



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 1

В статье рассматривается ряд новых направлений развития методов и средств экспериментальной механики. Дается краткий анализ таких тенденций, как: а) уменьшение размеров объектов (моделей, образцов) лабораторных испытаний, их унификация, а также связанная с этим миниатюризация оборудования и средств измерения; б) появление и развитие методов экспериментального исследования механических характеристик наноматериалов. При анализе тенденции (а) приведены характеристики разработанной на ОАО «Планар» (г. Минск) установки ЭМ-6705, предназначенной для контроля прочности проволоочных перемычек в изделиях электронной техники, контроля прочности на сдвиг объемных выводов и определения относительного удлинения проволоки, а также созданного для университетов совместными усилиями Белорусского государственного университета, НПО «ТРИБОФАТИКА» и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси в рамках задания ГНТП «Эталоны и научные приборы» персонального испытательного центра для износоусталостных испытаний материалов. Дается краткое описание методов экспериментального исследования механических свойств и деформационного поведения на микро- и наномасштабном структурных уровнях.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-78-86>

Введение. При решении задач прочности материалов и элементов машин и конструкций решающая роль принадлежит эксперименту, который необходим для определения механических характеристик материала и для выявления влияния отдельных факторов и их одновременно действующей совокупности на эти характеристики путем испыта-

ния лабораторных образцов, моделей конструктивных элементов. Особый интерес и большое научное и практическое значение имеют результаты экспериментальных исследований прочности и предельного состояния реальных деталей машин и их узлов на специальных стендах в лабораторных условиях, максимально имитирующих реальные условия экс-

плуатации рассматриваемого класса машин. Именно результаты таких исследований создают тот научный фундамент, основываясь на котором можно прогнозировать прочность, надежность и долговечность машин и аппаратов [1–3].

Механические испытания — один из важнейших видов исследования материалов, позволяю-

щих определять их способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних нагрузок. Недостоверность определения механических свойств материалов современных инженерных конструкций может привести к снижению безопасности их эксплуатации. Поэтому важным и актуальным представляется вопрос ос-

