



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 539.4

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

С.А. ТЮРИН, канд. техн. наук, доц.
заведующий кафедрой «Мобильные и технологические комплексы»²
E-mail: iznoslab@mail.ru

О.М. ЕЛОВОЙ, канд. техн. наук
заместитель генерального директора по научной работе и инновационной деятельности³
E-mail: omy@bk.ru

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

³Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.09.2025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ И КОНТАКТНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

В работе обсуждаются принципы моделирования и методы лабораторных ускоренных испытаний пар трения и силовых систем при трении качения и контактно-механической усталости. Рассмотрена система критериев подобия повреждений на основе статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом, которая успешно применяется в условиях объемного и поверхностного деформирования, а также при их взаимодействии. Показана возможность применения метода многоступенчатого нагружения (Локати) для расчетно-экспериментальной оценки предела контактной выносливости с учетом схожести механизмов механической и контактной усталости. Метод ускоренных испытаний на трение качения и контактно-механическую усталость путем многоступенчатого нагружения при прямом эффекте (изменении во времени амплитуды σ_a изгибных напряжений при постоянном значении контактных напряжений $p_0 = \text{const}$) и при обратном эффекте (изменении во времени контактных напряжений p_0 при постоянном значении амплитуды изгибных напряжений $\sigma_a = \text{const}$) описан и реализован на конкретном примере. Также показаны примеры методов ускорения испытаний путем форсирования их режимов.

Ключевые слова: ускоренные испытания, моделирование, силовая система, пара трения, износоусталостное повреждение, трение качения, контактно-механическая усталость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-66-74>

Введение. В машиностроении сложилась и получила широкую реализацию концепция приоритетности натурных испытаний — от отдельных деталей и узлов до агрегатов и машин в целом. Трудоемкость и стоимость таких испытаний весьма велики, притом что их результаты имеют ограниченное значение: они относятся лишь к тем

типоразмерам объекта, которые предусмотрено испытывать на данном стенде.

Для серийных и массовых изделий машиностроения перспективным является научный подход, основанный на моделировании. Испытания моделей деталей и узлов, уменьшенных в разумных пределах, можно вести на универсальном

испытательном оборудовании. Это резко снижает затраты и расширяет возможности по количеству испытуемых объектов, что ведет к повышению точности оценки служебных свойств изделия, узла, детали. Но тогда необходимы обоснованные критерии подобия, задача разработки которых является непростой.

С другой стороны, экспериментальная оценка работоспособности объекта связана с большой продолжительностью и высокой стоимостью стандартных тестов. Необходимость применения ускоренных испытаний (УИ) взамен классических диктуется их высокой экономичностью и малой длительностью. При этом результаты (пусть и приближенные) УИ могут быть вполне достаточными для принятия оперативных решений по совершенствованию конструкции или узла, освоению их производством в сжатые сроки. Известно, что трудоемкость УИ составляет 5...10 % трудоемкости классических, а продолжительность на порядок или два меньше [1].

В статье обсуждаются принципы моделирования и методы лабораторных УИ пар трения и силовых систем (СС) при трении качения и контактно-механической усталости (КМУ), в том числе разработанные для машин серии СИ и предложенные в рамках трибофатики.

Принципы моделирования. При физическом моделировании, когда проводятся лабораторные испытания малоразмерной модели реальной механической системы, возникает проблема: как осуществить моделирование и обратный переход от модели к натуре, чтобы получить достоверный прогноз сопротивления разрушению реальной механической системы? Понятно, что испытания моделей СС тем значимее, чем точнее они позволяют оценить показатели надежности натуральных узлов в условиях, близких к эксплуатационным.

Переход от модели к натуре обычно сопровождается решением задачи масштабного эффекта. При механической усталости, например, величина предела выносливости уменьшается с ростом размеров образца; при трении (например, в условиях контактной усталости) долговечность, наоборот, увеличивается с ростом размеров образца. Применительно к СС задача усложняется, если надо оценить работоспособность обоих элементов величиной предельного напряжения: при переходе от модели к натуре она увеличивается по критерию износостойкости и одновременно снижается по критерию сопротивления усталости.

Классические теории размерностей и подобия здесь оказываются пока бессильными. Однако решение этой задачи возможно на основе статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом (модель ТОПО) [2–6]. Согласно модели ТОПО, прочность тела (в том числе и поверхностная) определяется областью конечных размеров с критическим уровнем напряжений

в ней — опасным объемом. Сущность подхода состоит в следующем [7, 8].

Пусть стальной вал циклически изгибается моментом M таким образом, что в некоторой его области поле нормальных напряжений σ является повреждающим. Это означает, что на поверхности вала формируется опасный объем $V_{P\gamma} > 0$ (случай F на рисунке 1), ограниченный условием $\sigma \geq \sigma_{-1min}$, где σ_{-1min} — нижняя граница рассеяния пределов выносливости. Пусть, далее, в этой опасной зоне вала реализуется процесс трения качения либо трения скольжения. И пусть в такой СС («вал — контртело») поле контактного давления p таково, что вызывает появление в области контактной площадки опасного объема $S_{P\gamma}$ (случай T на рисунке 1).

Если реализуется процесс трения качения, то опасный объем $S_{P\gamma} = S_{WP}$ (случай T-1) и/или $S_{P\gamma} = S_{VP}$ (случай T-2) формируется не только на поверхности, но и под нею. Во всех этих случаях он ограничивается повреждающим уровнем касательных напряжений $\tau \geq \tau_0$, где τ_0 — нижняя граница рассеяния пределов выносливости, определяемых при сдвиге (либо кручении тонкостенных трубок).

Будем теперь рассматривать износоусталостные испытания как совмещение циклического изгиба и трения качения. Тогда возможны две ситуации при формировании опасных объемов (правый столбец схем на рисунке 1). Во-первых, объемы $V_{P\gamma}$ и $S_{P\gamma}$ совмещаются на поверхности (случай FT-1). Во-вторых, они совмещаются под поверхностью (случай FT-2).

