

УДК 621.89.017

doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-30-39

Методика определения несущей способности и противозадирных свойств смазочных материалов, применяемых в тяжело нагруженных трибодинамических сопряжениях металлургических машин и агрегатов*

М.В. Харченко, С.П. Нефедьев, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Methods for Determining the Bearing Capacity and Extreme Pressure Properties of Lubricants Used in Heavy-loaded Tribodynamic Couplings of Metallurgical Machines and Units

M.V. Kharchenko, S.P. Nefediev, R.R. Dema, O.R. Latypov

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov

Для решения контактных задач, связанных с исследованием взаимодействия смазанной или несмазанной пары трения используют стандартное оборудование — машины трения и трибометры. Однако применение исследовательского оборудования в заводском исполнении не всегда позволяет точно определить триботехнические характеристики процессов трения и изнашивания в конкретных условиях эксплуатации. Обзор литературы по техническим возможностям испытательных машин показал, что их главным недостатком является неспособность программно задавать режимы ускорения трибологической системы и отслеживания проскальзывания в реальном времени. Выявлена необходимость разработки методики исследования противозадирных свойств жидких смазочных материалов в режиме ускорения трибосопряжения, вызванная в первую очередь воздействием высоких контактных нагрузок, действующих в областях контакта пар трения (зубчатых передач, подшипников качения и т. д.) во время пуска и выхода на рабочую скорость технологических машин и оборудования. Рассмотрена модернизированная машина трения, способная программно задавать режимы ускорения и исследовать трибодинамические процессы смазанных фрикционных сопряжений. Разработана методика, позволяющая оценивать эффективность жидкого смазочного материала при ускорении трибологической системы и его влияние на износ смазанного контакта на основе применения модернизированной машины трения.

Ключевые слова: машина трения, смазочно-охлаждающая жидкость, трибодинамические сопряжения, противоизносные свойства, противозадирные свойства

To solve contact problems related to the study of the interaction between a lubricated or non-lubricated friction pair, we used standard equipment — friction machines and tribo-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

meters. However, the use of factory-made research equipment does not always allow us to accurately answer the questions concerning the tribotechnical characteristics of friction and wear processes under specific operating conditions. A review of the literature on the technical capabilities of testing machines showed that their main drawback is the inability to programmatically set the modes of acceleration of the tribological system and tracking slippage in real-time. The study revealed the need to develop a methodology for investigating the extreme pressure properties of liquid lubricants in the tribocoupling acceleration mode, which is caused primarily by the effect of high contact loads acting in the contact areas of friction pairs, e.g. gears, rolling bearings, etc. when technological machines and equipment start and reach the operating speed. The paper considers a modernized friction machine capable of programmatically setting acceleration modes and investigating tribodynamic processes of lubricated frictional couplings. We developed a technique that makes it possible to evaluate the efficiency of a liquid lubricant during acceleration and its effect on the wear of a lubricated contact based on the use of the modernized friction machine.

Keywords: friction machine, cutting fluid, tribodynamics, antiwear properties, extreme pressure properties

Обзор технических возможностей испытательных машин [1–5] показал, что их главным недостатком является неспособность программно задавать режимы ускорения трибологической системы и отслеживания проскальзывания в реальном времени.

Цель работы — проведение технической модернизации машины трения и разработка методик исследования противоизносных и противозадирных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), основанных на изучении влияния внешней нагрузки и ускорения на триботехнические параметры смазанной пары трения.

Оборудование. Испытания проведены на модернизированной машине трения СМЦ-2, кинематическая схема которой показана на рис. 1.

Техническая характеристика лабораторной установки приведена в работах [6–13], внешний вид рабочего места оператора — показан на рис. 2.

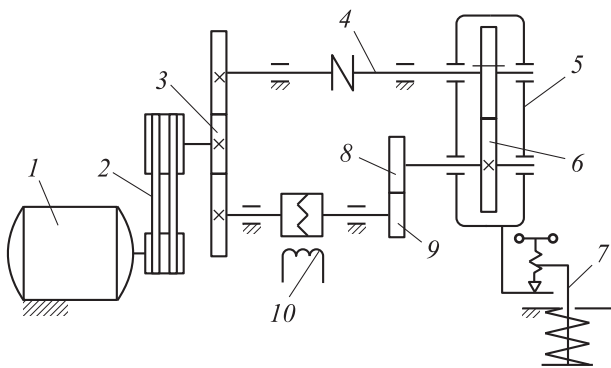


Рис. 1. Кинематическая схема модернизированной машины трения СМЦ-2

Техническая модернизация машины трения СМЦ-2 заключалась в переходе на полупроводниковые схемы управления сигналами и в использовании контроллеров для управления и слежения за несколькими исследуемыми параметрами одновременно. Также выполнена модернизация силовой части машины трения СМЦ-2: установлены частотный преобразователь тока электродвигателя и на каждую из его трех фаз смонтирована двухканальная система регистрации энергосиловых параметров (напряжения и тока) с целью определения изменения загрузки главного привода в процессе эксперимента.

