

УДК 620.178.16 : 621.892

А. В. ЗАХАРЧЕНКО

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ: ОБЪЕКТЫ, СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На підставі сучасних трибологічних джерел та проведеного моделюючого активного експерименту пропонується дослідити вплив концентрації хімічно активних речовин на мікромеханічні характеристики поверхневих шарів досліджуваних зразків методами безперервного вдавлювання індентора, трибоспектральним (склерометрії), металографії, топографії. Дослідження виконувалися на останньої модифікації настільного приладу "Мікрон-гамма 9" з широкими функціональними можливостями, що відрізняється від зарубіжних аналогів компактністю, простотою експлуатації, технологічністю виготовлення. Детально висвітлено особливості комплексного дослідження і контролю мікромеханічних характеристик поверхневих шарів досліджуваних зразків.

Ключові слова: хімічно активні речовини, пакет присадок, трибосполучення, поверхневий шар, мікромеханічні характеристики, індентор, наноіндентування, склерометрія, металографія, топографія.

На основании современных трибологических источников и проведённого моделирующего активного эксперимента предлагается исследовать влияние концентрации химически активных веществ (ХАВ) на микромеханические характеристики поверхностных слоёв исследуемых образцов методами непрерывного вдавливания индентора, трибоспектральным (склерометрии), металлографии, топографии. Исследования выполнялись на последней модификации настольного прибора "Микрон-гамма 9" с широкими функциональными возможностями, отличающегося от зарубежных аналогов компактностью, простотой эксплуатации, технологичностью изготовления. Подробно освещены особенности комплексного исследования и контроля микромеханических характеристик поверхностных слоёв исследуемых образцов.

Ключевые слова: химически активные вещества, пакет присадок, трибосопряжение, поверхностный слой, микромеханические характеристики, индентор, наноиндентирование, склерометрия, металлография, топография.

One of the most important tasks to ensure antifrictional and anti-wear properties of friction units is to optimize the concentration of additive packages to base oils. Optimization of the concentration of chemically active substances in the oils currently are not completely objective due to their focus only on the physical-chemical properties of the oils themselves in terms of delivery. Absolutely not taken into account in determining the performance and service life of lubricants is such an important factor, as the influence of chemical composition and operating properties of oils on the structural homogeneity and mechanical characteristics of surface layers of friction units. On the basis of modern tribological sources and conducted simulation active experiment is proposed to investigate the influence of the concentration of chemically active substances on the micromechanical characteristics of the surface layers of the investigated samples by continuous indentation of the indenter, tribotechnology (sclerometry), metallography, topography. The study was performed on the last modification of the table device "Micron-gamma 9" with broad functionality that is different from their foreign counterparts compactness (an implementation of the differential method of determining the displacement of the indenter), ease of operation (fully automated management and processing of experimental data), manufacturability. Detail features for integrated control and study the micromechanical characteristics of the surface layers of investigated samples. Provides structural design and technical characteristics of the instrument, methods of research in monitoring mode.

Keywords: chemically active substances, the additive package, tribeopedia, the surface layer, the micromechanical characteristics of the indenter, nanoindentation, sclerometry, metallography, topography.

Введение. Одной из важнейших задач для обеспечения антифрикционных и противоизносных свойств трибосопряжений является оптимизация концентрации пакетов присадок в базовых маслах [1]. Пути оптимизации концентрации ХАВ в маслах в настоящее время не являются до конца объективными благодаря их ориентированности только на физико-химические свойства самих масел в условиях поставки. Абсолютно не учитывается при определении эффективности и срока службы смазочных материалов такой важный фактор, как влияние химического состава и эксплуатационных свойств масел на структурную однородность и микромеханические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений [2]. Определение оптимальной концентрации пакетов присадок в маслах приведёт к их рациональному использованию, что даст существенную экономию горюче-смазочных ресурсов и конструктивных материалов в Украине [3].

Необходимость предлагаемой работы определяется значительной проблемой рационального использования новых высокоэффективных комплексных фосфор- и серосодержащих товарных пакетов присадок, используемых заводами-производителями нашей страны в качестве легирующих элементов при изготовлении товарных трансмиссионных масел (ТМ), имеющих значительную стоимость и не всегда соответствующих эксплуатационным требованиям и потребностью предприятий-эксплуатантов техники в современных ТМ отечественного производства для конкретных

условий работы с позиции их влияния на физико-механические характеристики и состояние поверхностных слоёв трибосопряжений в условиях качения с проскальзыванием [4].

Постановка задач исследования. Целью настоящей работы является исследование влияния концентрации ХАВ на состояние поверхностных слоёв трибосопряжений, образованных в условиях смазочного действия ТМ при качении с проскальзыванием.

Для достижения поставленной цели в работе были реализованы следующие задачи: обосновать и конструктивно реализовать для комплексного исследования и контроля микромеханических характеристик поверхностных слоёв исследуемых образцов методы непрерывного вдавливания индентора, трибоспектральный (склерометрии), металлографии, топографии.

Предмет исследования – влияние химически активных присадок на микромеханические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений в зависимости от их массовой концентрации в базовом масле.

Объекты исследований. Смазочные материалы. Для реализации поставленных задач было использовано товарное трансмиссионное масло ТМ-3-18 на минеральной основе (ГОСТ 17479.2–85) [5], аналогичное ТАП-15В (ГОСТ 23652–79) [6] и его база без композиции (пакета) присадок.

Выбор был остановлен на вышеуказанном ТМ общего назначения по следующим причинам: во-первых,

данное масло является одним из самых распространённых в нашей стране при использовании в агрегатах трансмиссий грузовых автомобилей и спецмашин по обслуживанию воздушных судов; во-вторых, ТМ-3-18 является типовым по структуре, эксплуатационным свойствам и составу другим ТМ [7]. Применяется ТМ-3-18 для смазывания тяжело нагруженных цилиндрических, конических, спирально-конических, в том числе гипоидных, и червячных передач. Используется в трансмиссиях автомобилей, строительных и дорожных машинах [8], в различных редукторах при температуре окружающего воздуха до 50 °С, контактных напряжениях до 2500 МПа и скоростях скольжения до 15 м/с. В средней климатической зоне его используют всевозможно, имеет температурный диапазон работоспособности масла в объёме от -25 до 150 °С [9, 10]. Из-за этих особенностей масло ТМ-3-18 было избрано в качестве одного из конструктивных материалов триады трения [11], который обеспечивает прохождение процессов контактного взаимодействия в условиях граничного режима смазки. Используемое масло изготавливают из смеси экстрактов остаточных масел фенольной очистки и дистиллятных масел или фильтрата обезмасливания парафина и композиции противозадирной и депрессорной присадок умеренной эффективности [12].

В процессе работы были проведены испытания зарубежного товарного пакета присадок Компадит-731 (К-731), поставляемого Фастовскому заводу технических масел "Ариан". Физико-химические характеристики этого пакета присадок, улучшающего смазывающие свойства ТМ, представлены в табл. 1. Согласно поставленным задач исследования, при лабораторной оценке значения концентрации пакета присадок в базовом масле варьировались от 1 до 8 % по массе (табл. 2). Компаундирование (смешение) базового масла с пакетом присадок выполнялось при 50 °С. При этой температуре вязкость масел и присадок достаточно низки для гарантированного удовлетворительного и быстрого перемешивания. В то же время базовое масло и присадки не подвергаются значительным термическим воздействиям [13].

Испытания пакета присадок на машине трения (МТ) показали, что воздействие К-731 на смазывающую способность, противозадирные и противоизносные свойства ТМ сопоставимо с воздействием других высококачественных зарубежных аналогов, таких, например, как Компадит-733 ("Istrochem", Словакия) и Англумол-6085 ("Lubrizol", Германия).

Таблица 1 – Физико-химическая характеристика пакета присадок Компадит-731 ("Istrochem", Словакия)

Показатель	Значение показателя
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	17,5
Содержание, %:	
Цинка	4,78
Фосфора	5,35
Серы	8,55
Механических примесей	≤0,05
Воды	0,06
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	155
Используемая на практике концентрация пакета присадок в базовом масле, %	2,4
Зольность, сульфатная (оксидная), %	15,73
Коррозия на пластинах из меди при 120 °С в течение 3 ч	Отс.