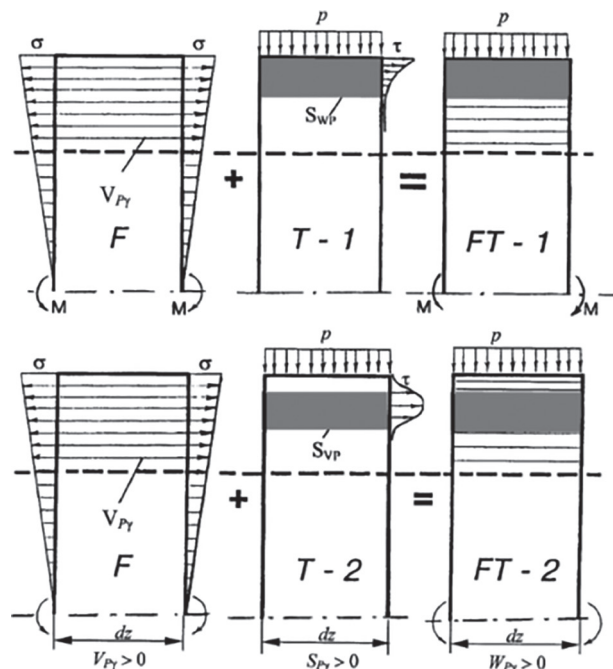


Рисунок 1 — Схемы формирования опасных объемов при испытаниях на трение ($S_{P\gamma} > 0$), механическую усталость ($V_{P\gamma} > 0$) и при износоусталостных испытаниях ($W_{P\gamma} > 0$)
Figure 1 — Formation schemes of dangerous volumes during friction tests ($S_{P\gamma} > 0$), mechanical fatigue ($V_{P\gamma} > 0$) and wear and fatigue tests ($W_{P\gamma} > 0$)

В обоих этих случаях возникает общий опасный объем $W_{P\gamma} > 0$, являющийся объединением объемов $V_{P\gamma}$ и $S_{P\gamma}$, т. е.

$$W_{P\gamma} = (V_{P\gamma} \cup S_{P\gamma})\varphi^*,$$

где φ^* — функция взаимодействия (в некоторых случаях достаточно ее рассматривать как параметр взаимодействия).

Формулы для определения опасных объемов по любой компоненте нормальных σ и касательных τ напряжений приведены в таблице 1. Используя модель ТОПО при механической усталости и при трении, нетрудно составить условия безотказной работы и/или условия повреждения и разрушения, если ввести соответствующие меры поврежденности ω (S_0 и V_0 — рабочие объемы при трении и при усталости соответственно). Все решения без труда распространяются и на случай комплексных износоусталостных повреждений.

Разработанная система критериев подобия повреждений позволяет удовлетворительно решать трудные проблемы моделирования пар трения при контактной усталости и СС современных машин и оборудования в условиях КМУ.

Ускоренные испытания. Процессы поверхностного повреждения обусловлены знакопеременными циклическими деформациями (напряжениями) при трении, и, следовательно, разрушение поверхностных слоев материала в таких специфических условиях контактного взаимодействия имеет усталостный характер. В этой связи повреждение и разрушение материала при трении качения называют контактной усталостью [9, 10]. Соответственно, для пары трения с определенной геометрией ее элементов, изготовленных из заданных материалов, может быть построена кривая контактной усталости и определены характеристики сопротивления контактной усталости по ГОСТ 30754-2001 и Р 50-54-30-87 [11, 12]. Исходя из этой позиции, по-видимому, в ряде случаев при трении качения применимы подходы механики усталостного разрушения к разработкам методов УИ. Они предусматривают решение трех задач [1]:

- определение долговечности для принятого критерия предельного состояния при минимальных заданных напряжениях;
- ускоренное построение наклонного участка кривой усталости;
- определение положения горизонтального участка кривой усталости и предела выносливости.

Первую задачу решают либо путем нахождения непосредственной зависимости между долговечностями при высоком и низком уровнях напряжения, либо путем построения верхней части наклонного участка кривой усталости с последующей экстраполяцией его в область низких уровней напряжения. При этом во всех случаях проводятся УИ главным образом при высоких уровнях напряжения. Вторая задача связана с первой, ее решение дает экономию времени и числа испытуемых объектов. Третья задача является наиболее распространенной и трудоемкой, применение УИ здесь наиболее эффективно.

К расчетно-экспериментальным относятся методы ускоренного определения предела выносливости Локати, экстраполяции левой ветви кривой усталости, Субраманьяна, ступенчато повышаемых деформаций (Dst-метод), Про.

Наиболее простым и распространенным, предназначенным для ускоренной оценки среднего значения $\bar{\sigma}_{-1}$ предела выносливости в случаях, не требующих высокой точности, является метод Локати, основанный на известной гипотезе линейного суммирования повреждений (Пальмгрена–Майнера). Порядок проведения УИ и обработку экспериментальных данных по данному методу регламентирует РД 50-686-89 [13]. Испытание проводят при ступенчатом возрастании нагрузки до разрушения образца. В ходе УИ образец нагружают начальным напряжением σ_{a_0} и испытывают в течение n_0 циклов. Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на $\Delta\sigma_a = \text{const}$ до величины σ_{a_1} , и на этом уровне напряжения УИ продолжают в течение $n_1 = n_0$ циклов и т. д. до наступления предельного состояния. Число циклов на последней ступени напряжения n_k определяют при разрушении образца.

