

УДК 620.178.162:621.891

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Е.И. МАРДОСЕВИЧ, канд. техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Приведены результаты исследований в области разработки методических подходов к созданию автоматизированного комплекса для ускоренных триботехнических испытаний смазочных материалов, позволяющих существенно повысить информативность полученных результатов испытаний при значительном сокращении длительности и трудоемкости их проведения.*

**Ключевые слова:** автоматизация, аппаратно-программные средства, триботехнические испытания, смазочные материалы

**Введение.** В современном машиностроении к одной из наиболее интенсивно развиваемой области разработок и исследований можно отнести создание функционально ориентированных, в том числе наноструктурированных, смазочных материалов, обладающих качественно новым комплексом служебных свойств, позволяющим существенно расширить диапазон режимов функционирования, увеличить нагрузочную способность и ресурс трущихся сопряжений.

Развитие этой перспективной сферы научных исследований и разработок в определенной мере сдерживается отсутствием современных автоматизированных аппаратно-программных средств триботехнических испытаний смазочных материалов в заданных условиях эксплуатации динамических, тепловых, скоростных и нагрузочных режимах, позволяющих на порядок и более сократить длительность и трудоемкость их проведения. Создание таких средств позволит осуществить технически обоснованный выбор тех или иных смазок для типовых пар трения с учетом конкретизированных условий эксплуатации, определить критерии степени деградации этих свойств в эксплуатации и их влияние на процесс расходования ресурса трибосопряжения и обеспечить технически и экономически обоснованную замену смазочных материалов.

*Целью проведения исследований* была разработка методических подходов к созданию автоматизированного комплекса для ускоренных триботехнических испытаний смазочных материалов, позволяющих существенно повысить информативность полученных результатов испытаний при значительном сокращении длительности и трудоемкости их проведения.

**Методический подход к выбору схемы проведения автоматизированных триботехнических испытаний смазочных материалов.** К основным требованиям, предъявляемым к автоматизированным средствам для проведения триботехнических испытаний смазочных материалов, можно отнести следующее:

- автоматизированное обеспечение в процессе испытаний требуемого диапазона нагрузочных, скоростных и

- тепловых режимов функционирования испытуемых или тестируемых смазочных материалов с минимизированной длительностью испытаний и возможностью, для ряда случаев, определения несущей способности смазки по критической нагрузке служебных свойств смазочных материалов (параметров  $P_k$ ,  $P_c$ ,  $D_n$  и  $I_3$  согласно ГОСТу 9490-75, характеризующих триботехнические свойства испытываемого смазочного материала);

- обеспечение достоверности и сопоставимости полученных данных с данными научно-технических источников информации и предыдущих исследований;

- представление результатов испытаний в удобном для последующего использования виде.

Комплексная реализация первого требования может быть осуществлена путем сочетания применения следующих подходов:

- повышения информативности проведения испытаний за счет уточненного учета толщины масляной пленки между трущимися поверхностями;

- расширения технических возможностей стендового оборудования в части автоматизированного создания в более широких, по сравнению с традиционными, диапазонах скоростных, нагрузочных и тепловых режимов испытаний;

- применения метода планирования эксперимента с варьированием тремя параметрами: скоростью скольжения, контактными давлениями и объемной температурой испытываемого смазочного материала;

- автоматизации процесса контроля режимов и исследуемых параметров в процессе проведения испытаний.

При разработке методических подходов к реализации второго требования учитывалось следующее:

- при взаимодействии трущихся поверхностей значительное влияние на триботехнические свойства оказывает толщина масляной пленки [1, 2], на которую, в свою очередь, оказывают существенное влияние скоростные, нагрузочные и тепловые факторы, а также шероховатость и топография контактирующих поверхностей, а при оценке противозадирных свойств смазочного материала

к ним добавляются свойства материала и твердость контактирующих поверхностей;

- контроль коэффициентов трения и достоверность оценки влияния служебных свойств смазочных материалов на износостойкость определяется не только возможностями средств контроля, но и наличием информации о реальной толщине масляной пленки в зоне контакта.

Анализ результатов исследований, показал, что к наиболее рациональным, с позиций нормативного и методического обеспечения по ГОСТ 23.221-84, DIN 51 350, ASTM D 2266, ГОСТ 9490-75, РД 50-531-85, РД 50-531-85 и другим схемам проведения триботехнических испытаний можно отнести схему, реализованную в методе четырех шариков с точечным контактом (схема А по ГОСТ 23.221-84), и, при необходимости, схему проведения испытаний с контактом вращающегося шара со сферическим пояском на пересечении торцевой поверхности внутреннего отверстия нижнего образца, выполненного в виде кольца (схема Б по ГОСТ 23.221-84).

Существенное повышение информативности этого метода может быть достигнуто за счет введения в него автоматизированной системы контроля и управления толщиной масляной пленки в трущихся сопряжениях. Контроль толщины масляной пленки достаточно широко используется в целях мониторинга [3–6], позволяющего повысить достоверность и информативность диагностики и триботехнических испытаний.

