

**Стельмах А.У.**Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина**АДГЕЗИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ  
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ.  
СООБЩЕНИЕ II. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И  
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЧНЫХ  
СЛОЕВ ТРИБОСИСТЕМ****Введение**

Повышение работоспособности трибосистем с граничным трением, являющееся одним из основных и актуальных направлений современной трибологии. Решение проблем граничного трения в значительной степени зависит от эффективности используемых методов исследования граничных слоев. В граничных слоях трибосистем протекает комплекс взаимосвязанных физико-химических, физико-механических и гидродинамических процессов, оказывающих доминирующее влияние на трибологическое поведение контакта. Существующая современная диагностика систем «твердое тело – смазочная среда – твердое тело» основана, главным образом, на изучении физико-химических и физико-механических явлений на рабочих поверхностях трибоконтакта с использованием традиционных материаловедческих методов анализа их состава и структуры [1 - 3]. При этом практически полностью игнорируется исследование динамических процессов в граничных слоях, что обусловлено существующим традиционным адгезионно-деформационным подходом к проблеме граничного трения [4]. Вместе с тем, последние исследования граничных слоев [5 - 7] указывают на ограниченность такого подхода и на необходимость комплексного изучения микротечений в граничных слоях, термо- и кавитационных эффектов в их взаимосвязи с адгезионно-деформационными явлениями на рабочих поверхностях трибоконтакта.

Цель настоящей работы – разработать и создать измерительно-испытательный трибологический комплекс и квалификационный метод определения трибологических свойств трибосистем с граничным трением с учетом исследования динамических процессов в граничных слоях (ДПГС).

**Приборы, материалы и методы исследования граничных слоев**

В качестве основной модельной смазочной среды использовался авиационный керосин ТС-1, как прозрачная, маловязкая среда, исключая при трении скольжения на малых скоростях (0,2 ... 0,8 м/с) и малых нагрузках (1 ... 10 Н) возникновение режима гидродинамического бесконтактного трения. Также изучалось поведение смазочных слоев различных технических товарных и модельных масел: глицерина ХЧ, вакуумного масла ВМ-6, моторного синтетического масла ИПМ-10, холодильного масла ХФ 12 - 16, авиационного гидравлического масла АМГ-10, моторного минерального масла МС-20, диалкилбензолного синтетического масла, дистиллированной воды и др.

При разработке приборов предусматривалась возможность измерения силы трения и величины износа на модельном подшипнике скольжения, а также плавного регулирования условий трения в диапазоне: линейная скорость скольжения от 0,2 до 2,0 м/с, осевая нагрузка от 4,0 до 20,0 Н, максимальная объемная температура среды не более 60 °С.

**Приборы для визуального изучения ДПГС**

Для визуального изучения динамических процессов, в частности, интенсивности возникающих встречных течений, возникающих в граничных слоях трибоконтакта, было разработано несколько лабораторных приборов трения с оптически-прозрачным линейным контактом [8]. С целью непосредственного наблюдения за возникающими течениями смазки относительно линии контакта в диффузорной области (ДО) и в конфузорной области (КО) контакта, в приборе АСБ-01 (рис. 1) контакт плоского модельного и прозрачного подшипника скольжения с валом осуществлялся сверху. Это позволяет наблюдать за течениями смазочной среды через полированные грани прозрачного параллелепипеда. Материал модельного подшипника – оргстекло, кристалл парателлурита ( $TiO_2$ ), сапфира или кварца. В качестве модельного вала использовался фторопластовый или стальной (ШХ-15, HRC 59 ... 63) ролик с полированной ( $R_a < 0,04\mu m$ ) рабочей поверхностью, образующей цилиндр. Диаметр модельного вала – 90мм, длина модельного вала или ширина рабочей поверхности, образующей цилиндр вала – 9 мм (фторопластовые) и 16 мм (стальные). Исследуемая среда подавалась в контакт движущейся поверхностью путем подхвата её нижним сегментом, который погружался в ванночку с жидкостью.

Прибор трения АСБ-02 отличается от АСБ-01 тем, что контакт плоского модельного подшипника с рабочей поверхностью модельного вала создается не сверху, а снизу, и смазывание контакта производится путем его полного погружения в прозрачную ванночку с предварительно наполненной рабочей жидкостью (рис. 2, а).

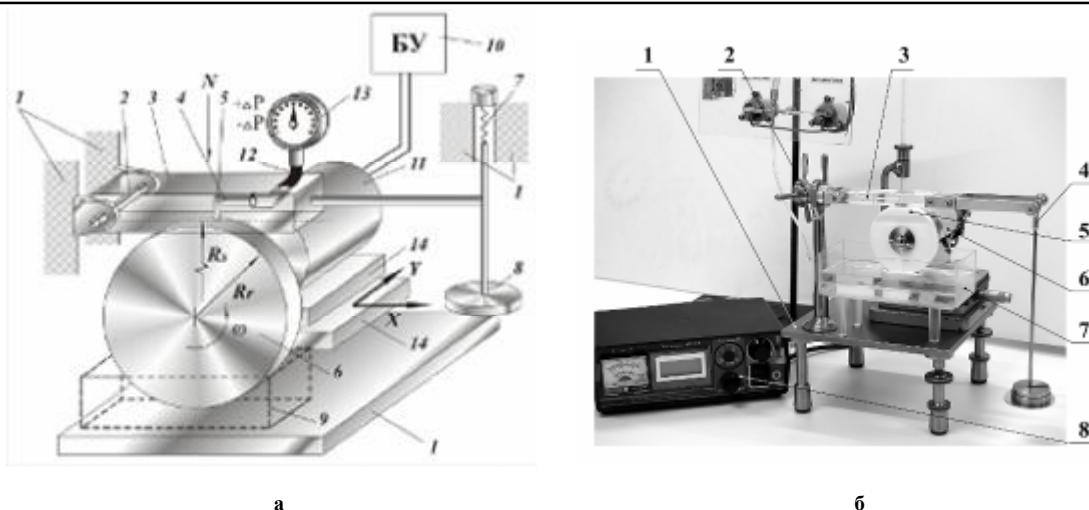


Рис. 1 – Схема (а) и внешний прибор трения скольжения АСБ-01 (б) с оптическим каналом исследования динамики граничных слоев и верхним положением контакта

В приборах АСБ-01 и АСБ-02 предусмотрено измерение локальных давлений в граничных слоях в процессе трения. Для этого в прозрачном модельном подшипнике (параллелепипеде) на рабочей поверхности трения делалось приемное устройство в виде отверстия или щели (диаметр отверстия – 0,2 мм, ширина щели – 0,23...0,3 мм, а длина – 6 мм). Такое приемное устройство через каналы, изготовленные внутри образца, штуцер и гибкий шланг соединялось с измерительными приборами (манометры, вакуумметры, электромеханические или тензометрические датчики давления).



Рис. 2 – Внешний вид приборов трения АСБ-02(а), АСБ-02Т(б)

Конструкция приборов АСБ-01 и АСБ-02 позволяет визуально наблюдать непосредственно возникновение встречных течений и эффекты кавитации в различных средах в процессе трения [9, 10]. В качестве примера на рис. 3 представлены линии тока в керосине (а) и эффекты кавитации (б, в).