Таблица 1 — Критерии подобия на основе модели ТОПО¹

Table 1 — Similarity criteria based on a model of a solid with a dangerous volume¹

Повреждение	Условие безотказной работы	Мера поврежденности	Условия повреждения и разрушения	Критерий подобия	Среднее значение опасного объема
Механическая усталость	$V_{P\gamma} = 0$	$\omega_V = \frac{V_{P\gamma}}{V_0}$	$0 \leq \omega_V \leq 1$	$\frac{V_{P\gamma}}{V_{st}} = \Pi_{VP}$	$V_{0,5\gamma} = \iiint_{\sigma > \sigma_{-1 \min}} \sigma(x, y, z) dV$
Трение и изнашивание	$S_{P\gamma} = 0$	$\omega_S = \frac{S_{P\gamma}}{S_0}$	$0 \leq \omega_S \leq 1$	$\frac{S_{P\gamma}}{S_{st}} = \Pi_{SP}$	$S_{0,5\gamma} = \iint_{\tau > \tau_0} \tau(x, y, z) dS$
Износоусталостное повреждение	$W_{P\gamma} = 0$	$\omega_W = \frac{W_{P\gamma}}{W_0}$	$0 \leq \omega_W \leq 1$	$\frac{W_{P\gamma}}{W_{st}} = \Pi_{WP}$	$W_{0,5\gamma} = \varphi^*(V_{P\gamma}, S_{P\gamma})$

¹ $V_{P\gamma}$, $S_{P\gamma}$, $W_{P\gamma}$ — опасные объемы элементов реальной СС; V_{st} , S_{st} — опасные объемы системы, которая принимается в качестве стандартной (так называемая стандартная модель) и которую можно испытать на машинах серии СИ.

Результаты УИ изображают на графике $\lg \sigma_a - \lg N$ (или $\sigma_a - \lg N$) в виде многоступенчатой диаграммы, на которую в последующем наносят три условные кривые усталости, для каждой из которых вычисляют суммы относительных долговечностей (накопленных повреждений). По значениям сумм относительных долговечностей $\sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N_i} \right)$ и соответствующим им значениям пределов выносливости строится график в координатах $\lg \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N_i} \right) - \sigma_{-1}$. Оценку медианы предела

выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ производят графически или аналитически интерполяцией или экстраполяцией полученного графика. Отметим, что для оценки предела выносливости по методу Локати необходимо испытание как минимум одного изделия (образца).

Учитывая широкую апробацию метода Локати в условиях механической усталости конструкционных материалов, а также то, что правило линейного суммирования повреждений справедливо и для пар трения (впервые оно было установлено применительно к подшипниковым узлам), можно рекомендовать его и для возможного использования при оценке предела контактной выносливости таких материалов при трении качения, а также при оценке предела выносливости в условиях КМУ. Конечно, границы применимости данного метода к тем или иным парам и условиям трения, уточнение уровня начальной ступени напряжений, числа циклов на каждой ступени приращения напряжений и диапазона этого приращения предстоит установить. Апробация метода Локати применительно к парам трения «алюминиевый сплав Д16 (вал) — сталь 18ХГТ (ролик)» и «сталь 45 (вал) — сталь 25ХГТ (ролик)» выполнена в работе [14], для пары трения «высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧГГ (вал) — сталь 18ХГТ (ролик)» — в работе [15], где было показано, что метод многоступенчатого нагружения Локати может эффективно применяться для ускоренной расчетно-экспериментальной оценки пределов контактной выносливости металлических материалов разного класса.

Для экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала при контактной усталости в широком диапазоне изменения контактных напряжений используют ускоренный метод многоступенчатого нагружения [16]. Сущность метода пояснена на рисунке 2, где показана программа ступенчатого нагружения — закон изменения во времени максимального контактного напряжения в центре контактной площадки p_0 .

Для реализации данной программы предварительно задают критерий достижения предельного состояния (ПС) ($k_i = \text{const}$), начальный уровень

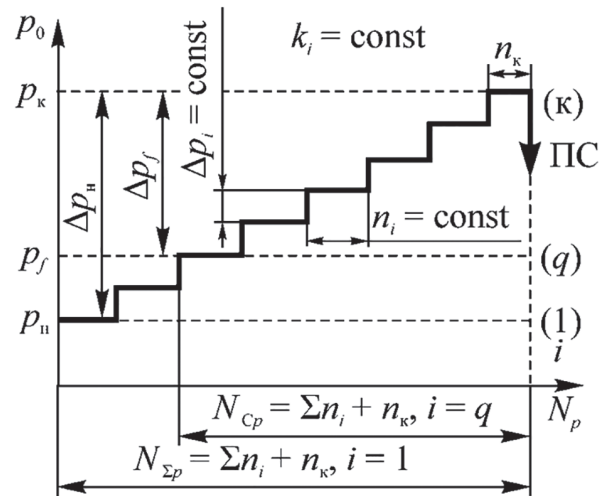


Рисунок 2 — Программа ступенчатого нагружения и основные характеристики сопротивления контактной усталости
Figure 2 — Step loading program and main characteristics of contact fatigue resistance

контактных напряжений p_n , степень приращения напряжений $\Delta p_i = \text{const}$, продолжительность ступени нагружения $n_i = \text{const}$. Испытания проводят непрерывно, до достижения ПС по выбранному критерию. По результатам испытаний определяют следующие характеристики сопротивления контактной усталости: предельное контактное напряжение p_k , интервал нагруженности $\Delta p_n = p_k - p_n$, интервал предельных контактных напряжений $\Delta p_f = p_k - p_f$, суммарную долговечность $N_{\Sigma p} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i + n_k$ (суммарную наработку), суммарную живучесть $N_{Cp} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i + n_k$.