Таблица 2 – Характеристики испытываемых композиций

Смазочный материал	Массовая доля активных элементов, % (расчётный метод)	
	S	P
База ТМ-3-18 (Б)	1	0
Б + К-731 1 мас. %	1,0855	0,0535
Б + К-731 2 мас. %	1,171	0,107
Б + К-731 2,4 мас. % (ТМ-3-18 товарное)	1,2052	0,1284
Б + К-731 4 мас. %	1,342	0,214
Б + К-731 8 мас. %	1,684	0,428
Mobilube GX 80W-90 (товарное)	1,92	не опр.

С целью подтверждения оптимальной концентрации пакета присадок при условиях исследования и для сравнительного анализа полученных зависимостей в настоящей работе также было использовано товарное ТМ Mobilube GX 80W-90, производимое нефтяной компанией Mobil Oil oy ab с Финляндии [14]. Mobilube GX – это серия всевозможных минеральных ТМ, учитывающих особенности современных синхронизированных трансмиссий, представляющая собой глубоководноочищенную нефтяную основу, в состав которой вводят сбалансированную серо- фосфорсодержащую композицию сильных EP-присадок высокого давления, но более смягчённых, чем в маслах серии Mobilube HD. Рекомендуется для применения в коробках передач с ручным управлением, раздаточных коробках и т.п., устанавливаемых на машинах и автомобилях, для которых изготовители требуют применения масел уровня API GL-4 класса. Масла превосходят требования американской военной спецификации MIL-L-2105A [15, 16].

Выбор и обоснование схемы контактирования.

Исходя из цели методики, её эффективность определяется оптимальным выбором схемы контактирования, позволяющей достигнуть воспроизводимости напряжённо-деформируемого состояния в ходе испытаний и идентичности режимов нагружения, что достигается за счёт максимальной локализации пятна контакта в исходном состоянии испытываемых образцов, а также локализации износа в ходе испытаний. При сравнении схем контактирования образцов простой геометрической формы – вал-вкладыш, цилиндр-цилиндр (с параллельными и перекрещивающимися осями), сфера-сфера, сфера-плоскость – следует, что максимальная локализация контакта в условии качения с проскальзыванием достигается при реализации схемы цилиндр-цилиндр с параллельными осями.

Режимы трибологического процесса реализуются на МТ с различными схемами контакта трущихся образцов. Нашли применение следующие разновидности номинального фрикционного контакта: по площади (пять), линейный (пять) и точечный (четыре). Линейная схема трения – два вращающихся цилиндра – широко применяется при моделировании трения в зубчатых передачах. Воспроизведена в различных МТ: в серийных ИИ 5018, СМЦ-2 и более современной СМТ-1, Амслер, МИ-1М и в специальных роликовых стендах. В качестве модельного (не конструкционного) материала и для подтверждения справедливости полученных результатов показателей смазочного действия использовались подверженные объёмной закалке образцы и контртела роликового типа (рис. 1), мм:

диаметр образца ... 50
ширина образца ... 10

диаметр контртела ...50

ширина контртела ...3

Форма и размеры образцов для моделирующих трибо-технических испытаний с учётом масштабного фактора [17] соответствовали требованиям ДСТУ 30480–97 с коэффициентом взаимного перекрытия $K_{вз} = 0,3$.

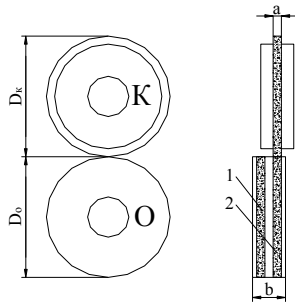


Рис. 1 – Схема трибоконтакта образца (О) и контртела (К) роликового типа: D_o – диаметр образца; D_k – диаметр контртела; a – ширина контртела; b – ширина образца; 1 и 2 – дорожки трения

Модельные материалы. Образец и контртело изготавливают из одного материала, а именно из: 1) углеродистой стали средней прочности перлитного класса – 30ХГСА (хромансиль) с твёрдостью 40...45 HRC (0,28...0,34 % С; 0,9...1,2 % Мn; 0,8...1,1 % Cr; Fe – основа), прокаливается на глубину 25...40 мм [18, 19]; 2) углеродистой высокопрочной стали перлитного класса – 40ХН2СВА с твёрдостью 45...50 HRC (0,36...0,43 % С; 0,7...1 % Si; 0,5...0,8 % Мn; 0,8...1,1 % Cr; 2,5...3,0 % Ni; 0,8...1,2 % W; Fe – основа), прокаливается на глубину 25...40 мм [18, 19]. Зубчатые колёса для объёмного закалывания изготавливаются из сталей типа сталь 40Х, а в более ответственных случаях из сталей 40ХН и т.д. [20]. Сталь 40ХН2СВА при твёрдости свыше 50 HRC резко теряет свои прочностные свойства. Обе стали применяются в производстве как машиностроительные более полувека [21].

Испытуемые образцы и контртела изготовлены из сталей в состоянии поставки, имеющих структуру перлита, одной выбранной марки и плавки с разрезанием цилиндрического стержня на диски. В работе [22] сопоставлены значения твёрдости HV, HB, HR (стандартные шкалы А, В и С), хотя зависимость между HB и HRB, и также HRC нелинейная. Очевидны весьма ограниченные возможности в части повышения прочностных характеристик сталей [23, 24]. Анализ литературных данных [25–28] показывает, что эксплуатационные свойства деталей машин, определяющие их надёжность, зависят от системы параметров качества их рабочих поверхностей: макроотклонения, волнистости, шероховатости, субшероховатости, физико-химических свойств. Поэтому, шероховатость поверхностного слоя образцов и контртел считалась постоянной и была выбрана на уровне $Ra = 0,32$ мкм с разбросом параметров не более 5 % [29]. Перед установкой на МТ поверхности образцов и контртел обрабатывались по общепринятой методике ГОСТ 23.210-80.

Последующая в наших исследованиях оценка состояния поверхностных слоёв трибосопряжений имеет четыре основные стадии – электроискровую резку изделий (поперечную и отрезание сегментов), изготовление шлифов, собственно экспериментальную работу и интерпретацию полученных результатов. Электроис-

кровая резка изделий из образцов роликового типа характеризуется следующими показателями:

- 1) оборудование – электроискровой станок мод. 4531;
- 2) рабочий электрод – латунная проволока $\varnothing 0,2$ мм;
- 3) рабочая жидкость – керосин;
- 4) режимы работы:
 - напряжение искрового промежутка – 150 В;
 - ток короткого замыкания – 1,4 А;
 - рабочий ток – 0,7 А;
 - рабочая ёмкость – 2 мкФ;
 - рабочая подача – автоматически, при помощи следящего устройства;
- 5) машинное время:
 - поперечная резка 10×16 мм – 2×40 мин;
 - отрезание сегментов 10×12 мм – 23 мин.

Изготовление шлифов из отрезанных изделий характеризовалось следующими условиями:

- 1) оборудование – притирочно-доводочный станок;
- 2) инструмент – набор алмазных кругов зернистостью 63/50 (черновая обработка среза) и 50/30 (чистовая обработка среза);
- 3) охлаждающая жидкость – вода;
- 4) способ обработки – вручную.

После ополаскивания в спирте и высушивания при 70 °С изделия были готовы к экспериментальной работе.

Средства исследований. Принцип работы и конструктивное решение настольного прибора "Микрон-гамма 9". В 1987 году И. М. Закиевым под руководством проф. В. В. Запорожца был изготовлен первый настольный аналоговый вариант прибора серии "Микрон-гамма" на базе серийного микротвёрдомера ПМТ-3 (рис. 2, а) с записью диаграмм нагружения, профилеграмм и трибограмм двухкоординатным самописцем, а их расшифровка велась вручную. В последующие годы, с появлением персональных компьютеров, было сконструировано, изготовлено и доведено до практического использования ещё 7 модификаций цифровых приборов, позволяющих уже автоматически производить и регистрировать измерения (рис. 2, б–г). "Микрон-гамма" позволяет проводить исследование физико-механических свойств поверхностных слоёв материалов и смазочных сред в режиме мониторинга методами непрерывного вдавливания индентора, трибоспектральным, акустической эмиссии, топографии поверхности [30].