Управление всем комплексом параметров осуществляется через интерфейс специально созданной программой для ЭВМ (рис. 3).

В результате модернизации произошло значительное расширение области исследований на трение и износ, заключающееся в возможности:

- получать высокую точность результатов испытаний (погрешность измерения систем составляет $\pm 0,5\%$);
- программно задавать режимы разгона, торможения и вращения с постоянной угловой скоростью;
- активно управлять частотой вращения испытуемого образца;
- отслеживать текущую угловую скорость вращения приводного (нижнего) вала;
- отслеживать частоту вращения верхнего вала каретки, сравнивая ее с частотой вращения нижнего вала;
- измерять температуру на поверхности образцов после проведения испытаний с помощью термопар.

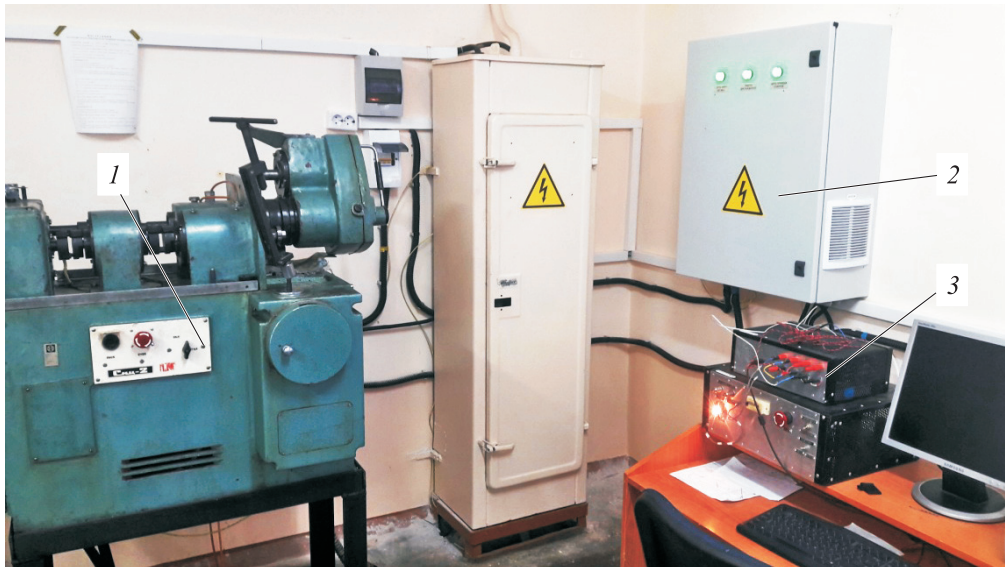


Рис. 2. Внешний вид рабочего места оператора:
1 — машина трения СМЦ-2; 2 — шкаф коммутации; 3 — блок обработки и преобразования информации