Приведем пример применения описанного метода. Серия пар трения (цилиндрический образец из стали 45 и контробразец-ролик из стали 18ХГТ) была испытана ускоренным методом многоступенчатого нагружения. Испытания проводили непрерывно до достижения ПС, в качестве которого приняли предельную величину вибрации в паре трения 140 Дб. Схема испытаний приведена на рисунке 3. Цилиндрический образец 1 закрепляли в шпинделе 2 и приводили во вращение с угловой скоростью ω_1 . К его рабочей зоне

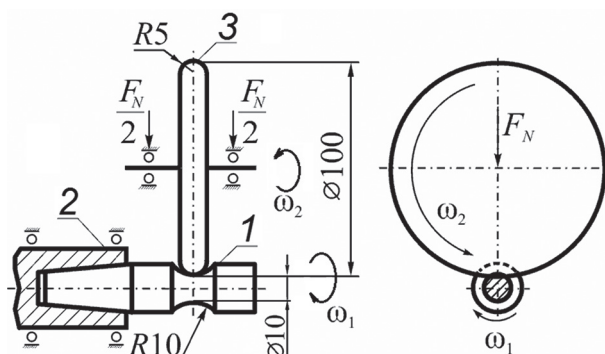


Рисунок 3 — Схема испытаний на контактную усталость:
1 — образец; 2 — шпиндель; 3 — контробразец (ролик с профильным радиусом)
Figure 3 — Rolling fatigue test scheme: 1 — sample; 2 — spindle; 3 — control sample (roller with profile radius)

диаметром $d = 10$ мм прижимали под действием контактной нагрузки F_N вращающийся ролик 3.

Численные значения полученных характеристик сопротивления контактной усталости приведены в таблице 2.

Авторы справочного пособия [17] в рекомендациях по применению моделирования для разработки методов УИ материалов и трибосистем указывают, что сокращение длительности испытаний может быть достигнуто одним из пяти способов:

1) уплотнением испытаний по времени за счет сокращения холостых ходов или простоев (для машин, стендов, приборов), а также одновременного испытания большего количества образцов (или машин) при различных режимах, аналогичных эксплуатационным (этот способ реализован, например, в изобретениях [18, 19]);

2) форсированием режимов испытаний за счет применения более высоких нагрузок или скоростей по сравнению с эксплуатационными (это допустимо в пределах применения заранее изученного закона трения и износа в конкретной паре трения), что широко используется в лабораторных испытаниях;

3) ужесточением фактора внешней среды (повышение или понижение наружной температуры, концентрации абразива, влаги, химических реагентов);

4) повышением точности измерения параметров (путем использования более чувствительных методов измерений процессов трения и изнашивания), что дает более точное выявление и за более короткое время переход от стадии приработки к стационарному процессу;

5) экстраполированием известной функциональной зависимости между контактной нагрузкой или скоростью трения и временем работы до предельного состояния образца.

В лабораторных модельных испытаниях наибольшее применение нашли второй и пятый из указанных способов. Так, стандарт [20] регламентирует порядок проведения ресурсных УИ на износостойкость пары трения с периодическим форсированием режима нагружения.

Испытания каждого образца по данному методу проводят при последовательном ступенчатом

чередовании нормального и форсированного режимов. В качестве нормального на соответствующих ступенях применяют любой режим, по отношению к которому оценивают ресурс изделия (постоянный режим, режим с циклическим или стационарным случайным изменением уровня внешних нагрузочных воздействий). Форсированный режим должен быть выбран так, чтобы скорость изнашивания на каждой ступени с нормальным режимом (нормальной ступени) при данном значении износа (или в данном диапазоне износа) не зависела от режима, при котором был накоплен этот износ (форсированного или нормального). Испытания каждого образца начинают с приработочной ступени, проводимой в режиме, установленном для приработки данного изделия. После окончания ступени измеряют приработочный износ. После завершения испытаний на приработочной ступени производят ступенчатое чередование нормального и форсированного режимов, причем испытания начинают и заканчивают нормальным режимом. Соотношение количества форсированных m_F и нормальных m_N ступеней определяют зависимостью $m_F = m_N - 1$. Хотя в стандарте [20] не указано, для каких пар трения метод форсированных испытаний предназначен, можно полагать, что преимущественно для пар трения скольжения, т. к. требуется проводить измерения износа на каждой ступени нагружения.

Форсирование режима испытаний за счет более высоких скоростей можно достигнуть путем применения соответствующего оборудования и методов испытаний на контактную усталость и КМУ. Например, согласно патенту [21] в захвате 1 вибростенда (рисунок 4) вертикально устанавливают и закрепляют за один конец длинномерный образец 2, на другом конце которого закреплен груз 3 массой m , прижимают к его рабочей поверхности с помощью динамометрической скобы 4 с противоположных сторон два контробразца в виде роликов 5, прикладывают к контробразцам нормальные нагрузки F_N , равные по величине и противоположные по направлению, сообщают образцу через захват продольные колебания со скоростью v и частотой f , близкой к собственной частоте колебаний всей механической системы. При этом массы образца, груза на его свободном конце и динамометрической скобы с контробразцами подбирают такими, чтобы при циклическом резонансном нагружении обеспечивались заданные уровни амплитуды нормальных напряжений $\sigma = Q / A$ (Q — амплитуда растягивающего усилия; A — площадь поперечного опасного сечения рабочей части образца) и контактных напряжений p_0 в опасном сечении образца при соответствующей амплитуде возвратно-поступательного перемещения контробразцов относительно срединной точки, расположенной по линии первоначального контакта контробразцов с образцом.

