

УДК 539.4

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры теоретической и прикладной механики¹
E-mail: bogal@tut.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.
начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» – заведующий лабораторией
приводных систем и технологического оборудования²
E-mail: vladbas@mail.ru

О.М. ЕЛОВОЙ, канд. техн. наук
заместитель генерального директора по научной работе и инновационной деятельности²
E-mail: omy@bk.ru

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.09.2025.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В статье обсуждается ряд терминов и понятий, связанных с механикой усталостного разрушения, трибологией, трибофатикой в системе научных дисциплин. Предложена иерархическая структура некоторых объектов, изучаемых в механике, дан сравнительный анализ методов исследования и расчета объектов, изучаемых в механике усталостного разрушения, трибологии и трибофатике. Рассмотрен принцип формирования унифицированных методов износоусталостных испытаний в том случае, когда за базовый метод испытания на усталость принимают изгиб с вращением, а в качестве стандартного принят цилиндрический образец диаметром рабочей части 10 мм. Дано описание разработанных методов и оборудования для проведения износоусталостных испытаний, технические характеристики машин для таких испытаний, в том числе последних совместных разработок БГУ и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Обсуждаются тенденции развития оборудования для механических испытаний материалов и механических систем.

Ключевые слова: износоусталостное повреждение, силовая система, износоусталостные испытания, пара трения, оборудование, методы испытаний

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-76-85>

Введение. В экстремальных по нагруженности и скоростям условиях функционирования значительная часть компонентов ответственных узлов, как правило, подвергается комплексному воздействию разрушающих факторов. В совокупности это обуславливает либо усталостное контактное или изгибное разрушение, либо износ, приводящий к потере работоспособности, либо одновременно и то и другое, что существенно ускоряет каждый из этих процессов. При этом изменение, например, условий смазки при износе либо контактном разрушении или сочетание изгибающих и контактных нагрузок способно изменить ресурс в три и более раза, а возможности применения существующих методик для оценки влияния этих изменений крайне ограничены.

Почти 40 лет назад появились первые публикации [1–3], в которых были изложены методологические основы нового научного направления в механике — трибофатики. Автором этих публи-

каций был ученый-механик Леонид Адамович Сосновский, в то время доцент Белорусского института инженеров железнодорожного транспорта в Гомеле. В 2025 году Л.А. Сосновскому, доктору технических наук, профессору, Заслуженному деятелю науки Республики Беларусь, лауреату Государственной премии Украины в области науки и техники исполнилось бы 90 лет. Его жизнь неразрывно была связана с наукой — механикой, но любимым «детищем», несомненно, была механика износоусталостных повреждений, т. е. трибофатика.

Важность этого направления для машиностроения была оценена и поддержана ведущими специалистами машиноведения, например, Константином Васильевичем Фроловым, вице-президентом АН СССР и РАН, возглавлявшим на протяжении свыше 30 лет Институт машиноведения им. А.А. Благонравова.

В статье рассматривается ряд терминов и понятий, связанных с механикой усталостного раз-

рушения, трибологией, трибофатикой, а также принципы формирования унифицированных методов износостойкостных испытаний, разработанное оборудование для их проведения и перспективы его развития.

О терминах и понятиях. Любая научная дисциплина призвана и имеет своей целью понять и описать те или иные закономерности и особенности развития определенных явлений, ситуаций, событий, обусловленных существованием некоторых реальных или мыслимых объектов, которые обнаруживают специфические свойства [4]. Изучение нового объекта, как правило, порождает новую научную дисциплину, поэтому с позиции рассматриваемой задачи, с учетом совокупности и степени сложности принимаемых во внимание при разрушении объекта факторов, согласно работам [5–7] можно построить упрощенную условную иерархию исследуемых объектов. Она представлена на рисунке 1. В этой схеме не отражены жидкая и газообразная среды, а также и многое другое. Цель ее построения — обозначить ориентировочное место и охарактеризовать значение механики усталостного разрушения [1–10], трибологии и трибофатики [11–28] в системе научных и связанных с ними дисциплин. В схеме трибофатика комплексно учитывает результаты влияния разрушающих факторов в целом на ресурс. При этом любой из этих факторов в каждом конкретном случае может быть превалирующим, с учетом чего должно осуществляться прогнозирование ресурса. Оценку этого влияния можно отнести к одной из наиболее важных задач трибофатики.

В свое время некий материальный объект был мысленно представлен в виде безразмерной и бесструктурной точки, наделенной лишь способностью двигаться в пространстве и во времени по любой траектории и в любом направлении, — потребовалось рождение теоретической меха-



Рисунок 1 — Упрощенная иерархическая структура некоторых объектов, изучаемых в механике: от простого к сложному

Figure 1 — Simplified hierarchical structure of some objects studied in mechanics: from simple to complex

ники, чтобы понять и описать все многообразие движения такого физически нереального объекта. Представление о «масштабе точки» сделало теоретическую механику полезной наукой: стал возможным правильный анализ движения, например, точек-планет или точек-электронов, т. е. и огромных объектов Вселенной, и невообразимо малых объектов микромира. Если «большие точки» наделить массой, удается установить, например, законы взаимодействия небесных тел в процессе их движения. Механика космического полета, механика механизмов и машин — все, что движется, подвластно анализу методами теоретической механики.

Совокупность точек, связанных между собой определенным образом, есть сплошная среда; одним из частных ее видов является твердое тело, которое обладает особыми (специфическими) свойствами: жесткостью и прочностью. Когда было обнаружено, что под воздействием многообразных нагрузок точки твердого тела способны двигаться или смещаться относительно друг друга, появилось представление о новом объекте — деформируемом твердом теле. Естественно, что потребовалось создание механики деформируемого твердого тела, чтобы научиться исследовать его напряженно-деформированное состояние в любой точке и в конечном счете понять и описать закономерности и особенности изменения размеров и искажения формы тела как целого. Деформируемое твердое тело стали называть просто материалом, или образцом, или элементом конструкции — в зависимости от конкретных целей исследования. И специфические свойства подобных объектов изучают в таких разделах, как механика материалов, конструкций, композитов, грунтов; механика повреждений и разрушения (при статическом, ударном, циклическом и ином нагружении); мезомеханика, микромеханика. При этом познают закономерности, особенности и последствия обратимого (теория упругости) и необратимого (теория пластичности) движения точек деформируемых тел. Последние наделяются и многообразными специфическими свойствами, например, вязкоупругостью, упруговязкопластичностью. Механика деформируемого твердого тела стала, таким образом, одним из мощнейших инструментов исследования поведения объектов в различных условиях эксплуатации или испытаний. Применение вычислительной техники и развитие методов компьютерного моделирования привело к резкому повышению эффективности расчетов и формированию компьютерной механики.

