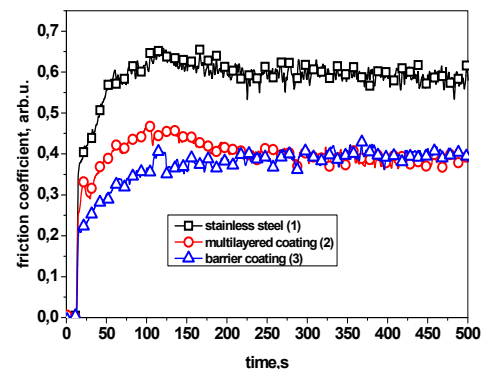


Рисунок 2 – Коэффициент «сухого» трения в зависимости от времени испытаний:

1 – исходный образец нержавеющей стали;
2 и 3 – сталь с покрытием

В качестве примера на рисунке 2 представлены зависимости коэффициента трения от времени, полученные в процессе испытаний двух новых типов покрытия: многослойного (16 слоев) с периодом Ti/TiN (кривая 2) и покрытия Ti–Al–N/Ti–Al (кривая 3), служащего эффективным барьером для диффузии водорода в атомной энергетике. Показано, что при нанесении покрытий снижение коэффициента трения скольжения может составлять от 30 до 40 %.

На трибограмме исходного состояния заметны выбросы, свидетельствующие о когезионных процессах, в то время как защищенный покрытием материал не склонен к налипанию. Отметим, что при неизменных условиях испытаний вслед за измерением коэффициента трения может быть определена износостойкость трибосопряжения путем измерения протяженности сформировавшегося трека износа. Как показали микроскопические исследования, трек износа исходного образца содержит ярко выраженные следы когезионных процессов и имеет большую протяженность. Для образцов, защищенных покрытиями поверхность трека износа близка к зеркальной, а длина трека существенно сократилась. Подавление когезионных процессов сопровождалось существенным увеличением износостойкости трибосопряжений, наиболее выра-

женным для случая многослойного покрытия. Увеличение износостойкости при нанесении защитных слоев составило от 150 до 200 % для слоев 2 и 3, соответственно.

Литература

1. Borets A.A. Structure and phase transformations in chemical active ions bombarded thin Al films / A.A. Borets, F.F. Komarov, V.V. Pilko, S.J. Shiryajev // Radiation Effects Letters. – 1986, v. 87, № 4. – Pp. 163–168.
2. Katsapov A.N. Metals and alloys surface hardening method / A.N. Katsapov, F.F. Komarov, V.V. Pilko, A.A. Pugatshov // USSR Patent. №166395, 30.11.1988.
3. Klimovich I.M. Influence of Parameters of Reactive Magnetron Sputtering on Tribomechanical Properties of Protective Nanostructured Ti-Al-C-N coatings / I.M. Klimovich, F.F. Komarov, V.A. Zaikov, A.R. Kuleshov, V.V. Pilko // Journal of Friction and Wear. – 2018. – Vol. 39, No. 2. – P. 92–98.
4. Комаров Ф.Ф. Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости» Ф.Ф. Комаров, В.В. Пилько, В.Н. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 122–128.
5. Пилько В.В. Устройство для измерения коэффициента трения поверхностных слоев / Пилько В.В., Пилько В.В.(мл.) // Положительное решение на выдачу патента РБ №20190292 от 27.03.2020 г. – С. 1–6.

УДК 535.421

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ Полещук Н.Н., Рудницкий А.С.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

В дифракционных полях изолированных диэлектрических частиц с размерами порядка длины волны формируются вблизи их поверхности области повышенной интенсивности волнового поля, получившие название фотонных наноструй (ФНС). Особенность ФНС заключается в высокой пространственной локализации светового поля в поперечном к направлению падающего излучения сечении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Эта особенность ФНС и представляет интерес для практического применения их в нанопотонике, биологии, медицине, наноэлектронике, системах хранения данных. Сообщается о возможности разработки устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации и технологии безмасочного (прямого) нанесения шаблонов на поверхность фотосенсоров [1]. На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [2] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном квар-

цевом цилиндре микронных размеров. Большинство известных теоретических результатов относятся к цилиндрическим и сферическим частицам и получены на основе соответствующих аналитических решений дифракционных задач. В работе [3] на их основе показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. При исследовании фотонных наноструй на частицах более сложной формы используются численные методы. В работе [4] приведены примеры численного моделирования фотонных наноструй на частицах в виде осесимметричного конуса, пирамиды, бруска с треугольным профилем. Моделирование проводилось на коммерческом программном продукте CST Microwave Studio.

В работе [5] исследованы фотонные наноструи, сформированные квадратными микроступеньками на кварцевой подложке. Достаточно полный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям эффектов ФНС, можно найти в работе [6–8].