Таблица 2 — Характеристики долговечности и несущей способности, полученные по результатам испытаний на контактную усталость методом многоступенчатого нагружения
Table 2 — Durability and load-bearing characteristics obtained from the results of contact fatigue tests using the multi-stage loading method

Характеристика	Численное значение при длительности ступени нагружения		
	10 мин	30 мин	60 мин
p_k , МПа	2600	2000	2000
Δp_n , МПа	1200	600	600
Δp_n , МПа	840	240	240
$N_{\Sigma p}$, циклов	$1,78 \cdot 10^5$	$3,12 \cdot 10^5$	$5,73 \cdot 10^5$
N_{Cp} , циклов	$1,18 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$

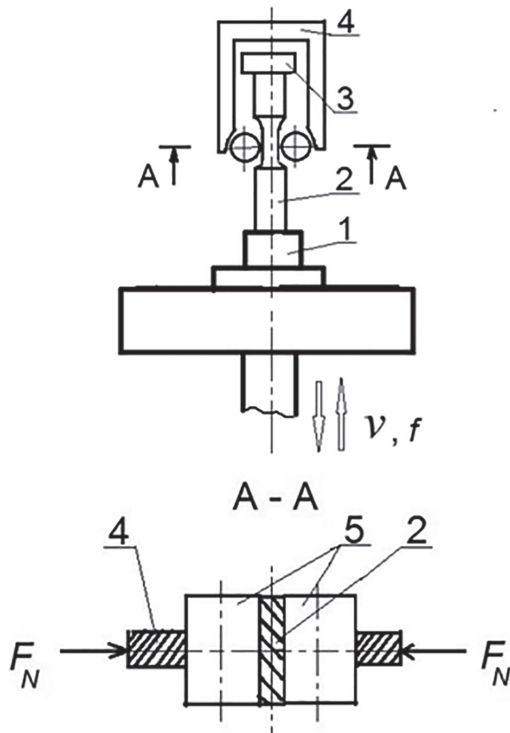


Рисунок 4 — Схема испытаний на КМУ на вибростенде:
1 — захват; 2 — образец; 3 — груз; 4 — динамометрическая скоба;
5 — контрообразцы-ролики

Figure 4 — Mechano-rolling fatigue (MRF) test scheme
on a vibration bench: 1 — gripper; 2 — sample; 3 — load;
4 — torque clamp; 5 — rollers control sample

Еще один нормативный метод [22] экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала разработан применительно к СС в условиях КМУ. Поясним суть метода для СС со схемой контакта «вал — ролик», приведенной на рисунке 5.

Согласно данной схеме, цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (направлена вниз). А к его рабочей

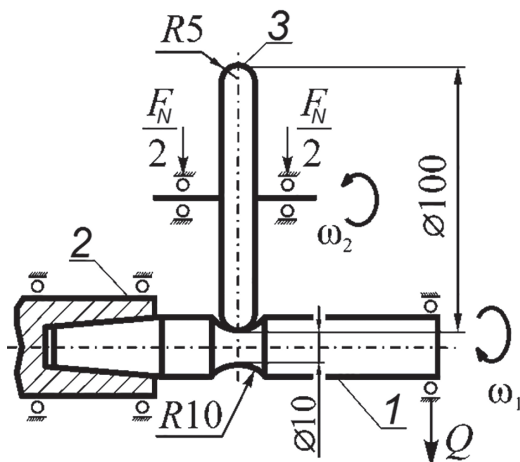
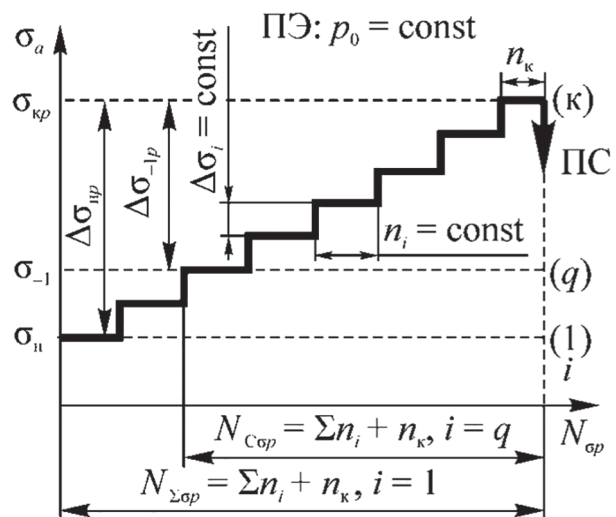


Рисунок 5 — Схема испытаний на КМУ: 1 — образец;
2 — шпиндель; 3 — контрообразец (ролик с профильным радиусом)
Figure 5 — MRF test scheme: 1 — sample; 2 — spindle;
3 — control sample (roller with profile radius)

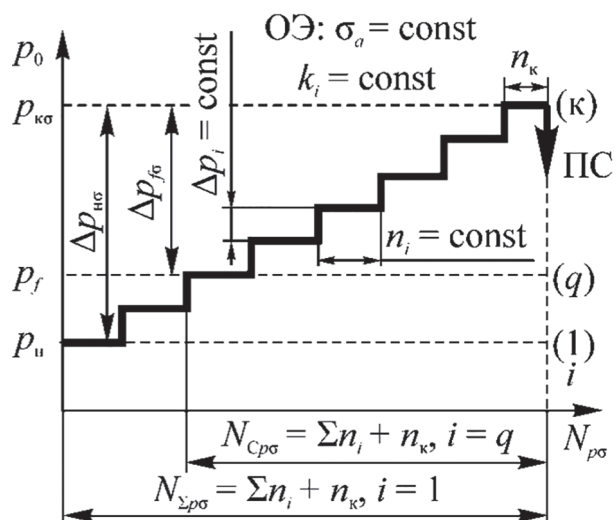
зоне ($d = 10$ мм) прижимается под действием контактной нагрузки F_N вращающийся ролик 3. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 .

Особенностью проводимых испытаний является то, что в опасном сечении образца возникают напряжения от действия контактной F_N и изгибающей Q нагрузок. Результатом является комплексное повреждение — излом плюс выкрашивание, изнашивание, пластические деформации.

На рисунке 6 схематично изображена программа ступенчатого нагружения для случая реализации УИ методом многоступенчатого нагружения при прямом эффекте (ПЭ), т. е. изменении во времени амплитуды σ_a изгибных напряжений при постоянном значении максимального контактного напряжения p_0 в центре контактной площадки $p_0 = \text{const}$ (см. рисунок 6 а) и для слу-



а



б

Рисунок 6 — Программа ступенчатого нагружения при КМУ и основные характеристики сопротивления КМУ:

а — прямой эффект; б — обратный эффект

Figure 6 — Step loading program with MRF and the main characteristics of MRF resistance: а — direct effect; б — back effect

чая реализации УИ методом многоступенчатого нагружения при обратном эффекте (ОЭ), т. е. изменении во времени максимального контактного напряжения p_0 при постоянном значении амплитуды изгибных напряжений $\sigma_a = \text{const}$ (см. рисунок 6 б).