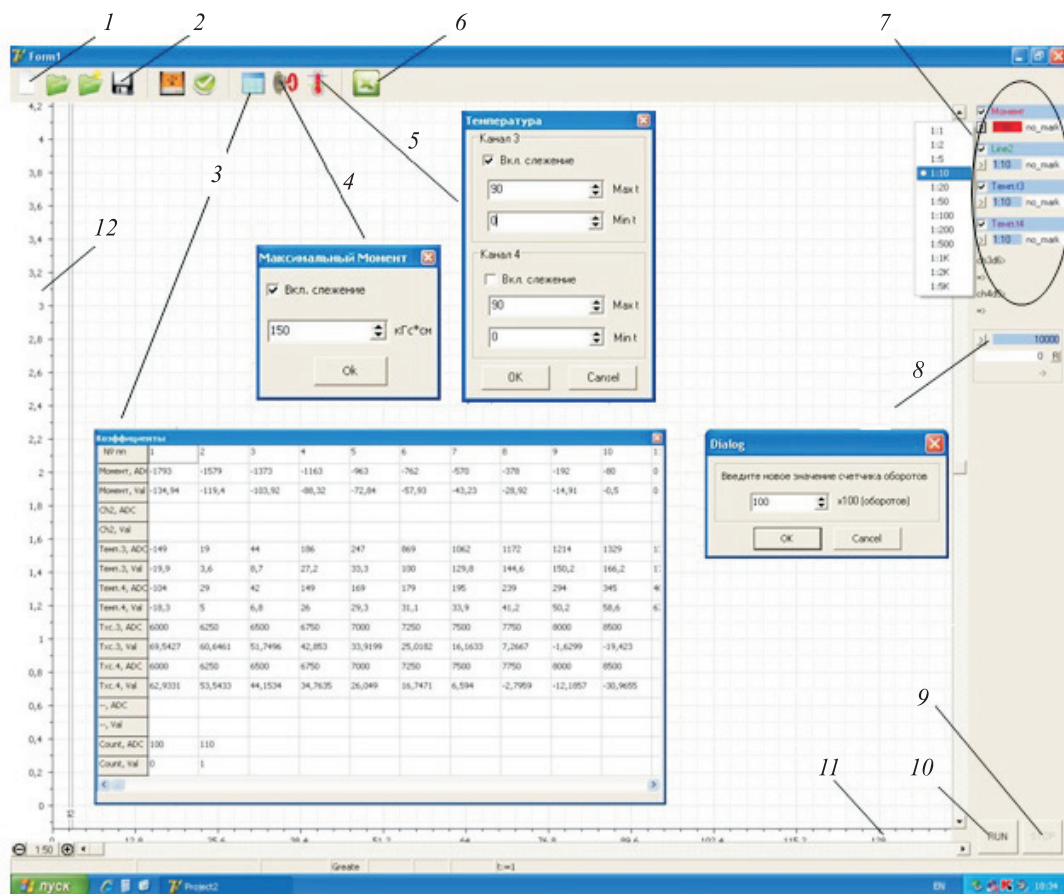


Рис. 3. Визуализация интерфейса программного комплекса машины трения СМЦ-2:
1 — кнопка создания нового эксперимента; 2 — кнопка сохранения результатов проведенного эксперимента;
3 — кнопка вывода тарировочных коэффициентов; 4, 5 и 8 — задатчик параметра — соответственно момента трения $M_{тр}$, температуры, числа оборотов приводного вала универсального трибометра, — при превышении значения которого машина отключается, и эксперимент автоматически останавливается; 6 — кнопка сохранения результатов в среде MS Excel с возможностью выбора объема сохраняемых данных; 7 — кнопки выбора масштаба отображения регистрируемых параметров; 9 и 10 — кнопка останова и пуска эксперимента; 11 — шкала времени от начала проведения эксперимента, с; 12 — шкала измеряемого (отслеживаемого) параметра

Методика испытаний. Предварительно обезжиренные и просушенные образцы (ролик, цилиндр, испытательную камеру) и оснастку их крепления собирают на испытательной установке, после чего протирают рабочие поверхности. Схема испытаний образцов на машине трения показана на рис. 4, а взаимное расположение элементов пары трения неподвижный

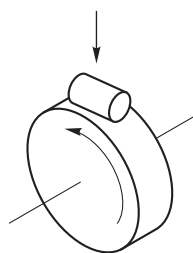
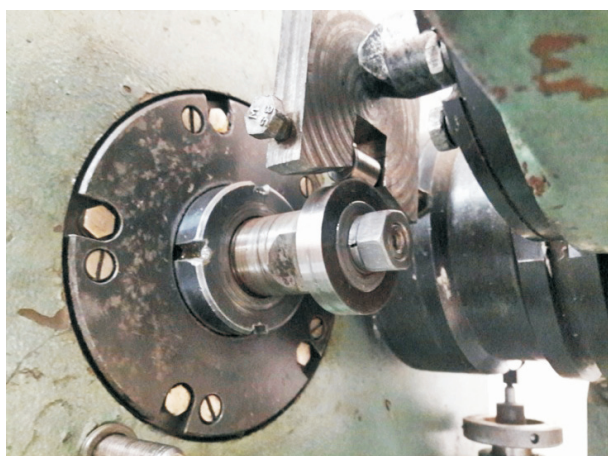


Рис. 4. Схема испытаний образцов на машине трения



а



б

Рис. 5. Взаимное расположение элементов пары трения неподвижный ролик — вращающийся диск (а) и камера для ее испытания (б)

ролик — вращающийся диск и камера для ее испытания — на рис. 5, а и б.

Испытания проводят согласно методике, приведенной в ASTM D 2782–20 [14]. Внешний диаметр вращающегося диска составляет 65 мм, внутренний — 16 мм. В испытательную камеру заливают исследуемую СОЖ объемом, достаточным для погружения подвижного ролика на глубину не менее 2 мм.

Определение противоизносных свойств СОЖ. Противоизносные свойства СОЖ определяют следующим образом. Лабораторную установку запускают в работу. Программно устанавливают частоту вращения образца 300 мин⁻¹. Путем плавного опускания каретки сближают образцы; обеспечивают нагружение усилием 200 Н и с момента контактирования образцов контролируют число оборотов.

Проводят десять экспериментов с различными наработками (от 3000 до 74 000 оборотов за испытание) согласно работе [15]. Далее выполняют две серии испытаний с наработками, указанными в табл. 1.

По достижении заданного суммарного числа оборотов (пути трения) каретка поднимается, эксперимент останавливается. Контактные поверхности протирают.