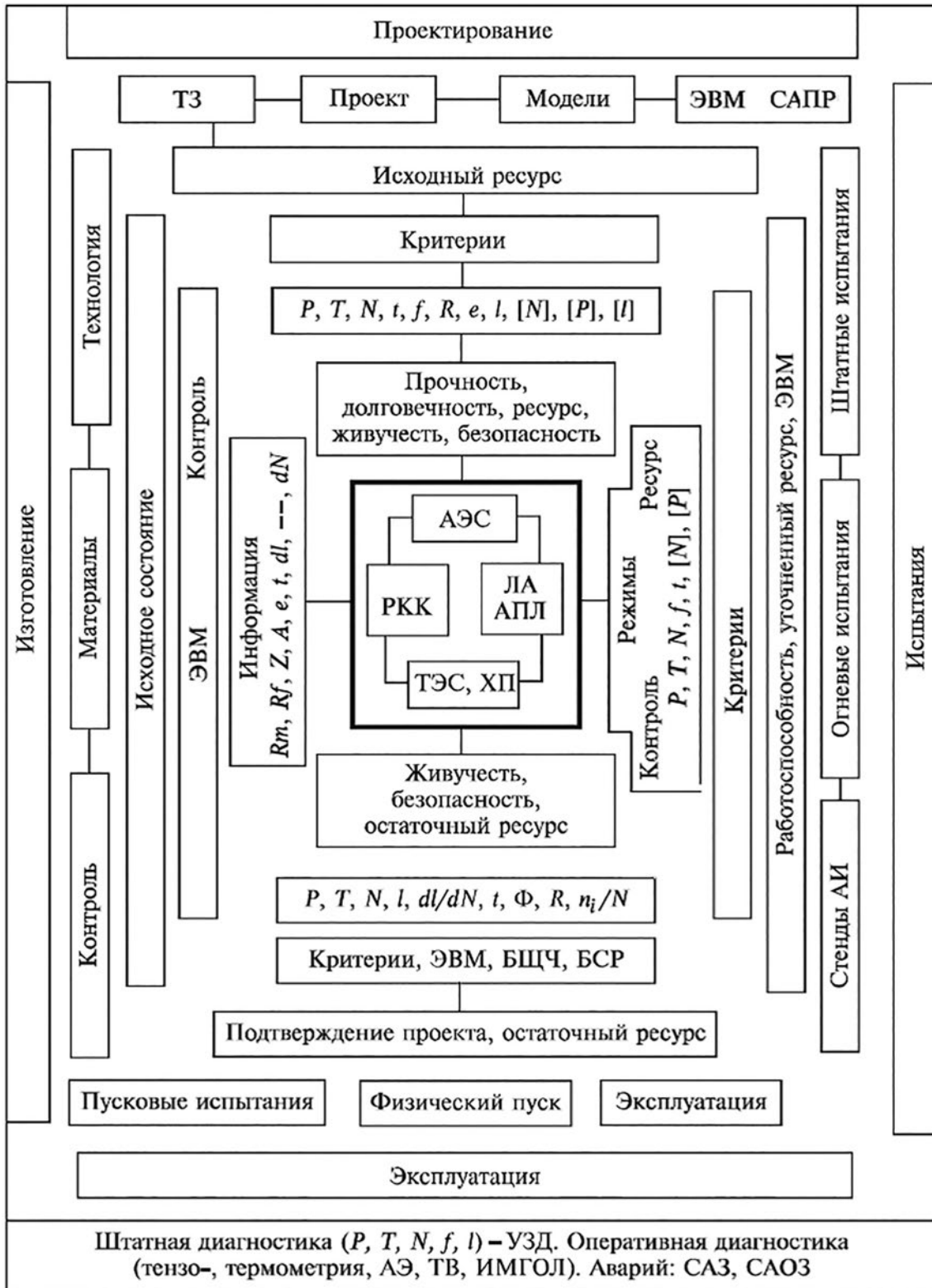


Рисунок 1 — Блок-схема анализа прочности и безопасности машин и конструкций [3]
 Figure 1 — Block diagram of strength and safety analysis of machines and structures [3]

нашения лабораторий механических испытаний современным высокоэффективным оборудованием и соответствующими средствами измерения, использование стандартных, в том числе ускоренных, методов испытаний.

На рисунке 1 показана предложенная Н.А. Махутовым [3] комплексная блок-схема решения проблем прочности и безопасности сложных и потенциально опасных объектов, таких как атомные электростанции (АЭС), ракетно-космические комплексы (РКК), летательные аппараты (ЛА), атомные подводные лодки (АПЛ), теплоэлектростанции (ТЭС) и химические производства. Эти проблемы охватывают все стадии жизненного цикла объектов: проектирование, изготовление, испытания и эксплуатацию. Стадия испытаний является очень важной, она включает их различные виды и комбинации: автономное испытание узлов, стендовые испытания узлов, агрегатов и изделий, лабораторные испытания образцов материалов, огневые и имитационные испытания. Завершающими оказываются штатные испытания головных образцов с воспроизведением реальных эксплуатационных и экстремальных режимов. При этом исследователи нередко сталкиваются с рядом проблем на разных стадиях испытаний, например, по адекватности тех или иных методов испытаний, в том числе с форсированием режимов используемого оборудования реальным условиям нагружения.

Экспериментальные методы основаны на использовании различных физических эффектов, сопровождающих деформацию тел: электрических, оптических, магнитных, вибрационных, акустических.

Считается, что как самостоятельный раздел механики экспериментальная механика формировалась и развивалась с 1940-х годов. Основополагающая роль в этом процессе принадлежит профессору Н.И. Пригоровскому, докторам техн. наук Г.Х. Хуршудову и Б.Н. Ушакову, кандидатам техн. наук М.Л. Дайчику и Ю.К. Михалеву, под руковод-

ством которых разрабатывались экспериментальные методы тензометрии, фотоупругости, хрупких и фотоупругих покрытий, муаровых полос, голографической интерферометрии. Также разрабатывались и активно применялись расчетно-экспериментальные методы, основанные на совместном использовании численных методов (МКП — метод конечных полос, МКЭ — метод конечных элементов, МГЭ — метод граничного элемента) и современных методов экспериментальной механики, позволяющие получить качественно новую информацию, которую невозможно добыть использованием расчетных и экспериментальных методов по отдельности.

Экспериментальные исследования НДС и прочности на моделях и натурных конструкциях в сочетании с численными расчетами применяются на различных этапах проектирования и отработки конструкций, включая период эксплуатации (таблица 1).

В данной статье рассматриваются некоторые новые направления в развитии методов и средств экспериментальной механики, преимущественно связанных с определением основных механических свойств материалов и изделий.

Новые направления в развитии методов и средств экспериментальной механики. Перечислим основные, на наш взгляд, тенденции, проявившиеся в последние годы в области экспериментальной механики:

- 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;

Таблица 1 — Методы экспериментальной механики, используемые на различных этапах создания машин и конструкций [3]
Table 1 — Methods of experimental mechanics used at various stages of the creation of machines and structures [3]

Этап работы	Метод исследования	Задача исследования
Эскизный проект	Модели из полимерных материалов	Обоснование основных конструктивных решений
Технический проект	Модели металлические и из полимерных материалов	Обоснование проекта, уточнение расчета. Подготовка данных для натурной тензометрии
Рабочий проект	Модели из полимерных материалов (фотоупругие и тензометрические)	Уточнение формы и размеров деталей, оптимизация конструкции
Изготовление оборудования	Натурные узлы и модели из полимерных материалов	Проверка допустимости технологических решений
Пусконаладочные работы	Натурный объект (натурная тензометрия)	Оценка и оптимизация режимов эксплуатации
Эксплуатация оборудования	Натурный объект и модели	Эксплуатационный контроль и оценка остаточного ресурса. Совершенствование конструкции, ремонтные варианты

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 для 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.