При реализации испытания в условиях ПЭ производят ступенчатое повышение σ_a при заданном значении $p_0 = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают начальный уровень амплитуды изгибных напряжений σ_n , длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const, интервал приращения амплитуды напряжений $\Delta\sigma_i = \text{const}$. При реализации испытания в условиях ОЭ производят ступенчатое повышение p_0 при заданном значении $\sigma_a = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают критерий достижения предельного состояния $k_i = \text{const}$, начальный уровень контактных напряжений p_0 ; длительность ступени нагружения $n_i = \text{const}$, интервал приращения контактных напряжений $\Delta p_0 = \text{const}$.

Начальные параметры устанавливаются в зависимости от поставленной задачи; число циклов n_k на последней ступени нагружения определяется достижением предельного состояния; переход со ступени на ступень осуществляют без промежуточных пауз; испытания проводят непрерывно до наступления предельного состояния.

По результатам УИ определяют следующие характеристики сопротивления КМУ:

- в условиях ПЭ:

- предельное напряжение σ_{kp} при изгибе;
- интервал нагруженности $\Delta\sigma_{np} = \sigma_{kp} - \sigma_n$;
- интервал предельных напряжений при изгибе

$\Delta\sigma_{-1p} = \sigma_{kp} - \sigma_{-1}$;

- суммарную долговечность (суммарную наработку) $N_{\Sigma ap} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i (\alpha_a, p_0 = \text{const}) + n_k$;
- суммарную живучесть $N_{C ap} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i (\alpha_a, p_0 = \text{const}) + n_k$;

- в условиях ОЭ:

- предельное контактное напряжение $p_{k\sigma}$;
- интервал нагруженности $\Delta p_{n\sigma} = p_{k\sigma} - p_n$;
- интервал предельных контактных напряжений $\Delta p_{f\sigma} = p_{k\sigma} - p_f$ (p_f — предел контактной выносливости);

- суммарную долговечность (суммарную наработку) $N_{\Sigma ap} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i (p_0, \alpha_a = \text{const}) + n_k$;
- суммарную живучесть $N_{C ap} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i (p_0, \alpha_a = \text{const}) + n_k$.

В качестве примера на рисунке 7 приведены результаты сравнительных испытаний методом многоступенчатого нагружения СС «вал (сталь 45) — ролик (сталь 25ХГТ)». Испытания проводились в условиях ПЭ ($p_0 = 3200$ МПа = const, см. рисунок 7 а) и в условиях ОЭ ($\sigma_a = 225$ МПа = const, см. рисунок 7 б). Численные значения полученных характеристик сопротивления КМУ приведены в таблице 3.

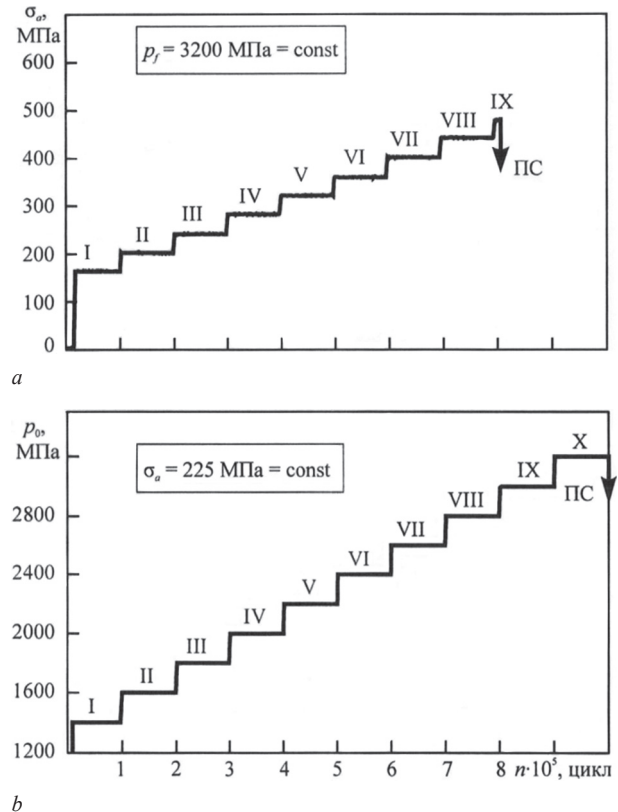


Рисунок 7 — Результаты испытаний на КМУ методом многоступенчатого нагружения при ПЭ (а) и при ОЭ (б)
Figure 7 — Results of MRF tests by multi-stage loading at direct effect (a) and at back effect (b)

Таблица 3 — Характеристики долговечности и несущей способности, полученные по результатам испытаний на КМУ методом многоступенчатого нагружения
Table 3 — Durability and load-bearing characteristics obtained from the results of MRF tests using the multi-stage loading method

Характеристика	Численное значение при реализации испытания в условиях	
	прямого эффекта	обратного эффекта
$\sigma_{kp}, p_{k\sigma}$, МПа	480	3200
$\Delta\sigma_{np}, \Delta p_{n\sigma}$, МПа	320	1800
$\Delta\sigma_{-1p}, \Delta p_{f\sigma}$, МПа	225	1440
$N_{\Sigma ap}, N_{\Sigma ps}$, циклов	$8,04 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$
$N_{C ap}, N_{C ps}$, циклов	$6,04 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^5$

Заключение. Реализуя УИ по выбранной программе, можно в течение короткого времени произвести выбор материала или технологии, которые обеспечивают необходимое для СС с заданной геометрией сопротивление КМУ.