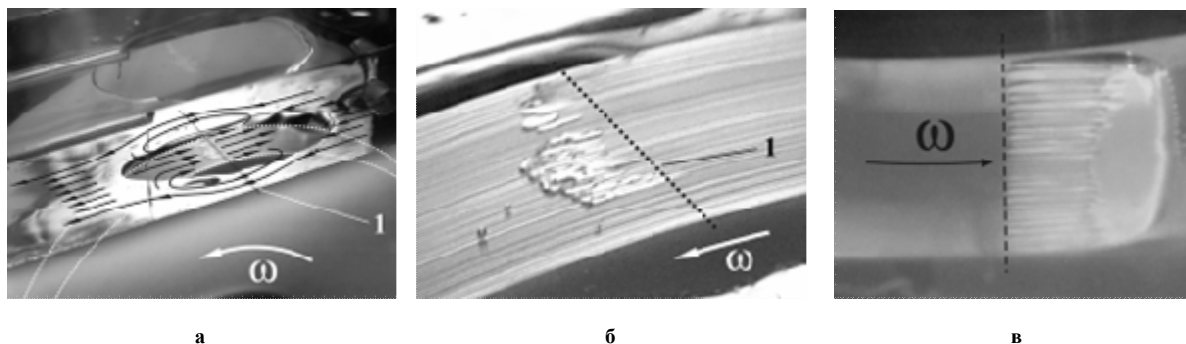
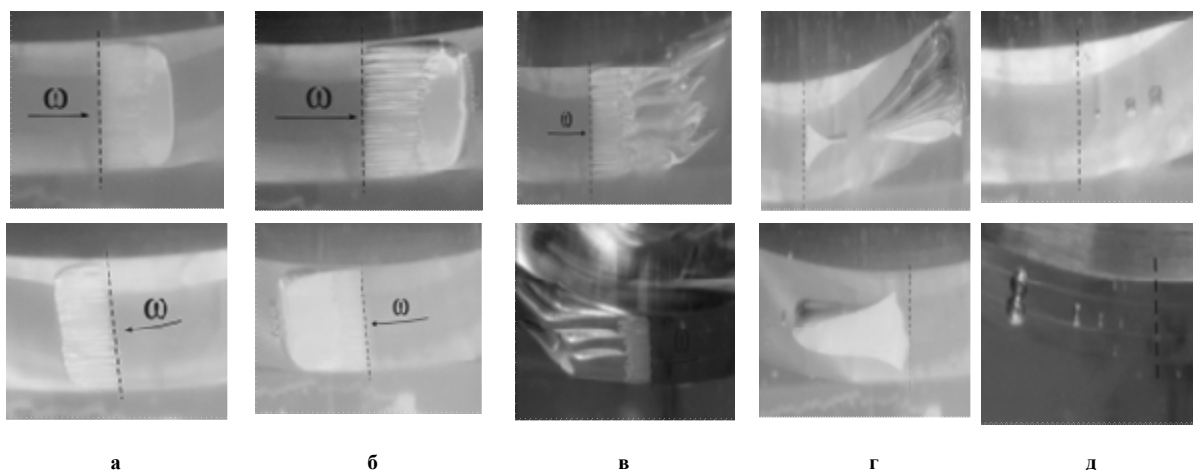


Рис. 3 – Линии тока встречных течений (а) и эффекты кавитации на приборе АСБ-01 (керосин ТС-1) (б) и на приборе АСБ-02 (масло ИПМ-10), (в)

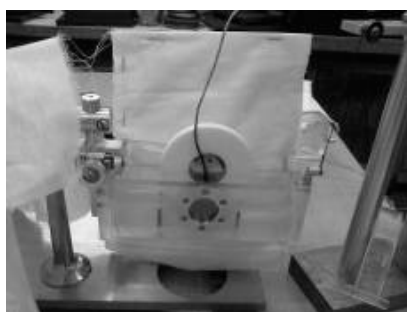
Кроме того, разработанные приборы позволяют исследовать все стадии нуклеации, роста и образования газо-воздушной полости, находящейся в состоянии динамического равновесия, процесс кавитации, а также частичное растворение микропузырьков в диффузорной области контакта (рис. 4).



**Рис. 4 – Стадии образования газовой полости разрезания граничных слоев в диффузорной области трибоконтакта скольжения (ШХ-15 –  $\text{TiO}_2$ , масло ИПМ-10) при разных направлениях скольжения (вверху – против часовой стрелки, внизу – по часовой стрелке): а – нуклеация в начальный момент трения; б – рост и динамическое равновесие с увеличением скорости; в – кавитация; г, д – частичное растворение газовой полости после прекращения трения**

#### ***Приборы для изучения тепловых эффектов в трибоконтакте***

Для изучения тепловых процессов в граничных слоях первостепенное значение имеет распределение температуры в контактной области. С этой целью был изготовлен прибор АСБ-02Т, в котором модельный подшипник скольжения представляет собой плоскую поверхность в виде плоскопараллельного диска, изготовленного из германиевого стекла высшего качества, полированного, просветленного, имеющего защитное покрытие. Этот диск герметично устанавливался в днище камеры, которая заполнялась вазелиновым маслом ХЧ, пропускающим 90 % теплового молекулярного излучения в соответствующем диапазоне инфракрасного (ИК) спектра (от 7,5 до 13,0 мкм). В этом диапазоне ИК-излучения германиевое стекло и вазелиновое масло практически прозрачны, что позволило с помощью тепловизора *ThermaCAM<sup>TM</sup>65* (рис. 5) исследовать распределение температуры по полю зрения в контактной области модельного подшипника скольжения при трении в динамике с чувствительностью 0,5 °С.



а



б

**Рис. 5 – Внешний вид машины трения АСБ-02Т (а), тепловизора *ThermaCAM<sup>TM</sup> R65* (б) и их расположение в ходе исследований**

После тщательной юстировки и фокусировки контрообразец путем медленного нагружения поднимался до соприкосновения с поверхностью, образующей цилиндр фторопластового ролика, создавался линейный контакт, и видекамера фиксировала повышение температуры в нем на 3,5 °С относительно температуры окружающей среды. При осевой силе сжатия 40 Н образовывался контакт шириной около 2,8 мм. Плавное снятие нагрузки и вывод из контакта германиевого контрообразца не приводили к выравниванию температуры, т.е. тепловой след от созданного разовым сжатием контакта оставался неизменным (рис. 6). Этот факт, также как и распределение тепловых потоков при трении, требует дополнительного изучения, что может быть достигнуто с использованием разработанного прибора АСБ-02Т. Прямые измерения тепловых процессов в трибоконтакте современной тепловизионной техники на приборе АСБ-02Т позволили подтвердить возникновение в эластогидродинамическом контакте термоэффекта [4], который не находит однозначного объяснения без учета динамических процессов в граничных слоях смазки.