Со временем в механике деформируемого твердого тела особое значение получили исследования по деформированию и разрушению образцов и элементов конструкций под воздействием повторно-переменных нагрузок. Это объясняется тем, что внезапные поломки наиболее ответствен-

ных деталей машин приводят не только к значительному материальному ущербу, но и к нарушению безопасности людей. Тогда появилась научная дисциплина, которая получила название механики усталостного разрушения.

Деформируемое твердое тело — лишь один из компонентов многочисленных и разнообразных механических систем. Уже простейший случай сжатия двух неподвижных твердых тел вызвал развитие нового подхода в теории упругости — его называли контактной задачей. Она стала началом механики контактного взаимодействия тел (компонентов) при статическом, ударном, циклическом и других нагружениях.

Очередной объект — пара трения, главной особенностью которой является относительное движение двух твердых тел, находящихся под действием контактной нагрузки. И появилась специальная научная дисциплина — трибология, основной задачей которой стало изучение закономерностей и особенностей трения и поверхностного повреждения различных материалов при скольжении, качении, проскальзывании, ударе [29–34]. По существу, любая пара трения — многокомпонентная система: в ней неизбежно организуется так называемое третье тело [35, 36], формируемое в области подвижного контакта за счет смазочного материала и/или продуктов трибодеструкции тонких поверхностных слоев контактирующих тел.

Более сложным, чем пара трения, является своеобразный объект — силовая система, представление о которой введено совсем недавно (в конце XX века) [37, 38]. Так называют всякую механическую систему, которая воспринимает и транзитно передает рабочую циклическую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении [39–41]. Другими словами, силовая система — это пара трения, хотя бы один из элементов которой подвергается объемному повторно-переменному деформированию. Для таких систем характерно комплексное — износостойкое повреждение (ИУП). Оно обусловлено кинетическим взаимодействием явлений механической усталости, трения, изнашивания, эрозии, коррозии [18, 42–46], поэтому силовую систему называют трибофатической [26, 47, 48]. Естественно, что обнаружение нового и специфического объекта привело к возникновению очередной научной дисциплины — механики износостойкости повреждений, которая получила краткое название трибофатики [18, 19, 23–25].

Таким образом, трибофатика — это наука о комплексном износостойкостном повреждении и разрушении силовых (трибофатических) систем [41, 49]. Поскольку речь идет о механике износостойкости повреждения, то термин трибофатика вполне, хотя и очень кратко, отражает ее содержание: *tribo* символизирует современную трибологию, в том числе и трибологическую надежность, а *fatigue* — современную механику усталостного разрушения, в том числе и прочностную надежность. Как видно, термин «трибофатика» состоит из двух слов (понятий), которые совершенно равноправны. Если же говорить о физико-механических процессах, определяемых указанными понятиями, то следует принять во внимание их диалектическое взаимодействие и взаимовлияние: трение и износ \leftrightarrow усталость = трибофатика.

Поскольку трибофатика — это новый раздел механики [4, 22, 25, 41, 50], ее можно определить и как механику трибофатических систем [26].

Следует указать на фундаментальность понятия усталости при объемном нагружении и трении. Авторы современных книг описывают механическую усталость как процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений или деформаций, что вызывает изменения в структуре и свойствах, зарождение и распространение трещин и разрушение. «Термин «усталость металлов» означает, таким образом, поведение металлов, подвергаемых повторным напряжениям», — такое обобщение исследуемого понятия, «далекого от идеала, слишком неопределенного и неясного», но тем не менее «общепринятое», «широко распространенного», дал Г.Дж. Гаф в 1926 году [10].

Здесь под поведением материала можно понимать все что угодно: и повреждение, и трещины, и разрушение независимо от физических механизмов, обнаруженных при определенных условиях нагружения того или иного конкретного материала, в том числе на разных масштабных уровнях (атомном, субмикро-, микро-, мезо-, макроуровне). Определение, данное Г.Дж. Гафом, оказалось применимым и тогда, когда И.В. Крагельский установил усталостный механизм износа при скольжении (1939 год). В течение последующих десятилетий стали говорить об объемной или механической усталости и поверхностной или фрикционной усталости. Новые приложения, используемые со «старым» термином, ничего не изменили в его значении: они только конкретизировали условия возникновения и зоны, где происходят процессы усталости. И когда в конце прошлого века возникла механика комплексного или износостойкого повреждения (трибофатика), термин «усталость» вновь стал востребованным.

В таблице 1 дан сравнительный анализ методов исследования и расчета объектов, изучаемых в механике усталостного разрушения, трибологии и трибофатике [25, 51, 52].

Первое слово в названии данной статьи («экспериментальная») подчеркивает, что в работе рассматриваются вопросы экспериментального исследования ИУП. Надо отметить, что «экспериментальная механика» — устоявшийся термин. Во многих университетах, в том числе БГУ, МГТУ

Таблица 1 — Методы исследования объектов в трех смежных дисциплинах
Table 1 — Methods of object research in three related disciplines

Дисциплина	Объект для изучения	Основные методы исследования		Масштаб повреждения
		экспериментальные	теоретические	
Т (Трибология)	Пара трения	Испытания на трение	Механика контактного взаимодействия	Поверхностное повреждение (износ, питтинг)
F (Механика усталостного разрушения)	Элемент конструкции	Испытания на усталость	Механика деформирования и разрушения	Объемное (усталостное) разрушение
TF (Трибофатика)	Трибофатическая система	Износосталостные испытания	Механика комплексного износосталостного повреждения и разрушения	Комплексное поверхностное повреждение и объемное разрушение

имени Н.Э. Баумана, читают курсы для студентов и магистрантов по экспериментальной механике; издаются соответствующие учебники [53–55].

Методы и средства износосталостных испытаний. В отличие от других механических испытаний классификация износосталостных включает новый признак — вид ИУП. Поскольку основными видами ИУП являются контактно-механическая усталость (КМУ), фрикционно-механическая усталость (ФМУ) и фреттинг-усталость (ФУ), то разрабатывают и соответствующие методы износосталостных испытаний.