Список литературы

1. Олейник, Н.В. Ускоренные испытания на усталость / Н.В. Олейник, С.П. Скляр. — Киев: Наук. думка, 1985. — 304 с.
2. Сосновский, Л.А. Статистическая модель деформируемого твердого тела с опасным объемом и некоторые ее приложения. Сообщение 1 / Л.А. Сосновский // Проблемы прочности. — 1990. — № 5. — С. 8–12.
3. Сосновский, Л.А. Статистическая модель деформируемого твердого тела с опасным объемом и некоторые ее приложения. Сообщение 2 / Л.А. Сосновский // Проблемы прочности. — 1990. — № 5. — С. 12–17.

4. Сосновский, Л.А. Статистическая модель деформируемого твердого тела с опасным объемом и некоторые ее приложения. Сообщение 3 / Л.А. Сосновский // Проблемы прочности. — 1992. — № 11. — С. 21–29.
5. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. — Минск: Наука и техника, 1987. — 288 с.
6. Сосновский, Л.А. Расчеты на усталость деталей с опасным объемом в вероятностной постановке / Л.А. Сосновский // Прикладная механика. — 1979. — Т. 15, № 4. — С. 60–66.
7. Сосновский, Л.А. Статистическая модель деформируемого твердого тела и ее приложения. Сообщение 4 / Л.А. Сосновский, В.Н. Корешков // Проблемы прочности. — 1999. — № 6. — С. 42–49.
8. Трибофатика – 96/97: ежегодник / под общ. ред. Л.А. Сосновского. — Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 1999. — Вып. 2: Моделирование силовых систем / В.Н. Корешков, Г.П. Ожигар, Л.А. Сосновский; под ред. Л.А. Сосновского. — 80 с.
9. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие для студентов технич. вузов: в 2 т. / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с. — Т. 2. — 235 с.
10. Орлов, А.В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А.В. Орлов, О.Н. Черменский, В.М. Нестеров. — М.: Машиностроение, 1980. — 110 с.
11. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость: Р 50-54-30-87. — Взамен ГОСТ 25.501-78; введ. 01.07.1988. — М.: ВНИИНМАШ, 1988. — 64 с.
12. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 40 с.
13. Методические указания. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций: РД 50-686-89. — Введ. 01.01.1990. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1990. — 27 с.
14. Богданович, А.В. Об использовании метода многоступенчатого нагружения для расчетно-экспериментальной оценки предела контактной выносливости / А.В. Богданович, В.Л. Басинюк, А.А. Глазунова // Механика машин, механизмов и материалов. — 2024. — № 1(66). — С. 29–36. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-29-36>
15. Тюрин, С.А. Контактная усталость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом: ускоренные испытания / С.А. Тюрин, Е.С. Таранова // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. — Гомель, 2012. — Вып. 6 / под ред. А.О. Шимановского. — С. 139–148.
16. 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.
17. Справочник по триботехнике: в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1989. — Т. 1. Теоретические основы / Н.М. Алексеев, А. Вахал, А.В. Блюмен [и др.]. — 397 с.
18. Авторское свидетельство SU 1762182, МПК G01N3/56. Способ испытания материалов в условиях фреттинг-усталости: заявл. 11.06.1990: опубл. 15.09.1992 / Сосновский Л.А., Шлотгаузэр В.А., Богданович А.В. — 3 с. — URL: <https://patents.su/3-1762182-sposob-ispytaniya-materialov-v-usloviyakh-fretting-ustalosti.html> (дата обращения: 01.08.2025).
19. Авторское свидетельство SU 1827580, МПК G01N3/56. Способ испытания материалов на фреттинг-усталость: заявл. 07.05.1990: опубл. 15.07.1993 / Сосновский Л.А. — 4 с. — URL: <https://patents.su/4-1827580-sposob-ispytaniya-materialov-na-fretting-ustalost.html> (дата обращения: 01.08.2025).
20. Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима: ГОСТ 23.205-79. — Введ. 01.01.1980. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 26 с.
21. Патент ЕА 028169, МПК G01N 3/56. Метод износоусталостных испытаний материалов: № а 201500793: заявл. 30.06.2015: опубл. 31.10.2017 / Богданович А.В., Сосновский Л.А., Щербаков С.С., Лис И.Н.; заявитель Белорусский государственный университет. — URL: <http://eapatis.com/Data/EATXT/earo2017/PDF/028169.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).
22. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость: СТБ 1233-2000. — Введ. 01.01.2001. — Минск: Госстандарт, 2000. — 8 с.

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

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: bogal@tut.by

TYURIN Sergey A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department “Mobile and Technological Complexes”²

E-mail: iznoslab@mail.ru

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

Deputy Director General for Research and Innovations³

E-mail: omy@bk.ru

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

³Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received September 7, 2025.

MODELING AND ACCELERATED TESTS UNDER ROLLING FRICTION AND MECHANO-ROLLING FATIGUE

Modelling principles and methods of laboratory accelerated tests of friction pairs and active systems in rolling and mechano-rolling fatigue are discussed in the paper. The system of criteria of similarity damage based on a statistical model of a deformable solid with dangerous volume is developed. It has been used successfully under volume and surface deformation, as well as in their interaction. The possibility of using

the multi-stage loading method (Lokati) for the computational and experimental assessment of the contact rolling fatigue limit is shown, taking into account the similarity of the mechanisms of mechanical and rolling fatigue. The method of accelerated tests for rolling friction and mechano-rolling fatigue by multi-stage loading with a direct effect (change in time of the amplitude σ_a of bending stresses at a constant value of contact stresses $p_0 = \text{const}$) and with a back effect (change in time of contact stresses p_0 at a constant value of the amplitude of bending stresses $\sigma_a = \text{const}$) is described and implemented on a specific example. Examples of methods for accelerating tests by forcing their modes are also shown.