Отметим, что это далеко не полный перечень направлений в развитии экспериментальной механики. Из-за ограниченного объема статьи рассмотрим проявление некоторых из перечисленных тенденций, в том числе на конкретных примерах.

Тенденция 2 (уменьшение размеров объектов (моделей, образцов) лабораторных испытаний, их унификация, а также связанная с этим миниатюризация оборудования и средств измерения) наметилась по ряду причин, включая стремление производителей оборудования и его потребителей снизить затраты на испытания, улучшить сопоставимость результатов испытаний в разных лабораториях. Также этот вопрос актуален и для

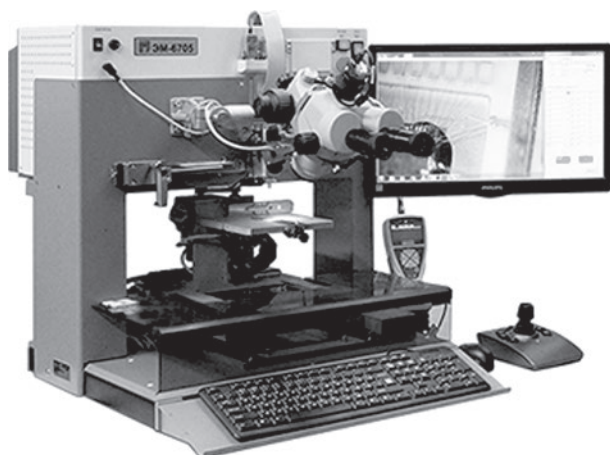


Рисунок 2 — Общий вид установки ЭМ-6705
Figure 2 — General view of the EM-6705 installation

Таблица 2 — Технические характеристики установки ЭМ-6705
Table 2 — Technical characteristics of the EM-6705 installation

Параметр	Значение
Измеряемое усилие, кг	0,001 ... 5 (10)
Рабочее поле столика для тестируемых изделий, мм	250 × 250
Моторизованное перемещение по координатам X, Y, мм	50 × 50
Скорость теста по оси Z, мм/с	до 5 (программируемая)
Перемещение по оси Z, мм	65
Интерфейс передачи данных	RS-232, USB
Отображение результатов	LCD-монитор
Система наблюдения за объектом	микроскоп, видеокамера
Габаритные размеры, мм	1100 × 755 × 620
Масса, кг	70

производителей изделий микро- и нанoeлектроники, мехатроники, где объекты исследований имеют весьма малые размеры. Надо отметить серьезные достижения в этом направлении отечественных компаний, например ОАО «Планар», имеющее опыт создания уникального испытательного оборудования и средств измерения для тестирования миниатюрных изделий микроэлектроники. Так, разработанная на ОАО «Планар» установка ЭМ-6705 (рисунок 2, таблица 2) предназначена для контроля прочности проволочных перемычек в изделиях электронной техники, а также прочности на сдвиг объемных выводов и определения относительного удлинения проволоки. Перемещение тестируемых приборов и приложение рабочих нагрузок выполняется трехкоординатным приводом на шаговых двигателях. Это позволяет обеспечить точность позиционирования испытываемого прибора, возможность дозирования нагрузки и повторяемость выполнения однотипных тестов.

Потребителями нового оборудования являются в том числе и учреждения высшего образования, а значит, создаваемые испытательные машины должны быть малогабаритными и иметь приемлемую для отечественных университетов стоимость, сохраняя при этом достаточно высокий уровень функциональных возможностей. Поэтому в рамках задания ГНТП «Эталоны и научные приборы» Белорусский государственный университет объединил свои усилия с НПО «ТРИБОФАТИКА» и Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси с целью разработки и внедрения в учебный процесс университетов так называемого персонального испытательного центра (ПИЦ) для износоусталостных испытаний. Основные технические характеристики этого центра, предусмотренные техническим заданием, приведены в таблице 3. Главные его особенности — существенное уменьшение габаритных размеров, мас-

Таблица 3 — Основные технические характеристики ПИЦ
Table 3 — Main specifications of the personal testing center

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Диаметр рабочей части образца (вала), мм	6
2	Габаритные размеры контробразца ролика (диаметр), мм	60
3	Основная пара трения	цилиндр — ролик
4	Частота вращения образца, мин ⁻¹	1000, 3000
5	Способ задания контактной и изгибающей нагрузок	программно-регулируемый
6	Диапазон задания контактных нагрузок, Н (МПа)	5...700 (500...6000)
7	Диапазон задания изгибающих нагрузок, Н (МПа)	5...700 (15...2000)
8	Диапазон измерения момента трения, Н·м	0,2...10
9	Диапазон измерения суммарного износа (сближения осей) образца и контробразца, мкм	5...3000
10	Диапазон измерения уровня вибрации, дБ	50...150
11	Диапазон измерения температуры в зоне контакта или в произвольной области образца (контробразца), °С	10–1000
12	Количество точек замера контактной и изгибающей нагрузок, суммарного износа (сближения осей), вибрации, температуры за 1 оборот образца	8; 12; 16
13	Установленная мощность электрооборудования, кВт, не более	1
14	Информационно-управляющая система сбора и обработки данных	автономная на базе ПЭВМ
15	Число каналов управления (включая резервные)	8
16	Число измерительных каналов (включая резервные)	до 16

