



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.4

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.

начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» — заведующий лабораторией приводных систем и технологического оборудования¹

E-mail: vladbas@mail.ru

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, доц.

профессор кафедры теоретической и прикладной механики²

E-mail: bogal@tut.by

О.М. ЕЛОВОЙ, канд. техн. наук

заместитель генерального директора по научной работе и инновационной деятельности¹

E-mail: omy@bk.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 09.07.2021.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ. ЧАСТЬ 2

В статье рассматривается ряд новых направлений развития методов и средств экспериментальной механики. Дается краткий анализ таких тенденций, как унификация методов испытаний и расчета, развитие оборудования и методов испытаний в экстремальных условиях, широкое применение акустико-эмиссионных методов и видеорегистрации при испытаниях, создание и развитие оборудования и методов комплексных испытаний (например, износоусталостных) материалов и изделий. Также отмечены достижения белорусских ученых в области экспериментальной механики контактного взаимодействия, включая адгезиометр для измерений молекулярного взаимодействия технических поверхностей; миллитрибометр для измерения сил трения при нагрузках, характерных для прецизионного контакта; бортовой трибометр для проведения испытаний материалов на трение и износ в экстремальных условиях действия факторов космического пространства.

Ключевые слова: прочность, долговечность, трение, испытания, механические свойства

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-71-82>

Введение. В предыдущей статье [1] показана актуальность методов экспериментальной механики для надежной и безопасной эксплуатации современных инженерных конструкций. В [1] также отмечен ряд основных тенденций развития методов и средств экспериментальной механики, а именно:

1) автоматизация и роботизация испытаний;
2) уменьшение размеров объектов (моделей, образцов) лабораторных испытаний, их унификация, а также связанная с этим миниатюризация оборудования и средств измерения;

3) повышение точности средств измерения и автоматизация обработки результатов испытаний;

4) разработка новых методов ускоренных испытаний материалов и повышение точности прогнозирования с их помощью механических характеристик;

5) быстрое развитие методов пробоподготовки, включая аддитивные технологии, позволяющие в испытательной лаборатории самостоятельно изготовить объекты испытаний необходимого качества;

6) появление и развитие методов экспериментального исследования механических характеристик наноматериалов;

7) унификация методов испытаний и расчета;

8) развитие оборудования и методов испытаний в экстремальных условиях;

9) широкое применение акустико-эмиссионных методов и видеорегистрации при испытаниях, особенно изделий из композиционных материалов;

10) использование онлайн-систем управления испытаниями, наиболее эффективных, когда оператору опасно находиться в зоне тестирования ввиду наличия поражающих факторов;

11) создание и развитие оборудования и методов комплексных испытаний (например, износоусталостных) материалов и изделий, позволяющих организовать воздействие на объект двух и более повреждающих явлений;

12) разработка методов, оборудования и средств измерения для испытаний различных покрытий, тонких пленок, а также для испытаний в специальных средах.

Был также произведен краткий анализ тенденций 2 и 6.

В настоящей статье авторы продолжают рассмотрение некоторых тенденций в развитии экспериментальной механики с примерами достижений белорусских ученых и специалистов.

Новые направления в развитии методов и средств экспериментальной механики (продолжение). Тенденция 7 (унификация методов испытаний и расчета) вызвана стремлением обобщить известные методики расчета и испытаний при разных видах нагружения, стадиях и механизмах разрушения с единых позиций и в последующем нормировать их. Если рассматривать расчеты и испытания на прочность, то соответствующее обобщение предложено в Институте машиноведения имени А.А. Благоднарова РАН на основе деформационного подхода Н.А. Махутова [2], согласно которому для всех объектов машиностроительного комплекса решение проблем прочности, ресурса и безопасности в значительной степени сводится к научно обоснованному определению допустимых расчетных параметров ресурса и удержанию уровней напряжений и деформаций рассматриваемых объектов в допустимых пределах. Предложены четыре основных критериальных выражения для оценки прочности и долговечности, на основе которых решают три унифицированные задачи:

- строят уравнения состояния (диаграммы деформирования), связывающие напряжения и деформации в упругой и неупругой областях;

- решают линейные и нелинейные краевые задачи о напряженно-деформированных состояниях в зонах неоднородного распределения напряжений и деформаций;

- обосновывают и выбирают критерии достижения предельных состояний — недопустимых (критических) пластических деформаций и напряжений при потере устойчивости и разрушении.

В соответствии с этим подходом, основанном на унифицированных методах расчетов и испытаний, для оценки условий безопасной эксплуатации и достижения предельных состояний, устанавливают критериальные величины и ключевые запасы прочности, ресурса, трещиностойкости, и с помощью комплекса предложенных уравнений учитывают конструкторские, технологические и эксплуатационные факторы. При этом конструкционные факторы отражаются в решениях краевых упругих и упругопластических задач по определению расчетными и экспериментальными методами напряженно-деформированного состояния создаваемых и эксплуатируемых объектов. Влияние технологических факторов производства материалов и вида их исходного формообразования для получения изделий, отражающиеся на механических свойствах, оценивается по результатам испытания лабораторных образцов. Эксплуатационные факторы (рисунки 1, 2) в наибольшей степени сказываются на механических свойствах материалов, что, в свою очередь, влияет на напряженно-деформированные и предельные состояния конструкций в их локальных зонах [2].



Рисунок 1 — Траектории повреждаемости объектов на различных стадиях жизненного цикла [3]

Figure 1 — Trajectories of damage to objects at various stages of the life cycle [3]



Рисунок 2 — Состояния, сценарии и факторы эксплуатации объектов с учетом возможности возникновения аварий и катастроф [3]

Figure 2 — Conditions, scripts and factors of operation of facilities, taking into account the possibility of accidents and catastrophes [3]

Развитие оборудования и методов испытаний в экстремальных условиях (тенденция 8) востребовано в связи с необходимостью эксплуатации машин, оборудования, приборов и конструкций в таких условиях, как высокие и низкие температуры, давление, глубокий вакуум. Например, большой проблемой высокотемпературных испытаний жаропрочных материалов, в том числе углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), является нагрев до высоких температур (до 3000 °С) за относительно короткое время и измерение перемещений (деформаций) образцов под действием приложенной нагрузки. Стандартное оборудование и средства измерения не позволяют решить задачу. Поэтому в АО «НИИГрафит» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (г. Москва) была разработана универсальная испытательная машина ИМГр-3000-1000, позволяющая проводить кратковременные механические испытания графитовых и углеродных материалов при температурах до 3000 °С не только на растяжение и сжатие, но и на изгиб [4]. Испытательная машина состоит из трех секций (рисунок 3) с общей неподвижной станиной (траверсой) 10 и общим электроприводом 7 для увеличения производительности испытаний при температурах выше 2200 °С, при которых длительность охлаждения печи составляет 30–90 мин. Поэтому образец испытывают сначала на одной секции, затем привод переключается на другую секцию,