Все существующие приборы не позволяют проводить испытания материалов в реальном масштабе времени, в режиме мониторинга, что значительно снижает производительность и информативность, увеличивает погрешность, связанную с субъективными факторами. Таким образом, всегда существовала потребность в разработке настольной конструкции прибора, который позволял бы измерять физико-механические свойства материалов методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором, работающим в режиме мониторинга и имеющим бесконтактный нагружатель и датчики перемещения самого индентора. Благодаря применению выше отмеченных методов исследования прибор "Микрон-гамма 9" позволяет [31]:

- проводить испытание на микротвёрдость в диапазоне малых и сверхмалых нагрузок с автоматической регистрацией двух параметров процесса: нагрузки и величины внедрения индентора;

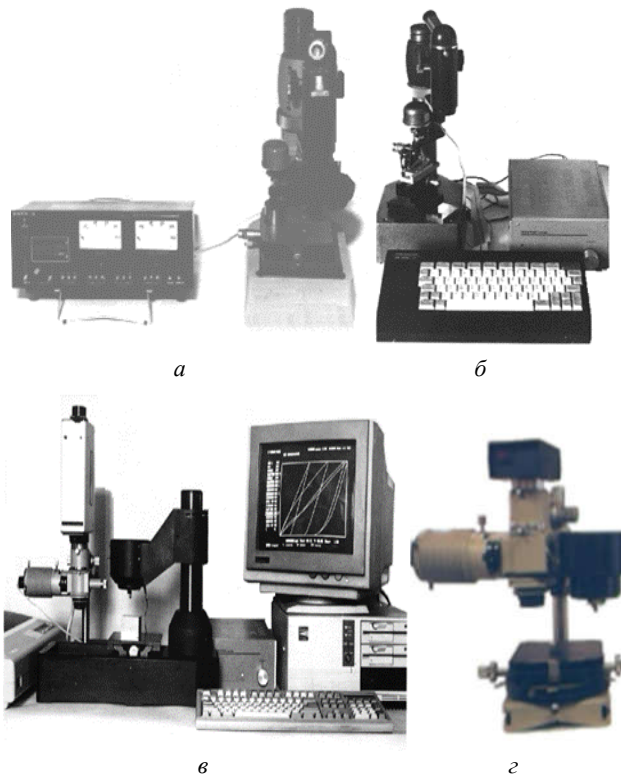


Рис. 2 – Модификации приборов для тестирования материалов методом индентирования [30]: *a* – аналоговый с выводом результатов на самописец (1987 г.); *b* – аналоговый с выводом результатов на микро-ЭВМ "БК-0010" (1992 г.); *в* – аналого-цифровой с управлением и обработкой IBM-286 в среде DOS (1995 г.); *г* – "Микрон-гамма-8" с цифровой камерой и обработкой данных в среде Windows (2002 г.)

- изучать особенности микродеформации материалов по кинетике внедрения индентора под воздействием поверхности активных веществ с регистрацией скорости движения этого внедрения;
- регистрировать микроползучесть материалов при выдержке под давлением путём регистрации изменения глубины отпечатка в функции времени;
- проводить оценку упругих свойств материалов и возможность их к релаксации энергии, накопленной в процессе пластической деформации, по величине упругого возобновления глубины отпечатка;
- проводить оценку деформационной и релаксационной способности материалов по величине площади диаграммы внедрения в координатах: нагрузка-величина внедрения;
- исследовать материалы с плохой отбивающей способностью поверхности и материалы, в которых отпечаток существенно изменяет размеры после снятия нагрузки;
- проводить оценку степени наклёпа поверхностного слоя по величине энергии упругого возобновления материала и тонкого поверхностного слоя, который определяется по площади диаграммы внедрения;
- моделировать при малых скоростях деформации элементарные акты процессов трения и изнашивания с регистрацией длины и глубины царапины;
- проводить оценку среднего значения и разброса микромеханических свойств поверхностных слоёв и их распределение по трассе сканирования;
- регистрировать характеристики микрогеометрии поверхностей при использовании соответствующего индентора, а также распечатывать видеоизображение поверхности материалов;

– регистрировать энергию, которая выделяется источником акустической эмиссии, при микровдавливании и сканировании индентором поверхности;

- измерять расклинивающее действие поверхностно активных веществ и смазочных сред;
- исследовать механические свойства граничных смазочных слоёв.

В настоящей работе для исследования микромеханических свойств материалов методом индентирования поверхности [32] использовалась последняя 9 модификация прибора с широкими функциональными возможностями (рис. 3), отличающегося от зарубежных аналогов компактностью (реализация дифференциального метода определения перемещения индентора), простотой эксплуатации (практически полностью автоматизированы управление и обработка экспериментальных данных), технологичностью изготовления [33].

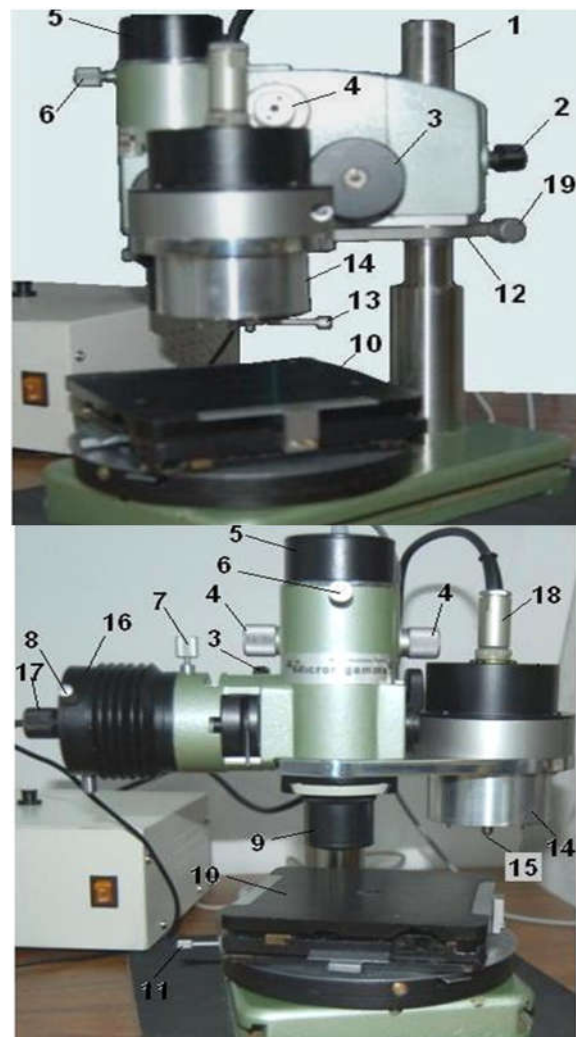


Рис. 3 – Внешний вид прибора "Микрон-гамма 9" для исследования микромеханических свойств материалов [33]: 1 – стойка; 2 – ручка фиксации микроскопа на стойке; 3 – ручка грубой подачи микроскопа и индентора; 4 – ручка механизма укола; 5 – видеокамера; 6 – винт крепления камеры; 7 – винт крепления осветителя; 8 – центрирующие винты осветителя; 9 – объектив; 10 – двухкоординатный стол; 11 – винт фиксации поворота стола; 12 – ограничитель прицельного укола; 13 – рукоятка щупа; 14 – блок нагружения; 15 – индентор; 16 – осветитель микроскопа; 17 – патрон со светодиодом повышенной яркости; 18 – разъём головки; 19 – винт фиксации ограничителя

Методы исследования и контроля микромеханических характеристик поверхностных слоёв модельных материалов в режиме мониторинга. Предпосылки возникновения нанотрибологии освещаются в [34, 35]. В настоящей работе для оценки микромеханических характеристик поверхностных слоёв исследуемых образцов были использованы методы: непрерывного вдавливания индентора, трибоспектральный (склерометрии), металлографии, топографии.

В соответствии с направлением движения зондирующего поверхность инструмента по отношению к плоскости образца методы подразделяют на наноиндентирование (индентор движется по нормали к поверхности) и наносклерометрию (индентор движется по касательной к поверхности). Сущность этих методов состоит в программируемом приложении малых или ультрамалых усилий к индентору и непрерывной регистрации зависимости силы сопротивления P от смещения (глубины погружения h или тангенциального перемещения x). Типичные записи диаграмм для обоих случаев показаны на рис. 4 [36].

