

4. Принципы самоорганизации / Сборник докладов. Редакторы: Хайнц фон Ферстер, Джордж У. Цоф. М.: Мир, 1966, 624 с.

5. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House, Norwood, 1999, 1230 p.

УДК 53.08: 004

## ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА МЕТОДОМ «ДИСК НА ПЛОСКОСТИ»

Кулешов В.Н.<sup>1</sup>, Пилько В.В.<sup>2</sup>, Пилько В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время весьма актуальной задачей точного машиностроения является экономия энергии и ресурсов [1]. Одним из перспективных направлений решения задачи зарекомендовало себя использование новых материалов с модифицированным поверхностным слоем, либо с нанесенным на поверхность покрытием. Вследствие многофакторности процессов обработки и нанесения неизбежно возникает задача их оптимизации. В большинстве случаев задача сводится к поиску экстремумов износостойкости и коэффициента трения. Экспрессное определение этих важных величин позволяет интенсифицировать процессы оптимизации. Намечившиеся в последнее время тенденции перехода к наноразмерным структурам и тонким слоям [2] вынуждают повышать локальность методов измерения по поверхности и глубине материала. Унифицированные стандарты методов измерения износостойкости и коэффициента трения в настоящее время отсутствуют. Перспективным способом решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам и контртелу. Основным источником новой научной информации при исследованиях служит величина коэффициента трения, и диапазон ее изменения в зависимости от времени испытания.

Среди используемых в настоящее время установок для трибологических исследований аналогами разработки могут послужить устройства для измерения коэффициента трения методом «индентор на диске» [3]. Величина силы трения, при этом, как правило, определяется путем регистрации величины изгиба упругой консоли, прижимающей индентор к поверхности вращающегося испытываемого диска. Измерение величины изгиба консоли производится, в основном, тензочувствительными датчиками. Главным недостатком этих машин трения при тестировании плоских образцов является проблема непостоянства коэффициента трения и скорости износа поверхностного слоя на различных испытываемых участках круговой траектории, вызывающая осцилляции полученных значений. Дополнительным недос-

татком метода является цикличность процесса, сопровождающаяся воздействием среды на сформированную ювенильную поверхность трека износа в промежутках между проходами индентора. Сопутствующим конструктивным недостатком является отклонение формы трека от геометрической окружности при изгибе консоли. При использовании «пальчиковых» образцов возникают проблемы постоянства траектории, изготовления образцов сложной формы и точности ее воспроизведения.

Наиболее близким по конструкции и принципу действия к разработанному прибору является модифицированный трибометр Шкоды–Савина [4], реализующий механизм трения и износа «диск – плоский образец», при котором сила трения определяется путем регистрации величины деформации упругой стойки, удерживающей образец. Основным недостатком данного устройства является смещение пятна контакта контртела с образцом при изгибе стойки.

При разработке измерительного комплекса основное внимание было уделено устранению перечисленных выше недостатков. Установлено, что для решения поставленных задач наиболее эффективным методом исследования коэффициента трения и износостойкости является контакт вращающегося диска (контртела) и неподвижной плоскости (образец) при сохранении неизменными основных параметров испытаний и положения пятна контакта.

Схематично конструкция испытательного блока прибора представлена на рисунке 1.

Измерение коэффициента трения реализуется с повышенной точностью и локальностью за счет жесткого фиксирования пятна контакта на образце О при любых изменениях коэффициента трения в процессе испытаний. При этом узел нагружения Н и крепления образца выполнен жестким, а диск Д вместе с двигателем привода СД смонтированы в виде единого узла привода, вращающегося на оси и застопоренного упругой тензометрической пластиной Т.

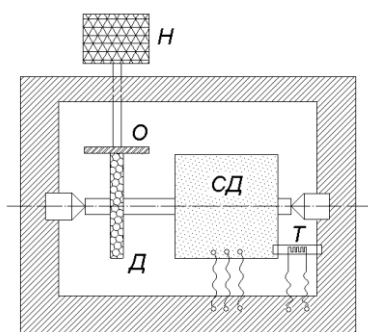


Рисунок 1 – Конструкция испытательного блока:  
 О – образец; Д – диск; Н – нагрузка;  
 СД – синхронный двигатель; Т – тензодатчик

Конструктивно результат достигается за счет того, что генерируемая в паре трения сила изгибает стопорящую узел упругую пластину, при этом пятно контакта образца с контртелом остается неподвижным. 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 амплитуды величины сигнала от тензомоста, 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. Сигнал разбаланса тензомоста обрабатывается в режиме реального времени АЦП – платой ICP DAS PIO-821H, подключенной к системной шине персонального компьютера с установленным драйвером «PIO-821 Series Classic Driver» версии не ниже 1.0.1. Данные поступают в специально разработанную для трибологических испытаний программу регистрации напряжения «Tribology Logger 2013 v.1.00».

Разработанный прибор характеризуется простой формой образца, возможностью использования смазывающих и охлаждающих агентов, широким диапазоном и высокой точностью контроля нагрузки и силы трения. Условия испытаний максимально приближены к реальным условиям эксплуатации, предусмотрена возможность получения характеристик процесса износа.

В качестве примера реализуемых прибором возможностей при исследовании покрытий и модифицированных слоев на рисунке 2 представ-

лены зависимости коэффициентов трения от времени испытаний, полученные в процессе оптимизации состава и условий реактивного магнетронного нанесения наноструктурированных покрытий Ti-Zr-Si-N на стали 12X18H10T. Толщина покрытий выбиралась одинаковой и не превышала 1,5 мкм, а парциальное давление реактивного газа (азота) увеличивалось в ряду А – В – С с заданным шагом.

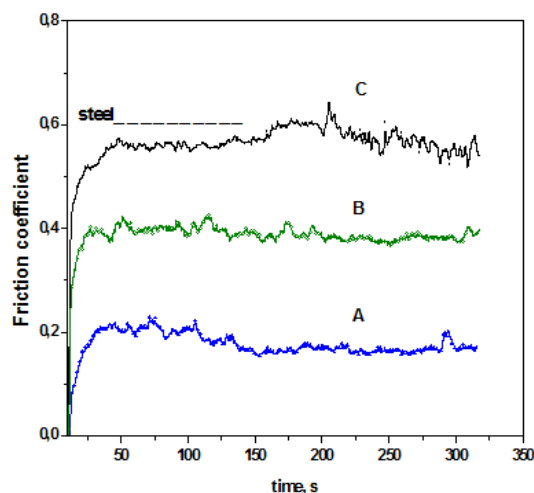


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от времени испытаний для покрытий Ti-Zr-Si-N на подложке из нержавеющей стали 12X18H10T

Установлено, что значения коэффициентов трения в зависимости от условий нанесения контролируются в широком диапазоне от 0,17 до 0,58. Наименьшими коэффициентами трения характеризуются покрытия, полученные в условиях недостатка азота (кривая А). Дополнительные исследования, осуществленные путем профилирования сформированных треков износа, позволили произвести оптимизацию трибологических свойств для многофакторного процесса нанесения наноструктурированных слоев.

#### Литература

1. Приоритетные направления научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы, Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190.
2. Cavaleiro A., De Hossou J. T Nanostructured Coatings, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
3. Гриб, В.В. Лабораторные испытания на трение и износ / В.В.Гриб, Г.Е.Лазарев // М. Наука, 1968, 142 с.
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. 279–285.