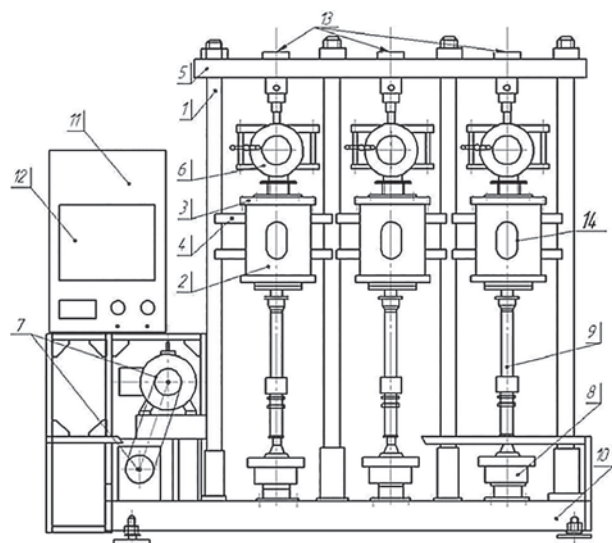


Рисунок 3 — Схема универсальной испытательной машины ИМГр-3000-1000 [4]: 1 — колонна; 2 — высокотемпературная печь; 3 — водоохлаждаемая токоподводящая крышка; 4 — текстолитовая направляющая; 5 — верхняя неподвижная траверса; 6 — камера измерителя деформации; 7 — привод; 8 — червячный редуктор; 9 — нижняя водоохлаждаемая тяга; 10 — нижняя траверса; 11 — пульт управления; 12 — самописец; 13 — силоизмерители; 14 — иллюминаторы

Figure 3 — Scheme of the universal testing machine IMGr-3000-1000 [4]: 1 — pillar; 2 — high-temperature furnace; 3 — water-cooled current-carrying cover; 4 — textolite guide; 5 — upper fixed traverse; 6 — deformation meter chamber; 7 — drive; 8 — worm gear; 9 — lower water-cooled rod; 10 — lower traverse; 11 — control panel; 12 — recorder; 13 — force meters; 14 — portholes

куда устанавливают образец, нагревают его до заданной температуры с последующей выдержкой и нагружением. После испытания на второй секции привод переключают на третью секцию и повторяют процедуру установки, нагрева и нагружения следующего образца. Наличие трех секций машины позволяет проводить на ней последовательно высокотемпературные испытания образцов на растяжение, сжатие и изгиб при температурах до 3000 °С.

Для измерения продольной деформации при растяжении, сжатии и прогибе образцов используется дилатометрическая система, состоящая (рисунок 4) из трех составных экстензометрических стержней: одного центрального (4), который своим графитовым заостренным концом опирается на торец верхней головки образца 1, и двух крайних стержней (5), опирающихся заостренными концами в графитовое коромысло 7. Последнее устанавливается на два игольчатых стержня 10 из мелкозернистого графита, которые, проходя через отверстия в нижнем захвате, упираются

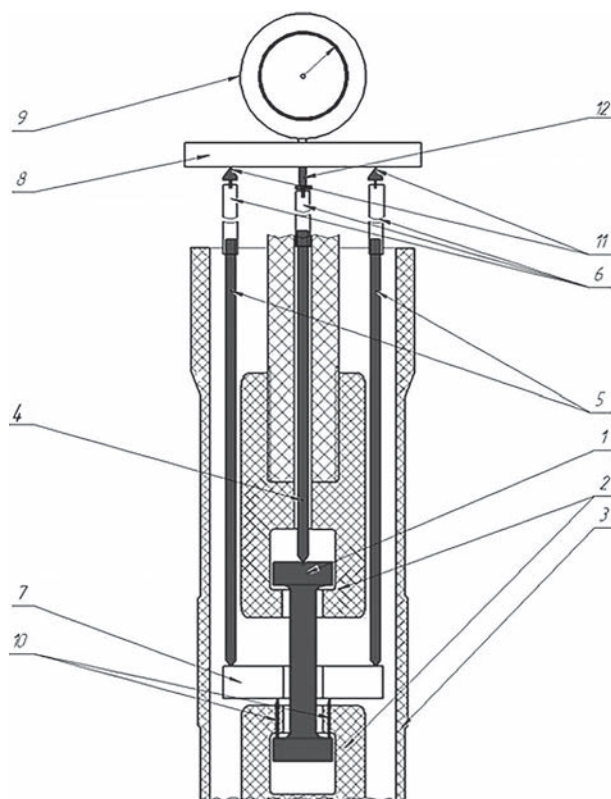


Рисунок 4 — Схема дилатометрической системы измерения деформации [4]: 1 — испытуемый образец; 2 — графитовые захваты; 3 — графитовый нагреватель; 4 — центральный графитовый стержень; 5 — боковые графитовые стержни; 6 — кварцевые стержни; 7 — графитовое коромысло; 8 — платформа; 9 — измерительная головка; 10 — игольчатые стержни; 11 — стальные наконечники; 12 — подвижный шток индикатора часового типа

Figure 4 — Diagram of the dilatometric deformation measurement system [4]: 1 — test sample; 2 — graphite grips; 3 — graphite heater; 4 — central graphite rod; 5 — side graphite rods; 6 — quartz rods; 7 — graphite rocker arm; 8 — platform; 9 — measuring head; 10 — needle rods; 11 — steel tips; 12 — movable rod of the clock type indicator

в опорную торцевую поверхность нижней головки образца. Верхние концы кварцевых трубчатых стержней со стальными наконечниками выведены в водоохлаждаемую камеру, у которой поддерживается комнатная температура. В камере на специальной платформе 8 установлена измерительная головка 9, представляющая собой индикатор часового типа. Платформа опирается на два стальных наконечника 11 крайних кварцевых стержней, при этом средний стержень с седловидным наконечником упирается в подвижный шток индикатора 12. В результате крайние стержни перемещаются вместе с нижней головкой образца, фиксируя ее перемещение относительно его верхней головки. К индикатору прикреплена консольная балочка с наклеенными на нее тензодатчиками, которая свободным концом касается верхнего конца штока. Когда шток нажимает на балочку, она изгибается, вызывая изменение электрического потенциала на тензодатчиках.

Разработаны также специальные образцы из УУКМ и методики испытаний [4].