сы и потребляемой мощности, что, несомненно, отразится на рыночной стоимости и сделает его привлекательным для учреждений образования и соответствующего тиражирования. Реализуемые схемы износоусталостных испытаний ПИЦ изображены на рисунке 3, а фото опытного образца ПИЦ дано на рисунке 4.

На схеме взаимодействия ПИЦ с персональным компьютером (ПК) (рисунок 5) отражена, на наш взгляд, еще одна намечающаяся тенденция развития современной экспериментальной механики — испытательная установка в комплексе с ИУС и ПО (см. рисунок 5) служит периферийным устройством ПК, например, принтер, ска-

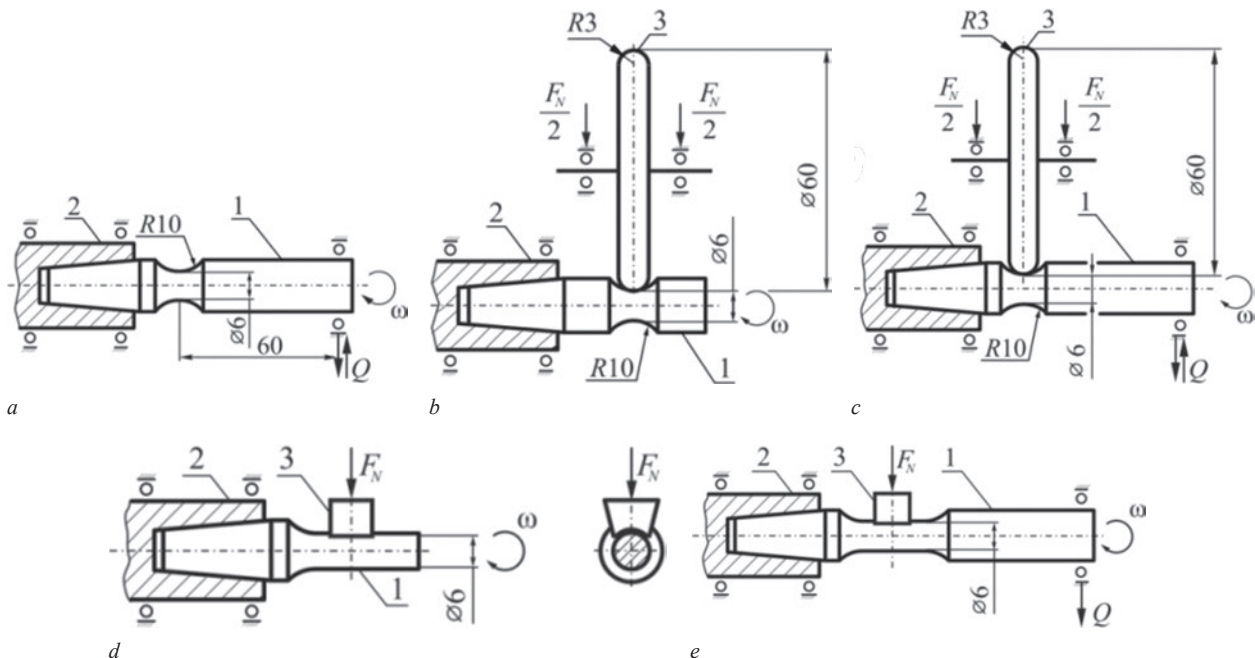


Рисунок 3 — Реализуемые на ПИЦ схемы испытаний на механическую (а), контактную (b), контактно-механическую (с), трение (d) и трение-механическую усталость (e)

Figure 3 — Test schemes implemented at the personal testing center for mechanical (a), contact (b), mechano-rolling (c), friction (d) and mechano-sliding fatigue (e)

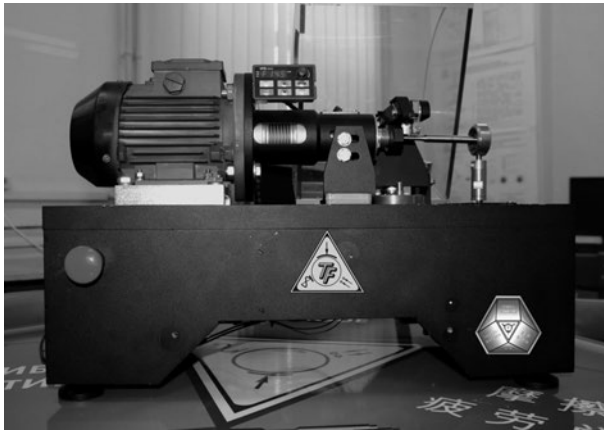


Рисунок 4 — Фото общего вида испытательной установки ПИЦ без защитного кожуха
 Figure 4 — Photo of a general view of the testing facility without a protective casing at the personal testing center