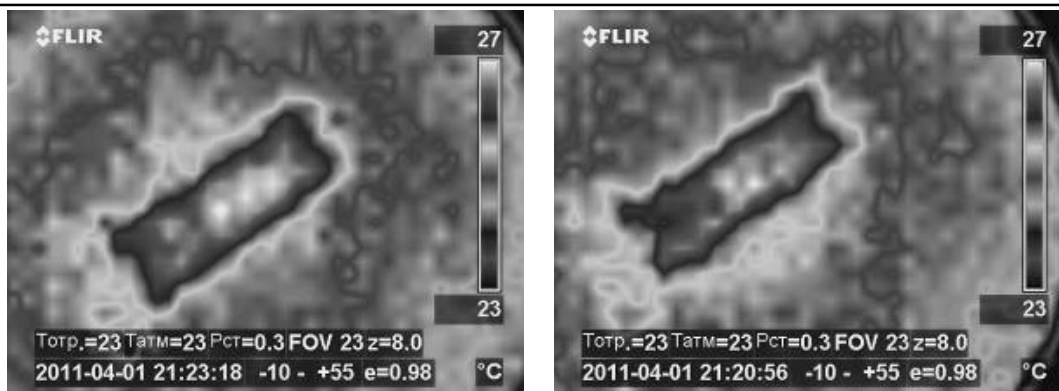


Рис. 6 – Распределение температуры в контактной области при сжатии поверхности, образующей цилиндр ролика, с германиевым плоским стеклом в вазелиновом масле (а) и то же – после снятия нагрузки и создания зазора между поверхностями 1 мм через 1 мин

### *Прямые измерения давления в граничных слоях при трении*

В рамках ЭГД-теории расчетные контактные напряжения, возникающие в поверхностях при сжатии, отождествляются с давлением, развиваемым в граничных слоях при трении. То есть, давление в смазочной пленке ЭГД-контакта всегда выше давления окружающей среды. Такое же мнение принято и в адгезионно-деформационном подходе, где динамические процессы в граничных слоях игнорируются. Вместе с тем, для установления взаимосвязи трибологического поведения контакта с динамикой граничных слоев принципиально важным является прямое экспериментальное измерение локального фактического давления в граничных слоях смазки трибоконтакта при трении в динамике.

В приборах трения АСБ-01, АСБ-02, АСБ-02(Т) обеспечено постоянство линейного контакта и равномерное распределения мгновенных контактных напряжений при перемещении рабочей поверхности модельного вала благодаря использованию системы самоустановки контакта, как в приборе АСК-01 [11]. Это достигнуто тем, что ось качания модельного подшипника пересекает ось нагружения и ось вращения модельного вала в его центре масс. Кроме того, в этих приборах реализовано электромеханическое сканирование контактных областей приемными устройствами (отверстиями круглого или прямоугольного сечения в виде щелей), расположенными на контактной поверхности модельного подшипника, путем перемещения электропривода модельного вала с контролируемой скоростью шаговым двигателем. Разработанные и созданные специальные АЦП, ЦАП и программа управления параметрами трения обеспечивают их стабильность благодаря обратным связям с соответствующими датчиками. Интерфейс программы (рис. 7, а) позволяет регистрировать локальное давление (рис. 7, б) на срезе приемного отверстия, его координату, скорость сканирования и другие параметры.

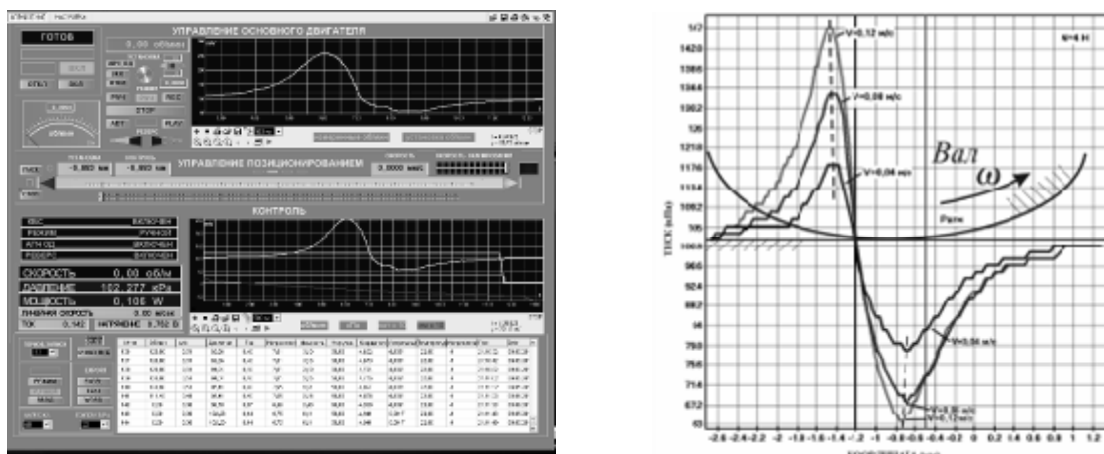
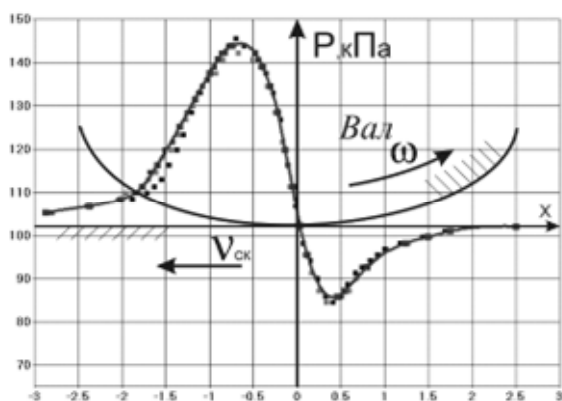


Рис. 7 – Графический интерфейс программного обеспечения (а), где плавная кривая отражает распределение давления (повышение и понижение) при сканировании перпендикулярно контакту, а также результаты экспорта с первичной обработкой измеренных параметров (б) после серии экспериментов при линейной скорости скольжения 0,251 м/с и разных осевых нагрузках

Графический интерфейс в совокупности с программными модулями математической обработки экспериментальных данных позволяют создать наглядную, удобную и относительно простую автоматизированную систему регистрации параметров и управления режимами трения скольжения.

Использование модернизированного прибора АСБ-02 позволило впервые провести прямые экспериментальные измерения локального давления в контактных областях и установить наличие разнополярного градиента давления в граничных слоях смазки при трении скольжения по обе стороны контакта (положительный в КО и отрицательный в ДО).

Многочисленные измерения распределения давления в контактной области на приборе АСБ-02 в среде масла ХФ 12-16 при сканировании в направлении (рис. 8, а) и против (рис. 8, б) направления скольжения вала показали, что относительная погрешность не превышает 5 %. При максимальных расчетных контактных напряжениях 0,615 МПа по Г. Герцу (диаметр вала – 0,08 м, ширина вала – 0,009 м, модуль упругости фторопласта 4 – 450 МПа, модуль упругости оргстекла неориентированного – 2900 МПа) модельный вал вращался с частотой 15 об/мин., т.е. с линейной скоростью скольжения в контакте 0,06 м/с, а скорость сканирования, т.е. перемещения контрообразца (оргстекло), составляла 0,011 мм/с. При таких условиях были получены распределения давления в контактной области с постоянными скоростью и направлением скольжения вала и различным направлением сканирования (рис. 8).



**Рис. 8 – Распределение давления в контактной области при скольжении вала с линейной скоростью 0,251 м/с и сканировании со скоростью  $V_{ск} = 0,00036$  м/с: а – в направлении вращения вала; б – против направления вращения вала**

Обращает на себя внимание закономерное понижение давления в конфузурной области и повышение степени разрежения – в диффузорной при изменении направления сканирования со встречного на обратное. Симметричное относительно вертикальной оси распределение давления в граничных слоях и его характерное изменение в КО и ДО областях контакта при разных направлениях сканирования с одинаковой скоростью объясняется определенными изменениями протекающих динамических процессов в граничных слоях в случае чистого скольжения и качения с проскальзыванием.