Существует множество способов измерения и контроля толщины масляной пленки: электрический, механический, рентгеновский, оптический и др. Однако, анализ результатов исследований в этой области, показал, что для рассматриваемого случая наиболее целесообразно использование метода определения толщины масляной пленки методом измерения падения в ней напряжения при стабилизированном токе  $I = 1,5$  А в измерительном тракте, включающем масляную пленку [7–9]. Этот способ позволяет достаточно удобно и относительно точно определить толщину смазочной пленки между труднодоступными перемещающимися друг относительно друга поверхностями. Погрешность измерения при этом связана только со сложностью тарировки и не превышает 15–20 %, однако, как показал анализ результатов экспериментальных исследований, отклонения полученных в идентичных условиях данных о толщине масляной пленки, как правило, не превышают 5 %.

Для реализации этого способа необходимы:

- источник стабилизированного по току электропитания;
- электрическая изоляция трущихся поверхностей друг относительно друга.

В данном устройстве сначала при металлическом контакте сферических стальных инденторов определялось падение напряжения в измерительном тракте, а затем в емкость заливалось масло, используемое при проведении исследований.

Между инденторами устанавливались нормированные методикой испытаний зазоры и измерялось падение напряжения, из которого вычиталось падение напряжения в измерительном тракте, и, с использованием метода наименьших квадратов, рассчитывался коэффициент пропорциональности между падением напряжения в масляной пленке и ее толщиной, среднее квадратическое отклонение и строился тарировочный график.

**Методический подход к автоматизированному управлению и контролю режимов проведения триботехнических**

**Таблица — Основные режимы испытаний и диапазоны их варьирования**

Режимы испытаний, их обозначение и размерность			Рекомендуемые/планируемые	
			Схема А <sup>1</sup>	Схема Б <sup>1</sup>
Нагрузка	$P$	$H$	0÷9800	Зависимость (1)
Скорость вращения (скорость скольжения)	$\omega$ (V)	мин <sup>-1</sup> м/с	1460±70/8000±240 (0,18 <sup>2</sup> /1 <sup>2</sup> )	
Температура	$T$	°C	НТД+ГОСТ 23.221–84±5 °C	
Время испытаний	$t$	мин	(60±0,5)	

**испытаний.** Режимы, управление которыми целесообразно осуществлять при проведении триботехнических испытаний смазочных материалов в соответствии с ГОСТ 9490-75, рекомендуемые и предлагаемые диапазоны их изменения приведены в таблице, где зависимость между удельной нагрузкой в контакте с осевой нагрузкой  $P$  может быть представлена в виде:

$$P = q \cdot \pi \cdot b \cdot r \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $q$  — заданная удельная нагрузка в контакте, Па, обеспечиваемая с погрешностью не более 0,1 МПа;  $\pi = 3,1415\dots$ ;  $b$  — ширина рабочего пояса кольцевого образца, измеренная под микроскопом, м, с погрешностью до  $5 \cdot 10^{-6}$  м;  $r$  — радиус шарика ( $\varnothing 12,7$  мм), м, с точностью до  $10^{-5}$  м;  $\varphi$  — угол, образованный радиусами, проведенными от центра кривизны верхнего сечения шарика до пересечения с диаметрально противоположными точками на середине рабочего пояса на внутренней цилиндрической поверхности кольцевого образца, с точностью до 15°.

При проведении триботехнических испытаний смазочных материалов дополнительно к контролю и регистрации режимов испытаний целесообразно контролировать и регистрировать с привязкой к реальному масштабу времени:

- момент сопротивления вращению, что позволяет определить коэффициент трения скольжения, количественные величины значений критической нагрузки  $P_k$ , нагрузку сваривания  $P_c$ ;
- осевое перемещение верхнего шарика (нажимного штока машины трения) относительно плоскости центров нижних шариков на величину 0,5 мм с погрешностью не более 0,015 мм;
- толщину масляной пленки, измеряемую косвенным методом по падению напряжения тлеющего разряда, измеряемому при стабилизированном в измерительном тракте токе 5 А.

**Схемы контроля режимов проведения испытаний.** При контроле режимов проведения автоматизированных триботехнических испытаний смазочных материалов необходимо обеспечить, в основном, решение задач повышения информативности и достоверность результатов испытаний. При этом целесообразно контролировать: а) основные параметры, определяющие и создающие возможность оперативного управления режимами испытаний в соответствии с принятой схемой, включающие:

- осевую нагруженность верхнего шарика, угловую скорость его вращения и момент сопротивления вращению;  
 - объемную температуру испытываемого смазочного материала;

б) вспомогательные параметры, позволяющие технически обоснованно подбирать режимы испытаний, включая:  
 - толщину масляной пленки, характеризующую нагрузочную способность смазочного материала и режим трения трущихся поверхностей (жидкостной или граничный), что позволяет повысить достоверность и информативность развития процесса сваривания трущихся поверхностей;  
 - взаимное перемещение трущихся поверхностей вдоль оси вращающегося шарика, характеризующего износ трущихся поверхностей.