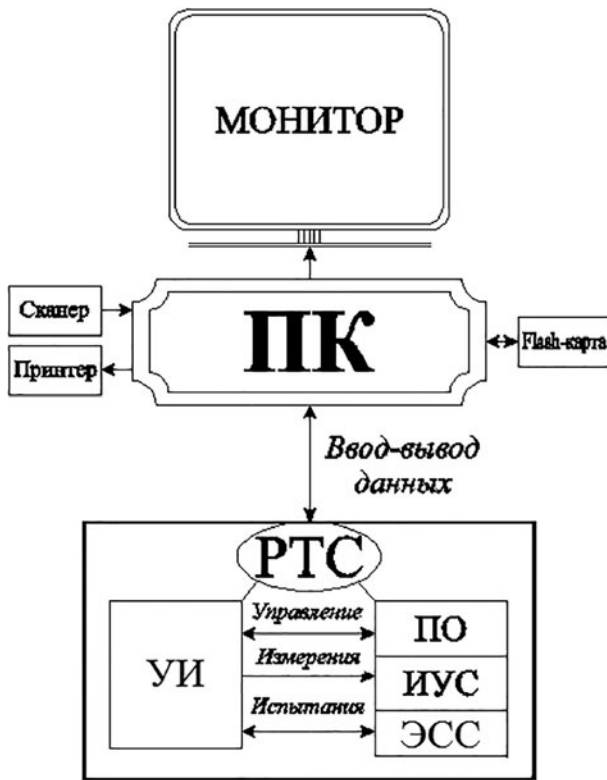
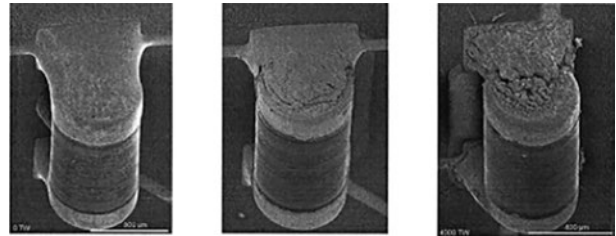


Рисунок 5 — Схема взаимодействия ПИЦ (РТС) с ПК: УИ — установка испытательная; ПО — программное обеспечение; ИУС — информационно-управляющая система; ЭСС — электросиловая система

Figure 5 — Scheme of interaction of the personal testing center (PTC) with the PC (ПК): УИ — testing facility; ПО — software; ИУС — information and control system; ЭСС — electric-power system

нер и т. д. Вообще этот модуль можно назвать, например, тестером.

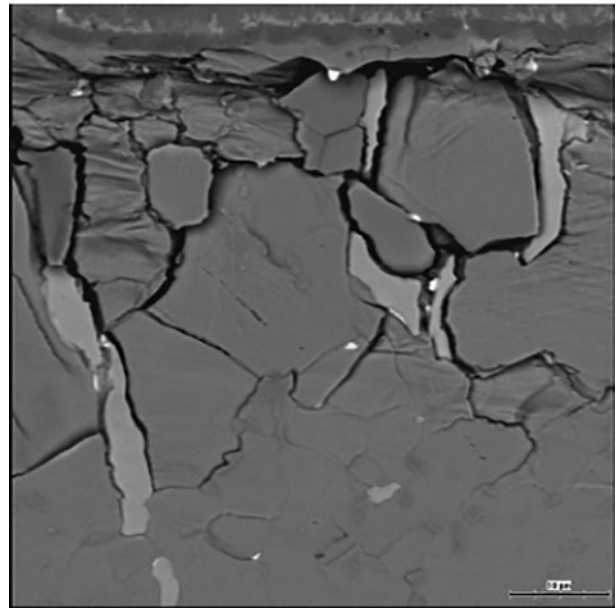
Появление и развитие методов экспериментального исследования механических характеристик наноматериалов (тенденция б) вызвано следующим. Современные сенсоры, микро- и наноэлектромеханические системы содержат значительное количество функциональных структур, состоящих из компонент материалов ограниченных субмикро- и нанообъемов. Различие таких свойств материалов, как коэффициент термиче-



a

b

c



d

Рисунок 6 — Разрушение паяного соединения (a–c) и SnAgCu припоя вдоль границ зерен (d) в результате термоциклического (–40...150 и 20...80 °С соответственно) нагружения: a — исходное состояние; b и c — после 1000 и 4500 циклов нагружения [4]