Для косвенного измерения коэффициента трения была произведена доработка прибора АСБ-02 (рис. 9). Модернизация прибора АСБ-02 заключалась в установке дополнительных электронных датчиков давления ДД и разрежения ДР для измерения соответствующих параметров в зоне контакта модельного вала с поверхностью плоского неподвижного прозрачного модельного подшипника, оптического датчика частоты оборотов вала ДЧВ и датчика определения потребления тока ДТ основного двигателя АД, доработке механизма позиционирования на базе шагового двигателя ШД. Разработанные схемы модуля измерения напряжения ДН и потребления тока ДТ позволяют получать исходные данные для расчета мощности потерь АД в процессе трения скольжения при фиксированной частоте вращения и различных нагрузках.

Блок управления БУ выполняет следующие функции:

- обработку сигналов датчиков ДР, ДД, ДЧВ, ДТ, ДН;
- формирование и передачу массива данных в ПК;
- прием данных из ПК для формирования сигналов управления АД и ШД.

Программное обеспечение выполняет функции формирования алгоритма управления исполнительными устройствами, отображение в цифровом или в графическом виде рабочих параметров и режимов лабораторной установки АСБ-02.

Управление скоростью позиционно-сканирующего механизма при исследовании процесса трения скольжения автоматизировано. Предусмотрена ручная юстировка зоны контакта. Частота вращения основного двигателя стабилизирована и автоматически поддерживается на заданном уровне независимо от влияния нагрузки и скорости сканирования.

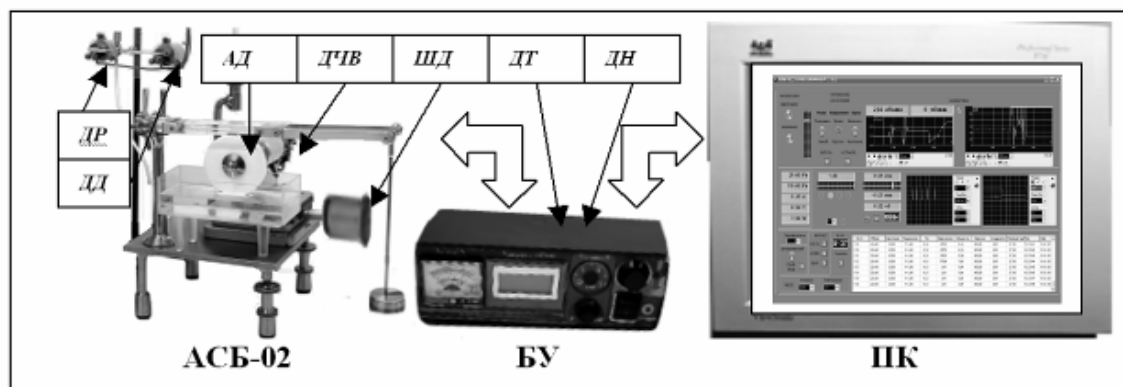


Рис. 9 – Структура автоматизированной измерительно-испытательной системы:

АСБ-02 – лабораторная установка для измерения компрессионно-вакуумных процессов; БУ – блок управления; ПК – персональный компьютер; АД – асинхронный двигатель; ШД – шаговый двигатель; ДР – датчик разрезания; ДД – датчик давления; ДЧВ – датчик частоты вращения; ДТ – датчик тока; ДН – схема измерения напряжения

Формирование данных табл. 1 осуществляется в ручном или в автоматическом режиме с предварительной установкой периода записи. Предусмотрена возможность экспорта данных в программу EXCEL с целью дальнейшей статистической обработки.

Таблица 1

Массив данных, получаемых в ходе испытаний на приборе АСК-02

№ пп	Частота об/мин,	Избыточное давление, кПа	Разрежение, кПа	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Осевая нагрузка	Координата, мм	Температура, °С	Время	Дата
0	100	255	255	2,55	60	153	0	-1	0	20:02:41	19.03.2011
1	115,5	255	255	2,55	60	153	0	-0,91	0	20:02:59	19.03.2011
2	132,03	255	255	2,55	60	153	0	-0,65	0	20:03:13	19.03.2011
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	187,83	255	255	2,55	60	153	0	-0,23	0	20:04:32	19.03.2011
13	211,6	255	255	2,55	60	153	0	0,01	0	20:04:49	19.03.2011

Графический интерфейс (рис. 9) программы дает возможность визуально наблюдать в реальном времени необходимые графические зависимости с сохранением изображений в памяти ПК.

Для исследования динамических процессов, возникающих при трении граничных слоев при относительном движении поверхностей с адсорбированными фрагментами граничных слоев смазочной среды, был разработан и изготовлен лабораторный прибор АСБ-03 (рис. 10). Этот прибор включает в себя механический модуль (электропривод прецизионного вала через шкивы и ременную передачу, который вращается относительно неподвижного блока с приемным устройством) и электрический модуль управления частотой вращения с обратной связью и регистрацией потребляемой мощности электродвигателя. В отличие от предыдущих приборов, здесь в качестве приемного устройства использована длинная щель (20 мм) и реализована возможность ее изменения от 0 до 5 мм, а также точного регулирования зазора между валом и поверхностью с приемным устройством и точного позиционирования щели относительно оси вращения вала. На блоке с приемным устройством размещена система тонкой регулировки микрометрическими винтами (рис. 10, б).

Прибор АСБ-03 позволяет изучать распределение давления, возникающего в граничных слоях при их движении с поверхностью вращающегося модельного вала с плоской поверхностью, расположенной на определенном расстоянии с установленным минимальным зазором от 0 до 5 мм, шагом 25 нм. В качестве измерительного прибора используется мановакуумметр МВТП-160А. Для измерения расхода жидкости при различном избыточном давлении используются дроссельный кран тонкой регулировки и расходомер в виде мерного тарированного цилиндра. Получаемые результаты позволили произвести принципиальную оценку возможности использования динамических процессов в диффузорной и конфузорной областях контакта для разработки и создания принципиально новой трибомолекулярной техники нагнетания и разрежения среды.