Каждое следующее испытание проводят на «новых» (неизношенных) поверхностях путем ослабления винтов оснастки держателя верхнего цилиндра и его поворота на угол 3...5 и смещения кареточного узла по оси не менее чем на две ширины дорожки износа предыдущего испытания. Результаты измерений заносят в протокол испытаний. После окончания измерений и изменения взаимного положения образцов испытания повторяют.

Определение противозадирных свойств СОЖ. Противозадирные свойства СОЖ определяют следующим образом. Лабораторную установку запускают в работу. Программно устанавливают частоту вращения образца 300 мин⁻¹. Путем плавного опускания каретки сближают образцы и обеспечивают минималь-

Таблица 1

Значения суммарной наработки в серии опытов

Номер серии	Суммарное число оборотов за испытание	Продолжительность испытания, мин	Число испытаний
I	6810	30	5
II	68 160	295	5

ное нагружение трибосистемы усилием 100 Н. В таком режиме проводят приработку пары трения до стабилизации момента трения и прогрева СОЖ.

Далее происходит либо ступенчатое нагружение пары трения с шагом 150 Н и длительностью на каждом шаге не менее 3 мин, либо ступенчатое ускорение подвижного ролика на 1 м/с^2 . Остановка испытаний происходит при появлении первых признаков заедания образца, таких как резкий скачок момента трения, грубый или свистящий звук, иногда дымление СОЖ. Нагрузка или ускорение, при которых зафиксировано заедание, считается нагрузкой сваривания, предельная нагрузка, после которой произошло заедание — критической нагрузкой для исследуемого СОЖ.

Каждое следующее испытание проводят на неизношенных поверхностях путем ослабления винтов оснастки держателя верхнего цилиндра и его поворота на угол $3...5^\circ$ и смещения кареточного узла по оси не менее чем на две ширины дорожки износа предыдущего испытания.

Результаты измерений заносят в протокол испытаний. После окончания измерений и изменения взаимного положения образцов испытания повторяют.

Обработка результатов измерений. Для сравнения противоизносных свойств жидких смазочных материалов (ЖСМ) сопоставляют значения сходственных диаметров овала износа разных ЖСМ (рис. 6) при прочих равных условиях: меньший диаметр соответствует лучшим противоизносным свойствам.

Для сопоставления противозадирных свойств ЖСМ сравнивают значения предельных нагрузок заедания: большее значение соответствует лучшим противозадирным свойствам.

В журнал испытаний вносят следующие параметры: нагрузку сваривания N , момент трения $M_{\text{тр}}$ и потерю массы верхнего ролика вследствие износа пары трения, которую

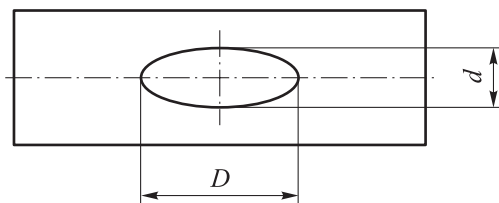


Рис. 6. Схема пятна износа на ролике с характерными размерами

определяют с помощью аналитических весов AND GR-200.

Экспериментальное исследование составов СОЖ по разработанной методике определения противозадирных свойств. В качестве примера реализации предложенных методик выбраны СОЖ, применяемые на операциях лезвийной и абразивной обработки черных, цветных металлов и сплавов, холодной штамповки, гибки, для металлообработки на современных станках с числовым программным управлением в тяжелых условиях резания.

Технологическая эксплуатация СОЖ подразумевает их использование в виде эмульсий с концентрацией $3...20\%$ эмульсола. Концентрацию выбирают на основе типа операции металлообработки ее сложности и длительности.

Для исследования антифрикционных и противозадирных свойств использовали образцы СОЖ, имеющие в своем составе разные функциональные присадки. Физико-химические показатели СОЖ-1 и СОЖ-2 приведены в табл. 2.

Перед испытаниями проводили контрольное взвешивание образцов на аналитических весах (рис. 7). В предварительно очищенную и обезжиренную ванну заливали СОЖ, приготовление которой происходило в холодной воде ($4...7^\circ\text{C}$) из централизованной системы водоснабжения.

В соответствии со схемой испытания (см. рис. 4) устанавливали пару трения неподвижный ролик — вращающийся диск и проводили эксперимент по предложенной методике. Материалом ролика являлась сталь ШХ15 (твердость 200 НВ, предел прочности $\sigma_b = 620 \text{ МПа}$, шероховатость поверхности $Ra = 0,12 \text{ мкм}$), материалом диска — сталь 45 (твердость 207 НВ, $\sigma_b = 570 \text{ МПа}$, $Ra = 0,15 \text{ мкм}$). Диаметр и длина ролика составляли 14 мм, диаметр диска — 45 мм.