Один из путей разработки методов комплексных (износосталостных) испытаний — совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание. Принцип такого формирования в том случае, когда базовым методом испытания на усталость принимают изгиб с вращением, показан на рисунке 2. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы, представленные на рисунке 2, являются практически важными. Используя подобный подход, достигают того, что на машинах, предназначенных для износосталостных

испытаний, можно проводить и обычные испытания либо на механическую усталость, либо на трение и изнашивание в определенных условиях.

К основным методам износосталостных испытаний будем относить методы испытаний на ФМУ, КМУ и ФУ при изгибе с вращением. Рассмотрим формирование унифицированных методов износосталостных испытаний на примере ФМУ и КМУ (рисунок 3).

Испытания на ФМУ. На рисунке 3 *е* цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . 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 контробразец 3, например пластина или частичный вкладыш. Таким образом, в рабочей зоне образца одновременно возникают максимальные контактные и изгибные напряжения.

Исходя из этого, при реализации схемы испытаний согласно рисунку 3 *е*, можно проводить:

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

Значит, если, согласно рисунку 2, объединить (составить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение скольжения, то получим схему испытаний на ФМУ на рисунке 3 *е*.

Испытания на КМУ. Эта схема (см. рисунок 3 *а*) отличается от схемы испытаний на ФМУ (см. рисунок 3 *е*) тем, что неподвижно закрепленный контробразец заменен на вращающийся ролик 4. При этом образец и ролик могут в общем



Рисунок 2 — Формирование методов износосталостных испытаний при главном вращательном движении
Figure 2 — Formation of methods of wear-fatigue tests in the main rotational motion

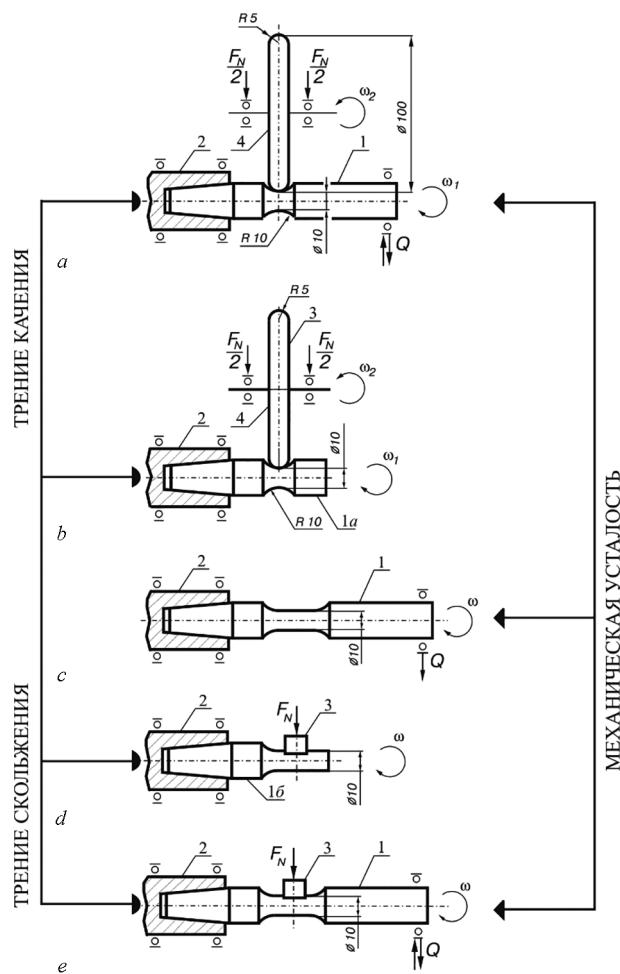


Рисунок 3 — Типичные схемы износосталостных испытаний:

а — контактно-механическая усталость; б — контактная усталость; в — механическая усталость; г — трение скольжения; д — фрикционная усталость; е — фрикционно-механическая усталость; 1, 1а, 1б — образец; 2 — шпиндель испытательной машины; 3, 4 — контробразец; Q — изгибающая нагрузка; F_N — контактная нагрузка; ω_1, ω_2 — скорость вращения образца, контробразца

Figure 3 — Typical schemes of wear-fatigue tests:

а — mechano-rolling fatigue; б — contact fatigue; в — mechanical fatigue; г — friction fatigue; д — mechano-sliding fatigue; 1, 1а, 1б — 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

случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 и в различных направлениях. При реализации схемы испытаний согласно рисунку 3 а, можно проводить:

- износосталостные испытания на КМУ (см. рисунок 3 а) с варьированием величин F_N , Q , ω_1 и ω_2 ;
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 3 в) 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 3 б) 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.

Значит, если, согласно рисунку 2, объединить (составить) известные схемы испытаний на ме-

ханическую усталость и на трение при качении, то получим схему испытаний на КМУ на рисунке 3 а.

На базе изобретений и по заказам потребителей создан и изготовлен (ООО «НПО «ТРИБОФАТИКА», Республика Беларусь) модельный ряд машин серии СИ для износосталостных испытаний.

В таблице 2 приведены технические характеристики модульных машин СИ-01, СИ-02 и СИ-03, с помощью которых получены оригинальные результаты, установлены новые закономерности ИУП, ставшие уже классикой [4, 26, 52]. 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 [56–59], разработаны требования к машинам для износосталостных испытаний, которые стали стандартными [60]. На международных выставках испытательные машины серии СИ и их разработчики неоднократно удостаивались наград.

На рисунке 4 представлено фото одной из последних разработок ООО «НПО «ТРИБОФАТИКА» и ОАО «Гомсельмаш» — испытательного центра SZ-01, изготовленного по заказу БГУ. Это многофункциональный и эффективный исследовательский инструментарий, весьма полезный и для вузовской лаборатории, и для научного учреждения, и для предприятия. В БГУ активно используется испытательный центр SZ-01 в учебном процессе, а также для научных исследований с участием студентов, магистрантов и аспирантов механико-математического факультета, он является важной составляющей для подготовки высококвалифицированного специалиста и ученого.

Одним из потребителей нового класса оборудования являются университеты. А значит, создаваемые испытательные машины должны быть малогабаритными и иметь приемлемую для отечественных университетов стоимость, сохраняя при этом уровень функциональных возможностей, достигнутых и реализованных в центре SZ-01. Поэтому в рамках задания ГНТП «Эталоны и научные приборы» БГУ объединил свои усилия с ООО «НПО «ТРИБОФАТИКА» и Объединенным институтом машиностроения НАН Беларусь с целью разработки и внедрения в учебный процесс университетов так называемого персонального испытательного центра для износосталостных испытаний. Главные его особенности — существенное уменьшение габаритных размеров, массы и потребляемой мощности. Опытный образец персонального испытательного центра показан на рисунке 5. На разработанные испытательные центры получены евразийские патенты [61, 62].