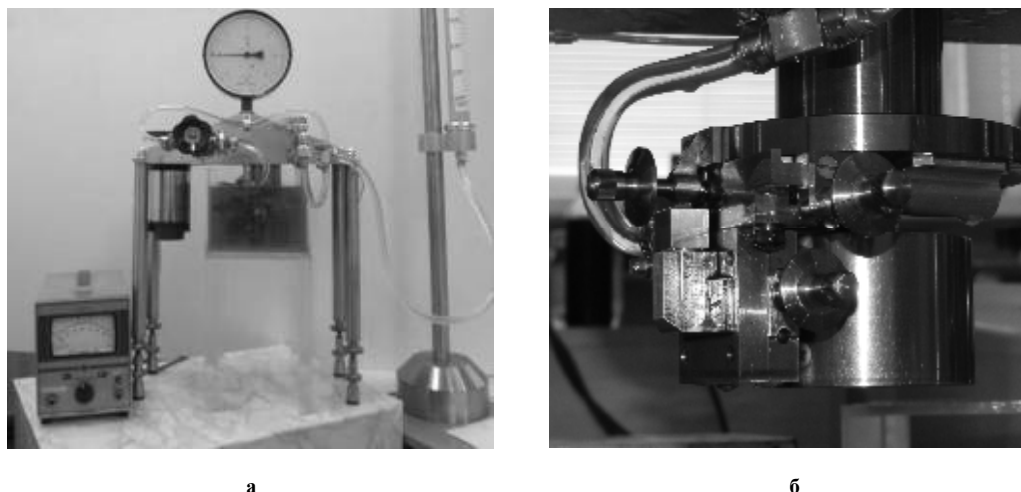


Рис. 10 – Внешний вид лабораторного прибора трения граничных слоев АСБ-03(а) и его неподвижного блока 1 с регулировочными винтами позиционирования приемного устройства относительно поверхности вала 2 (б)

***Измерительно-испытательный комплекс для исследования трения в условиях граничной смазки***

С целью исследования влияния постоянства мгновенных контактных напряжений на противоизносные свойства трибосистемы скольжения с линейным контактом наногеометрических поверхностей трения была разработана и создана машина трения со стабилизированными мгновенными контактными напряжениями и определенными радиальными отклонениями модельного вала. На рис. 11 представлена схема и внешний вид созданной машины трения АСК-01 [9], где при измерении силы трения ось нагружения, ось вращения модельного вала и ось, вокруг которой колеблется плоский неподвижный образец, пересекаются в центре масс контробразца. Таким образом, мгновенные контактные напряжения соответствуют расчетным, что подтверждается образованием равномерно по всей поверхности контробразца вторичных структур.



Рис. 11 – Внешний вид машины трения АСК-01 (а) и модельной трибосистемы скольжения с линейным контактом (б)

Большинство углеводородных неполярных смазочных материалов при смачивании поверхностей деталей машин образуют на них эпитропные жидкокристаллические структуры в нано- и микрометровом диапазоне. Так как их структура и свойства в значительной степени определяются шероховатостью рабочей поверхности, то необходимо иметь максимально полную информацию о трехмерном состоянии исходной поверхности. Наногеометрическая поверхность модельных образцов нуждается в соответствующем контроле, который необходимо осуществлять бесконтактным методом с высокой чувствительностью по профилю и достаточно большим полем зрения. Контактные профилографы-профилметры типа «Калибр М201» или М-283 не удовлетворяют этим требованиям из-за повреждения поверхности и малой информативности. Поэтому совместно со специалистами лаборатории акустооптики радиофизического факультета КНУ им. Тараса Шевченко был разработан и создан [12] лазерный сканирующий бесконтактный дифференциально-фазовый микроскоп-профилограф-профилметр (ЛСДФМП) (рис. 12). Экспериментально установлено, что именно 3D состояние рабочих поверхностей характеризует их трибологические свойства, а не стандартизованные параметры шероховатости ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $t_p$  и др.), рассчитываемые лишь по одной профилограмме.

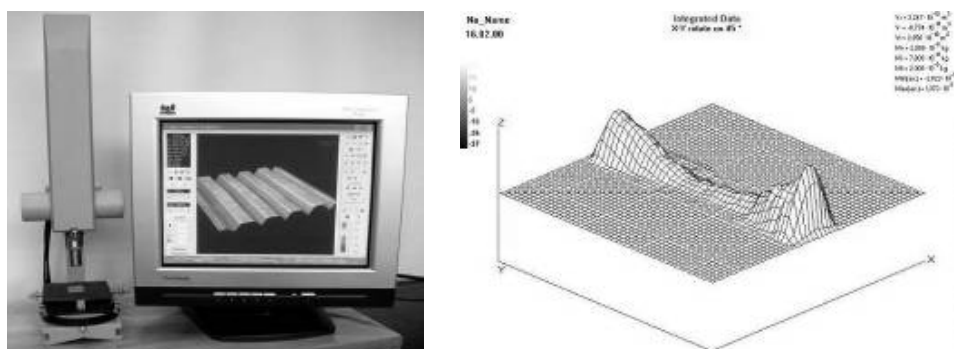


Рис. 12 – Внешний вид лазерного сканирующего дифференциально-фазового микроскопа-профилометра (а) и 3D инвертированное изображение дорожки трения (б)

Экспериментально установлено, что при одном и том же параметре шероховатости, в частности  $R_a$ , создаваемой различными технологическими приемами, поверхности имеют принципиально различные трибологические свойства, зависящие от их 3D состояния.

В результате сканирования поверхности ДФЛСПП можно получить ее двумерное дифференциально-фазовое изображение (рис. 13, а), состоящее из  $512 \times 512$  профилограмм. Путем интегрирования поверхность восстанавливается (рис. 13, б) с возможностью анализа любой из 1024 профилограмм (рис. 13, в). Новый способ двумерного представления трехмерного состояния поверхностей в виде амплитудно-частотно-пространственного распределения дисперсии показан на рис. 13, г, что чрезвычайно важно для трибосистем.

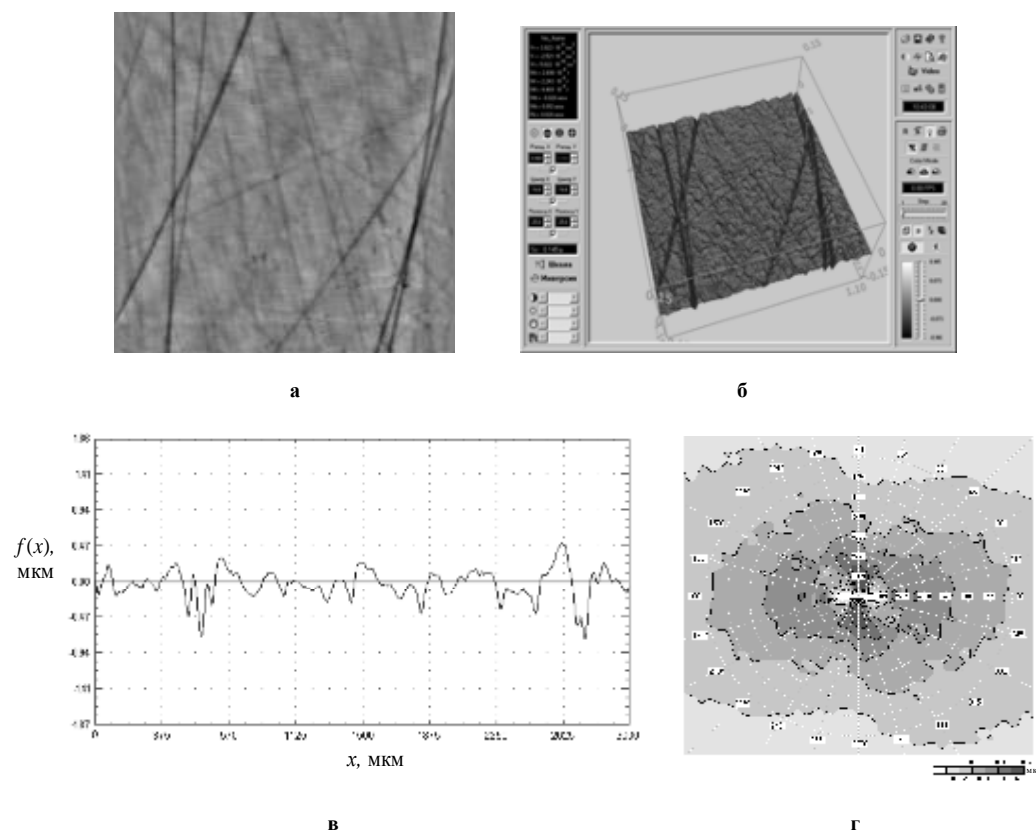


Рис. 13 – Рельеф реальной поверхности с параметром шероховатости  $R_a = 0,15$  мкм в двух- (а) и трехмерном (б) изображениях, один из ее профилей (в) и двумерное распределение дисперсии по направлению для отдельных спектральных составляющих пространственного спектра поверхности (г), (по радиусу – пространственные частоты в  $\text{см}^{-1}$ )