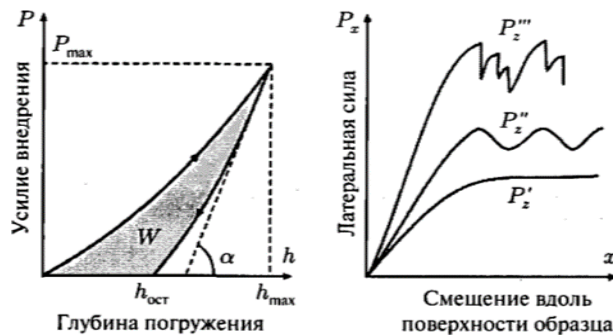


Рис. 4 – Диаграммы, полученные при наноиндентировании (слева) и наноскрабировании (справа) [36]:

h_{\max} – максимальная глубина погружения индентора;
 $h_{\text{ост}}$ – глубина отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки; W – поглощённая энергия; P_z , P_z , P_z – низкие, умеренные и высокие значения силы прижима индентора к поверхности соответственно

Метод непрерывного вдавливания индентора. Практика показала ограниченность схемы испытаний по диагонали отпечатка. Существенно расширить получаемую информацию можно лишь по принципиально новой схеме испытаний по глубине отпечатка (рис. 5 и 6) методом непрерывного вдавливания индентора. Этот метод основан на автоматической регистрации в процессе испытаний нагрузки на индентор и глубины его внедрения в поверхность испытуемого материала в виде диаграммы нагружения $P = f(h)$ (см. рис. 4, слева). Расшифровка такой диаграммы позволяет получать не только более обширную, но также и принципиально новую, по сравнению со стандартизованным методом испытаний на микротвёрдость, информацию. Метод позволяет фиксировать ценную информацию о самом процессе вдавливания индентора, учитывая процессы, происходящие вследствие релаксации напряжений, формоизменения материала под индентором в процессе вдавливания, при выдержке под нагрузкой, при нагружении и т.п. [37, 38].

Методические основы определения твёрдости и модуля упругости по диаграммам индентирования освещаются в [39, 40] и приняты в качестве международного стандарта [41], регламентирующего испытания материалов методами вдавливания, когда индентирование

классифицируют по трём размерно-силовым уровням:

- макроскопический уровень $2 \text{ Н} < P < 30 \text{ кН}$;
- микроскопический уровень $P < 2 \text{ Н}$, $h > 200 \text{ нм}$;
- нанометровый уровень $h < 200 \text{ Н·м}$;

где P – сила, действующая на индентор при его вдавливании в поверхность;

h – глубина проникновения индентора.

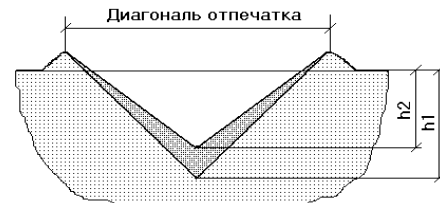


Рис. 5 – Схема отпечатка в разрезе [33]:

h_1 – глубина внедрения при максимальной нагрузке;

h_2 – глубина восстановленного отпечатка после нагружения

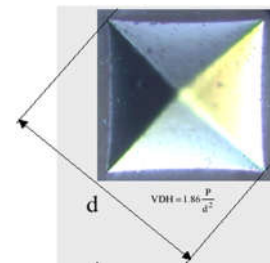


Рис. 6 – Микрофотография отпечатка Виккерса [33]:

d – диагональ отпечатка

Данный подход основан на теоретических зависимостях, которые были получены ранее и описывают упругое восстановление при внедрении в плоское упругое полупространство инденторов различной осесимметричной формы [42]. При этом методе в качестве конструкционного материала индентора использован алмаз, обладающий минимальной адгезией к большинству технических материалов [43]. Современные качественные инденторы имеют минимальный радиус закругления кончика в пределах 30...50 нм, инденторы широкого использования – порядка 100 нм и больше. Учёт затупленности индентора осуществляется путём корректировки значений проекции контактной площади [32].

Метод непрерывного вдавливания позволяет:

- проводить испытания на микротвёрдость в диапазоне малых и сверхмалых нагрузок;
- изучать особенности микродеформации материалов по кинетике внедрения индентора;
- регистрировать микроползучесть материалов;
- измерять градиент свойств по глубине внедрения;
- испытывать материалы с плохой отражающей способностью (в частности, полимерные материалы), а также материалы, у которых отпечаток сильно изменяет размеры после снятия нагрузки;
- измерять хрупкость материалов по диаграмме внедрения;
- измерять упругость материалов.

По сути, диаграмма представляет собой работу, затраченную индентором на преодоление сопротивления материала (площадь под ветвью нагружения), и работу, затраченную материалом на восстановление своих свойств (площадь под ветвью разгрузки) (рис. 4, слева).

Для оценки ползучести строится график зависимости глубины внедрения индентора h от времени выдержки T под нагрузкой, а для оценки градиента прочностных свойств – график зависимости твёрдости H от нагрузки P (рис. 7).

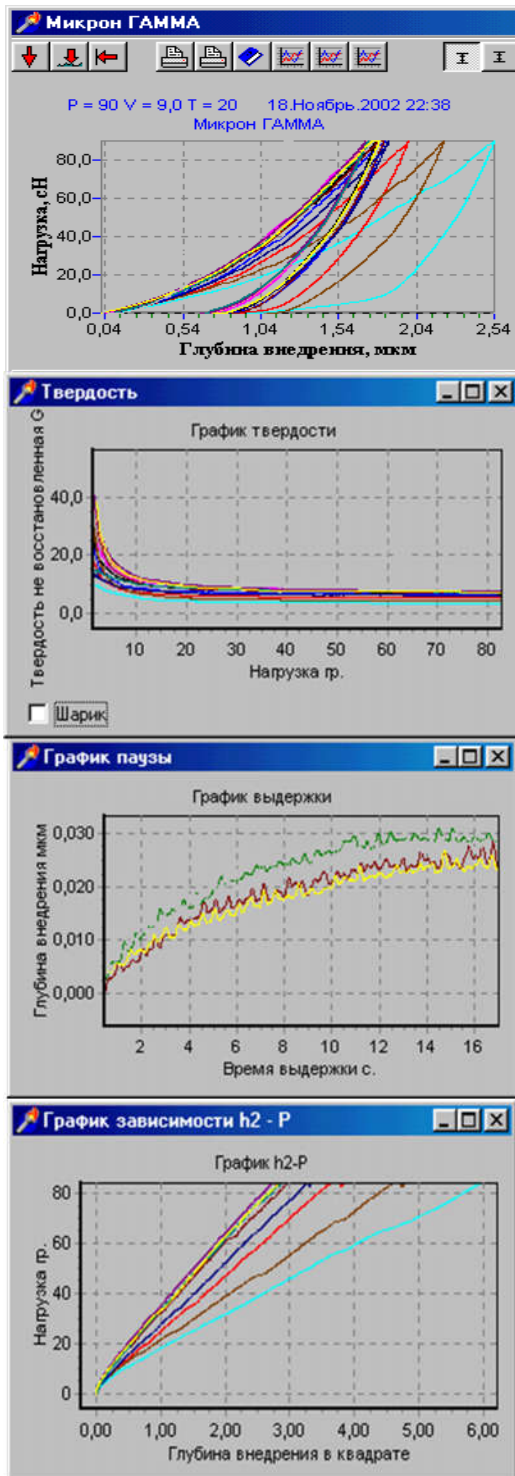


Рис. 7 – Типичные графики, получаемые методом непрерывного внедрения индентора

Данные непрерывного индентирования обычно обрабатывают по методу Оливера–Фарра [44], который состоит в подборе параметров степенной функции, описывающей экспериментальную зависимость глубины погружения от приложенной нагрузки, и расчёте твёрдости и модуля Юнга по этим данным.

Но, даже учитывая большую ценность полученных с помощью метода микровдавливания результатов, метод не позволяет провести комплексную оценку состояния поверхностного слоя. В связи с этим значительный интерес представляет анализ динамических эффектов контактного взаимодействия разработанным трибоспектральным (склерометрии) методом.

Трибоспектральный (склерометрии) метод. Измерение твёрдости царапанием ранее применялось, главным образом, при изучении минералов. Ещё в 1640 году драгоценные камни классифицировались по твёрдости посредством царапания напильником [45]. В 1824 году Моос предложил шкалу твёрдости, состоящую из 10 эталонных минералов. При этом каждый последующий минерал мог царапать все предыдущие. Шкала Мооса состоит из 10 баллов в такой последовательности минералов: тальк, гипс, кальцит, флюорит, апатит, ортоклас, кварц, топаз, корунд, алмаз (№ 10 этой шкалы) [46]. М. М. Хрущов предложил вместо 10 классов твёрдости по шкале Мооса 15 классов (алмаз – 15,1 класс по шкале Хрущова) и следующую формулу для определения класса твёрдости: $H_x = 0,7 \sqrt[3]{H}$, где H – число твёрдости, кгс/мм² [47]. Более точная и объективная оценка классов твёрдости минералов по шкале М. М. Хрущова нашла широкое применение у минералогов [48]. Между тем, возможность определения сопротивления разрушению и связанных с ним характеристик по испытаниям очень малого участка поверхности представляет большой практический интерес и при изучении металлов. Первый прибор для оценки твёрдости царапанием – склерометр был создан Зеебеком в 1833 г. Принцип представления твёрдости в виде нагрузки на алмазный конус с углом 90° при формировании им царапины шириной 10 мкм предложен Мартенсом в 1890 г., и долгое время (до 1936 г.) являлся единственным методом количественной оценки микротвёрдости [45]. Впервые микротвёрдость отдельных структурных составляющих была определена на склероскопе Шора А. М. Бочваром в 1917 г. и применена им для изучения связи структуры и свойств подшипниковых материалов [49].