Figure 6 — Destruction of solder joint (a–c) and SnAgCu solder along grain boundaries (d) as a result of thermocyclic (–40...150 and 20...80 °C, respectively) loading: a — initial state; b and c — after 1,000 and 4,500 loading cycles [4]

ского расширения, модуль упругости и временная зависимость механических характеристик, приводит к возникновению в нанообъемах локальных напряжений и деформаций, результатом которых являются зарождение и распространение трещин (рисунок 6). Механизмы повреждения и разрушения нанопленок, нанопроволоки, нанотрубок, наноэлектронных компонент и объемных наноматериалов от воздействия коррозионно-активных сред и внешних нагрузок, вызванных температурами и вибрациями, еще мало изучены и не осознаны. Кроме того, отсутствуют доступные базы данных по механическим характеристикам наноматериалов для моделирования процессов их деформирования и разрушения.

Прогресс в исследовании механизмов деформирования и разрушения наноматериалов обусловлен, главным образом, совершенствованием и созданием новой методологической базы, основанной на приборах новых поколений [5, 6]. Прежде всего следует отметить атомно-силовую и сканирующую туннельную микроскопию, нейтронную и элек-

тронную дифракцию, лазерную профилометрию и спеклинтерферометрию, оптико-телевизионные измерения, позволяющие обнаружить уникальные механизмы деформирования и разрушения материалов на микро- и наноуровнях [7].

Совершенствуются также методы испытаний для получения механических характеристик наноматериалов. Например, для исследования механических свойств нанопроволок и нанотрубок применяют резонансный метод и механические испытания на растяжение. Резонансный метод позволяет оценить размеры нанотрещин, возникающих в процессе деформирования; при этом измеряют резонансную частоту на консольных нанопроволоках и по сдвигу резонансной частоты, обусловленной наличием нанотрещин, с помощью аналитических соотношений рассчитывают размеры и оценивают местоположение нанотрещин в нанопроволоке [8]. Эксперименты проводят в вакуумной ячейке, резонанс в нанопроволоке возбуждают механическим или электрическим способом.

Необходимость адаптации традиционных методов испытаний на статическое растяжение к испытаниям нанопроволок и нанотрубок привело к созданию высокочувствительных наноманипуляторов и средств измерения приложенных усилий и перемещений при нагружении микрообразцов в колонне электронного микроскопа [9]. Измерение усилий может быть основано на атомно-силовой микроскопии; в качестве чувствительного элемента выступает податливая консоль (рисунок 7), по измерению отклонения которой определяется растягивающее усилие. Исходные и текущие длину и диаметр нанопроволок в процессе нагружения измеряют с помощью сканирующей электронной микроскопии с разрешающей способностью 2 нм.

Для оценки механических свойств и деформационного поведения на микро- и наномасштабном

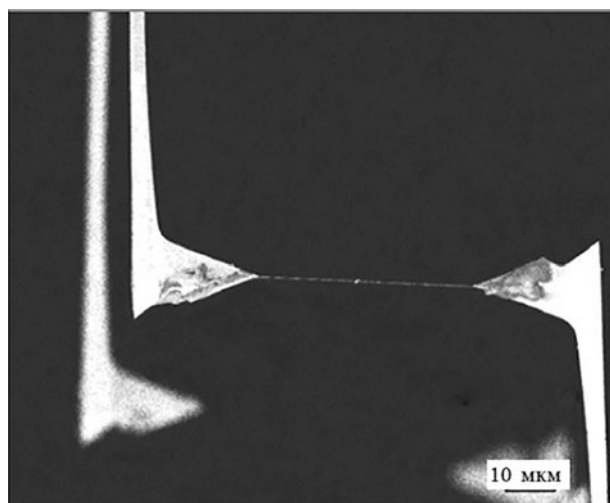


Рисунок 7 — Борное нановолокно, укрепленное на концах двух атомно-силовых микроскопических консолей [7]
Figure 7 — Boron nanofiber fixed at the ends of two atomic force microscopic consoles [7]

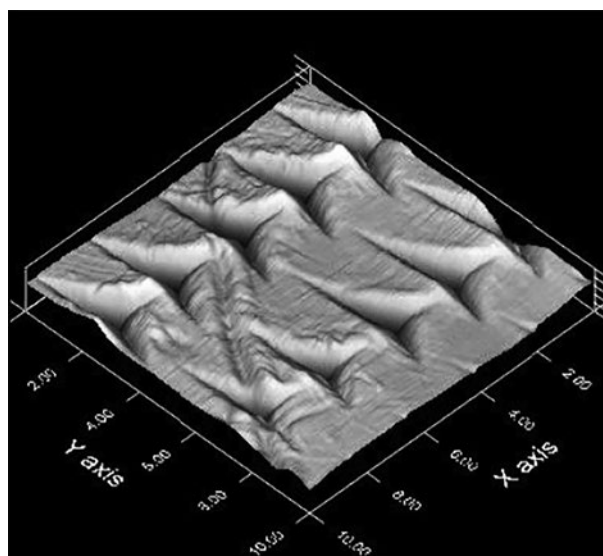


Рисунок 8 — Топография поверхности наноиндентирования углерод-полимерной нанотрубки, полученная с помощью атомно-силовой микроскопии на площади 100 мкм [12]
Figure 8 — Topography of the nanoindentation surface of a carbon-polymer nanotube obtained by atomic force microscopy on an area of 100 μm [12]