Тенденцию 9 (широкое применение акустико-эмиссионных методов и видеорегистрации при испытаниях) проиллюстрируем на следующих примерах. В Институте машиноведения имени А.А. Благонравова РАН на протяжении ряда лет исследуется возможность применения акустической эмиссии (АЭ) для количественной оценки процесса накопления повреждений и определения остаточной прочности изделий, изготовленных из современных конструкционных материалов, при статических и циклических нагрузках. Для этого используют структурно-феноменологический подход, позволяющий с помощью современных методик кластерного анализа импульсов АЭ событий, реализуемых с применением МКЭ, нейронных сетей, синхронной видеосъемки накопления повреждений на разных структурных уровнях материала, и включающих фрактографические исследования разрушений, спектральный и вейвлет-анализ распределения плотности энергии спектров, установить перекрестные связи между процессами накопления повреждений и разрушения структурных связей конструкционного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях и генерируемыми при этом акустическими сигналами [5–7].

В работе [5] исследован процесс разрушения однонаправленного ламината при растяжении с помощью АЭ и видеорегистрации. Путем сопоставления событий АЭ, регистрируемых на стадиях нагружения испытываемых образцов, с кадрами видеосъемки микроисследований накопления повреждений и разрушения структурных связей в пакете однонаправленного ламината установлено соответствие между происходящими разрушениями на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях, генерируемыми при этом акустическими

волнами и регистрируемыми преобразователями АЭ локационными импульсами, их энергетическими параметрами, формой и спектром. На рисунке 5 показаны типичные формы и спектры локационных импульсов, регистрируемых широкополосными преобразователями UT-1000 на разных стадиях нагружения образца.

Для обнаружения и измерения дефектов типа микротрещин в материалах, характеризующихся низкой отражательной способностью (полимерах, кварцевых и органических стеклах), в последнее время применяют специальные, так называемые видеоизмерительные машины, поскольку традиционное оборудование и технологии, используемые в научных исследованиях и на производстве (микроскопы, работающие по принципу отражения или пропускания светового потока), не гарантируют удовлетворительного результата. Результаты измерения дефектов в ряде материалов с низкой отражательной способностью на видеоизмерительных машинах моделей Micro-Vu Sol 161 (США) и MarVision MM 320 (Германия) представлены в работе [8]. Дефекты измеряли (рисунки 6, 7) по нескольким параметрам: длине самой протяженной и наиболее короткой трещины; площади (при виде сверху) и максимальной глубине дефекта. Применялась методика простановки реперных точек.

Тенденция 11 (создание и развитие оборудования и методов комплексных испытаний (например, износоусталостных) материалов и изделий) особенно стала заметной в последние три десятилетия, в первую очередь, благодаря усилиям белорусских ученых и специалистов под руководством профессора Л.А. Сосновского в рамках нового направления в механике — трибофатики. За эти годы был реализован ряд проектов по созданию модульных машин серии СИ настольного типа с информационно-управляющей системой на базе ПК и электрошпинделем привода образца, компактных, работающих в автоматическом режиме [9]. С помощью этих машин получены оригинальные результаты, установлены новые закономерности износоусталостных повреждений, ставшие уже классикой [9–16]. Они неоднократно обсуждались на различных международных форумах, опубликованы в ряде монографий, статьях в ведущих научных журналах. Отработаны новые методики испытаний и измерений, в том числе ускоренных [17–20], разработаны требования к машинам для износоусталостных испытаний, которые стали стандартными [21].

Рассмотрим формирование унифицированных методов износоусталостных испытаний на примере фрикционно-механической (ФМУ) и контактно-механической (КМУ) усталости (рисунок 8).

Испытания на ФМУ (см. рисунок 8 *е*). Цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 .

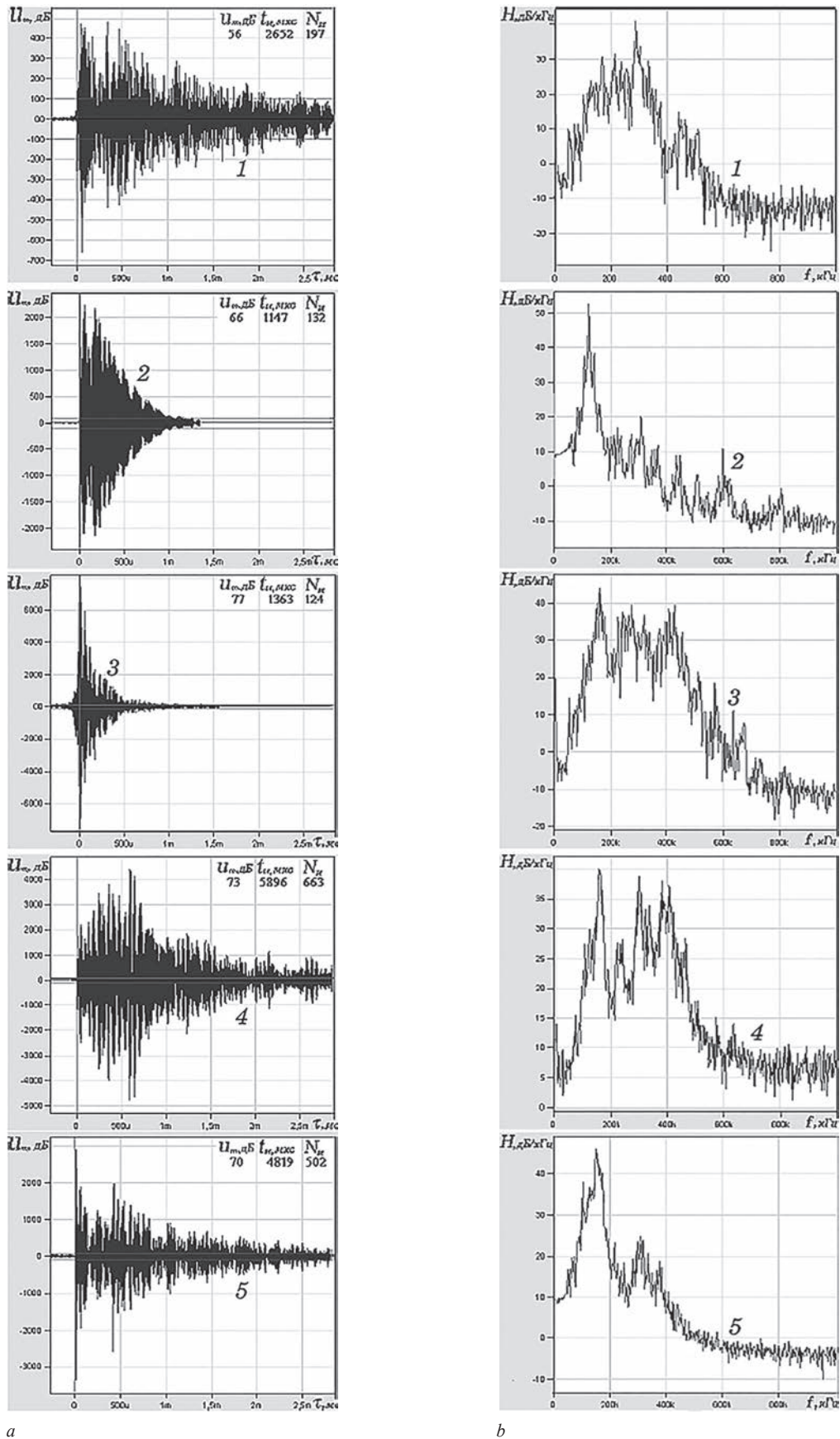
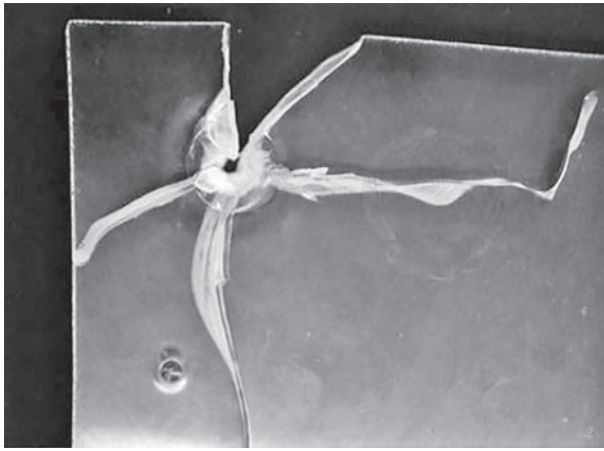
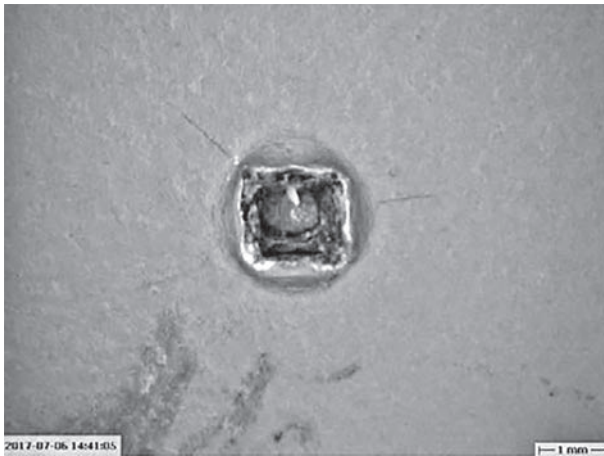