Трибоспектральный (склерометрии) метод микро-механических испытаний, разработанный и внедрённый в 1960-х гг. в лаборатории КИИГА под руководством проф. В. В. Запорожца, базируется на непрерывной регистрации двух составляющих сопротивления движению индентора по поверхности с заданной нагрузкой [50–52]. Данный метод предполагает пропахивание борозды на поверхности изучаемого материала образца. Выбор склерометрии основан на качественном подобии напряжённо-деформированного состояния и масштабного уровня повреждений при трении и при деформации поверхности индентором. Физическая основа метода – зависимость параметров трения от ориентации отдельных кристаллитов и параметров тонкой кристаллической структуры (анизотропия трения) [53, 54]. Аналитической основой метода является теория случайных процессов [55, 56], которые при неоднократном проведении одного и того же опыта протекают каждый раз несколько по-иному, всё определённое и отчётливее проявляя присущие им закономерности. Заметим, что случайность не может являться причиной события, но как понятие случайности (непредсказуемость) объективно существует.

Сканирование поверхностного слоя выполняется путём перемещения алмазного индентора в режиме упругопластического деформирования с постоянной скоростью под действием неизменной во времени нагрузки, обеспечивающей заданную глубину внедрения в анализируемую поверхность [57]. Модель поверхностного слоя представляется в виде случайно расположенных кристаллов (фрагментов) с различными прочностными и деформационными характеристиками. Согласно этому, поверхностный слой нагружается трением индентора, моделирующего единичную неровность, и по изменению силы трения и нормальной нагрузки, связанных с анизотропией прочностных и деформационных свойств отдельных микрообъёмов, рассчитывается комплекс статистических характеристик, отражающих состояние поверхностного слоя [57–59]. В целом, определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъёмов материала контактному деформированию методами теории случайных процессов позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования алмазным индентором и, в частности, даёт возможность:

- оценивать среднюю прочность поверхностного слоя на трассе сканирования;
- оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств;
- моделировать элементарные акты процессов трения и износа (микрорезания, микроскольжения и т.п.).

На рис. 8 ниже представлена модель, поясняющая сущность метода сканирования. Если исследуемая поверхность вдоль трассы сканирования индентора состоит из твёрдых (и мелких L2) и мягких (и крупных L1) фрагментов, обработав трибограмму (зависимость глубины внедрения от времени t) как случайный процесс и построив график спектральной плотности, можно получить прочностной портрет поверхности (рис. 9). По спектральной плотности можно судить о размерах, количестве и прочности фрагментов на трассе сканирования.

О. Н. Билякович (1996) впервые использовал трибоспектральный метод микромеханических исследований для оценки состояния смазочных сред [60]. Суть этого исследования заключалась в оценке эффективности смазочного действия трансмиссионных масел с различной степенью загрязнённости механическими примесями, микромеханических характеристик и показателей структурной однородности поверхностных слоёв, сформированных в процессе испытаний в вышеуказанных маслах.

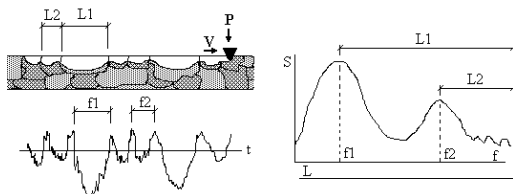


Рис. 8 – Модель, поясняющая принцип действия метода сканирования

Метод металлографии основан на регистрации изображения посредством оптического микроскопа со встроенной цифровой видеокамерой и последующей статистической обработке изображения. Метод позволяет производить:

- количественный анализ изображения;
- анализ неметаллических включений;

- анализ пористости;
- анализ зёрновой структуры;
- фазовый анализ;
- регистрацию в динамике процессов разрушения и трещинообразования;
- построение трёхмерной яркостной модели поверхности.

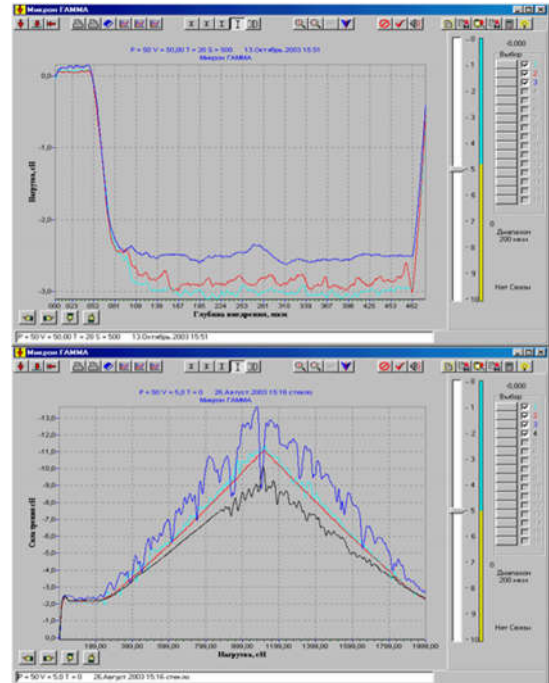


Рис. 9 – Трибограммы нормальной и тангенциальной составляющей силы трения

Кроме того, метод позволяет проводить прицельный "укол" в необходимом месте поверхности, при этом наблюдая за изображением на экране монитора (рис. 10). А внешний вид интерфейса пользователя приведен на рис. 11.

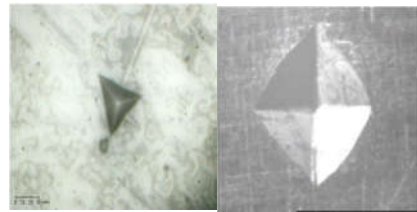


Рис. 10 – Отпечатки разных инденторов $\times 400$ [30]

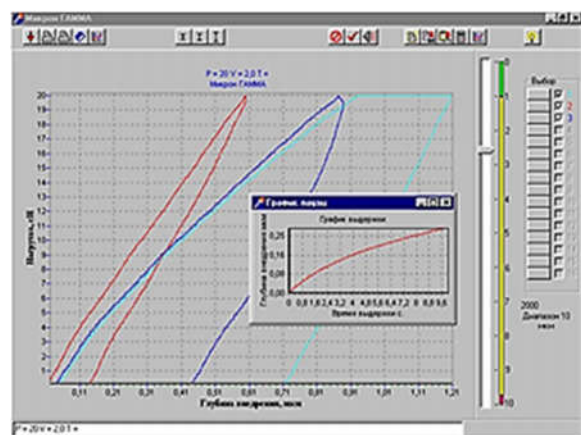


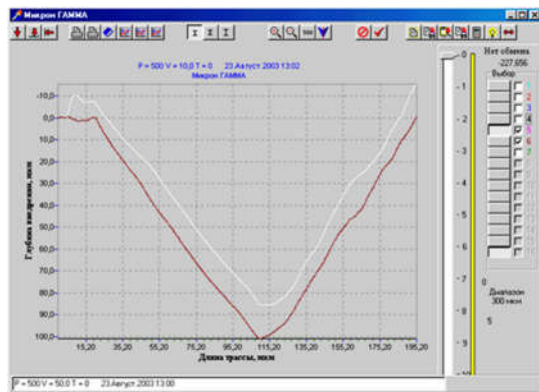
Рис. 11 – Внешний вид интерфейса пользователя [30]

Метод топографії оснований на скануванні поверхні індентором при мінімальній нарузці (около 0,1 г) с последующей обработкой профілограмм (рис. 12) и, в частности, позволяет:

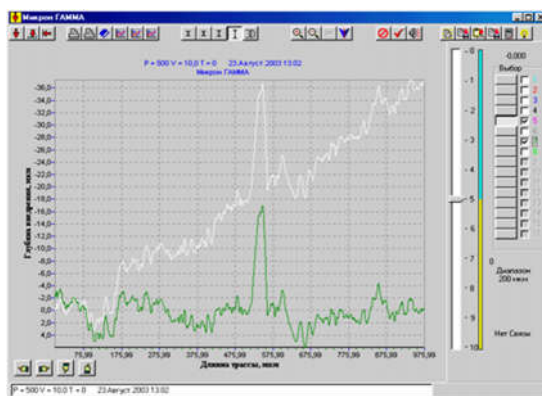
– регистрировать параметры шероховатости поверхности;

– строить трёхмерный профиль поверхности.