Таким образом, именно 3D микро- и нано- состояние поверхностей с учетом направления граничного трения дает информацию об эксплуатационных трибосвойствах рабочих поверхностей. Кроме шероховатости, ДФЛСПП позволяет определять объем изношенного материала в нанометрах кубических, что значительно повышает точность определения величины изнашивания.



Разработана новая многоступенчатая методика трибологических испытаний смазочных материалов, учитывающая влияние вторичных структур на износостойкость в ходе длительных испытаний [9]. Суть методики заключается в поэтапных измерениях величины износа во времени при прочих равных начальных условиях. По разработанным методикам были испытаны определенные товарные моторные и получены их противоизносные характеристики, которые полностью соответствовали результатам шести-часовых моторно-стендовых испытаний по пропорциям эффективности, что подтверждено соответствующим актом МНПП «Присадки».

В совокупности лабораторный прибор трения АСК-01, лазерный сканирующий дифференциально-фазовый микроскоп-профилометр ЛДФСМП и методики трибологических испытаний в условиях граничной смазки представляют собой комплекс приборов и методов, который внесен в перечень квалификационных методов УкрЦАХ СЕПРО Украины [13].

### **Приборы и методы для изучения влияния граничных слоев на контактные напряжения**

Прибор АСБ-01 позволяет исследовать влияние природы смазочной среды на реологические и физико-химические свойства граничных слоев, которые оказывают существенное влияние на фактические контактные напряжения поверхностей трения. Так, путем медленного прижатия плоского модельного подшипника 1 из оргстекла полированной поверхностью к рабочей поверхности вала 2 (рис. 14, а) при осевой нагрузке 4 Н на воздухе возникает тонкая прямоугольная площадка контакта. Ее длина соответствует длине модельного подшипника, т.е. высоте ролика - 9 мм, а ширина - 0,9 мм, что согласуется с расчетными значениями, полученными по формуле Г.Герца, учитывающей модули упругости материалов. В верхнем положении контакта (рис. 14, а) при его смачивании керосином капиллярный и иммерсионный эффекты проявляются визуально: ширина смоченного контакта при прочих равных условиях возрастает до 5,5 мм. Учитывая, что хорошо смачиваемым является модельный подшипник (оргстекло), а поверхность вала (фторопласт) - олеофобна по отношению к неполярным углеводородным жидкостям, можно предположить, что высота эпиторпных жидко-кристаллических слоев равна расстоянию между поверхностями в крайних положениях ширины контакта, которую можно оценить путем вычисления расстояния между поверхностями на краях мениска. Так, в керосине ТС-1 ширина смачиваемого контакта равнялась при диаметре ролика 80 мм - 7,4 мм, в масле ИПМ-10 - 7,9 мм, и в масле МС-20 - 11,4 мм. Вязкость этих масел при 20 °С соответственно составляла 1,34 сСт; 24,7 сСт и 1600 сСт. Толщина эпиторпного иммерсионного упорядоченного граничного слоя определялась из расчета постоянства нагрузки 1,5 Н без учета различий по коэффициенту поглощения в малых толщинах, которые соответственно составляли: для ТС-1 - 0,17 мм, для ИПМ-10 - 0,19 мм и для МС-20 - 0,4 мм. При этом учесть минимальную толщину смазочного слоя оказалось достаточно сложно, хотя она, безусловно, влияет на полученные результаты измерений ширины смоченного контакта. Таким образом, можно предположить, что границы смазочного слоя неполярной углеводородной среды, где прекращается иммерсионный эффект вокруг смоченного контакта, образованного криволинейными поверхностями олеофобной (фторопласт) и олеофильной поверхностью, являются показателем, отражающим толщину эпиторпного жидкокристаллического приповерхностного слоя, структурированных молекул в поле твердой подложки.

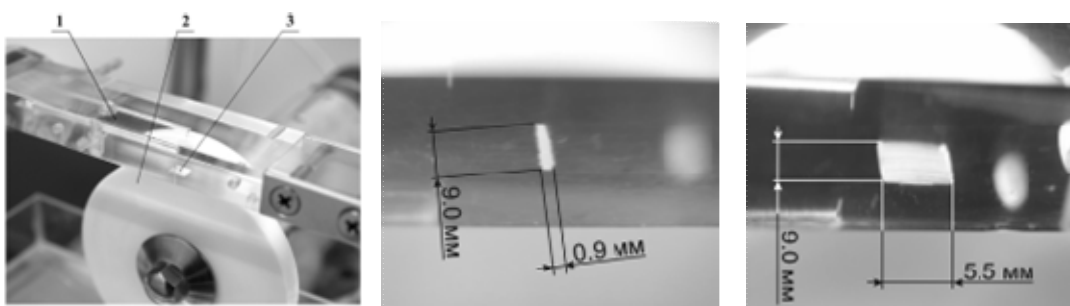


Рис. 14 – Вид контакта 3 машины трения АСБ-01, возникающего при соприкосновении плоского модельного подшипника 1 с модельным валом 2, смоченного авиакеросином ТС-1 (а) и образование линейного контакта на воздухе (б), а также при смачивании его авиакеросином при осевой нагрузке 4 Н

Исследования распределения напряжений поверхности модельного, а также плоского вала, проводились оптико-поляризационным методом. В качестве подшипника использовался кубик изотропного полимерного материала с полированными гранями. Параллельный пучок белого света или лазера направлялся фронтально к контакту, после чего он, пройдя через поляризатор, проецировался на экран. Такой подход использовался как в статических условиях нагружения, так и в динамике – при трении в различных средах (воздух или смазочная среда). Поляризационно-оптическим методом исследований (рис. 15) экспериментально наблюдается перераспределение контактных напряжений в поверхностях, смоченных граничными слоями смазки (рис. 15, б, в).