Рисунок 5 — Формы (a) и спектры (b) локационных импульсов, регистрируемых АЭ преобразователями UT-1000 на стадиях нагружения образца пакета ламината, генерируемых процессами отделения связующего (1) от волокон, образования трещин в матрицах слоев (2), разрыва волокон (3), их вырывания из связующего (4), межслоевого расслаивания (5) [5]
 Figure 5 — Shapes (a) and spectra (b) of location pulses recorded by UT-1000 acoustic emission converters at the loading stages of the laminate package sample generated by the processes of separation of the binder (1) from the fibers, the formation of cracks in the matrices of layers (2), the rupture of fibers (3), their tearing out of the binder (4), interlayer delamination (5) [5]



a



b

Рисунок 6 — Примеры дефектов в образцах стекла, применяемого для остекления кабины летательного аппарата (a) и в авиаприборах (b), изученных на видеоизмерительной машине Micro-Vu Sol 161 [8]

Figure 6 — Examples of defects in samples of glass used for glazing the cabin of an aircraft (a) and in aircraft appliances (b) studied on the Micro-Vu Sol 161 video measuring machine [8]

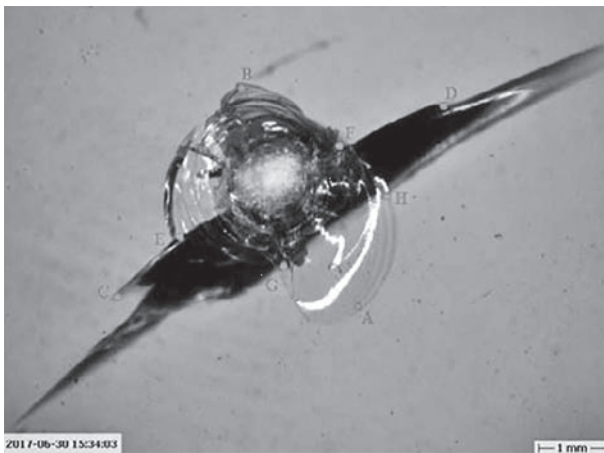


Рисунок 7 — Пример дефекта в стекле с реперными точками [8]
Figure 7 — Example of a defect in glass with fixed points [8]

На другом его конце приложена вертикальная изгибающая (внеконтактная) нагрузка Q (вверх или вниз). А к его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N неподвижно закрепленный контрообразец 3, на-

пример, пластина или частичный вкладыш. Таким образом, в рабочей зоне образца одновременно возникают максимальные контактные и изгибные напряжения.

При реализации схемы испытаний согласно рисунку 8 e можно проводить:

- износоусталостные испытания на ФМУ (см. рисунок 8 e) с варьированием величин F_N , Q и ω .
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 8 c) с варьированием величин Q и ω . В этом случае контрообразец 3 снимают, так что $F_N = 0$;
- испытания на трение и изнашивание при скольжении (см. рисунок 8 d) с варьированием величин F_N и ω . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 с целью экономии материала делают укороченным.

Испытания на КМУ (см. рисунок 8 a). Эта схема отличается от схемы испытаний на ФМУ (см. рисунок 8 e) тем, что неподвижно закрепленный контрообразец заменен на вращающийся ролик 4. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 и в различных направлениях. При реализации схемы испытаний согласно рисунку 8 a можно проводить:

- износоусталостные испытания на КМУ (см. рисунок 8 a) с варьированием величин F_N , Q , ω_1 и ω_2 ;
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 8 c) с варьированием величин Q и ω ; в этом случае ролик 3 снимают, так что $F_N = 0$ и $\omega_2 = 0$;
- испытания на трение качения или трение качения с проскальзыванием (см. рисунок 8 b) с варьированием величин F_N , ω_1 и ω_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 с целью экономии материала делают укороченным.