Обработка результатов эксперимента. По результатам экспериментального исследования построены графические зависимости момента трения $M_{\text{тр}}$ от времени t при разном нагружении смазанной пары трения (рис. 8) и $M_{\text{тр}} = f(t)$ при различных значениях ускорения и нагрузки трибосопрежений, смазанных СОЖ-1 и СОЖ-2 (рис. 9, а–г). Также на рис. 9, а–г показана зависимость относительного ускорения (ускорение относительно заданного значения) $a_{\text{отн}}$ от времени, где U — ускорение, СВ — свободный пробег.

Таблица 2

Физико-химические показатели СОЖ-1 и СОЖ-2

Показатель	Норма		Метод испытаний
	СОЖ-1	СОЖ-2	
<i>Концентрат (продукт в состоянии поставки)</i>			
Внешний вид	Однородная маслянистая жидкость от желтого цвета до коричневого	Однородная маслянистая жидкость от желтого цвета до светло-коричневого	ГОСТ 6243–75 (раздел 1)
Запах	Специфический, не раздражающий	Слабый, не раздражающий	Органолептический
Вязкость кинематическая при 50 °С, сСт	30...100	8...60	ГОСТ 33–2016
Стабильность при низкой температуре (минус 15 °С)	Стабильна	Стабильна	ГОСТ 6243–75 (раздел 5)
<i>Водная эмульсия*</i>			
Коррозионное воздействие на черные металлы (метод контактных пар) 2,5%-ной эмульсии в течение 5/168 ч	Стабильна	Стабильна	–
Внешний вид 5%-ной эмульсии	Однородная полупрозрачная жидкость	Однородная жидкость молочного цвета	Визуально
Склонность к пенообразованию 5%-ной эмульсии, см ³ , не более	500	400	–
Устойчивость пены, см ³ , не более	300	250	–
рН 5% эмульсии	8,5...10,0	8,0...10,0	ГОСТ 6243–75 (раздел 4)
* Водная эмульсия на воде жесткостью 4,6 мг-эquiv/дм ³ для СОЖ-1 и 5%-ная водная эмульсия для СОЖ-2.			

Все регистрируемые и вычисляемые показатели заносили в протокол испытаний (табл. 3).

Образцы после проведения испытаний и характерные пятна износа исследуемых ЖСМ показаны на рис. 10, а и б.



Рис. 7. Результаты взвешивания ролика на аналитических весах до (а) и после (б) испытаний СОЖ-1

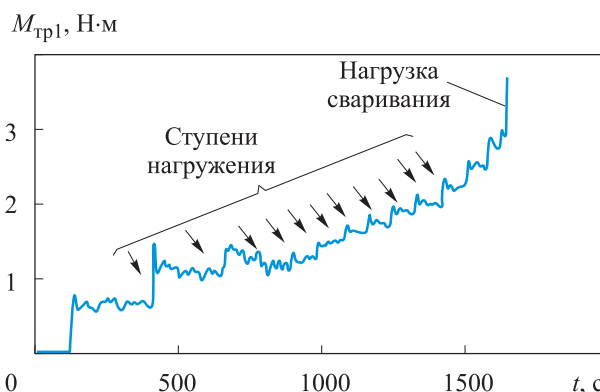


Рис. 8. Зависимость момента трения $M_{тр1}$ от времени t при различном нагружении пары трения, смазанной СОЖ-1