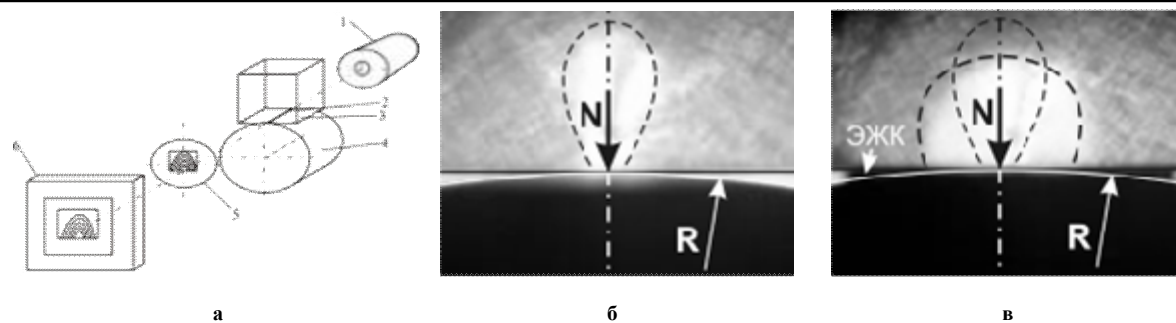


Рис. 15 – Контактные напряжения в изотропном кристалле (поляризованный свет) при сжатии нагрузкой  $N$ : а – на воздухе в статике; б – смоченный маслом (ЭЖК-слоями) в статике; в – трение по часовой стрелке

Уменьшение максимальных расчетных контактных напряжений, вызванное увеличением фактической площади контакта, обусловленного возникновением упругодеформированных изотропных жидкокристаллических слоев смазки, схематически представлено на рис. 16.

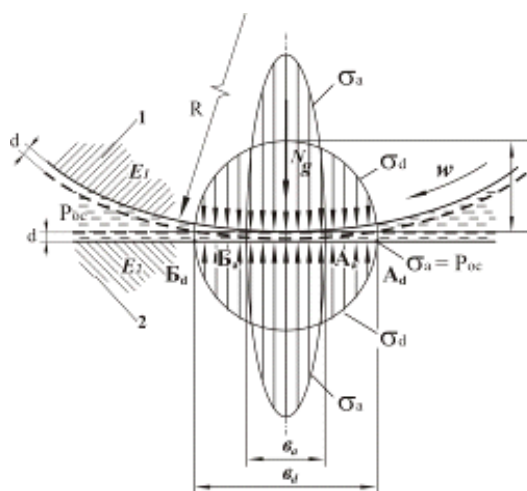


Рис. 16 – Схема образования линейного контакта  $A_d B_d$  шириной  $b_d$  поверхности вала 1 и поверхности плоского подшипника 2 под действием осевой силы  $N_g$  и возникновение в них контактных напряжений  $\sigma_a$  на воздухе и его расширение до  $A_d B_d$  с шириной  $b_d$  и соответствующим их уменьшением до  $\sigma_d$  с учетом наличия на них ЭЖК-слоев толщиной  $d$

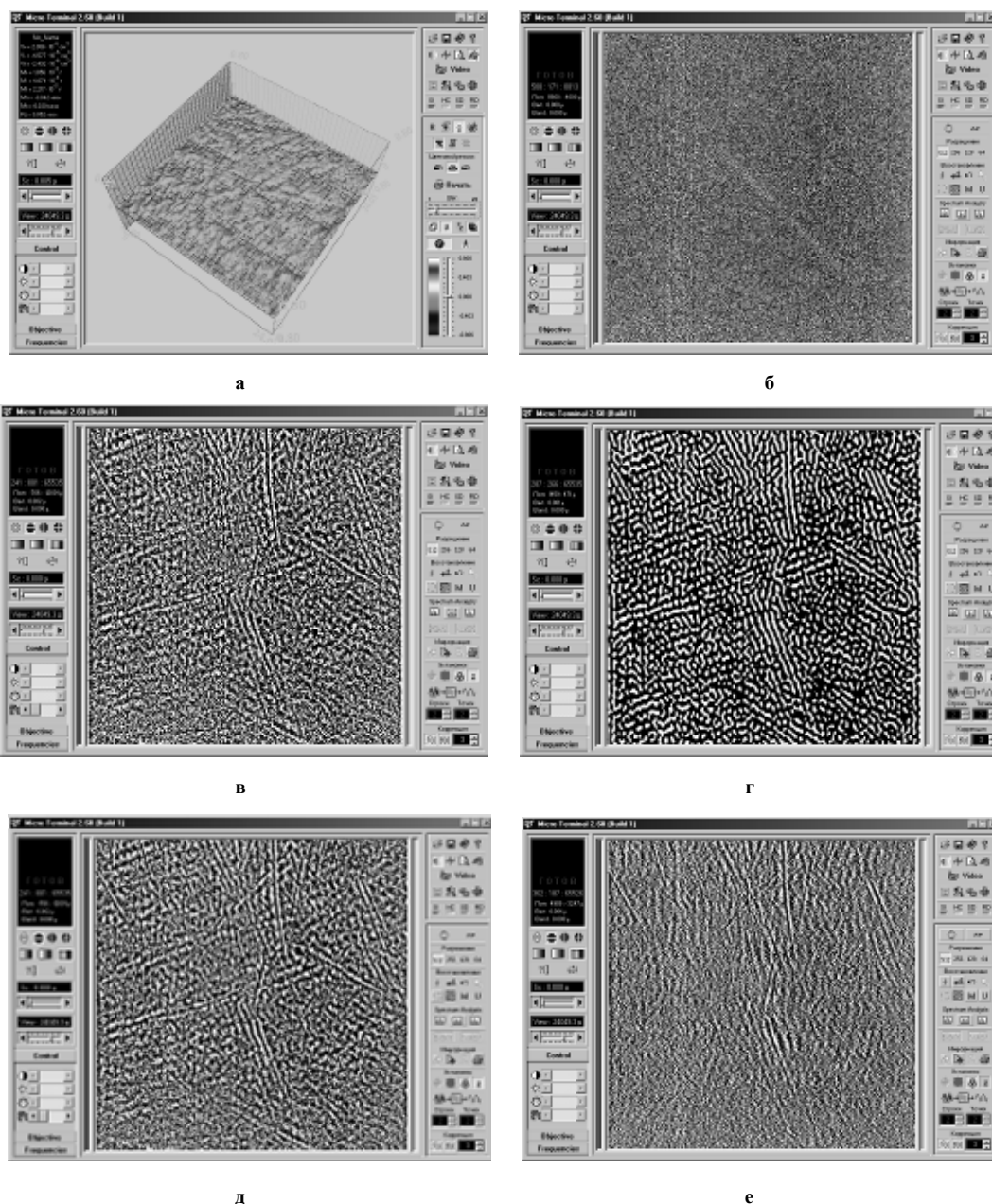
При увеличении нагрузки наблюдалось перетекание граничных слоев из образованных полостей наружу. После этого снятие нагрузки приводило к очень медленному увеличению объемов со смазочным материалом, о чем свидетельствуют 2D изображения контакта через 10 минут и 24 часа - после разгрузки контакта. При этом после снятия нагрузки в контакте, образованном под давлением 10 МПа, и нескольких дней наблюдений, разъединить поверхности в нормальном направлении к плоскости контакта не удавалось. Разъединить его с наименьшими усилиями удалось лишь путем сдвига. Таким образом, при сжатии двух поверхностей с граничными слоями образуются общие для поверхностей замкнутые полости с субмикрообъемами смазочного материала. Лазерная 3D профилография подтверждает возможность возникновения разрежения в микрообъемах граничных слоев в образуемых, общих для обеих поверхностей полостях, заполненных фрагментами смазочной среды.

Полученные результаты исследования упругой деформации ЭЖК-слоев в статических условиях (без трения) сжатия и релаксации после снятия нагрузки позволяют объяснить ряд известных явлений или дополнить их новыми сведениями и гипотезами.