На рисунке 9 представлено фото одной из последних разработок ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» — испытательный центр SZ-01, изготовленный по заказу БГУ. Это многофункциональный и эффективный исследовательский инструмент, который активно используется в учебном процессе, а также для научных исследований с участием студентов, магистрантов и аспирантов механико-математического факультета [22], он является важной составляющей для подготовки высококвалифицированного специалиста и ученого.

Следует также отметить ряд достижений в области экспериментальной механики контактного взаимодействия, где заметную роль играют белорусские ученые.

Так, для измерений молекулярного взаимодействия технических поверхностей в Институте механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси разработан адгезиомер, основанный на использовании схемы вер-

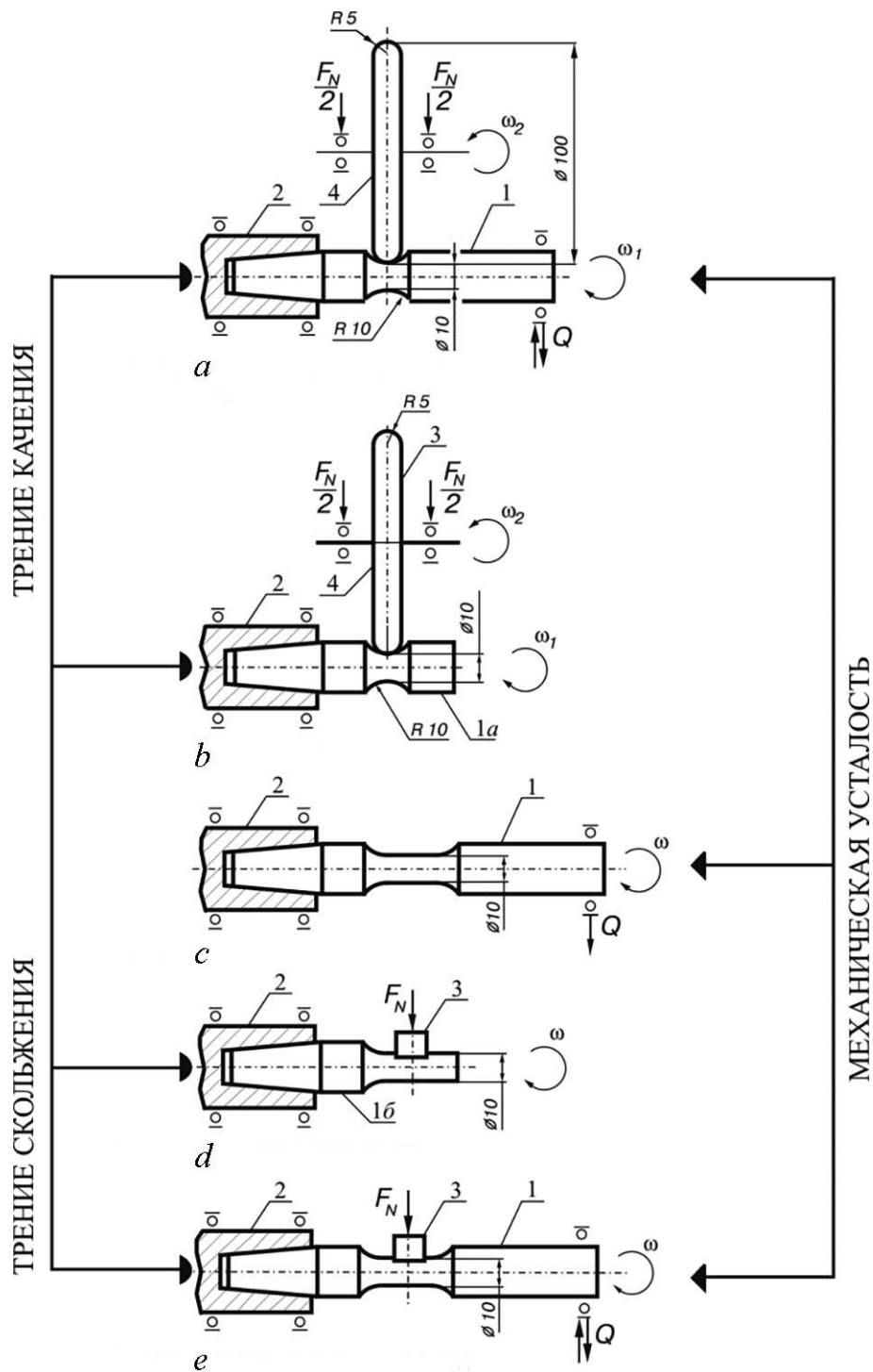


Рисунок 8 — Типичные схемы износусталостных испытаний: *a* — контактно-механическая усталость; *b* — контактная усталость; *c* — механическая усталость; *d* — фрикционная усталость; *e* — фрикционно-механическая усталость (1, 1а, 1б — образец; 2 — шпиндель испытательной машины; 3, 4 — контрообразец; Q — изгибающая нагрузка; F_N — контактная нагрузка; ω_1, ω_2 — скорость вращения образца, контрообразца)

Figure 8 — Typical schemes of wear-fatigue tests: *a* — mechano-rolling fatigue; *b* — contact fatigue; *c* — mechanical fatigue; *d* — friction fatigue; *e* — mechano-sliding fatigue (1, 1a, 1b — sample; 2 — spindle of the testing machine; 3, 4 — counter-sample; Q — bending load; F_N — contact load; ω_1, ω_2 — rotation speed of the sample, counter-sample)

тикальных торсионных весов с отрицательной обратной связью [23]. Измерительная часть контактного адгезиометра представляет собой вертикально расположенную рамку 1 (рисунок 10 *a*), подвешенную на струне 2. На одном плече рамки расположен держатель пробного тела 3, на втором плече — постоянный магнит 4, помещенный меж-

ду полюсами электромагнита 5. К рамке крепится зеркало 6, отражающее пучок света от источника 7 на фотоприемник 8. При силовом воздействии на пробное тело 3 рамка 2 с зеркалом 6 поворачивается, изменяя количество света, падающего на фотоприемник 8. Сигнал с фотоприемника поступает в электронный блок 9, который регистрирует



Рисунок 9 — Общий вид испытательного центра SZ-01
Figure 9 — General view of the SZ-01 test center

и изменяет ток в катушке электромагнита 5 до значения, обеспечивающего обратный поворот рамки 1 в исходное равновесное положение. Таким образом, любое изменение действующих на пробное тело сил компенсируется соответствующим изменением тока в катушке электромагнита 5, обеспечивая неизменное положение рамки. Ток в катушке 5 прокалиброван, что в итоге позволяет измерить действующие силы между пробным телом и образцом 10, расположенным на столике 11.