Keywords: accelerated tests, modelling, active system, friction pair, wear-fatigue damage, rolling friction, mechano-rolling fatigue

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-66-74>

References

- Oleynik N.V., Sklyar S.P. *Uskorennyye ispytaniya na ustalost* [Accelerated fatigue tests]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1985. 304 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. Statisticheskaya model deformiruemogo tverdogo tela s opasnym obemom i nekotorye ee prilozheniya. Soobshchenie 1 [Statistical model of a deformable solid with a dangerous volume and some of its applications. Message 1]. *Problemy prochnosti*, 1990, no. 5, pp. 8–12 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. Statisticheskaya model deformiruemogo tverdogo tela s opasnym obemom i nekotorye ee prilozheniya. Soobshchenie 2 [Statistical model of a deformable solid with a dangerous volume and some of its applications. Message 2]. *Problemy prochnosti*, 1990, no. 5, pp. 12–17 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. Statisticheskaya model deformiruemogo tverdogo tela s opasnym obemom i nekotorye ee prilozheniya. Soobshchenie 3 [Statistical model of a deformable solid with a dangerous volume and some of its applications. Message 3]. *Problemy prochnosti*, 1992, no. 11, pp. 21–29 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Statisticheskaya mekhanika ustalostnogo razrusheniya* [Statistical mechanics of fatigue failure]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 288 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. Raschety na ustalost detaley s opasnym obemom v veroyatnostnoy postanovke [Fatigue calculations for parts with dangerous volume in a probabilistic formulation]. *Prikladnaya mekhanika*, 1979, vol. 15, no. 4, pp. 60–66 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A., Koreshkov V.N. Statisticheskaya model deformiruemogo tverdogo tela s opasnym obemom i nekotorye ee prilozheniya. Soobshchenie 4 [Statistical model of a deformable solid with a dangerous volume and some of its applications. Message 4]. *Problemy prochnosti*, 1999, no. 6, pp. 42–49 (in Russ.).
- Tribofatika-96/97. Vyp. 2. Modelirovanie silovykh sistem* [Tribo-fatigue-96/97. Iss. 2. Modeling of active systems]. Gomel, NPO "TRIBOFATIKA" Publ., 1999. 80 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki* [Fundamentals of tribo-fatigue]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2003. Vol. 1, 246 p.; vol. 2, 235 p. (in Russ.).
- Orlov A.V., Chermenskiy O.N., Nesterov V.M. *Ispytaniya konstruktsionnykh materialov na kontaktmuyu ustalost* [Contact rolling fatigue testing of structural materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 110 p. (in Russ.).
- R 50-54-30-87. *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody ispytaniy na kontaktmuyu ustalost* [Calculations and strength tests. Test methods for contact fatigue]. Moscow, VNIINMASH Publ., 1988. 64 p. (in Russ.).
- State Standard 30754-2001. *Tribofatika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Methods of wear-fatigue testing. Mechano-rolling fatigue tests]. Minsk, Mezhsosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2002. 40 p. (in Russ.).
- RD 50-686-89. *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost v tekhnike. Metody uskorennykh ispytaniy na ustalost dlya otsenki predelov vyнослиvosti materialov, elementov mashin i konstruktсий* [Methodical instructions. Reliability in technology. Accelerated fatigue testing methods for assessing the endurance limits of materials, machine elements and structures]. Moscow, Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam Publ., 1990. 27 p. (in Russ.).
- Bogdanovich A.V., Basiniuk V.L., Glazunova A.A. Ob ispolzovanii metoda mnogostupenchatogo nagruzheniya dlya raschetno-eksperimentalnoy otsenki predela kontaktnoy vyнослиvosti [On the use of the method of multistage loading for computational and experimental evaluation of the contact endurance limit]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 1(66), pp. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-29-36> (in Russ.).
- Tyurin S.A., Taranova E.S. Kontaktnaya ustalost vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom: uskorennyye ispytaniya [Rolling fatigue of ductile iron with spheroidal graphite: accelerated testing]. *Mechanics. Scientific researches and methodical development*, 2012, iss. 6, pp. 139–148 (in Russ.).
- Bogdanovich A.V., Sherbakov S.S., Marmysh D.E. *Laboratornyy praktikum po eksperimentalnoy mekhanike* [Laboratory practical training in experimental mechanics]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2017. 107 p. (in Russ.).
- Spravochnik po tribotekhnike. T. 1. Teoreticheskie osnovy* [Handbook of tribology. V. 1. Theoretical foundations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 397 p. (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A., Shlotgauer V.A., Bogdanovich A.V. *Sposob ispytaniya materialov v usloviyakh fretting-ustalosti* [Method of testing materials under fretting fatigue conditions]. Author Certificate SU, no. 1762182, 1992 (in Russ.).
- Sosnovskiy L.A. *Sposob ispytaniya materialov na fretting-ustalost* [Method for testing materials for fretting fatigue]. Author Certificate SU, no. 1827580, 1993 (in Russ.).
- State Standard 23.205-79. *Obespechenie iznosostoykosti izdeliy. Uskorennyye resursnye ispytaniya s periodicheskim forsirovaniem rezhima* [Products wear resistance assurance. Accelerated life tests by inquiry method]. Moscow, Standartov Publ., 1979. 26 p. (in Russ.).
- Bogdanovich A.V., Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S., Lis I.N. *Metod iznosoustalostnykh ispytaniy materialov* [Method of wear-fatigue testing of materials]. Patent EA, no. EA028169B1, 2017 (in Russ.).
- Standard of Belarus STB 1233-2000. *Tribofatika. Metody iznosoustalostnykh ispytaniy. Uskorennyye ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost* [Tribo-fatigue. Wear-fatigue tests methods. Accelerated mechano-rolling fatigue tests]. Minsk, Gosstandart Publ., 2000. 8 p. (in Russ.).