В машиностроении известен прием микрометрирования в размер с помощью набора калиброванных плиток Ягонтсона, основанный на сжатии концевых мер их стальными полированными поверхностями. После снятия усилия сжатия плитки удерживаются. Из практики также известно, что плитки Ягонтсона лучше удерживаются при их сжатии с незначительным одновременным тангенциальным сдвигом. Это объясняют с позиций адгезионно-деформационной теории трения И.В. Крагельского действием молекулярной составляющей силы трения.

При сжатии полированных плоских поверхностей стали ШХ15 и кварцевого стекла, на которые предварительно наносился слой оптически непрозрачного вещества (закрашенное черным красителем масло ТАД-17), наблюдается его экструзия, а после снятия нагрузки – возникновение газовых полостей в граничном слое. Исходная полированная стальная поверхность после сканирования на ЛДФСПП представлена на рис. 17, а. При сжатии поверхностей до 1,0 МПа в контакт вступают вершины волнистых поверхностей стального и кварцевого образцов (рис. 17, б), где площадь контактов вершин (светлые участки) составляла около 40 % контурной площади в поле зрения. При увеличении нагрузки до 5,0 МПа, очевидно, начинают сливаться упругодеформированные вершины, а между ними образуются общие плоскости с остатками непрозрачной смазки (рис. 17, в).

Дальнейшее увеличение нагрузки до 10,0 МПа привело к некоторому расширению площади контактирующих вершин и уменьшению площади плоскостей, заполненных маслом (рис. 17, г). При этом общая площадь контактирующих вершин (светлые участки) увеличилась до 60 % и четко видно образование общих для обеих поверхностей полостей, заполненных закрашенным маслом.



**Рис. 17 – Образование общих плоскостей с граничными слоями непрозрачной смазочной среды между стальной и кварцевой полированными поверхностями (а) при их сжатии до напряжений 1,0 МПа (б), 5,0 МПа (в), 10,0 МПа (г) и после снятия нагрузки через 10 минут (д) и 24 часа (е)**

Однако при таком подходе не учитываются и другие виды взаимодействия, например электромагнитное, которое возникает в ферромагнитных плитках при относительном перемещении доменов поверхностей. Также не рассматривается возможное влияние динамических процессов в граничных слоях при их деформировании и релаксации после сжатия. Так, удержание плиток Ягонтсона может быть следствием образования микро- и нанометровых общих полостей при сжатии двух полированных поверхностей, из которых в окружающую среду выдавливаются излишки граничных, адсорбированных на поверхностях молекул атмосферы. Затем, в процессе снятия нагрузки, происходит упругая релаксация контактирующих вершин, что и приводит к растяжению ранее образованных при сжатии полостей, т.е. к разрежению адсорбированных слоев среды в ранее образованных, общих для обеих поверхностей полостях. Таким образом, плитки удерживаются не только молекулярными силами и магнитными полями ферромагнитных материалов, но и внешним давлением, действующим на разреженные, общие для поверхностей полости.

### Висновки

1. Розроблені прилади з оптичними каналами зйому інформації (АСБ-01, АСБ-02, АСБ-02Т), що дозволяють спостерігати:

- фазові перетворення в граничних шарах мастила (нуклеацію, ріст паровоздушних порожнин, їх еволюцію та схлопування бульбашок в дифузійній області контакту);
- розшарування граничних шарів в конфузійній області трибоконтакту;
- виникнення вторинних зворотних течій та вихревих потоків в граничних шарах;
- розподіл теплових потоків в динаміці при терті.

2. Розроблені прилади безпосереднього вимірювання локального тиску в граничних шарах шляхом сканування прийнятними пристроями (контактні АСБ-01, АСБ-02 та безконтактний АСБ-03), що дозволило виявити загальну закономірність виникнення різнополярних градієнтів тиску в граничних шарах: позитивний – в конфузійній області контакту та негативний – в дифузійній.

3. В сукупності лабораторний пристрій тертя АСК-01, лазерний скануючий диференціально-фазовий мікроскоп-профілометр ЛДФСМП та методики трибологічних випробувань в умовах граничної мастила представляють собою комплекс пристроїв та методів, який внесено в перелік кваліфікаційних методів оцінки УкрЦАХ СЕПРО України [13].

Автор виражає вдячність колективу лабораторії Нанотриботехнологій НДЧ НАУ, за безпосереднє участь в розробці пристроїв, макетів та в експериментальних дослідженнях.

### Література

1. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. ; К : Машгиз, 1950. – 168 с.
2. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Чихос Х. Системный анализ в трибонике /Х.Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
5. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
6. Dowson D. and Taylor, C.M., 1974, “Fundamental Aspects of Cavitation in Bearings,” *Cavitation and Related Phenomena in Lubrication*, ImechE, England, pp. 15-26.
7. Luis San Andres, *Cavitation in Liquid Bearings*. ©- Notes 6. - 2009.
8. Патент на корисну модель №57465 Україна, (51) МПК G01N 3/56. Пристрій визначення трибологічних характеристик тертя ковзання в умовах граничного змащення /Стельмах О.У., Бондар В.С., Бадір К.К., Ібраїмов Т.Т. – № U 2010 10464; заявл. 30.08/2010; опубл. 25.02.2011. Бюл. №4. – 18 с.
9. Кияшко С.Н., Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Терновая Т.В., Сидоренко А.Ю. Способ определения противозносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления // Патент РФ на изобретение №2279660, приоритет от 30.09.04.Опубликовано: 10.07.2006. Бюл. №19. – 10 с.
10. Патент на корисну модель №65839 Україна, (51) МПК (2011.01) F04B 19/00, F04C 25/00. Спосіб нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/газоподібному/високодисперсному, твердому або багатофазовому стані /Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф., Запорожець О.І., Бадір К.К., Бондар В.С., Стельмах Д.О., Ібраїмов Т.Т., Хуссейн Д.Д., Аль-Тамімі Р.К. – № U 2011 09336; заявл. 26.07.2011; опубл. 12.12.2011. – Бюл. №23, 2011. – 22 с.
11. Патент на корисну модель №65840 Україна, (51) МПК (2011.01) F04C 2/00. Пристрій для нагнітання і/або створення розрідження або вакууму речовини, що перебуває в рідкому/ газоподібному/високодисперсному твердому або багатофазовому стані /Стельмах О.У., Аксьонов О.Ф., Хуфенбах В.А., Кунце К.Б.Ф. та ін. – № U 2011 09337; заявл. 26.07.2011; опубл. 12.12.2011. Бюл. №23, 2011. – 32 с.
12. Патент на изобретение №2179328 РФ, G02B21/00, G01B11/30. Способ дифференциально-фазовой профилометрии и/или профилографии и устройство для его реализации /Кияшко С.Н., Смирнов Е.Н., Ильченко Л.Н., Коленов С.А., Стельмах А.У. – №2001116525/28; заявл. 19.06.01; опубл. 10.02.2002.
13. Бойченко С.В. Комплекс методів кваліфікаційної оцінки палив для авіаційних газотурбінних двигунів /С.В.Бойченко. – К.: Український науково-дослідний та навчальний центр хімотології й сертифікації ПММ і ТР, 2011. – 8 с.

Надійшла 05.04.2012