Оборудование для износосталостных испытаний является научной продукцией и предоставляет исследователям уникальные возможности изучения процессов повреждения и разрушения силовых систем. Они помогают исследователям

Таблица 2 — Технические характеристики модульных машин серии СИ
 Table 2 — Technical characteristics of modular machines of the SI series

Наименование показателей	СИ-01	СИ-02	СИ-03
	Пара трения		
	Цилиндр–колодка	Цилиндр–ролик	Цилиндр–колодка, цилиндр–ролик
Диаметр рабочей части образца, мм	10	10	10
Размеры контробразца, мм	10×10×11,5	Ø100	10×10×11,5 Ø100
Диапазон частот вращения образца, мин ⁻¹	40...4000	3000	600...6000
Диапазон частот вращения контробразца, мин ⁻¹	—	50...500	50...500
Диапазон изгибающих нагрузок, Н	70...700	70...700	10...800
Диапазон контактных нагрузок, Н	10...500	50...1000	10...2000
Диапазон измерения суммарного износа образца и контробразца, мкм	10...3000	10–3000	10...4000
Диапазон измерения момента трения, Н·м: при трении скольжения при трении качения	0,01...1,2 —	— 0,2...20	0,01...1,2 0,2...20



Рисунок 4 — Общий вид испытательного центра SZ-01
 Figure 4 — General view of the SZ-01 test center



Рисунок 5 — Общий вид испытательной установки персонального испытательного центра без защитного кожуха
 Figure 5 — General view of the personal test center test facility without protective casing

в сжатые сроки решить самые сложные задачи экспериментальной оценки и повышения надежности наиболее ответственных узлов современной техники как по отдельным критериям сопротивления

усталости и износостойкости, так и по комплексным критериям сопротивления ИУП.

К методам и оборудованию для износостойкостных испытаний, их результатам проявляют большой интерес ученые и специалисты из разных стран. Ряд публикаций [63–67] свидетельствует о том, что инновационные методы трибофатики востребованы и развиваются.

Заключение. Подводя итоги, можно выделить некоторые наметившиеся тенденции в развитии оборудования для испытаний, в том числе износостойкостных. Это, во-первых, постепенный отказ от традиционного производства испытательной техники, в том числе крупногабаритной, с последующей ее миниатюризацией и унификацией. И если рынок коммерческого производства испытательных машин пока еще отстает от машиностроения, например, по внедрению аддитивных технологий, то во многом потому, что в методах физического моделирования и подобия еще не достигнута приемлемая точность. Во-вторых, стремление к максимальной автоматизации процесса испытаний, включая установку, закрепление, снятие образца и контробразца, т. е. происходит переход к роботизированным испытательным машинам. Еще одна новая особенность, на наш взгляд, современного испытательного оборудования, — его многофункциональность, позволяющая на одной единице оборудования получать комплекс разных характеристик механических (и не только) свойств материала; при этом стоимость результатов испытаний резко снижается, а информативность, наоборот, повышается по сравнению с традиционным получением опытных данных на разном оборудовании.

Список литературы

1. Сосновский, Л.А. О комплексной оценке надежности силовых систем / Л.А. Сосновский // Пути повышения технического уровня и надежности машин: тез. докл. Респ.