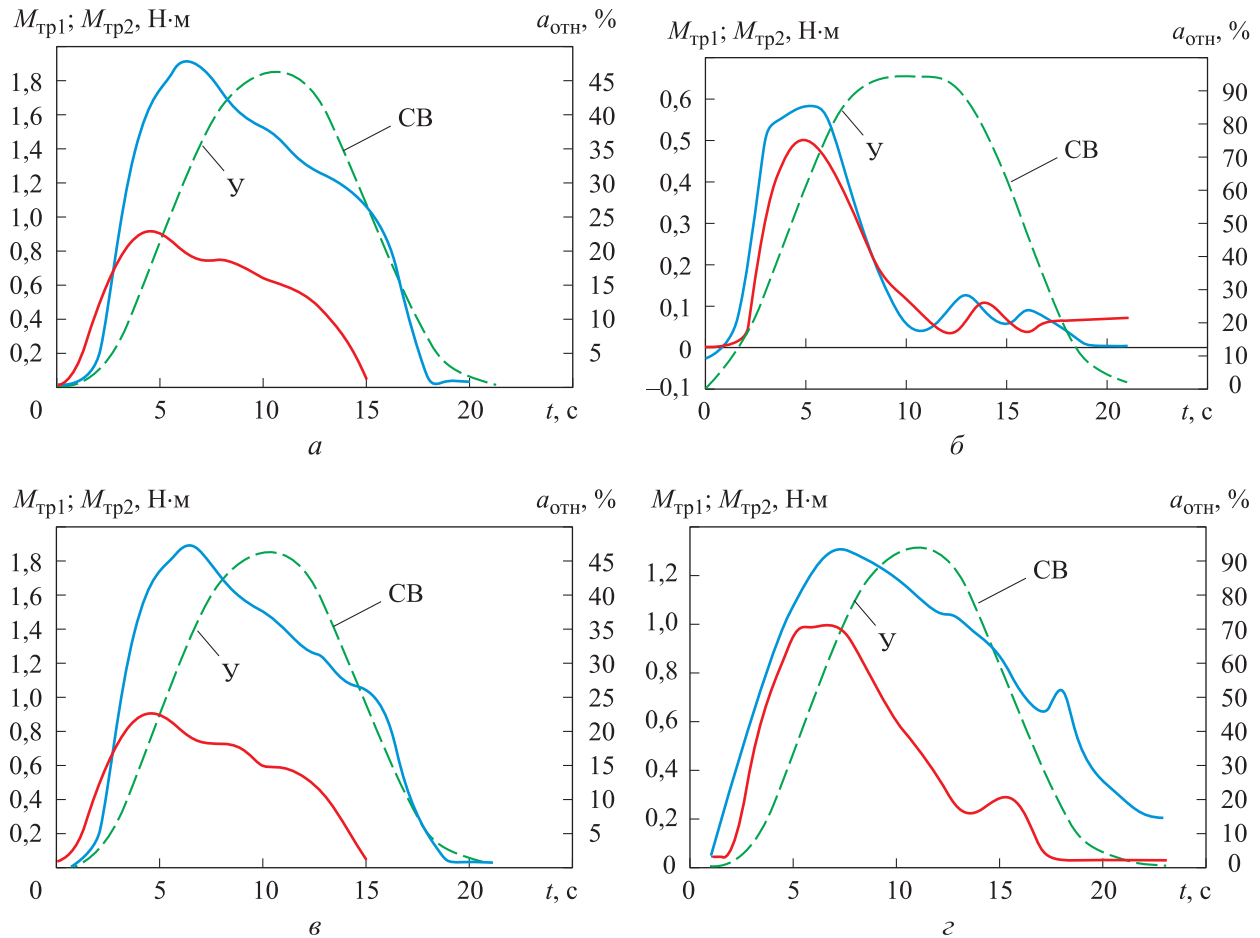


Рис. 9. Зависимости моментов трения трибосопряжений, смазанных СОЖ-1 $M_{тр1}$ (—), СОЖ-2 $M_{тр2}$ (—), и относительного ускорения $a_{отн}$ (---) от времени t при различных значениях их нагрузки и ускорения:
 а — $N = 300$ Н, $a = 1$ м/с²; б — $N = 300$ Н, $a = 2$ м/с²;
 в — $N = 900$ Н, $a = 1$ м/с²; г — $N = 900$ Н, $a = 2$ м/с²

Таблица 3

Результаты исследования по определению противозадирных свойств СОЖ при различных значениях нагрузки

Вид ЖСМ	Нагрузка сваривания, Н	Максимальный момент трения, Н·м	Масса ролика, г		Потери массы ролика, г
			до испытания	после испытания	
СОЖ-1	1600	3,0	16,6128	16,6092	0,0036
СОЖ-2	—	2,2	16,6372	16,6344	0,0024

Результаты лабораторных испытаний. Для проверки сходимости полученных результатов каждое испытание повторяли 3 раза. Анализ графических зависимостей (см. рис. 9, а–г) показывает, что разработанные методики позволяют оценить влияние нагрузки и наличия ускорения пары трения на изменение основных триботехнических параметров процесса контактного взаимодействия.

Как видно из рис. 9, а–г, для трибосопряжения с СОЖ-1 момент трения при ускорении $a = 1$ и 2 м/с² гораздо больше, чем для трибосопряжения с СОЖ-2, что характеризует СОЖ-2 как более эффективную по триботехническим параметрам, применение которой предпочтительнее в узлах трения машин и оборудования. Кроме того, наличие ускорения неизбежно будет влиять на износ смазанной пары трения.

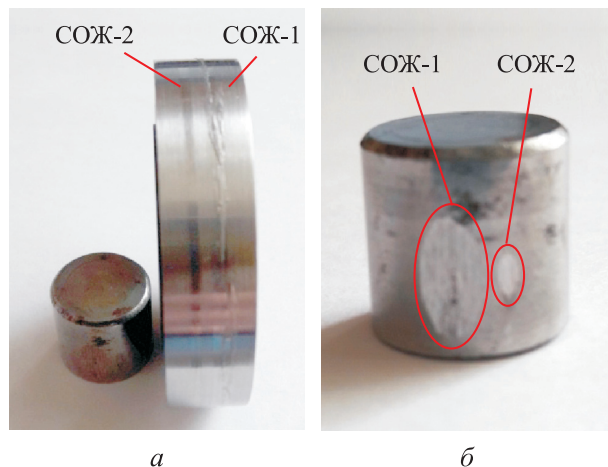


Рис. 10. Внешний вид образцов после проведения испытаний (а) и характерных пятен износа исследуемых ЖСМ (б)