Столик 11 перемещается винтовой парой 12 с помощью шагового двигателя 13 или вращением ручки 14. Точное перемещение производится пьезоэлементом 15, путем подачи на его обкладки напряжения от блока 9. Блок 9 соединен с компьютером 16, осуществляющим контроль процесса измерения и регистрации информации. В исходном положении образец и пробное тело (шарик)

находятся на расстоянии, исключающем их взаимное влияние друг на друга. Пьезоэлемент 15 «растянут» (на него подано максимальное электрическое напряжение), и в этом положении ток, протекающий в катушке электромагнита 5, принимается равным нулевой силе взаимодействия образцов. Далее образец 10 с помощью шагового двигателя 13 подводится к пробному телу до достижения заданной по условиям эксперимента начальной контактной нагрузки. Измерительный цикл начинается по достижении требуемой нагрузки или после заданного времени выдержки путем отвода образца 10 с помощью пьезоэлемента 15. В процессе отвода сила взаимодействия образцов меняется, рамка 2 поворачивается, что соответствующим образом компенсируется током в катушке электромагнита 5. По достижении заданного расстояния между шариком и образцом, цикл измерений проводится в обратной последовательности — при сближении образца и шарика.

Результатом эксперимента являются две зависимости (см. рисунок 10 *b*), характеризующие силовое взаимодействие при отводе 1 и подводе 2 образца к пробному телу. Для защиты от вибраций прибор 1 размещался на платформе, подвешенной на четырех упругих элементах в рамке 2 (см. рисунок 10 *c*). Вся эта конструкция помещается в камеру контроля влажности 3.

Данный прибор позволил оценить эффективность применения мономолекулярных покрытий в качестве аналога граничных смазок для прецизионных малогабаритных узлов трения и развить представления о механизмах трения фрикционных пар при нагрузках, соизмеримых с силами адгезионного взаимодействия [24].

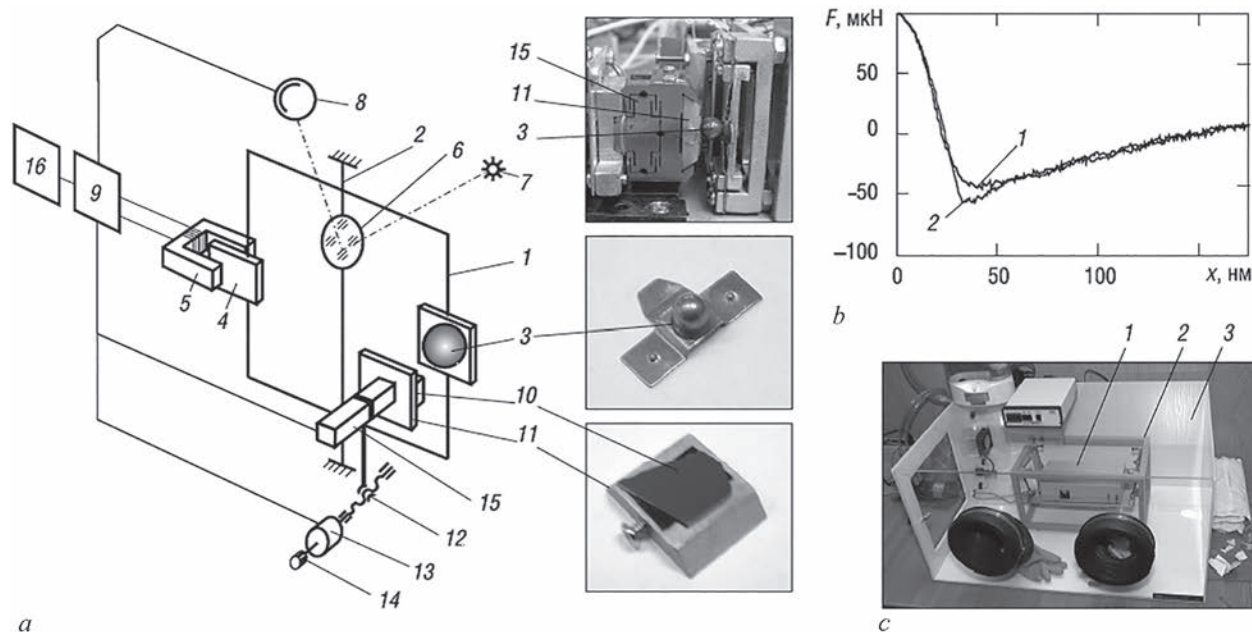


Рисунок 10 — Измерение поверхностных сил: *a* — принципиальная схема прибора; *b* — характерная зависимость силы межмолекулярного взаимодействия поверхностей от расстояния между ними; *c* — общий вид установки (обозначения см. по тексту) [25]
Figure 10 — Measurement of surface forces: *a* — schematic diagram of the device; *b* — characteristic dependence of the force of intermolecular interaction of surfaces on the distance between them; *c* — general view of the installation (see the designations in the text) [25]

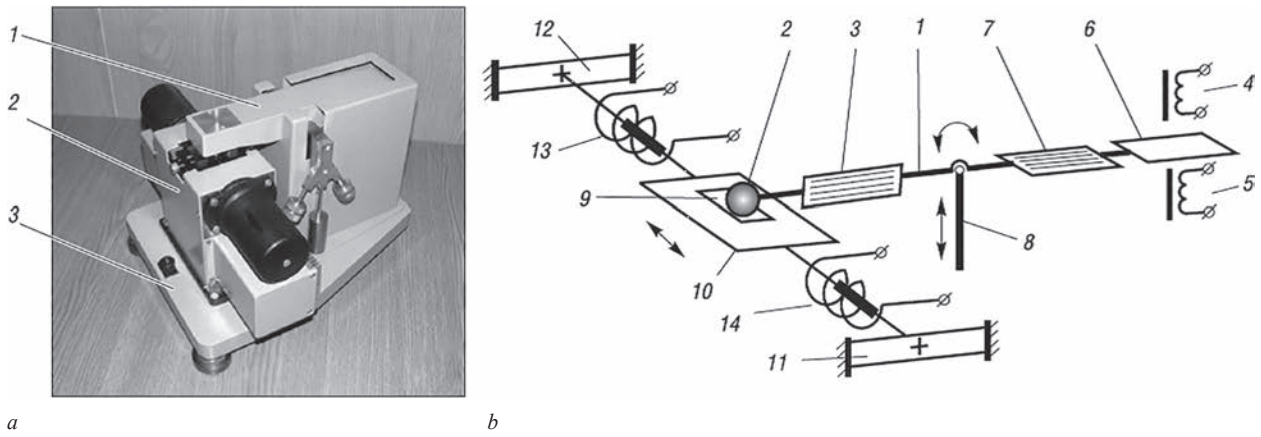


Рисунок 11 — Конструкция миллитрибометра МТУ-2К7: *a* — общий вид прибора; *b* — принципиальная схема (1 — коромысло; 2 — сферическое контргтело; 3 — датчик силы трения; 4, 5, 13, 14 — электромагниты; 6 — якорь; 7 — датчик контактной нагрузки; 8 — подъемный механизм; 9 — образец; 10 — стол; 11, 12 — пружинные шарниры [26])
Figure 11 — Design of the millitribometer MTU-2K7: *a* — general view of the device; *b* — schematic diagram (1 — rocker arm; 2 — spherical counterbody; 3 — friction force sensor; 4, 5, 13, 14 — electromagnets; 6 — anchor; 7 — contact load sensor; 8 — lifting mechanism; 9 — sample; 10 — table; 11, 12 — spring hinges [26])