- науч.-техн. конф., Минск, 20–21 нояб. 1986 г. — Минск, 1986. — С. 29.
2. Сосновский, Л.А. Надежность и долговечность элементов силового металлополимерного трибосопряжения в процессе износосталостных испытаний / Л.А. Сосновский // Надежность и долговечность машин и сооружений. — 1986. — № 9. — С. 93–102.
 3. Сосновский, Л.А. Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износстойкости (основы трибофатики): учеб.-метод. пособие / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелИИЖТ, 1988. — 56 с.
 4. Сосновский, Л.А. Механика износосталостного повреждения / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
 5. Витязь, П.А. Об объектах, изучаемых в механике / П.А. Витязь, М.С. Высоцкий, Л.А. Сосновский // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-метод. ст. / БНТУ; редкол.: А.В. Чигарев (пред. редкол.). — Минск, 2008. — Вып. 23. — С. 3–12.
 6. Новые подходы в механике износосталостного повреждения и разрушения / М.С. Высоцкий, Н.А. Махутов, Л.А. Сосновский [и др.] // Механика-2007: сб. науч. тр. III Белорус. конгр. по теоретич. и прикладной механике, Минск, 16–18 окт. 2007 г. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; под общ. ред. М.С. Высоцкого. — Минск, 2007. — С. 38–114.
 7. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справ: в 2 ч. / Л.А. Сосновский. — Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. — Ч. 1: А–Н. — 328 с.; Ч. 2: О–Я. — 340 с.
 8. Троценко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ.: в 2 т. / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2. — 825 с.
 9. Bathiar, C. Gigacycle fatigue in mechanical practice / C. Bathiar, P.C. Paris. — New York: Marcel Dekker, 2004. — 328 p. — DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203020609>.
 10. Gouth, H.J. The fatigue of metals / H.J. Gouth. — London: Scott, Greenwood & Son, 1924. — 304 p.
 11. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
 12. Rabinowicz, E. Friction and wear of materials / E. Rabinowicz. — New York: John Wiley and Sons, 1965. — 244 p.
 13. Blau, P.J. Friction science and technology / P.J. Blau. — New York: Marcel Dekker, 1996. — 399 p.
 14. Amiri, M. On the relationship between wear and thermal response in sliding systems / M. Amiri, M.M. Khonsari, S. Brahmashwarkar // Tribology Letters. — 2010. — Vol. 38, iss. 2. — P. 147–154. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9584-6>.
 15. Beheshti, A. On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect / A. Beheshti, M.M. Khonsari // Tribology International. — 2011. — Vol. 44, iss. 12. — P. 1620–1628. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.05.017>.
 16. Aghdam, A.B. On the fretting crack nucleation with provision for size effect / A.B. Aghdam, A. Beheshti, M.M. Khonsari // Tribology International. — 2012. — Vol. 47. — P. 32–43. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.10.001>.
 17. Сосновский, Л.А. Трибофатика: новые идеи в перспективном направлении / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, Ю.Н. Дроздов. — Гомель: БелИИЖТ, 1990. — 7 с.
 18. Сосновский, Л.А. Трибофатика: проблемы и перспективы / Л.А. Сосновский // Доклад на тематической выставке АН СССР «Математика и механика — народному хозяйству». — Гомель: БелИИЖТ, 1989. — 65 с.
 19. Сосновский, Л.А. Методологические проблемы комплексной оценки поврежденности и предельного состояния силовых систем (обзорная статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1991. — Т. 57, № 5. — С. 27–40.
 20. Трибофатика — новые пути для повышения надежности машин / М.С. Высоцкий, В.Н. Корешков, В.А. Марченко [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. науку. — 1994. — № 4. — С. 32–41.
 21. Махутов, Н.А. Методологические основы трибофатики / Н.А. Махутов, Л.А. Сосновский, В.-Ч. Гао // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2002. — Т. 68, № 6. — С. 29–41.
 22. Слово о трибофатике: сб. / ред.-сост. А.В. Богданович. — Гомель; Минск; М.; Киев: Remika, 1996. — 132 с.
 23. Sosnovskiy, L.A. Surprises of tribo-fatigue / L.A. Sosnovskiy // Proc. of the world tribology congress III, Washington, 12–16 Sept. 2005. — Washington, 2005. — P. 27–28. — DOI: <https://doi.org/10.1115/WTC2005-63082>.
 24. О трибофатике: по материалам науч. сем., посвящ. 20-летию развития исследований в области трибофатики и 70-летию проф. Л.А. Сосновского, Минск, 28 июля 2005 г. / науч. ред. Л.Г. Красневский. — Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2005. — 83 с.
 25. Sosnovskiy, L.A. Tribofatigue. Wear-fatigue damage and its prediction / L.A. Sosnovskiy. — Berlin: Springer, 2005. — 351 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27027-0>.
 26. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. — Минск: БГУ, 2011. — 407 с.
 27. Сосновский, Л.А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: курс лекций / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. — Минск: БГУ, 2011. — 488 с.
 28. Трибофатика: труды VI Междунар. симпозиума по трибофатике, Минск, 25 окт. – 1 нояб. 2010 г.: 25-летию развития исследований по трибофатике и 75-летию со дня рождения Л.А. Сосновского посвящается: в 2 ч. / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. — Минск: БГУ, 2010. — Ч. 1. — 839 с.; Ч. 2. — 725 с.
 29. Bhushan, B. Principles and applications of tribology / B. Bhushan. — New York: John Wiley & Sons, 1999. — 1020 p.
 30. Halling, J. Principles of tribology / J. Halling. — London: McMillan Press, 1978. — 401 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-04138-1>.
 31. Bauer, R.G. Mechanical wear prediction and prevention / R.G. Bauer. — New York: Marcel Dekker, 1994. — 657 p.
 32. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петровец. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 304 с.
 33. Трение, износ, смазка: трибология и триботехника / А.В. Чичинадзе, Э.М. Бернилер, Э.Д. Браун [и др.]. — М.: Машиностроение, 2003. — 575 с.
 34. Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering / ed. by G.E. Totten, H. Liang. — New York: Marcel Dekker, 2004. — 747 p. — DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203021545>.
 35. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
 36. Godet, M. Third-bodies in tribology / M. Godet // Wear. — 1990. — Vol. 136, iss. 1. — P. 29–45. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90070-Q](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90070-Q).
 37. Сосновский, Л.А. Проблемы комплексной оценки поврежденности и предельного состояния силовых систем. Основные термины / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелИИЖТ, 1990. — 10 с.
 38. Сосновский, Л.А. Трибофатика: основные термины и определения / Л.А. Сосновский // Трение и износ. — 1992. — Т. 13, № 4. — С. 728–734.
 39. Трибофатика. Термины и определения: СТБ 994-95. — Введ. 01.06.1996. — Минск: МГС; БелГИСС, 1995. — 98 с.
 40. Трибофатика: четырехяз. терминол. слов. / под ред. Л.А. Сосновского / авт.-сост. П.В. Андронов, В.А. Бабушкина, А.В. Богданович [и др.]. — Минск; Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. — 136 с.
 41. Трибофатика. Термины и определения: ГОСТ 30638-99. — Введ. 01.01.2000. — Минск: БелГИСС, 1999. — 17 с.
 42. Сосновский, Л.А. Фрикционно-механическая усталость силовых систем / Л.А. Сосновский // Вестник машиностроения. — 1992. — № 8–9. — С. 14–18.
 43. Сосновский, Л.А. Фреттинг-усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, В.А. Шуринов // Заводская лаборатория. — 1992. — Т. 58, № 8. — С. 45–62.
 44. Сосновский, Л.А. Фрикционно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, В.А. Шуринов // Заводская лаборатория. — 1992. — Т. 58, № 9. — С. 18–35.
 45. Сосновский, Л.А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, В.А. Шуринов // Заводская лаборатория. — 1992. — Т. 58, № 11. — С. 44–61.
 46. Сосновский, Л.А. Коррозионно-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов, В.А. Шуринов // Заводская лаборатория. — 1993. — Т. 59, № 7. — С. 33–44.
 47. Sosnovskiy, L.A. Surprises of tribo-fatigue / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov. — Minsk: Magic Book, 2009. — 199 p.