Выводы

1. На основе известных методов оценки противозносных и противозадирных свойств ЖСМ (ГОСТ Р 51860–2002 и ASTM D 2782–20) выполнена работа по расширению области исследований этих методов, а также по упрощению конструкции оснастки для их проведения. Расширение области исследований заключается

в возможности изучения эксплуатационных свойств ЖСМ в режимах пуска и ускорения технологического оборудования. Режимы пуска и разгона технологического оборудования являются наиболее тяжелыми периодами эксплуатации, при которых возникают пиковые контактные нагрузки. При этом ЖСМ должен обладать соответствующей стойкостью к нарушению сплошности разделительной смазочной пленки.

2. Разработанная методика позволяет оценить эффективность ЖСМ при ускорении, а также влияние ускорения на износ смазанного контакта на основе модернизированной машины трения, способной программно задавать режимы ускорения до 4 м/с^2 и исследовать трибодинамические процессы смазанных фрикционных сопряжений.

3. Проведены испытания двух видов СОЖ, на которых были опробованы предложенные методики. Результаты показали высокую сходимость полученных значений и их повторяемость.

4. На основании результатов можно полагать, что разработанные методики и упрощенную оснастку (по сравнению с ГОСТ Р 51860–2002) можно рекомендовать для приближенного определения триботехнических свойств ЖСМ.

Литература

- [1] Hamaker H.C. The London — van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, 1937, vol. 4, no. 10, pp. 1058–1072, doi: [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(37\)80203-7](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(37)80203-7)
- [2] Boer J.H. The influence of van der Waals' forces and primary bonds on binding energy, strength and orientation, with special reference to some artificial resins. *Trans. Faraday Soc.* 1936, vol. 32, pp. 10–37, doi: <https://doi.org/10.1039/TF9363200010>
- [3] Muller V.M., Yushchenko V.S., Derjaguin B.V. On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane. *J. Colloid Interface Sci.*, 1980, vol. 77, no. 1, pp. 91–101, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90419-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90419-1)
- [4] Attard P., Parker J.L. Deformation and adhesion of elastic bodies in contact. *Phys. Rev. A*, 1992, vol. 46, no. 12, pp. 7959–7971, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.46.7959>
- [5] Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю., Морозов А.В. и др. *Трение эластомеров. Моделирование и эксперимент*. Москва-Ижевск, ИКИ, 2017. 204 с.
- [6] Харченко М.В., Дема Р.Р., Нефедьев С.П. и др. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-2. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 10, с. 60–68, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-10-60-68>
- [7] Platov S.I., Dema R.R., Kharchenko M.V., et al. Experience of application of liquid lubricating materials during wide strip hot rolling. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 287, art. 012011, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/287/1/012011>
- [8] Levantsevich M.A., Kharchenko M.V., Dema R.R. Study of the conditions for the formation of an adsorption lubrication mode of heavily loaded friction couples with modeling in a laboratory setup. *J. Frict. Wear*, 2019, vol. 40, no. 4, pp. 277–283, doi: <https://doi.org/10.3103/S106836661904007X>

- [9] Kharchenko M.V., Zambrigitckaya E.S., Suvorova E.V. Modelling of the process of the friction couple contacting and examining the conditions of forming an adsorbating monolayer on the friction surface regarding the use of a lubricant material. *Mater. Today*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 155–162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.124>
- [10] Чичинадзе А.В., ред. *Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)*. Москва, Машиностроение, 2003. 576 с.
- [11] Крагельский И.В., Алисин В.В., ред. *Трение, изнашивание и смазка*. Кн. 1. Москва, Машиностроение, 1978. 400 с.
- [12] Kharchenko M.V., Kononov V.N., Zambrigitckaya E.S. Elastohydrodynamic friction mode as a method of surface finishing excluding burnishing. *Mater. Sci. Forum*, 2019, vol. 946, pp. 732–738, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.732>
- [13] Платов С.И., Румянцев М.И., Дема Р.Р. и др. Эффективность процесса горячей прокатки с подачей смазочного материала между опорным и рабочим валками на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000 ОАО «ММК». *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2011, № 4, с. 20–21.
- [14] ASTM D 2782–20. *Standard test method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (Timken method)*, doi: <https://doi.org/10.1520/D2782-20>
- [15] ГОСТ Р 51860–2002. *Обеспечение износостойкости изделий. Оценка противоизносных свойств смазочных материалов методом «шар-цилиндр»*. Москва, Госстандарт, 2002. 10 с.