Измерение сил трения при нагрузках, характерных для прецизионного контакта, — от единиц до нескольких сотен микроныютонов — имеет ряд особенностей из-за влияния сил межмолекулярного взаимодействия поверхностей. При трении из-за неоднородности свойств поверхностных слоев эти силы могут резко изменяться, что может приводить к кратным изменениям нормальной нагрузки и сил трения. Для обеспечения возможности сертификации материалов малогабаритных прецизионных узлов трения путем испытания их в миллиразмерном диапазоне нагрузок и скоростей в Институте механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси разработан миллитрибометр МТУ-2К7 [26]. Прибор предназначен для измерения сил (коэффициентов) трения материалов и покрытий в контакте со сферическим контргтелом при их возвратно-поступательном относительном движении. Испытания могут проводиться как в условиях сухого трения, так и при трении в среде смазочного материала. Скорость скольжения выбирается из интервала 0,1–10 мм/с. Длина трассы трения регулируется

от 1 до 10 мм. Диапазон устанавливаемых при испытаниях нормальных нагрузок составляет 10–1000 мН. Шарик-контргтело может иметь диаметр от 1 до 5 мм. Контролируемые диапазоны изменений нагрузки и диаметра шарика обеспечивают давление, достаточное для испытаний практически всех классов материалов — от полимеров до металлов, в условиях от упругого до пластичного состояния в контакте. Это существенно расширяет область применения прибора, позволяя использовать его для экспрессной оценки триботехнических свойств материалов узлов трения общего назначения.

Конструктивно миллитрибометр состоит из двух основных блоков — силоизмерительного модуля 1 и привода возвратно-поступательного движения 2, расположенных на основании 3 (рисунок 11 *a*). Принципиальная схема прибора изображена на рисунке 11 *b*.

Испытания проводятся в автоматическом режиме. Управление осуществляется с помощью специальной программы, позволяющей ввести требуемые по условиям эксперимента значения

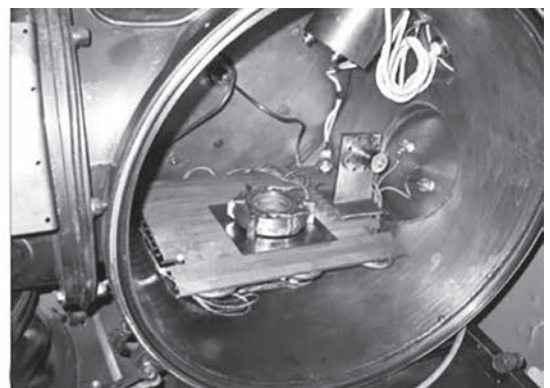
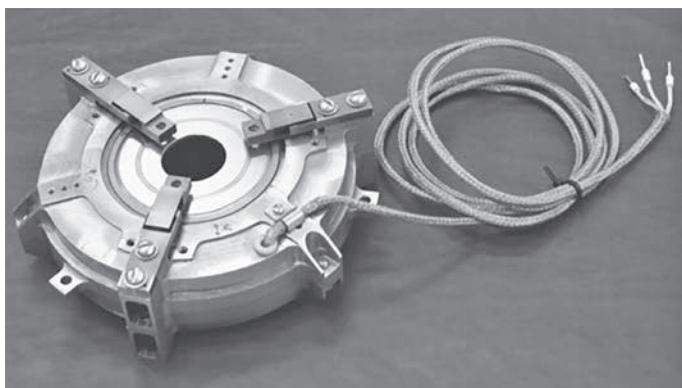


Рисунок 12 — Оборудование для проведения испытаний материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных условиях: *a* — бортовой трибометр; *b* — трибометр в камере имитационных криовакуумных испытаний [25]
Figure 12 — Equipment for testing materials for friction and wear in open space and ground conditions: *a* — on-board tribometer; *b* — tribometer in the chamber of simulated cryovacuum tests [25]

нагрузки, скорости скольжения, длины единичного хода и требуемого пути трения. В ходе эксперимента программа регистрирует данные, поступающие с микротрибометра, и формирует файл протокола эксперимента. Испытания прекращаются по достижении заданного пути трения или превышении некоторого заранее установленного предельного коэффициента трения (обычно единицы).

Для проведения испытаний материалов на трение и износ в экстремальных условиях действия факторов космического пространства в НАН Беларуси при участии академических учреждений — Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Физико-технического института НАН Беларуси, а также НПО «Планар» был изготовлен бортовой трибометр (рисунок 12 а). В ходе эксперимента предполагается провести ряд наземных испытаний тех же материалов. Наземные испытания будут проводиться по двум схемам. Первая схема основана на максимальном приближении к условиям работы бортового трибометра — это так называемые имитационные испытания в криовакуумной камере на идентичном бортовому приборе (см. рисунок 12 б), вторая предполагает проведение исследований в стандартных физических условиях [25].

Заключение. Непрерывное усложнение конструкций изделий машиностроения, приборостроения, рост нагрузок, скоростей, работа в экстремальных условиях, применение в связи с этим новых конструкционных материалов, покрытий, безусловно, стимулирует ученых, специалистов, коммерческие компании совершенствовать испытательную технику, средства измерения, разрабатывать новые методы испытаний и исследований. В этом процессе важно знать и использовать передовые технологии, оборудование и опыт, еще более важно и ответственно — быть первопроходцами. Авторы выражают уверенность, что ученые, работающие в учреждениях академической и вузовской науки, в содружестве с ведущими предприятиями непременно достигнут новых успехов в экспериментальной механике.