48. Сосновский, Л.А. Введение в трибофатику: пособие для студентов мех.-мат. ф-та, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика» (по направлениям) / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. — Минск: БГУ, 2010. — 77 с.
49. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский // Труды III Междунар. симп. по трибофатике, Пекин, 22–26 окт. 2000 г. — Пекин: Изд-во ун-та Хунань, 2000. — С. 84–101.
50. Сосновский, Л.А. Основы механики износоусталостного повреждения и разрушения: в 2 т. / Л.А. Сосновский // Тр. IV Междунар. симп. по трибофатике, Тернополь, 23–27 сент. 2002 г. / ТНТУ им. И. Пулюя; отв. ред. В.Т. Троценко. — Тернополь, 2002. — Т. 1. — С. 9–22.
51. Сосновский, Л.А. О состоянии и будущем развитии трибологии / Л.А. Сосновский // Поликомтриб-2009: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июня 2009 г. / ИММС им. В.А. Белого. — Гомель, 2009. — С. 215.
52. Износоусталостные повреждения и их прогнозирование: трибофатика / под науч. ред. Л.А. Сосновского. — Гомель; Киев; М.; Ухань: Трибофатика, 2001. — 170 с.
53. Экспериментальная механика: в 2 кн. / под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — Кн. 1. — 616 с.; Кн. 2. — 552 с.
54. Springer handbook on experimental solid mechanics / ed. by W.N. Sharpe. — New York: Springer, 2008. — 1098 р. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>.
55. Экспериментальная механика / Б.В. Букеткин, А.А. Горбатовский, И.Д. Кисенко [и др.]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 135 с.
56. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск: МГС; БелГИСС, 2002. — 8 с.
57. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость: СТБ 1233-2000. — Введ. 01.01.2001. — Минск: МГС; БелГИСС, 2000. — 8 с.
58. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость: СТБ 1448-2004. — Введ. 01.09.2004. — Минск: Госстандарт, 2004. — 14 с.
59. Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес: СТБ 1758-2007. — Введ. 01.12.2007. — Минск: Госстандарт, 2007. — 45 с.
60. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования: ГОСТ 30755-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск: МГС; БелГИСС, 2002. — 8 с.
61. Патент EA 040211, МПК G01N 3/56 (2006.01.01). Центр для износоусталостных испытаний материалов: № 201900229: заявлено 20.03.2019; опубл. 30.09.2020 / Богданович А.В., Журавков М.А., Щербаков С.С., Сосновский Л.А., Басинюк В.Л., Еловой О.М.; заявитель: БГУ.
62. Патент EA 047463, МПК G01N 3/56 (2006.01.01). Центр и способ для проведения испытания материалов: № 202393107: заявлено 01.11.2023; опубл. 24.07.2024 / Басинюк В.Л., Еловой О.М., Щербаков С.С., Богданович А.В., Тычинская И.Д., Волкотруб Р.Е., Лобкова М.П., Глазунова А.А.; заявитель: Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси.
63. Патент BY 7093 U, МПК G01N 3/00 (2009). Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ: № 20100717: заявлено 16.08.2010; опубл. 28.02.2011 / Степанкин И.Н., Кенько В.М., Панкратов И.А.; заявитель: УО «ГГТУ имени П.О. Сухого». — URL: <https://by.patents.su/4-u7093-ustrojstvo-ispytaniya-materialov-na-kontaktnuyu-ustalost-i-iznos.html> (дата обращения: 05.07.2025).
64. Королев, А.В. Машина трения для ускоренных испытаний на износ фрикционных тел качения / А.В. Королев, А.А. Королев // Трение и износ. — 2017. — Т. 38, № 1. — С. 49–54.
65. Cumulative damage modeling of solid lubricant coatings that experience wear and interfacial fatigue / N.L. McCook, D.L. Burris, N.H. Kim, W.G. Sawyer // Wear. — 2007. — Vol. 262, iss. 11–12. — P. 1490–1495. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.042>.
66. Relationship between wear rate and mechanical fatigue in sliding TPU–metal contacts / F.J. Martínez, M. Canales, J.M. Bielsa, M.A. Jiménez // Wear. — 2010. — Vol. 268, iss. 3–4. — P. 388–398. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.026>.
67. Trib-o-fatigue behaviors of steel wire rope under bending fatigue with the variable tension / J. Zhang, D. Wang, D. Song [et al.] // Wear. — 2019. — Vol. 428–429. — P. 154–161. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.004>.

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

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: bogal@tut.by

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 Equipment²

E-mail: vladbas@mail.ru

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

Deputy Director General for Research and Innovations²

E-mail: omy@bk.ru

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received September 7, 2025.

EXPERIMENTAL MECHANICS OF WEAR-FATIGUE DAMAGE

The article discusses a number of terms and concepts related to fatigue fracture mechanics, tribology, and tribo-fatigue in the system of scientific disciplines. A hierarchical structure of some objects studied in mechanics is proposed, and a comparative analysis is given for research and calculation methods for objects studied in fatigue fracture mechanics, tribology, and tribo-fatigue. The principle of forming unified methods of wear-fatigue testing is considered in the case when the basic method of fatigue testing is bending with rotation, and a cylindrical sample with a working part diameter of 10 mm is adopted

as a standard. A description of the developed methods and equipment for carrying out wear-fatigue tests, technical characteristics of machines for such tests, including the latest joint developments of Belarusian State University and the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus are given. Trends in the development of equipment for mechanical testing of materials and mechanical systems are discussed.

Keywords: wear-fatigue damage, active system, wear-fatigue testing, friction pair; equipment, testing methods