Учитывая то, что при ускоренных испытаниях для принятой схемы испытаний характерна высокая динамичность изменения режимов нагруженности, а минимальные значения градиентов их изменения в рамках второго ряда нагрузок рекомендуемого приложения 2 ГОСТ 9490-75, составляющие  $\Delta P = 20$  Н, нагруженность испытываемых пар трения, угловую скорость вращения верхнего шарика и момент сопротивления вращению целесообразно контролировать с частотой дискретизации  $10 \div 20$  Гц.

Толщина масляной пленки контролируется по падению напряжения тлеющего разряда. Согласно требованиям ГОСТ 9490-75 при трибологических испытаниях смазочных материалов должны отсутствовать внешние воздействия (динамические нагрузки, вибрации и т. п.) на испытываемые пары трения. Поэтому толщины масляных пленок при регламентированных этим ГОСТом материалах шариков, топографии и шероховатости их поверхностей будут зависеть только от трибологических свойств и температуры испытываемого смазочного материала, скорости скольжения и давления в зоне контакта. Поэтому частота дискретизации регистрируемой информации о толщине масляных пленок может быть принята равной частоте дискретизации данных о режимах испытаний.

При контроле взаимного перемещения трущихся поверхностей вдоль оси вращающегося шарика, характеризующего износ трущихся поверхностей, целесообразно учитывать следующее.

Величины предельных износов, в соответствии с рекомендациями методики ГОСТ 9490-75 варьируют, в зависимости от нагрузки, в диапазоне  $0,16 \div 0,86$  мм. При этом при достижении величины этого износа взаимное перемещение трущихся поверхностей вдоль оси вращающегося шарика составит ориентировочно  $0,15 \div 0,8$  мм.

Таким образом, для обеспечения достоверности и повышения информативности автоматизированных ускоренных испытаний смазочных материалов вполне достаточно обеспечение разрешающей способности контроля перемещений с дискретностью  $0,01 \div 0,03$  мм.

**Заключение.** Анализ приведенных выше результатов исследований показывает, что путем создания современных автоматизированных аппаратно-программных средств могут быть существенно расширены возможности регламентированного ГОСТ 9490-75 метода определения трибологических характеристик жидких и пластичных смазочных материалов и качественно повышена его информативность при значительном сокращении длительности и трудоемкости его проведения.

#### Список литературы

1. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Камбалов. — Минск: Машиностроение, 1977/ — 526 с.
2. Трение, изнашивание и смазка: справ. в 2-х кн. — Кн. 2., т. 66 / под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алексина. — М.: Машиностроение. — 1979, 358.
3. Способ оценки состояния масляной пленки в подшипниках качения: а.с. 1513384 СССР, МКИ 4 G01M13/04 / Т.И. Ногачева, С.Ф. Корндорф, В.Я. Варгашкин; Всесоюзный заочный машиностроительный институт. — № 4282932; заявл. 18.05.87; опубл. 07.10.89 // Открытия. Изобрет. — 1989. — № 37.
4. Устройство для контроля подшипников качения: а.с. 1539567 СССР, МКИ 5 G01M13/04/ Иванов В.К.; Московский научно-исследовательский и проектный институт жилищного хозяйства. — № 4460300; заявл. 13.07.1988; опубл. 30.01.1990. // Открытия. Изобрет. — 1990. — №4.
5. Устройство для обнаружения нарушений масляной пленки по бортам и поверхностям качения в роликовом подшипнике: а.с. 1564510 СССР, МКИ 5 G01M13/04/ Блинов Б.Д.; Васильева Т.С.; Пермский политехнический институт. — № 4415973; заявл. 25.04.1988; опубл. 15.05.1990. // Открытия. Изобрет. — 1990. — №18.
6. Устройство для оценки долговечности подшипников качения: а.с. 1691701, МКИ 5 G01M13/04 / В.Я. Варгашкин, С.Ф. Корндорф; Московский институт приборостроения. — № 4706145; заявл. 15.06.89; опубл. 15.11.91 // Открытия. Изобрет. — 1991. — № 42.
7. Basinyuk, V.L. Lubrication film thickness in the dynamically loaded spur gearing / V.L. Basinyuk // Journal of Friction and Wear. — 2004. — Vol. 25, № 2. — Pp. 53–62.
8. Lubricant Film Thickness Variation in Frictionless Bearing / V.L. Basinyuk, D.El. Messaoudi, E.I. Mardosevich / Friction and Wear. 2008. — Vol. 29, No 1. — Pp. 66–71.
9. Райко, М.В. Смазка зубчатых передач / М.В. Райко. — Киев: Техника, 1970. — 196 с.

Basiniuk U.L., Kalinichenko A.S., Mardosevich H.I.

#### Methodological approaches to creation of the automated accelerated tests of tribotechnical properties of lubricants

Research results in the field of development of methodological approaches to creation of the automated complex for the accelerated tribotechnical tests of the lubricants allowing to increase significantly informational content of the received results of tests at significant reduction of duration and labor input of their carrying out are given.

Поступил в редакцию 03.08.2015.