Список литературы

- Басинюк, В.Л. Современные тенденции в развитии методов и средств экспериментальной механики. Часть 1 / В.Л. Басинюк, А.В. Богданович, О.М. Еловой // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 4(57). — С. 78–86. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-78-86>.
- Махутов, Н.А. Унификация методов расчетов и испытаний на прочность, ресурс и трещиностойкость / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2019. — Т. 85, № 10. — С. 47–54. — DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-47-54>.
- Махутов, Н.А. Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области машиностроения с использованием критериев прочности, ресурса, трещиностойкости и безопасности / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Т. 84, № 10. — С. 41–52. — DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-10-41-52>.
- Мостовой, Г.Е. Особенности механических испытаний углеродных и углерод-углеродных композиционных материалов при температурах до 3000 °С / Г.Е. Мостовой, А.П. Карпов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017. — Т. 83, № 5. — С. 56–61.
- Матвиенко, Ю.Г. Исследование кинетики разрушения однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии и видеорегистрации / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2019. — Т. 85, № 11. — С. 45–61. — DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>.
- Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission / M. Saeedifar [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2018. — Vol. 144. — Pp. 206–219. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.028>.
- Brunner, A.J. Acoustic emission analysis for identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer composites and structural integrity assessment: selected examples and challenges / A.J. Brunner / Progress in acoustic emission XVIII: 8th international conference on acoustic emission, Kyoto, December 5–9, 2016; JSNDI & IIIAE. — Kyoto, 2016. — Pp. 287–292.
- Использование видеоизмерительных машин для исследования трещин в материалах с малой отражательной способностью / Б.Я. Мокрицкий [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Т. 84, № 5. — С. 41–44. — DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-5-41-44>.
- SI-series machines for wear-fatigue tests / V.A. Zhmailik [et al.]. — Gomel: Gomselmash, 2009. — 55 p.
- Сосновский, Л.А. Механика износосталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
- Износосталостные повреждения и их прогнозирование: трибофатика / Л.А. Сосновский [и др.]. — Гомель–Киев–Москва–Ухань: Трибофатика, 2001. — 170 с.
- Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2011. — 407 с.
- Богданович, А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем / А.В. Богданович. — Гродно: ГрГУ, 2008. — 372 с.
- Methods and Main Results of Tribo-Fatigue tests / L.A. Sosnovskiy [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2014. — Vol. 66. — Pp. 207–219. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.04.006>.
- Сосновский, Л.А. Износосталостные испытания / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Машиностроение: энциклопедия; ред. совет: К.В. Фролов (пред.) [и др.]. — М., 2010. — Т. II-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Л.В. Агамиров [и др.]; под общ. ред. Е.И. Мамаевой. — С. 354–385.
- Сосновский, Л.А. Современная наука и мультидисциплинарная система образование-наука-производство: некоторые достижения / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков, А.В. Богданович // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / БНТУ; редкол.: А.В. Чигарев [и др.]. — Минск, 2018. — Вып. 33. — С. 3–11.
- Трибофатика. Методы износосталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 32 с.
- Трибофатика. Методы износосталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость: СТБ 1233-2000. — Введ. 01.01.2001. — Минск: Госстандарт, 2000. — 16 с.
- Трибофатика. Методы износосталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость: СТБ 1448-2004. — Введ. 01.09.2004. — Минск: Госстандарт, 2004. — 20 с.
- Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес: СТБ 1758-2007. — Введ. 01.12.2007. — Минск: Госстандарт, 2007. — 52 с.
- Трибофатика. Машины для износосталостных испытаний. Общие технические требования: ГОСТ 30755-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 8 с.
- Богданович, А.В. Лабораторный практикум по экспериментальной механике: учеб.-метод. пособие / А.В. Богданович, С.С. Щербаков, Д.Е. Мармыш. — Минск: БГУ, 2017. — 107 с.

23. Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей / А.Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ. — 2003. — Т. 24, № 4. — С. 405–412.
24. Григорьев, А.Я. Трение мономолекулярных самособирающихся покрытий щеточного типа / А.Я. Григорьев, И.Н. Ковалева, Н.К. Мышкин // Трение и износ. — 2008. — Т. 29, № 6. — С. 596–603.
25. Григорьев, А.Я. Приборы и методы исследования контактного взаимодействия твердых тел / А.Я. Григорьев // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2018. — Т. 63, № 1. — С. 53–67. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-53-67>.
26. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А.Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 6. — С. 664–669.

BASINIUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment” —

Head of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment¹

E-mail: vladbas@mail.ru

BOGDANOVICH Alexander V., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics²

E-mail: bogal@tut.by

YELOVOY Oleg M., Ph. D. in Eng.

Deputy Director General for Science and Research¹

E-mail: omy@bk.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 09 July 2021.

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF EXPERIMENTAL MECHANICS. PART 2

The article considers a number of new directions in the development of methods and means of experimental mechanics. They are: the unification of test and calculation methods; the development of equipment and test methods in extreme conditions; the widespread use of acoustic emission methods and video recording during testing; the creation and development of equipment and methods for complex testing (for example, wear-fatigue) of materials and products. The achievements of Belarusian scientists are also noted in the field of experimental mechanics of contact interaction, including: an adhesiometer for measuring the molecular interaction of technical surfaces; a millitribometer for measuring friction forces under loads which are characteristic of a precision contact; an onboard tribometer for testing materials for friction and wear in extreme conditions of the action of space factors.

Keywords: strength, durability, friction, testing, mechanical properties

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-71-82>

References

- Basiniuk V.L., Bogdanovich A.V., Yelovoy O.M. Sovremennyye tendentsii v razvitiy metodov i sredstv eksperimentalnoy mekhaniki. Chast 1 [Modern trends in the development of methods and means of experimental mechanics. Part 1]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no 4(57), pp. 78–86 (in Russ.).
- Makhutov N.A., Gadenin M.M. Unifikatsiya metodov rascheta i ispytaniy na prochnost, resurs i treshchinostoykost [Unification of the calculation methods and tests for strength, life time and crack resistance]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 10, pp. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-10-47-54> (in Russ.).
- Makhutov N.A., Gadenin M.M. Razvitie fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya s ispolzovaniem kriteriev prochnosti, resursa, treshchinostoykosti i bezopasnosti [Development of fundamental and applied researches in the field of machine sciences using strength, safe life, survivability and safety criteria]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, vol. 84, no. 10, pp. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-10-41-52> (in Russ.).
- Mostovoy G.E., Karpov A.P. Osobennosti mekhanicheskikh ispytaniy uglerodnykh i uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov pri temperaturakh do 3000 °C [Features of mechanical testing of carbon and carbon-carbon composite materials at a temperature up to 3000°C]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 5, pp. 56–61 (in Russ.).