Максимально на экран монитора за один сеанс можно выводить 16 диаграмм внедрения. При необходимости диаграммы внедрения в автоматизированном режиме можно сглаживать, усреднять, аппроксимировать, сдвигать, вычитать и сравнивать с теоретической кривой нагружения.



а



б

Рис. 12 – Профілограмми до и после устранения тренда: а – лунок отпечатков; б – поверхности

Выводы. После завершения индентирования отчёт по испытаниям выводится на экран монитора в виде таблицы, в которой приведены вычисленные характеристики микромеханических свойств испытуемого материала: твёрдость, модуль Юнга, упругопластическая и упругая работы индентирования и т.д. Предусмотрена возможность введения пользователем формул расчёта параметров индентирования и построения графиков, полученных на основании собственных разработок. Для этого прилагается специально разработанный математически-графический редактор, который позволяет вводить пользовательские параметры, формулы расчётов, графические зависимости и виды отчёта. Такой подход предусматривает гибкость прибора как нового инструмента для исследования физико-механических свойств материалов.

Список литературы

1. Захарченко А. В. Проблема оптимізації концентрації хімічно активних речовин у трансмісійних оливах // Вісник Національного авіаційного університету. – К.: НАУ, 2005. – № 1. – С. 120–125.

2. Захарченко А. В. Влияние концентрации химически активных веществ на смазочное действие и состояние поверхностных слоёв трибосопрежений // Пр. 5-ї Міжнар. наук. конф. "Матеріали для роботи в екстремальних умовах". – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – С. 277–280.

3. Запорожець В. В., Білякович О. М., Захарченко А. В. Протизносні властивості мастильних середовищ у присутності хімічно активних речовин // Пр. Міжнар. наук. конф. "Наука і молодь". – К.: НАУ, 2001. – С. 13.

4. Оптимізація концентрації хімічно активних присадок у трансмісійних оливах вітчизняного виробництва: Звіт про НДР (завершал.) / Національний авіаційний університет. – 013-ДБ01; № ДР 0101V002732; Інв. № 0204U000857. – К., 2003. – 72 с.

5. Караулов А. К., Худолій Н. Н. Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение: Справочник. – К.: Журнал "Радуга", 2000. – 436 с.

6. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадыштова, С. А. Бнатов и др.; Под ред. В. М. Школьников. – 2-е изд. – М.: Издательский центр "Техинформ", 1999. – 596 с.

7. Смазочные материалы: Антифрикционные и противозносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р. М. Матвеевский, В. Л. Лаиха, И. А. Буяновский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.

8. Зорин В. А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.

9. Трансмиссионные масла. Пластичные смазки / Р. Балтенас, А. С. Сафонов, А. И. Ушаков, В. Шергалис. – СПб.: ООО "Изд-во ДНК", 2001. – 208 с.

10. Балабанов В. И., Беклемишев В. И., Гамидов А. Г. Безразборный сервис автомобиля (обкатка, профилактика, очистка, тюнинг, восстановление). – М.: Изд-во "Известия", 2007. – 272 с.

11. Захарченко А. В. Современные трибологические представления о технических маслах как основном элементе смазываемого сопряжения // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – № 30. – С. 192–199.

12. Сукач М. К. Автомобільні експлуатаційні матеріали. Ч. 1. Паливно-мастильні матеріали та спеціальні рідини. – К.: Університет "Україна", 2006. – 256 с.

13. Кламини Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты: Пер. с англ. / Под ред. Ю. С. Заславского. – М.: Химия, 1988. – 488 с.

14. Каталог Mobil. Промышленные масла. – К.: Представительство компании "Mobil Oil ou ab", 2000. – 62 с.

15. Мир ТСМ 2002. Каталог топливно-смазочных материалов. Топлива, масла, смазки и технические жидкости / Под ред. А. К. Караулова. – К.: Журнал "Радуга", 2002. – 256 с.

16. Синельников А. Ф., Балабанов В. И. Автомобильные топлива, масла и эксплуатационные жидкости: Краткий справочник. – М.: ЗАО КЖИ "За рулём", 2003. – 176 с.

17. Карасик И. И., Поляков С. А. Масштабный фактор и возможности моделирующих испытаний на существующих машинах трения // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, № 4. – С. 671–675.

18. Дубинин Г. Н., Тананов А. И. Авиационное материаловедение. – М.: Машиностроение, 1988. – 320 с.

19. Тимошук Л. Т. Механические испытания металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 224 с.

20. Детали машин. Розрахунок та конструювання / Г. В. Архангельський, М. С. Воробійов, О. І. Дубинець та ін. – К.: Талком, 2014. – 684 с.

21. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов. – М.: ОАО "Издательство "Недра", 2000. – 317 с.

22. Металловедение и термическая обработка стали. Т. 1. – 2-е изд. / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахитадта. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 752 с.

23. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М. Износостойкость сталей и сплавов. – М.: Нефть и газ, 1994. – 415 с.

24. Сорокин Г. М. Взаимосвязь механических свойств сталей и их износостойкость. – М.: Нефть и газ, 1995. – 69 с.

25. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

26. Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV-3. Надёжность машин / В. В. Клюев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин и др.; Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.

27. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.

28. Качество машин: справочник. В 2-х т. Т. 1 / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич и др.; Под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.

29. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; Под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

30. Закеев И. М., Варюхно В. В., Захарченко А. В. Прибор для оценки микромеханических свойств тонких поверхностных слоёв трибосопрежений // Пр. Міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2002". – К.: НАУ, 2002. – Т. 1. – С. 43.9–43.12.

31. Запорожець В. В., Закієв І. М., Білякович О. М., Захарченко А. В. Методика та приладне забезпечення для оцінки микромеханічних властивос-