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-76-85>

References

1. Sosnovskiy L.A. O kompleksnoy otsenke nadezhnosti silovykh sistem [On the comprehensive assessment of the reliability of active systems]. *Tezisy dokladov Respublikanskoy nauchno-technicheskoy konferentsii "Puti povysheniya tekhnicheskogo urovnya i nadezhnosti mashin"* [Abstracts of papers of the Republican scientific and technical conference "Ways to improve the technical level and reliability of machines"]. Minsk, 1986, p. 29 (in Russ.).
2. Sosnovskiy L.A. Nadezhnost i dolgovechnost elementov silovo-go metallopolimernogo tribosopryazheniya v protsesse iznosoustalostnykh ispitaniy [Reliability and durability of elements of power metal-polymer tribocoupling in the process of wear-fatigue tests]. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy*, 1986, no. 9, pp. 93–102 (in Russ.).
3. Sosnovskiy L.A. *Kompleksnaya otsenka nadezhnosti silovykh sistem po kriteriyam soprotivleniya ustalosti i iznosostoykosti (osnovy tribofatiki)* [Comprehensive assessment of the reliability of active systems based on fatigue and wear resistance criteria (fundamentals of tribofatigue)]. Gomel, Belorusskiy institut inzhenerov zheleznodorozhного transporta Publ., 1988. 56 p. (in Russ.).
4. Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-fatigue damage]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2007. 434 p. (in Russ.).
5. Vitzia P.A., Vysotskiy M.S., Sosnovskiy L.A. Ob obektakh, izuchayemykh v mekhanike [About objects studied in mechanics]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2008, iss. 23, pp. 3–12 (in Russ.).
6. Vysotskiy M.S., et al. Novye podkhody v mekhanike iznosoustalostnogo povrezhdeniya i razrusheniya [New approaches in the mechanics of wear-fatigue damage and fracture]. 3 Belorusskiy kongress po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike "Mekhanika-2007" [3rd Belarusian congress on theoretical and applied mechanics "Mechanics-2007"], Minsk, 2007, pp. 38–114 (in Russ.).
7. Sosnovskiy L.A. *Mekhanika ustalostnogo razrusheniya* [Fatigue fracture mechanics]. Gomel, NPO "TRIBOFATIKA" Publ., 1994. Part 1, 328 p.; part 2, 340 p. (in Russ.).
8. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1987. Vol. 1, 510 p.; vol. 2, 825 p. (in Russ.).
9. Bathiar C., Paris P.C. *Gigacycle fatigue in mechanical practice*. New York, Marcel Dekker, 2004. 328 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203020609>.
10. Gouth H.J. *The fatigue of metals*. London, Scott, Greenwood and Son, 1924. 304 p.
11. Garkunov D.N. *Tribotekhnika* [Tribotechnics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p. (in Russ.).
12. Rabinovitz E. *Friction and wear of materials*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1965. 244 p.
13. Blau P.J. *Friction science and technology*. New York, Marcel Dekker, 1996. 399 p.
14. Amiri M., Khonsari M.M., Brahmewarkar S. On the relationship between wear and thermal response in sliding systems. *Triboology letters*, 2010, vol. 38, iss. 2, pp. 147–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9584-6>.
15. Beheshti A., Khonsari M.M. On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect. *Triboology international*, 2011, vol. 44, iss. 12, pp. 1620–1628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.05.017>.
16. Aghdam A.B., Beheshti A., Khonsari M.M. On the fretting crack nucleation with provision for size effect. *Triboology international*, 2012, vol. 47, pp. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.10.001>.
17. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Drozdov Yu.N. *Tribofatika: novye idei v perspektivnom napravlenii* [Tribofatigue: new ideas in a promising direction]. Gomel, Belorusskiy institut inzhenerov zheleznodorozhного transporta Publ., 1990. 7 p. (in Russ.).
18. Sosnovskiy L.A. Tribofatika: problemy i perspektivy [Tribofatigue: problems and prospects]. *Doklad na tematicheskoy vystavke AN SSSR "Matematika i mehanika — narodnomu khozyaystvu"* [Presentation at the thematic exhibition of the Academy of Sciences of the Soviet Union "Mathematics and mechanics for national economy"]. Gomel, 1989, 65 p. (in Russ.).
19. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. Metodologicheskie problemy kompleksnoy otsenki povrezhdennosti i predelnogo sostoyaniya silovykh sistem (obzornaya statya) [Methodological problems of complex assessment of damage and limit state of active systems (review article)]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 1991, vol. 57, no. 5, pp. 27–40 (in Russ.).
20. Vysotskiy M.S., et al. Tribofatika – novye puti dlya povysheniya nadezhnosti mashin [Tribofatigue – new ways to improve machine reliability]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical series*, 1994, no. 4, pp. 32–41 (in Russ.).
21. Makhutov N.A., Sosnovskiy L.A., Gao V.-C. Metodologicheskie osnovy tribofatiki [Methodological foundations of tribofatigue]. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2002, vol. 68, no. 6, pp. 29–41 (in Russ.).
22. Bogdanovich A.V. *Slovo o tribofatike* [A word about tribofatigue]. Gomel, Minsk, Moscow, Kiev, Remika, 1996. 132 p. (in Russ.).
23. Sosnovskiy L.A. Surprises of tribofatigue. *Proc. World tribology congress III*. Washington, 2005, pp. 27–28. DOI: <https://doi.org/10.1115/WTC2005-63082>.
24. Krasnevskiy L.G. *O tribofatike* [About tribofatigue]. Minsk, NIRUP "Belavtotraktorostroenie" Publ., 2005. 83 p. (in Russ.).
25. Sosnovskiy L.A. *Tribo-fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction*. Berlin, Springer, 2005. 351 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27027-0>.
26. Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. *Mekhanika tribofaticheskikh sistem* [Mechanics of tribofatigue systems]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 407 p. (in Russ.).
27. Sosnovskiy L.A., Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. *Fundamentalnye i prikladnye zadachi tribofatiki* [Fundamental and applied problems of tribofatigue]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 488 p. (in Russ.).
28. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike, posvyashchennogo 25-letiyu razvitiya issledovaniy po tribofatike i 75-letiyu so dnya rozhdeniya L.A. Sosnovskogo "Tribofatika"* [Proc. 6th International symposium on tribofatigue (ISTF 2010), dedicated to the 25th anniversary of the tribofatigue research development and the 75th anniversary of L.A. Sosnovskiy "Tribofatigue"]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2010, part 1, 839 p.; part 2, 725 p. (in Russ.).
29. Bhushan B. *Principles and applications of tribology*. New York, John Wiley & Sons, 1999. 1020 p.
30. Halling J. *Principles of tribology*. London, McMillan Press, 1978. 401 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-04138-1>.
31. Bauer R.G. *Mechanical wear prediction and prevention*. New York, Marcel Dekker, 1994. 657 p.