структурных уровнях весьма привлекательна техника наноиндентирования [10, 11]. Это испытание может быть выполнено с помощью прибора Hysitron Triboscope с вершиной скругления алмазного индентора Берковича 50–200 нм. Разрешающая способность такого прибора по нагрузке составляет 1 нН и по смещению 0,1 нм. Исходной информацией для расчета механических характеристик служат диаграмма наноиндентирования и изображения поверхностей индентирования, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии (рисунок 8) [12]. Кроме того, наноиндентирование и наноцарапание успешно используют для определения вязкости разрушения нанослоистых пленок [13]; исходной информацией при этом являются ширина царапины, длины образующихся трещин, приложенные нагрузки и характеристики индентора.

Нанодеформационный анализ (nanoDAC) позволяет определять наноперемещения, микро- и нанотрещины, а также двумерные поля перемещений и деформаций на микро- и наномасштабных структурных уровнях у вершины трещины (рисунок 9) в тонких пленках, микроэлектронных компонентах, сенсорах и нанозелектромеханических системах на основе коррекции цифровых изображений топографии поверхности, получаемых до и после нагружения, например с помощью атомно-силовой микроскопии [5, 13]. Результаты нанодеформационного анализа двумерных полей деформаций являются исходной информацией для определения критериальных характеристик механики разрушения (вязкости разрушения, критического раскрытия в вершине трещины) на микро- и наномасштабных структурных уровнях, а также для решения трехмерных задач механики разрушения с помощью численных методов, например МКЭ.

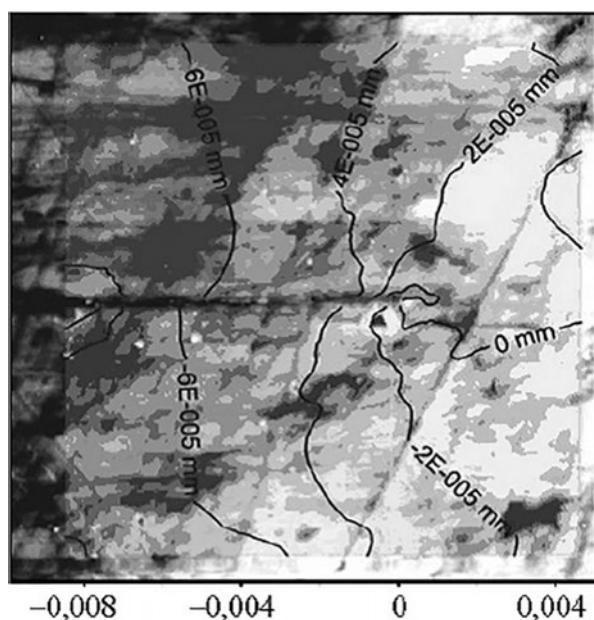


Рисунок 9 — Поле смещений (в мм) в окрестности вершины трещины перпендикулярно ее плоскости, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии посредством коррекции цифрового изображения поверхности нагруженного образца с трещиной [7]
 Figure 9 — Displacement field (mm) in the vicinity of the crack vertex perpendicular to its plane, obtained by atomic force microscopy by correcting the digital image of the surface of a loaded sample with a crack [7]

Во второй части статьи будет дан краткий анализ ряда других тенденций современной экспериментальной механики.

Список литературы

1. Писаренко, Г.С. Актуальные вопросы прочности в современном машиностроении / Г.С. Писаренко. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.