- тей тонких поверхневих шарів // Пр. Міжнар. наук.-техн. конф. "Надтверді інструментальні матеріали на рубежі тисячоліть: отримання, властивості, застосування". – К.: ІНМ НАН України, 2001. – С. 262–263.
32. Прибор для испытаний материалов на микротвёрдость. А.с. 373581 СССР, МКИ G 01 N 3/42/ В. В. Запорожец, И. М. Закиев, Ю. А. Никитин (СССР). – № 4816775/28; Заявл. 19.04.90; Опубл. 07.02.93, Бюл. № 5. – 4с.
 33. Закиев И. М. Прибор для определения микромеханических характеристик поверхностного слоя материалов методами индентирования и склерометрии: Дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. – К., 2008. – 162 с.
 34. Захарченко А. В. Передумови виникнення нанотрибології. Ч. 1 // Пр. 12-ї Всеукр. наук. конф. "Молодь: освіта, наука, духовність". Ч. 2. – К.: Університет "Україна", 2015. – С. 358–359.
 35. Захарченко А. В. Передумови виникнення нанотрибології. Ч. 2 // Пр. 12-ї Всеукр. наук. конф. "Молодь: освіта, наука, духовність". Ч. 2. – К.: Університет "Україна", 2015. – С. 360–361.
 36. Современная трибология: Итоги и перспективы // Э. Д. Браун, И. А. Буяновский, Н. А. Воронин и др.; Под ред. К. В. Фролова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
 37. Григорович В. К. Твёрдость и микротвёрдость материалов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
 38. Булычёв С. И., Алёхин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
 39. Doerner M. F., Nix W. D. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments // J. Mater. Res. – 1986. – Vol. 1, № 4. – P. 601–609.
 40. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation measurements // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, № 6. – P. 1564–1583.
 41. ISO/FDIS 14577-1: 2002; Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method – Geneva: ISO Central Secretariat, 2002.
 42. Sneddon I. N. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // Intern. J. Sc. Engin. – 1965. – № 3 – P. 47–57.
 43. Склерометрия: Теория, методика, применение испытаний на твёрдость царапанием // Отв. ред. М. М. Хрущов. – М.: Наука, 1968. – 218 с.
 44. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – № 7. – P. 1564–1583.
 45. Хрущов М. М. Современные методы испытания на микротвёрдость царапанием, их варианты, применение и перспективы использования // Склерометрия. – М.: Наука, 1968. – С. 5–24.
 46. Комбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / Под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. – М.: Машиностроение, 2008. – 384 с.
 47. Хрущов М. М. Исследование шкалы твёрдости Мооса методом микротвёрдости // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1966. – № 12. – С. 74–82.
 48. Лебедева С. И. Определение твёрдости минералов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 123 с.
 49. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
 50. Запорожец В. В. Трибоспектральные методы оценки поверхностной прочности // Тр. 8-й Всесоюзной конф. по физике прочности и пластичности металлов и сплавов. – Куйбышев, 1976. – С. 25.
 51. Бердинских В. А., Запорожец В. В., Кордонский Х. Б., Пегов А. К. Основные принципы и аппаратура для корреляционной оценки поверхностных слоёв деталей машин // Новые физические методы контроля качества продукции. – М.: Изд-во МДНТП, 1977. – С. 94–98.
 52. Zaporozhets V. V. Evaluation of the uniformity of micro mechanical properties of the surface layer // Proceeding the 7th Int. Conf. of Metrology and Prop of End. Suffuse. – Geteborg (Sweden), 1997. – P. 417–431.
 53. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др.; Под ред. Б. И. Костецкого. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
 54. Физика твёрдого тела: Энциклопед. слов. Т. 1 / Сост.: В. Г. Барьяхтар, В. Л. Винецкий, А. С. Бакай и др. – К.: Наук. думка, 1996. – 652 с.
 55. Овчаров Л. А., Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: КноРус, 2011. – 448 с.
 56. Ковригин В. А., Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных процессов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 256 с.
 57. Запорожец В. В., Закиев И. М., Бердинских В. А. Динамические эффекты контактного взаимодействия в присутствии поверхностно-активных веществ // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 1. – С. 19–25.
 58. Запорожец В. В. Динамические характеристики прочности поверхностных слоёв и их оценка // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 4. – С. 602–609.
 59. Запорожец В. В., Бердинских В. А., Варюхно В. В. Выбор критериев и синтеза алгоритма оценки видов изнашивания // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 6. – С. 975–984.
 60. Билякович О. Н. Влияние загрязнённости трансмиссионных масел на смазочное действие и состояние поверхностных слоёв трибосопряжений: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – К., 1996. – 273 с.

References (transliterated)

1. Zakharchenko A. V. Problema optimizatsii kontsentratsii khimichno aktivnykh rechovin u transmisiynogo olivakh // Visnik Natsional'nogo aviatsiynogo universitetu. – Kyiv: NAU, 2005. – No 1. – P. 120–125.
2. Zakharchenko A. V. Vliyanie kontsentratsii khimicheskii aktivnykh veshchestv na smazochnoe deystvie i sostoyanie poverkhnostnykh sloev tribosopryazheniy // Pr. 5-i Mizhnar. nauk. konf. "Materiali dlya roboti v ekstremal'nikh umovakh". – Kyiv: NTU "KPI", 2015. – P. 277–280.
3. Zaporozhets' V. V., Bilyakovich O. M., Zakharchenko A. V. Protiznosni vlastivosti mastil'nikh seredovishch u prisutnosti khimichno aktivnykh rechovin // Pr. Mizhnar. nauk. konf. "Nauka i molod". – Kyiv: NAU, 2001. – P. 13.
4. Optimizatsiya kontsentratsii khimichno aktivnykh prisadok u transmisiynikh olivakh vitchiznyanogo virobnytstva: Zvit pro NDR (zavershal.) / Natsional'niy aviatsiyniy universitet. – 013-DB01; No DR 0101V002732; Inv. No 0204U000857. – Kyiv, 2003. – 72 p.
5. Karaulov A. K., Khudoliy N. N. Avtomobil'nye masla. Motornye i transmisiionnye. Assortiment i primeneniye: Spravochnik. – Kyiv: Zhurnal "Raduga", 2000. – 436 p.
6. Topлива, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primeneniye: Spravochnik / I. G. Anisimov, K. M. Badyshtova, S. A. Bnatov i dr.; Pod red. V. M. Shkol'nikova. – 2-e izd. – Moscow: Izdatel'skiy tsentr "Tekhinform", 1999. – 596 p.
7. Smazochnye materialy: Antifriktsionnye i protivoznosnye svoystva. Metody ispytaniy: Spravochnik / R. M. Matveevskiy, V. L. Lashkhi, I. A. Buyanovskiy i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 224 p.
8. Zorin V. A. Osnovy dolgovechnosti stroitel'nykh i dorozhnykh mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 248 p.
9. Transmisiionnye masla. Plastichnye smazki / R. Baltenas, A. S. Safonov, A. I. Ushakov, V. Shergalis. – S.-Peterburg: OOO "Izdvo DNK", 2001. – 208 p.
10. Balabanov V. I., Beklemyshev V. I., Gamidov A. G. Bezrazbornyy servis avtomobilya (obkatka, profilaktika, ochildka, tyuning, voss-tanovleniye). – Moscow: Izd-vo "Izvestiya", 2007. – 272 p.
11. Zakharchenko A. V. Sovremennye tribologicheskie predstavleniya o tekhnicheskikh maslakh kak osnovnom elemente smazyvaemogo sopryazheniya // Visnik NTU "KhPI". Seriya: Problemi mekhanichnogo privodu. – Kharkov.: NTU "KhPI", 2004. – No 30. – P. 192–199.
12. Sukach M. K. Avtomobil'ni ekspluatatsiyni materialy. Ch. 1. Palivno-mastil'ni materialy ta spetsial'ni ridini. – Kyiv: Universitet "Ukraina", 2006. – 256 p.
13. Klamann D. Smazki i rodstvennye produkty. Sintez. Svoystva. Primeneniye. Mezhdunarodnye standarty: Per. s angl. / Pod red. Yu. S. Zaslavskogo. – Moscow: Khimiya, 1988. – 488 p.
14. Katalog Mobil. Promyshlennyye masla. – Kyiv: Predstavitel'stvo kompanii "Mobil Oil oy ab", 2000. – 62 p.
15. Mir TSM 2002. Katalog toplivno-smazochnykh materialov. Topлива, masla, smazki i tekhnicheskie zhidkosti / Pod red. A. K. Karaulova. – Kyiv: Zhurnal "Raduga", 2002. – 256 p.
16. Sinel'nikov A. F., Balabanov V. I. Avtomobil'nye topliva, masla i ekspluatatsionnye zhidkosti: Kratkiy spravochnik. – Moscow: ZAO KZhi "Za rulem", 2003. – 176 p.
17. Karasik I. I., Polyakov S. A. Masshtabnyy faktor i vozmozhnosti modeliruyushchikh ispytaniy na sushchestvuyushchikh mashinakh treniya // Trenie i iznos. – 1983. – Vol. 4, No 4. – P. 671–675.
18. Dubinin G. N., Tananov A. I. Aviatsionnoye materialovedeniye. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 320 p.
19. Timoshchuk L. T. Mekhanicheskie ispytaniya metallov. – Moscow: Metallurgiya, 1971. – 224 p.
20. Detali mashin. Rozrakhunok ta konstruyuvannya / G. V. Arkhangel's'kiy, M. S. Vorobyov, O. I. Dubinets' ta in. – Kyiv: Talkom, 2014. – 684 p.
21. Sorokin G. M. Tribologiya staley i splavov. – Moscow: OAO "Izdatel'stvo "Nedra", 2000. – 317 p.
22. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali. Vol. 1. – 2-e izd. / Pod red. M. L. Bernshteyna, A. G. Rakhshatada. – Moscow: Metallurgizdat, 1961. – 752 p.
23. Vinogradov V. N., Sorokin G. M. Iznosostoykost' staley i splavov. – Moscow: Neft' i gaz, 1994. – 415 p.
24. Sorokin G. M. Vzaimosvyaz' mekhanicheskikh svoystv staley i ikh iznosostoykost'. – Moscow: Neft' i gaz, 1995. – 69 p.
25. Suslov A. G. Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 2000. – 320 p.
26. Mashinostroeniye: Entsiklopediya. Vol. IV-3. Nadezhnost' mashin / V. V. Klyuev, V. V. Bolotin, F. R. Sosnin i dr.; Pod red. V. V. Klyueva. – Moscow: Mashinostroeniye, 1998. – 592 p.