References

- [1] Hamaker H.C. The London — van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, 1937, vol. 4, no. 10, pp. 1058–1072, doi: [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(37\)80203-7](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(37)80203-7)
- [2] Boer J.H. The influence of van der Waals' forces and primary bonds on binding energy, strength and orientation, with special reference to some artificial resins. *Trans. Faraday Soc.* 1936, vol. 32, pp. 10–37, doi: <https://doi.org/10.1039/TF9363200010>
- [3] Muller V.M., Yushchenko V.S., Derjaguin B.V. On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane. *J. Colloid Interface Sci.*, 1980, vol. 77, no. 1, pp. 91–101, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90419-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90419-1)
- [4] Attard P., Parker J.L. Deformation and adhesion of elastic bodies in contact. *Phys. Rev. A*, 1992, vol. 46, no. 12, pp. 7959–7971, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.46.7959>
- [5] Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu., Morozov A.V., et al. *Trenie elastomerov. Modelirovanie i eksperiment* [Friction of elastomers. Modelling and experiment]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2017. 204 p.
- [6] Kharchenko M.V., Dema R.R., Nefed'yev S.P., et al. A universal test facility for determining tribotechnical characteristics of lubricants based on the serial friction machine SMTs-2. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2017, no. 10, pp. 60–68, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-10-60-68> (in Russ.).
- [7] Platov S.I., Dema R.R., Kharchenko M.V., et al. Experience of application of liquid lubricating materials during wide strip hot rolling. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 287, art. 012011, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/287/1/012011>
- [8] Levantsevich M.A., Kharchenko M.V., Dema R.R. Study of the conditions for the formation of an adsorption lubrication mode of heavily loaded friction couples with modeling in a laboratory setup. *J. Frict. Wear*, 2019, vol. 40, no. 4, pp. 277–283, doi: <https://doi.org/10.3103/S106836661904007X>
- [9] Kharchenko M.V., Zambrigitckaya E.S., Suvorova E.V. Modelling of the process of the friction couple contacting and examining the conditions of forming an adsorbating monolayer on the friction surface regarding the use of a lubricant material. *Mater. Today*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 155–162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.124>
- [10] Chichinadze A.V., ed. *Trenie, iznos i mazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wearing and lubricant (tribology and triboengineering)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 576 p.
- [11] Krage'lskiy I.V., Alisin V.V., ed. *Trenie, iznashivanie i mazka*. Кн. 1 [Friction, wearing and lubricant. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 400 p.

- [12] Kharchenko M.V., Kononov V.N., Zambrigitckaya E.S. Elastohydrodynamic friction mode as a method of surface finishing excluding burnishing. *Mater. Sci. Forum*, 2019, vol. 946, pp. 732–738, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.732>
- [13] Platov S.I., Romyantsev M.I., Dema R.R., et al. Efficiency hot rolling process with use lubricant materials between backup and work rolls on continuous wide-strip hot rolling mill 2000. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 20–21 (in Russ.).
- [14] ASTM D 2782–20. *Standard test method for measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (Timken method)*, doi: <https://doi.org/10.1520/D2782-20>
- [15] GOST R 51860–2002. *Obespechenie iznosostoykosti izdeliy. Otsenka protivoznosnykh svoystv smazochnykh materialov metodom «shar-tsilindr»* [State standard R 51860-2002. Products wear resistance assurance. Evaluation of lubrication materials antiwear properties by “ball-cylinder” method]. Moscow, Gosstandart Publ., 2002. 10 p.

Статья поступила в редакцию 08.04.2021

Информация об авторах

ХАРЧЕНКО Максим Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика». ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Челябинская область, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: kharchenko.mv@bk.ru).

НЕФЕДЬЕВ Сергей Павлович — кандидат технических наук, докторант. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Челябинская область, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: sergeynefedyeff@gmail.com).

ДЁМА Роман Рафаэлевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения». ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Челябинская область, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина д. 38, e-mail: demarr78@mail.ru).

ЛАТЫПОВ Олег Рафикович — аспирант кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения». ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Челябинская область, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: latolegraf@list.ru).

Information about the authors

KHARCHENKO Maksim Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanics. Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: kharchenko.mv@bk.ru).

NEFEDIEV Sergey Pavlovich — Candidate of Science (Eng.), Doctoral Candidate. Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: sergeynefedyeff@gmail.com).

DEMA Roman Rafaelevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Metal Forming Machines and Technology. Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: demarr78@mail.ru).

LATYPOV Oleg Raficovich — post-graduate, Department of Mechanical Engineering, Metal Forming Machines and Technology. Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: latolegraf@list.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Харченко М.В., Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Латыпов О.Р. Методика определения несущей способности и противозадирных свойств смазочных материалов, применяемых в тяжело нагруженных трибодинамических сопряжениях металлургических машин и агрегатов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-30-39

Please cite this article in English as:

Kharchenko M.V., Nefediev S.P., Dema R.R., Latypov O.R. Methods for Determining the Bearing Capacity and Extreme Pressure Properties of Lubricants Used in Heavy-loaded Tribodynamic Couplings of Metallurgical Machines and Units. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 9, pp. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-30-39