2. Фролов, К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К.В. Фролов. — М.: Наука, 1984. — 224 с.
3. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. / Н.А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2005. — Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. — 494 с.; Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
4. Experimental investigations for fracture analysis of solder joints in microelectronic and MEMS applications / H. Walter [et al.] // Fracture of nano and engineering materials and structures: Proceeding of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, July 3–7, 2006 / Ed. by E.E. Gdoutos. — Dordrecht, 2006. — Pp. 731–732.
5. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceeding of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, July 3–7, 2006 / ed. by E.E. Gdoutos. — Dordrecht, 2006. — 1416 p.
6. Физическая мезомеханика. Актуальные проблемы физической мезомеханики деформируемого твердого тела: тематич. вып. — Томск, 2006. — Т. 9, № 3. — 113 с.
7. Матвиенко, Ю.Г. Деформирование и разрушение наноматериалов на микро- и наномасштабных структурных уровнях / Ю.Г. Матвиенко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2007. — Т. 73, № 1. — С. 83–90.
8. Mechanics of crystalline boron nanowires / W. Ding [et al.] // Composite Science and Technology. — 2006. — Vol. 66, iss. 9. — Pp. 1112–1124.
9. Three-Dimensional Manipulation of Carbon Nanotubes under a Scanning Electron Microscope / M. Yu [et al.] // Nanotechnology. — 1999. — Vol. 10, no. 3. — Pp. 244–252.
10. Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal of materials research. — 2004. — Vol. 19, no. 1. — Pp. 3–20.
11. Fischer-Cripps, A.C. Nanoindentation / A.C. Fischer-Cripps. — Sydney: Springer, 2004. — 264 p.
12. Lagoudas, D.C. Nanoindentation of CNT reinforced epoxy nanocomposites / D.C. Lagoudas, P.R. Thakre, A.A. Benzerga // Fracture of nano and engineering materials and structures: Proceeding of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, July 3–7, 2006 / ed. by E.E. Gdoutos. — Dordrecht, 2006. — Pp. 649–650.
13. Displacement and strain field measurements from SPM images / J. Keller [et al.] // Applied scanning probe methods / ed. by B. Bhushan, H. Fuchs, S. Hosaka. — The Netherlands: Springer, 2004. — Pp. 253–276.

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 1

The article considers a number of new directions in the development of methods and means of experimental mechanics. A brief analysis of the trends is given. They are: a) the size reduction of objects (mo-

dels, samples) of laboratory tests, their unification, as well as the associated miniaturization of equipment and measuring instruments, b) the emergence and development of methods for experimental research of the mechanical characteristics of nanomaterials. When analyzing the trend (a), the characteristics of the EM-6705 installation developed at the Planar JSC are given. The installation is designed to control the strength of wire bridges in electronic products, control the shear strength of bulk leads and determine the relative elongation of the wire. It is as well intended for use in a personal testing center for wear-fatigue testing of materials created for universities by joint efforts of Belarusian State University, S&P GROUP TRIBOFATIGUE Ltd. and the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus within the framework of the task of the State Scientific and Technical Program "Standards and Scientific Instruments". A brief description is given for the methods of the experimental study of mechanical properties and deformation behavior at the micro- and nanoscale structural levels.

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-78-86>

References

1. Pisarenko G.S. *Aktualnye voprosy prochnosti v sovremennoy mashinostroyeni* [Topical issues of strength in modern mechanical engineering]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 192 p. (in Russ.).
2. Frolov K.V. *Metody sovershenstvovaniya mashin i sovremennyye problemy mashinovedeniya* [Methods for improving machines and modern problems of mechanical engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 224 p. (in Russ.).
3. Makhutov N.A. *Konstruksionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopasnost. Ch. 1. Kriterii prochnosti i resursa. Ch. 2. Obosnovanie resursa i bezopasnosti* [Structural strength, lifetime and technogenic safety. P. 1. Strength and lifetime criteria. P. 2. Rationale for lifetime and safety]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 1104 p. (in Russ.).
4. Walter H., Bombach C., Dudek R., Faust W., Michel B. Experimental investigations for fracture analysis of solder joints in microelectronic and MEMS applications. *Fracture of nano and engineering materials and structures. Proceeding of the 16th European Conference of Fracture*. Alexandroupolis, 2006, pp. 731–732.
5. *Fracture of nano and engineering materials and structures. Proceeding of the 16th European Conference of Fracture*. The Netherlands, Springer, 2006. 1416 p.
6. *Physical mesomechanics*. 2006, vol. 9, no. 3 (in Russ.).
7. Matvienko Yu.G. Deformirovaniye i razrusheniye nanomaterialov na mikro- i nanomasshtabnykh urovnyakh [Deformation and fracture of nano materials on micro- and nano-scale structure levels]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2007, vol. 73, no. 1, pp. 83–90 (in Russ.).
8. Ding W., Calabri L., Chen X., Kohlhaas K.M., Ruoff R.S. Mechanics of crystalline boron nanowires. *Composite science and technology*, 2006, vol. 66, iss. 9, pp. 1112–1124.
9. Yu M., Dyer M.J., Skidmore G.D., Rohrs H.W., Lu X., Ausman K.D., Von Ehr J.R., Ruoff R.S. Three-dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope. *Nanotechnology*, 1999, vol. 10, no. 3, pp. 244–252.
10. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of materials research*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 3–20.
11. Fischer-Cripps A.C. *Nanoindentation*. Sydney, Springer, 2004. 264 p.
12. Lagoudas D.C., Thakre P.R., Benzerga A.A. Nanoindentation of CNT reinforced epoxy nanocomposites. *Fracture of nano and engineering materials and structures. Proceeding of the 16th European Conference of Fracture*. Alexandroupolis, 2006, pp. 649–650.
13. Keller J., Vogel D., Schubert A., Michel B. Displacement and strain field measurements from SPM images. *Applied scanning probe methods*, 2004, pp. 253–276.