27. *Suslov A. G.* Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 207 p.
28. *Kachestvo mashin: spravochnik. V 2-kh vol. Vol. 1 / A. G. Suslov, E. D. Braun, N. A. Vitkevich i dr.; Pod red. A. G. Suslova.* – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 256 p.
29. *Inzheneriya poverkhnosti detaley / Koll. avt.; Pod red. A. G. Suslova.* – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 320 p.
30. *Zakiev I. M., Varyukhno V. V., Zakharchenko A. V.* Pribor dlya otsenki mikromekhanicheskikh svoystv tonkikh poverkhnostnykh sloev tribosopryazheniy // Pr. Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. "Avia-2002". – Kyiv: NAU, 2002. – Vol. 1. – P. 43.9–43.12.
31. *Zaporozhets' V. V., Zakiev I. M., Bilyakovich O. M., Zakharchenko A. V.* Metodika ta priladne zabezpechennya dlya otsenki mikromekhanichnikh vlastivostey tonkikh poverkhnivikh shariv // Pr. Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. "Nadtvirdki instrumental'ni materiali na rubezhi tisyacholit': otrimannya, vlastivosti, zastosuvannya". – Kyiv: INM NAN Ukraini, 2001. – P. 262–263.
32. Pribor dlya ispytaniy materialov na mikrotverdst': A.s. 373581 SSSR, MKI G 01 N 3/42/ V. V. Zaporozhets, I. M. Zakiev, Yu. A. Nikitin (SSSR). – no 4816775/28; Zayavl. 19.04.90; Opubl. 07.02.93, Bul. No 5. – 4 p.
33. *Zakiev I. M.* Pribor dlya opredeleniya mikromekhanicheskikh kharakteristik poverkhnostnogo sloya materialov metodami indentirovaniya i sklerometrii: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13. – Kyiv, 2008. – 162 p.
34. *Zakharchenko A. V.* Peredumovi viniknennya nanotribologii. Ch. 1 // Pr. 12-i Vseukr. nauk. konf. "Molod': osvita, nauka, dukhovnist". Ch. 2. – Kyiv: Universitet "Ukraina", 2015. – P. 358–359.
35. *Zakharchenko A. V.* Peredumovi viniknennya nanotribologii. Ch. 2 // Pr. 12-i Vseukr. nauk. konf. "Molod': osvita, nauka, dukhovnist". Ch. 2. – Kyiv: Universitet "Ukraina", 2015. – P. 360–361.
36. *Sovremennaya tribologiya: Itogi i perspektivy // E. D. Braun, I. A. Bulyanovskiy, N. A. Voronin i dr.; Pod red. K. V. Frolova.* – Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2008. – 480 p.
37. *Grigorovich V. K.* Tverdst' i mikrotverdst' materialov. – Moscow: Nauka, 1976. – 230 p.
38. *Bulychev S. I., Alekhin V. P.* Ispytanie materialov nepreryvnyim vdavlivaniem indentora. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 224 p.
39. *Doerner M. F., Nix W. D.* A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments // J. Mater. Res. – 1986. – Vol. 1, No 4. – P. 601–609.
40. *Oliver W. C., Pharr G. M.* An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation measurements // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, No 6. – P. 1564–1583.
41. ISO/FDIS 14577-1: 2002; Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method – Geneva: ISO Central Secretariat, 2002.
42. *Sneddon I. N.* The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // Intern. J. Sc. Engin. – 1965. – No 3 – P. 47–57.
43. Sklerometriya: Teoriya, metodika, primenenie ispytaniy na tverdst' tsarapaniem // Otv. red. M. M. Khrushchov. – Moscow: Nauka, 1968. – 218 p.
44. *Oliver W. C., Pharr G. M.* An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – No 7. – P. 1564–1583.
45. *Khrushchov M. M.* Sovremennyye metody ispytaniya na mikrotverdst' tsarapaniem, ikh varianty, primenenie i perspektivy ispol'zovaniya // Sklerometriya. – Moscow: Nauka, 1968. – P. 5–24.
46. *Kombalov V. S.* Metody i sredstva ispytaniy na trenie i iznos konstruksionnykh i smazochnykh materialov: spravochnik / Pod red. K. V. Frolova, E. A. Marchenko. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 384 p.
47. *Khrushchov M. M.* Issledovanie shkaly tverdsti Moosa metodom mikrotverdsti // Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya. – 1966. – No 12. – P. 74–82.
48. *Lebedeva S. I.* Opredelenie tverdsti mineralov. – Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963. – 123 p.
49. *Fridman Ya. B.* Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 2. Mekhanicheskie ispytaniya. Konstruksionnaya prochnost'. – Moscow: Mashinostroenie, 1974. – 368 p.
50. *Zaporozhets V. V.* Tribospektral'nye metody otsenki poverkhnostnoy prochnosti // Tr. 8-y Vsesoyuznoy konf. po fizike prochnosti i plastichnosti metallov i splavov. – Kuybyshev, 1976. – P. 25.
51. *Berdinskikh V. A., Zaporozhets V. V., Kordonskiy Kh. B., Pegov A. K.* Osnovnye printsipy i apparatura dlya korrelyatsionnoy otsenki poverkhnostnykh sloev detaley mashin // Novye fizicheskie metody kontrolya kachestva produktsii. – Moscow: Izd-vo MDNTP, 1977. – P. 94–98.
52. *Zaporozhets V. V.* Evaluation of the uniformity of micro mechanical properties of the surface layer // Proceeding the 7th Int. Conf. of Metrology and Prop of End. Suffuse. – Geteborg (Sweden), 1997. – P. 417–431.
53. Poverkhnostnaya prochnost' materialov pri trenii / B. I. Kostetskii, I. G. Nosovskiy, A. K. Karaulov i dr.; Pod red. B. I. Kostetskogo. – Kyiv: Tekhnika, 1976. – 296 p.
54. *Fizika tverdogo tela: Entsikloped. slov. T. 1 / Sost.: V. G. Bar'yakhtar, V. L. Vinetskiy, A. S. Bakay i dr.* – Kyiv: Nauk. dumka, 1996. – 652 p.
55. *Ovcharov L. A., Venttsel' E. S.* Teoriya sluchaynykh protsessov i eye inzhenernye prilozheniya. – Moscow: KnoRus, 2011. – 448 p.
56. *Kovrigin V. A., Shakhtarin B. I.* Metody spektral'nogo otsenivaniya sluchaynykh protsessov. – Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2011. – 256 p.
57. *Zaporozhets V. V., Zakiev I. M., Berdinskikh V. A.* Dinamicheskie efekty kontaktного vzaimodeystviya v prisutstvii poverkhnostno-aktivnykh veshchestv // Trenie i iznos. – 1988. – Vol. 9, No 1. – P. 19–25.
58. *Zaporozhets V. V.* Dinamicheskie kharakteristiki prochnosti poverkhnostnykh sloev i ikh otsenka // Trenie i iznos. – 1980. – Vol. 1, No 4. – P. 602–609.
59. *Zaporozhets V. V., Berdinskikh V. A., Varyukhno V. V.* Vybore kriteriev i sintez algoritma otsenki vidov iznashivaniya // Trenie i iznos. – 1988. – Vol. 9, No 6. – P. 975–984.
60. *Bilyakovich O. N.* Vliyanie zagryaznennosti transmissionnykh masel na smazochnoe deystvie i sostoyanie poverkhnostnykh sloev tribosopryazheniy: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.04. – Kyiv, 1996. – 273 p.

Поступила (received) 23.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Влияние концентрации химически активных веществ на микромеханические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений: объекты, средства и методы исследований / А. В. Захарченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 41–50. – Бібліогр.: 60 назв. – ISSN 2079-0791.

Влияние концентрации химически активных веществ на микромеханические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений: объекты, средства и методы исследований / А. В. Захарченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 23 (1195). – С. 41–50. – Бібліогр.: 60 назв. – ISSN 2079-0791.

The influence of the concentration of chemically active substances on the micromechanical characteristics of the surface layers of friction units: the objects, means and methods of research / A. V. Zakharchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 23 (1195). – P. 41–50. – Bibliogr.: 60. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Захарченко Андрій Володимирович – Університет "Україна", Інженерно-технологічний інститут, доцент кафедри автомобільного транспорту; тел. : (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.

Захарченко Андрей Владимирович – Університет "Україна", Інженерно-технологічний інститут, доцент кафедри автомобільного транспорту; тел. : (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.

Zakharchenko Andriy Volodymyrovych – University "Ukraine", Institute of engineering and technology, Associate Professor at the Department of automobile transport; tel. : (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.