32. Mishkin N.K., Petrokovets M.I. *Tribologiya. Printsipy i priblozheniya* [Tribology. Principles and applications]. Gomel, Institut mekhaniki metallopolymernykh sistem imeni V.A. Belogo NAN Belarusi Publ., 2002. 304 p. (in Russ.).
33. Chichinadze A.V. et al. *Trenie, iznos, smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear, lubrication (tribology and tribotechnics)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 575 p. (in Russ.).
34. *Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering*. New York, Marcel Dekker, 2004. 747 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203021545>.
35. Kragelskiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p. (in Russ.).
36. Godet M. Third-bodies in tribology. *Wear*, 1990, vol. 136, iss. 1, pp. 29–45. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90070-Q](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90070-Q).
37. Sosnovskiy L.A. *Problemy kompleksnoy otsenki povrezhdennosti i predelnogo sostoyaniya silovykh sistem. Osnovnye terminy* [Problems of complex assessment of damage and limit state of active systems. Basic terms]. Gomel, Belorusskiy institut inzhenerov zheleznodorozhного transporta Publ., 1990. 10 p. (in Russ.).
38. Sosnovskiy L.A. *Tribofatiika: osnovnye terminy i opredeleniya* [Tribo-fatigue: Basic terms and definitions]. *Friction and wear*, 1992, vol. 13, no. 4, pp. 728–734 (in Russ.).
39. Standard of Belarus STB 994-95. *Tribofatiika. Terminy i opredeleniya* [Tribo-fatigue. Terms and definitions]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1995. 98 p. (in Russ.).
40. Andronov P.V., et al. *Tribofatiika* [Tribo-fatigue]. Minsk, Gomel, NPO “TRIBOFATIKA” Publ., 1996. 136 p. (in Russ.).
41. State Standard 30638-99. *Tribofatiika. Terminy i opredeleniya* [Tribo-fatigue. Terms and definitions]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 1999. 17 p. (in Russ.).
42. Sosnovskiy L.A. *Friktsionno-mekhanicheskaya ustalost silovykh sistem* [Mechano-sliding fatigue of active systems]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1992, no. 8–9, pp. 14–18 (in Russ.).
43. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Shurinov V.A. *Fretting-ustalost: osnovnye zakonomernosti (obobshchayushchaya statya)* [Fretting fatigue: basic patterns (summary article)]. *Industrial laboratory*, 1992, vol. 58, no. 8, pp. 45–62 (in Russ.).
44. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Shurinov V.A. *Friktsionno-mekhanicheskaya ustalost: osnovnye zakonomernosti (obobshchayushchaya statya)* [Mechano-sliding fatigue: basic patterns (summary article)]. *Industrial laboratory*, 1992, vol. 58, no. 9, pp. 18–35 (in Russ.).
45. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Shurinov V.A. *Kontaktno-mekhanicheskaya ustalost: osnovnye zakonomernosti (obobshchayushchaya statya)* [Mechano-rolling fatigue: basic patterns (summary article)]. *Industrial laboratory*, 1992, vol. 58, no. 11, pp. 44–61 (in Russ.).
46. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Shurinov V.A. *Korrozionno-mekhanicheskaya ustalost: osnovnye zakonomernosti (obobshchayushchaya statya)* [Mechano-corrosion fatigue: basic patterns (summary article)]. *Industrial laboratory*, 1993, vol. 59, no. 7, pp. 33–44 (in Russ.).
47. Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. *Surprises of tribo-fatigue*. Minsk, Magic Book, 2009. 199 p.
48. Sosnovskiy L.A., Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S. *Vvedenie v tribofatiiku* [Introduction to tribo-fatigue]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2010. 77 p. (in Russ.).
49. Sosnovskiy L.A. *Mekhanika iznosoustalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of wear-fatigue damage]. *Trudy 3 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatiike* [Proc. 3rd International symposium on tribo-fatigue]. Beijing, 2000, pp. 84–101 (in Russ.).
50. Sosnovskiy L.A. *Osnovy mekhaniki iznosoustalostnogo povrezhdeniya i razrusheniya* [Fundamentals of mechanics of wear-fatigue damage and fracture]. *Trudy 4 Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatiike* [Proc. 4th International symposium on tribo-fatigue]. Ternopol, 2002, vol. 1, pp. 9–22 (in Russ.).
51. Sosnovskiy L.A. *O sostoyani i budushchem razvitiu tribologii* [On the state and future development of tribology]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferen-* tsii “*Polikomtrib-2009*” [Abstracts of papers of the International scientific and technical conference “*Polikomtrib-2009*”]. Gomel, 2009, p. 215 (in Russ.).
52. Troschenko V.T., et al. *Iznosoustalostnye povrezhdeniya i ikh prognozirovaniye: tribofatiika* [Wear-fatigue damage and its prediction: tribo-fatigue]. Gomel, Kiev, Moscow, Uhan, Tribofatiika Publ., 2001, 170 p. (in Russ.).
53. *Eksperimentalnaya mehanika* [Experimental mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1990. Book 1, 616 p.; book 2, 552 p. (in Russ.).
54. *Springer handbook on experimental solid mechanics*. New York, Springer, 2008. 1098 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>.
55. Buketkin B.V., et al. *Eksperimentalnaya mehanika* [Experimental mechanics]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana Publ., 2004. 136 p. (in Russ.).
56. State Standard 30754-2001. *Tribofatiika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Methods of wear-fatigue testing. Mechano-rolling fatigue tests]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2002. 32 p. (in Russ.).
57. Standard of Belarus STB 1233-2000. *Tribofatiika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Uskorennye ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue test methods. Accelerated mechano-rolling fatigue tests]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2000. 8 p. (in Russ.).
58. Standard of Belarus STB 1448-2004. *Tribofatiika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Ispytaniya na friktsionno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue test methods. Mechano-sliding fatigue tests]. Minsk, Gosstandart Publ., 2004. 14 p. (in Russ.).
59. Standard of Belarus STB 1758-2007. *Tribofatiika. Metod sovmeshchennykh ispytaniy na izgibnyu i kontaktinu ustalost materialov zubchatykh koles* [Tribo-fatigue. Method of combined tests for bending and contact fatigue of gear materials]. Minsk, Gosstandart Publ., 2007. 45 p. (in Russ.).
60. State Standard 30755-2001. *Tribofatiika. Mashiny dlya iznosoustalostnykh ispytaniy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue testing machines. General technical requirements]. Minsk, Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2002. 8 p. (in Russ.).
61. Bogdanovich A.V., et al. *Tsentr dlya iznosoustalostnykh ispytaniy materialov* [Center for wear-fatigue testing of materials]. Patent EA, no. 040211, 2020 (in Russ.).
62. Basiniuk V.L., et al. *Tsentr i sposob dlya provedeniya ispytaniya materialov* [Center and method for testing materials]. Patent EA, no. 047463, 2023 (in Russ.).
63. Stepankin I.N., Kenko V.M., Pankratov I.A. *Ustroystvo ispytaniya materialov na kontaktinu ustalost i iznos* [A device for testing materials for contact fatigue and wear]. Patent BY, no. 7093, 2011 (in Russ.).
64. Korolev A.V., Korolev A.A. *Mashina treniya dlya uskorennnykh ispytaniy na iznos friktsionnykh tel kacheniya* [Friction machine for accelerated wear tests of frictional rolling elements]. *Friction and wear*, 2017, vol. 38, no. 1, pp. 49–54 (in Russ.).
65. McCook N.L., Burris D.L., Kim N.H., Sawyer W.G. Cumulative damage modeling of solid lubricant coatings that experience wear and interfacial fatigue. *Wear*, 2007, vol. 262, iss. 11–12, pp. 1490–1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.042>.
66. Martínez F.J., Canales M., Bielsa J.M., Jiménez M.A. Relationship between wear rate and mechanical fatigue in sliding TPU–metal contacts. *Wear*, 2010, vol. 268, iss. 3–4, pp. 388–398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.026>.
67. Zhang J., et al. Tribo-fatigue behaviors of steel wire rope under bending fatigue with the variable tension. *Wear*, 2019, vol. 428–429, pp. 154–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.004>.